



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

12–14 апреля 2023 года

ИКИ РАН, Москва

СБОРНИК ТРУДОВ

Под редакцией
А. М. Садовского

Серия «МЕХАНИКА, УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА»

МОСКВА
ИКИ РАН
2023

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

IKI, Moscow, 12–14 April 2023

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

The XX 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 12–14 April 2023. Students, postgraduates and young scientists as well as their senior colleagues participated in the conference, and more than 120 talks were presented. These Conference Proceedings contain selected articles prepared by speakers. The Proceedings are included in the Russian Science Citation Index library.

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

ИКИ РАН, Москва, 12–14 апреля 2023 г.

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

XX 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) 12–14 апреля 2023 г. В конференции принимали участие студенты, аспиранты и молодые учёные, а также их старшие коллеги, было представлено более 120 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 <https://iki.cosmos.ru/research>
и Российской научной электронной библиотеки <http://elibrary.ru/>

ПРЕДИСЛОВИЕ

Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (<http://kmu.cosmos.ru>), посвящённая Дню космонавтики, традиционно проходит в начале апреля. В юбилейной XX Конференции 2023 г., как это уже стало стандартом в последние годы, можно было участвовать как очно, так и онлайн.

Тем не менее оргкомитет пытается сохранить одну из основных целей конференции — дать возможность студентам, аспирантам и молодым учёным возможности отточить навыки публичного выступления перед большой аудиторией, а также принять участие в обсуждении научных результатов (как получить комментарии к своей работе, так и задать вопросы другим докладчикам).

В этом году на конференцию поступило более 120 заявок со всех концов страны, а также из Беларуси и Казахстана, что показывает актуальность космических исследований и растущий интерес к космосу. Следует отметить, что конференция остаётся самым крупным научным мероприятием по космическим исследованиям среди молодёжи.

В этом году конференция в основном проводилась Советом молодых учёных и специалистов ИКИ РАН и следует отметить, что она прошла практически идеально.

В конференции принимают участие студенты, аспиранты и молодые учёные (до 35 лет), чья деятельность связана с космосом и космическими исследованиями. «Сборник трудов конференции молодых учёных» содержит статьи, присланные её участниками.

А. М. Садовский

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛУННОГО ГРУНТА-АНАЛОГА VI-75 ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

И. А. Агапкин, А. В. Уварова

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

Результаты определения значений угла внутреннего трения и сцепления для лунного грунта аналога VI-75 при отрицательных температурах и различных значениях влажности.

Ключевые слова: Луна, лунный реголит, лунный грунт аналог, физико-механические свойства

Современные исследования Луны направлены, в том числе, на изучение полярных областей. В данных районах может присутствовать лёд и, согласно различным оценкам, его содержание может достигать 4 % по массе (Гришакина, Слюта, 2023). Он очень сильно влияет на механические свойства грунтов (Роман, 2002) и может повышать прочностные свойства в несколько раз. Данным фактом не следует пренебрегать при миссиях, цель которых — бурение и забор грунта, а также его зондирование. В связи с этим исследование направлено на изучение лунного грунта-аналога с разной влажностью при отрицательной температуре. В качестве грунта-аналога использовали разработанный ранее лабораторией геохимии Луны и планет лунный грунт-аналог VI-75 (Slyuta et al., 2021), который имитирует физические и механические свойства поверхностного лунного реголита.

Основными прочностными свойствами в механике грунтов выступают угол внутреннего трения и удельное сцепление (c). Первый параметр характеризует отношение нормальных и касательных сил, необходимых для разрушения образца, второй же показывает сопротивление касательным силам, без воздействия нормальных сил. Данные характеристики определяли одноплоскостным срезом.

Опыты проводили при трёх значениях вертикальной нагрузки, минимальное напряжение приняли 50 кПа, так как оно близко к бытовому давлению грунтов плотного сложения на глубине 60 см и далее. Последующие стадии нагружения выбраны как удвоенные значения предыдущей ступени. Смесь VI-75 замешивали равномерно с необходимым количеством воды до достижения одинаковой влажности внутри образца. Значения влажности задавали 5 и 10 % по массе. Полученную смесь помещали в цилиндрические кольца высотой 35 мм и диаметром 71 мм, это специальные формы для подготовки образцов к испытаниям на срез, и уплотняли до $\rho = 1,75 \text{ г/см}^3$. Кольца заблаговременно смазывали вазелином, чтобы для испытаний замёрзшие образцы было проще продавливать в установку. Подготовленные образцы помещали в ящик, сделанный из изоляционного материала. В отдельную ёмкость заливали жидкий азот для быстрой заморозки образцов. Они замерзали до минимально возможной температуры $-110...-120 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение двух часов. Отсутствие морозильных камер, способных вместить прибор для одноплоскостного среза, обусловило проведение экспериментов при температуре $+13 \text{ }^\circ\text{C}$. Подобные условия непременно привели к повышению температуры образцов, поэтому дополнительно измерялась скорость оттаивания образцов.

Агапкин Иван Аркадьевич — младший научный сотрудник, agapkin@geokhi.ru
Уварова Александра Владимировна — младший научный сотрудник

Измерение скорости оттаивания показало значительный рост температуры с -120 до -50 °С за 5 мин, дальше скорость снижалась. Сопоставление результатов среза с графиком скорости оттаивания демонстрирует, что пиковое значение касательной нагрузки достигается на 5-й минуте опыта, температура образцов при этом от -45 до -55 °С. Касательное напряжение также изменяется от 1,26 до 1,42 МПа. Образцы с большим разбросом касательного напряжения и выходящие за пределы статистической погрешности выбрасывались из общей выборки. Таким образом, за счёт большого количества опытов можно полагать, что все выбранные испытания на момент разрушения были на образцах с температурой около $-45...-55$ °С. Испытания одноплоскостным срезом образцов с влажностью 5 % показали, что угол внутреннего трения равен $66,8 \pm 0,9^\circ$ и удельное сцепление $163,9 \pm 28,4$ кПа. Данные характеристики возросли до значений $\varphi = 74,9 \pm 0,67^\circ$ и $c = 486,2 \pm 72,9$ кПа с увеличением суммарной весовой влажности до 10 % (рис. 1).

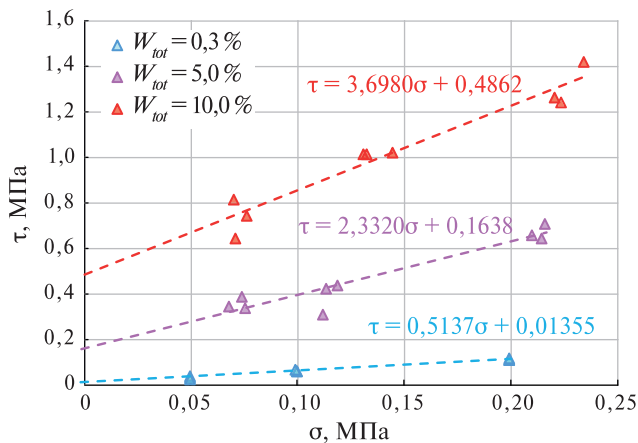


Рис. 1. Результаты испытаний для образца с плотностью $1,75$ г/см³ при разной влажности

Проведённые опыты одноплоскостным срезом на мёрзлом VI-75 с влажностью 5 и 10 % при температуре $-45...-55$ °С, а также сопоставление результатов с сухим образцом показали, что угол внутреннего трения заметно увеличивается до $66,8^\circ$ ($W_{tot} = 5$ %) и $74,9^\circ$ ($W_{tot} = 10$ %). Удельное сцепление также увеличивается до $163,9$ кПа ($W_{tot} = 5$ %) и достигает $486,2$ кПа ($W_{tot} = 10$ %). Таким образом, наличие льда в лунном реголите может существенно увеличить его прочностные характеристики. Дальнейшие исследования будут направлены на способы проведения испытаний при постоянной температуре образцов, а также определение других механических характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

- Гришакина Е.А., Слюта Е.Н. Возможные запасы водяного льда в лунных полярных областях // 13-я Конф. молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования»: сб. тр. М.: ИКИ РАН, 2021. С. 20–24. DOI: 10.21046/KMU-2021-20-24.
- Роман Л. Т. Механика мерзлых грунтов М.: Наука/Интерпериодика, 2002. 425 с.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.06.047>.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE LUNAR SOIL ANALOGUE VI-75 AT A NEGATIVE TEMPERATURE

I. A. Agapkin, A. V. Uvarova

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

The results of determining the values of the angle of internal friction and cohesion for the lunar soil analog VI-75 at negative temperatures and various water content values.

Keywords: the Moon, lunar regolith, lunar soil-analogue, physical-mechanical properties

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

Uvarova Alexandra Vladimirovna — junior researcher

ЗЕМЛЕПОДОБНЫЕ МОДЕЛИ ВНУТРЕННЕГО СТРОЕНИЯ ВЕНЕРЫ

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 и для исследования процесса образования Солнечной системы. В работе построены 45 моделей внутреннего строения Венеры на основе модели Земли PREM. Модели отличаются радиусом ядра и величинами плотности мантии и ядра. Для каждой из них рассчитано распределение плотности, давления, массы, гравитационного ускорения и скорости сейсмических волн по радиусу, а также вычислены момент инерции I , приливные числа Лява k_2 и h_2 и сдвиг фазы приливного горба. При расчёте чисел Лява применяется реология Андраде для перехода от упругих значений модуля сдвига к неупругим. Полученные результаты были сопоставлены с имеющимися оценками I (Margot et al., 2021) и k_2 (Konopliv, Yoder, 1996). Анализ моделей позволяет заключить, что присутствие твёрдого внутреннего ядра на Венере маловероятно, и что модели с радиусом ядра в интервале от 3100 до 3450 км — наиболее правдоподобные.

Ключевые слова: Венера, землеподобная модель, момент инерции, приливные числа Лява, неупругость, реология Андраде

ВВЕДЕНИЕ

Исследование внутреннего строения планет земной группы весьма важно, ведь процессы, происходящие в их недрах, тесно связаны с их эволюцией 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. После открытия активного вулкана на Венере (Herrick, Hensley, 2023) исследование данной планеты становится ещё более актуальной задачей. Кроме того, у Венеры отсутствует собственное магнитное поле, что указывает на то, что ядро сильно отличается от земного.

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 Роскосмоса «Венера-Д», проект ЕКА (Европейское космическое агентство) EnVision и проект НАСА (Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства) 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

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

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

сжатия по радиусу. Без этих зависимостей невозможно использовать уравнение Адамса – Вильямсона для получения профиля плотности в недрах.

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, Don, 1981) как нулевое приближение. Из модели PREM берутся зависимости плотности от давления $\rho_0(P)$ и модулей сдвига $\mu_0(\rho)$ и всестороннего сжатия $K_0(\rho)$ от плотности и проводится интерполяция данных, а при необходимости, их экстраполяция в нижней мантии или в верхней части ядра.

На основе анализа данных топографии и гравитационного поля Венеры (James et al., 2013; Jimenez-Diaz et al., 2015) в настоящей работе мощность коры принимается равной 25 км, а плотность постоянна и равна 2800 кг/м^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 работе (Dumoulin et al., 2017) 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 должно находиться в жидком состоянии. Рассматриваются модели с радиусом ядра R_c в интервале от 2850 до 3550 км.

Здесь используется подход из работы (Гудкова, Жарков, 2020) — плотность в мантии $\rho_\mu(P)$ задана с помощью коэффициента A : $\rho_\mu(P) = A\rho_0(P)$. 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 коэффициент B : $\rho_c(P) = B\rho_0(P)$. Построены модели для значений $B = 0,98; 1,00; 1,02$.

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, система уравнений (1) и (2) решается методом Рунге – Кутты 8-го порядка. Для каждой модели заданы значения радиуса ядра и коэффициента B и необходимо найти значение коэффициента A , при котором масса модельной планеты совпадает с массой Венеры $M = 4,8669 \cdot 10^{24} \text{ кг}$. Для этого используется метод Ньютона.

Всего построены 45 моделей: радиус ядра R_c меняется от 2850 до 3550 км с шагом 50 км, а коэффициент $B = 0,98; 1,00$ и $1,02$.

Важным геофизическим параметром, накладывающим ограничение на модель планеты, выступает момент инерции, который для 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 исследовании (Margot et al., 2021) и составляет $0,337 \pm 0,024$.

Для всех моделей также получено распределение 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

Распределение плотности и давления представляет особый интерес для определения состояния ядра (твёрдое или жидкое), поэтому для всех моделей приведены (рис. 1) полученные модельные значения давления в центре планеты P_c и для трёх из них приведена зависимость плотности от глубины (рис. 2).

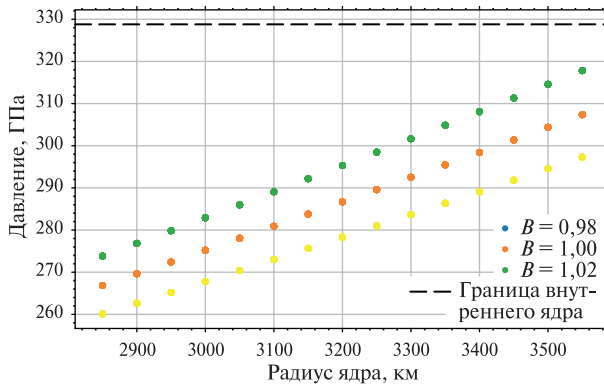


Рис. 1. Модельные значения давления P_c в центре Венеры

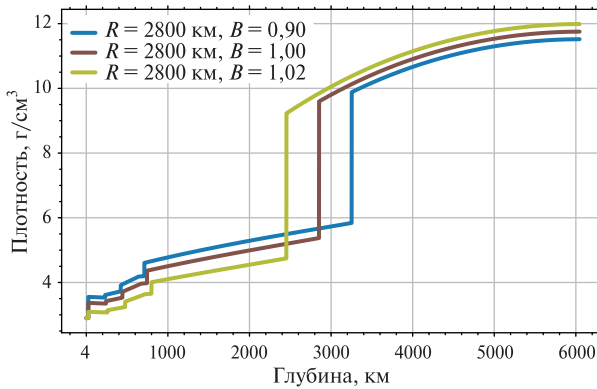


Рис. 2. Зависимость плотность от глубины для трёх из 45 построенных моделей

Модельные значения P_c (см. рис. 1) находятся в интервале от 260 до 320 ГПа. В моделях с большим ядром P_c выше, чем в моделях с маленьким ядром. Параметр B также заметно влияет на значение P_c . Для сравнения, в центре Земли давление достигает 363 ГПа, а на границе внутреннего ядра — 328 ГПа (Dziewonski, Don, 1981). Это показывает, что даже в моделях с очень большим

и тяжёлым 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.

Модель с $R_c = 320$ км и $B = 1$ — «наиболее землеподобная», т.е. распределение плотности в мантии и в ядре ближе всего к земному по сравнению с другими моделями Венеры. «Крайними» служат модели с $R_c = 2850$ км, $B = 0,98$ и $R_c = 3550$ км, $B = 1,02$. Все остальные модели находятся между ними.

Что касается момента инерции, получены значения (рис. 3) в интервале от 0,319 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 R_c от 3000 до 3250 км.

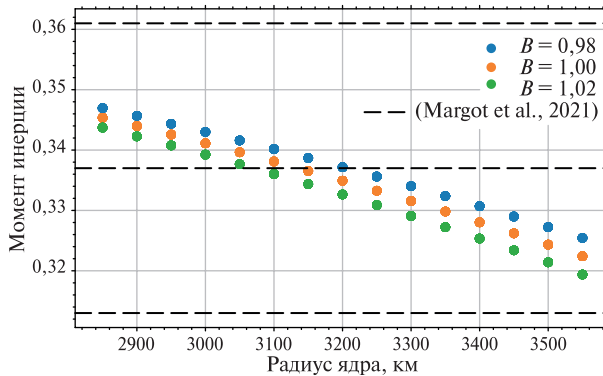


Рис. 3. Модельные значения момента инерции Венеры. Штриховые линии выделяют область $0,337 \pm 0,024$

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

ПРИЛИВНЫЕ ЧИСЛА ЛЯВА

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 измерено k_2 и оно составляет $0,295 \pm 0,066$ (Konopliv, Yoder, 1996).

На основе методов, предложенных в работах (Alterman et al., 1959; Chinnery, 1975; Michel, Boy, 2022), рассчитаны числа Лява k_2 и h_2 для всех построенных моделей Венеры. При расчёте чисел Лява неупругость в недрах учитывается с помощью реологии Андраде (Castillo-Rogez et al., 2011; Dumoulin et al., 2017; Efroimsky, 2012). Реологическое соотношение зависит от периода приливного воздействия (в случае Венеры — 58,4 дня) и от вязкости среды и задаёт закон преобразования упругого модуля сдвига μ в комплексную величину (вязкоупругий модуль сдвига). Вязкость в недрах Венеры неизвестна, поэтому для неё построено пробное распределение вязкости на основе современных моделей Земли.

Реология Андраде также зависит от двух эмпирических параметров — α и ζ , которые неизвестны для вещества мантии Венеры. Для «калибровки» реологического уравнения было проведено исследование реологии недр Земли. Эта работа была представлена на 65-й конференции МФТИ (https://conf.mipt.ru/view/conference/view_division/3075799). Полученные значения этих двух эмпирических параметров применяются к реологии Венеры.

Для всех 45 моделей при разных распределениях вязкости и при разных значениях параметров α и ζ рассчитываются числа Лява. Неопределённость в вязкости и в параметрах реологии вызывает неопределённость в самих числах Лява, поэтому для каждой модели получены, на самом деле, диапазоны возможных значений k_2 и h_2 . На рис. 4 приведены модельные значения k_2 .

Из рис. 4 видно, что у моделей с маленьким ($R_c < 3000$ км) или с большим ($R_c > 3450$ км) ядром значения k_2 заметно отличаются от 0,295, поэтому они маловероятны. По критерию k_2 наиболее вероятными являются модели с $3100 < R_c < 3450$ км.

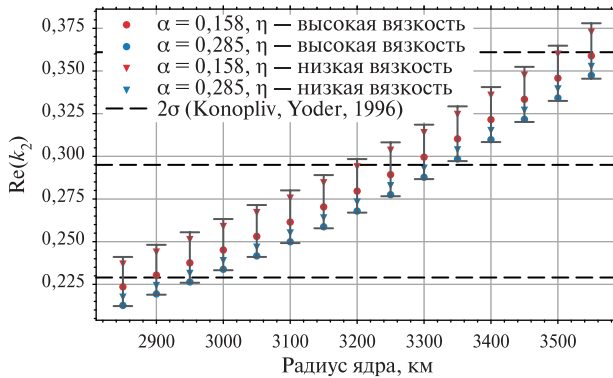


Рис. 4. Модельные значения k_2 Венеры. $B = 1,00$; $\zeta = 10$

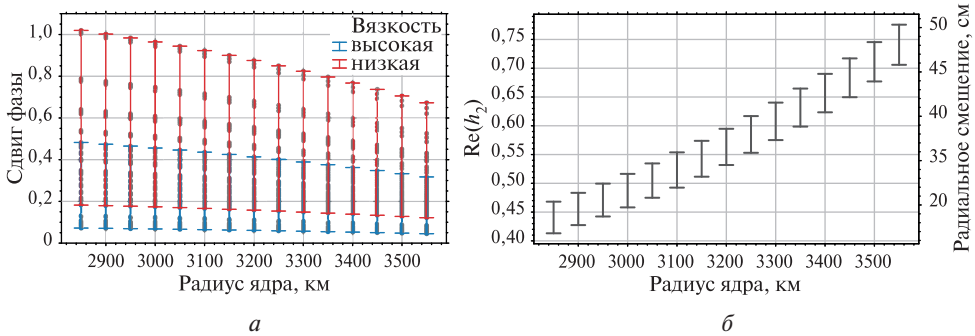


Рис. 5. Модельные значения сдвига фазы ϵ и h_2 Венеры

Можно также заметить, что вязкость сильно влияет на значения k_2 и её неопределённость усложняет исследование недр Венеры. Один из способов уточнения профиля вязкость лежит на основе приливного сдвига фазы, который определяется по формуле $\epsilon = \text{Im}(k_2) / 2 \text{Re}(k_2)$. Он ещё не определён для Венеры, но его измерение с высокой точностью планируется в миссиях VERITAS и EnVision (Cascioli et al., 2021; Rosenblatt et al. 2021). На рис. 5 приведены модельные значе-

ния сдвига фазы, которые могут быть использованы в будущем для определения вязкости в недрах планеты. На рис. 5 также приведены модельные значения числа Лява h_2 . Его измерение миссиями VERITAS и EnVision позволит наложить дополнительное ограничение на модели Венеры и точнее определить её внутреннее строение.

ВЕРОЯТНОСТЬ МОДЕЛЕЙ

На основе измеренных значений момента инерции и k_2 можно оценить вероятность каждой модели (с конкретными значениями радиуса ядра, параметров B , α и ζ и вязкости) по формуле:

$$p(k_2, I) = \exp\left[-\frac{(k_2 - k_2^0)^2}{2\sigma_{k_2}^2}\right] \cdot \exp\left[-\frac{(I - I^0)^2}{2\sigma_I^2}\right], \quad (4)$$

где $k_2^0 = 0,295$, $\sigma_{k_2} = 0,033$, $I^0 = 0,337$, $\sigma_I = 0,024$.

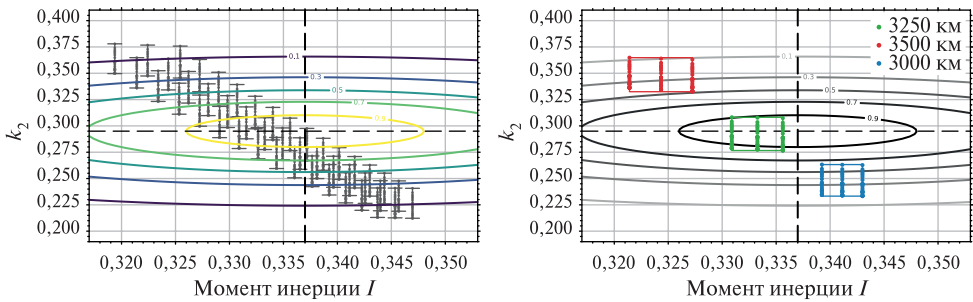


Рис. 6. Модельные значения k_2 и момента инерции и их распределение по вероятности

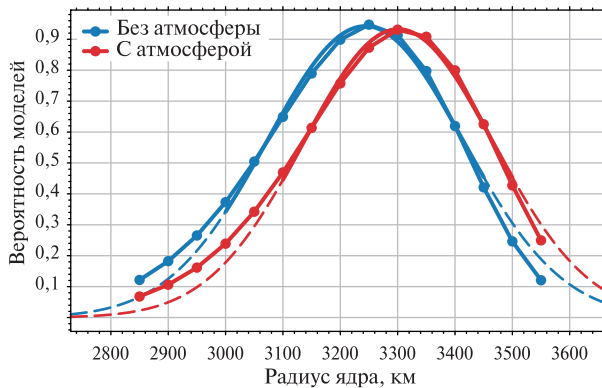


Рис. 7. Зависимость вероятности моделей от радиуса ядра

На рис. 6 серыми точками показаны все комбинации момента инерции и k_2 для построенных моделей. Также выделены изолинии с указанными вероятностями, рассчитанными по формуле (4). Снизу приведена аналогичная картина,

но только для некоторых значений радиуса ядра. Для каждого значения R_c получаем разброс значений момента инерции при вариации параметра B и разброс значений k_2 при вариации B , параметров α и ζ и вязкости. Все модели с конкретным значением R_c находятся внутри некоторого прямоугольника и, усредняя функцию $p(k_2, I)$ по этому прямоугольнику, можно оценить вероятность того, что радиус ядра Венеры имеет именно это значение R_c . Оценки вероятности приведены на рис. 7.

В публикации (Dumoulin et al., 2017) показано, что с учётом тяжёлой атмосферы Венеры k_2 может уменьшиться на 3–4 %. Так как в наших расчётах атмосфера не учитывается, можем уменьшить наши значения k_2 на 4 % и пересчитать вероятность моделей. На рис. 7 (см. с. 13) показаны вероятности с данной поправкой и без неё. В итоге получаем, что вероятнее всего радиус ядра Венеры находится в пределах от 3100 до 3450 км.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе 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 являются модели с радиусом ядра в интервале от 3100 до 3450 км.

Разработанные алгоритм и программы позволят лучше определить внутреннее строение Венеры, когда будут доступны точные измерения момента инерции, приливных чисел Лява и сдвига фазы приливного горба.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-22-00074 (<https://rscf.ru/project/23-22-00074>).

ЛИТЕРАТУРА

- Гудкова Т. В., Жарков В. Н. Модели внутреннего строения землеподобной Венеры // *Астроном. вестн. Исслед. Солнечной системы*. 2020. Т. 54. № 1. С. 24–32. DOI: 10.31857/S0320930X20010041.
- 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. <https://doi.org/10.1098/rspa.1959.0138>.
- Cascioli G., Hensley S., De Marchi F. et al. The determination of the rotational state and interior structure of Venus with VERITAS // *The Planetary Science J*. 2021. V. 2. No. 6. Art. No. 220. 12 p. <https://doi.org/10.3847/PSJ/ac26c0>.
- Castillo-Rogez J. C., Efroimsky M., Lainey V. The tidal history of Iapetus: Spin dynamics in the light of a refined dissipation model // *J. Geophysical Research: Planets*. 2011. V. 116. Iss. E9. Art. No. E09008. 29 p. <https://doi.org/10.1029/2010JE003664>.
- Chinnery M. A. The static deformation of an earth with a fluid core: a physical approach // *Geophysical J. Intern.* 1975. V. 42. Iss. 2. P. 461–475. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1975.tb05872.x>.
- Dumoulin C., Tobie G., Verhoeven O. et al. Tidal constraints on the interior of Venus // *J. Geophysical Research: Planets*. 2017. V. 122. Iss. 6. P. 1338–1352.
- Dziewonski A. M., Don L. A. Preliminary reference Earth model // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1981. V. 25. Iss. 4. P. 297–356. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(81\)90046-7](https://doi.org/10.1016/0031-9201(81)90046-7).
- Efroimsky M. Tidal dissipation compared to seismic dissipation: In small bodies, Earths, and super-Earths // *The Astrophysical J*. 2012. V. 746. Iss. 2. P. 150. DOI 10.1088/0004-637X/746/2/150.

- Herrick R. R., Scott H.* Surface changes observed on a Venusian volcano during the Magellan mission // *Science*. 2023. V. 379. Iss. 6638. P. 1205–1208. DOI: 10.1126/science.abm7735.
- James P. B., Maria T. Z., Roger J. Ph.* Crustal thickness and support of topography on Venus // *J. Geophysical Research: Planets*. 2013. V. 118. Iss. 4. P. 859–875. doi:10.1029/2012JE004237, 2013.
- Jiménez-Díaz A., Ruiz J., Kirby J. F.* et al. Lithospheric structure of Venus from gravity and topography // *Icarus*. 2015. V. 260. P. 215–231. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.07.020>.
- 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. <https://doi.org/10.1029/96GL01589>.
- 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. <https://doi.org/10.1098/rspa.1909.0008>.
- Margot J.-L., Campbell D. B., Giorgini J. D.* et al. Spin state and moment of inertia of Venus // *Nature Astronomy*. 2021. V. 5. No. 7. P. 676–683. DOI:10.1038/s41550-021-01339-7.
- Michel A., Boy J.-P.* Viscoelastic Love numbers and long-period geophysical effects // *Geophysical J. Intern.* 2022. V. 228. Iss. 2. P. 1191–1212. <https://doi.org/10.1093/gji/ggab369>.
- Rosenblatt P., Dumoulin C., Marty J.-Ch.* et al. Determination of Venus' interior structure with EnVision // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. Iss. 9. Art. No. 1624. <https://doi.org/10.3390/rs13091624>.

EARTH-LIKE MODELS OF VENUS' INTERIOR STRUCTURE

*D. O. Amorim*¹, *T. V. Gudkova*²

¹ Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT), Moscow, 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 as well as the formation of the Solar System. In this work we have built 45 PREM-based models of Venus, which differ in core radius and mantle and core densities. Their pressure, mass, density and seismic velocities profiles have been calculated, as well as their moment of inertia I , tidal Love numbers k_2 and h_2 and tidal phase lag. In order to account for the viscoelasticity of Venus' mantle we use Andrade rheology. The results were compared to the available estimates of I (Margot et al., 2021) and k_2 (Konopliv, Yoder, 1996). 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 models with a core radius in the range from 3100 to 3450 km are preferable.

Keywords: Venus' interior, Earth-like models, moment of inertia, tidal Love numbers, Andrade rheology

Amorim Dargilan Oliveira — master's student at MIPT, oliveira.ad@phystech.edu

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

ИСПЫТАНИЯ ДЕТЕКТОРА ИЗ ВЫСОКОЧИСТОГО ГЕРМАНИЯ В СОСТАВЕ ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТА КОСМИЧЕСКОГО ГАММА-СПЕКТРОМЕТРА С МЕЧЕННЫМИ ЗАРЯЖЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ НА ПРОТОННОМ ПУЧКЕ ФАЗОТРОНА ОИЯИ

А. А. Аникин¹, М. И. Мокроусов¹, И. Г. Митрофанов¹, Д. В. Головин¹, А. С. Козырев¹, М. Л. Литвак¹, С. Ю. Никифоров¹, А. Б. Санин¹, Г. Н. Тимошенко², В. Н. Швецов², Е. Е. Павлик²

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

² Объединённый институт ядерных исследований (ОИЯИ), Дубна, Россия

Рассмотрен эксперимент на протонном пучке фазотрона ОИЯИ с лабораторным макетом космического гамма-спектрометра с мечеными заряженными частицами (КГС-МЗЧ) с полупроводниковым детектором из высокочистого германия и результаты полученных измерений. Показано, что конфигурация космического гамма-спектрометра с полупроводниковым детектором представляется более эффективной для исследования состава приповерхностного грунта небесного тела с борта посадочного аппарата, чем со сцинтилляционным детектором. Высокое спектральное разрешение высокочистого германия даёт возможность обнаруживать ядерные линии с максимальной чувствительностью для детектора с заданной массой, а применение метода «меченных заряженных частиц» позволяет практически исключить собственный фон от космического аппарата и значительно повысить пространственное разрешение гамма-спектрометра.

Ключевые слова: гамма-лучи, космические лучи, ядерные линии, химический состав планетного вещества, планеты, Луна, космические исследования, полупроводниковый детектор, особо чистый германий

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время особую актуальность сохраняет задача анализа состава приповерхностного грунта небесных тел бесконтактными методами с борта космических орбитальных и посадочных аппаратов. Одним из хорошо зарекомендовавших себя методов определения элементного состава грунта выступает космическая гамма-спектроскопия (Adler, Trombka, 1977; Evans, et al., 2006, Feldman

Аникин Артём Александрович — инженер, a.anikin@np.cosmos.ru

Мокроусов Максим Игоревич — заведующий лабораторией, кандидат физико-математических наук

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

Головин Дмитрий Васильевич — научный сотрудник

Козырев Александр Сергеевич — научный сотрудник, кандидат физико-математических наук

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

Никифоров Сергей Юрьевич — научный сотрудник

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

Тимошенко Геннадий Николаевич — заместитель директора, доктор физико-математических наук

Швецов Валерий Николаевич — заместитель директора, кандидат физико-математических наук

Павлик Евгений Евгеньевич — старший инженер

et al., 1999; Prettyman et al., 2011; Vinogradov et al., 1966). Чаще всего этот метод используется для небесных тел с тонкой атмосферой или без неё, где в качестве источника излучения используется постоянный поток галактических космических лучей (ГКЛ). Основной проблемой таких измерений оказывается невозможность учёта фона от космического аппарата и отдалённых участков поверхности в результирующем измеренном сигнале.

При решении этой проблемы для посадочных аппаратов рабочей группой РНФ № 18-12-00487 (далее РНФ) был сформулирован «метод меченных заряженных частиц» (метод МЗЧ) (Аникин и др., 2021; Митрофанов и др., 2019; Mitrofanov et al., 2020b). Идея метода состоит в дополнении гамма-спектрометра (детектора гамма-лучей — ДГЛ) детектором-телескопом частиц ГКЛ (детектором заряженных частиц — ДЗЧ), располагающимся недалеко от поверхности небесного тела (на высоте 0,5–1 м), который регистрирует заряженные частицы (так называемые меченные ГКЛ, или МГКЛ), которые проходят через ДЗЧ попадают в небольшой выделенный изучаемый объём вещества небесного тела. В данном методе результаты измерений ДГЛ обрабатываются совместно с ДЗЧ в блоке электроники (БЭ): если для построения гамма-спектра отбирать только те отсчёты, которые совпали по времени (в некотором временном окне) с регистрацией МГКЛ, то с высокой вероятностью этот спектр характеризует раннее альbedo вещества небольшого изучаемого объёма приповерхностного грунта (рис. 1).

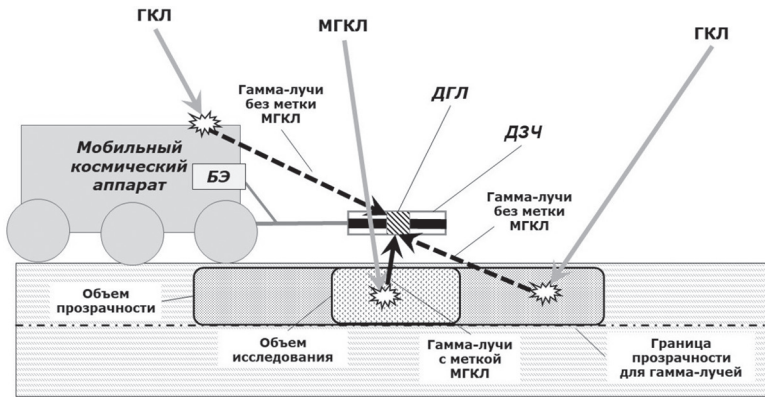


Рис. 1. Схема эксперимента с космическим гамма-спектрометром с применением метода меченных космических лучей на борту мобильного аппарата на поверхности небесного тела. Иллюстрация воспроизведена из статьи (Аникин и др., 2021)

Для реализации метода МЗЧ в рамках РНФ был разработан макет космического гамма-спектрометра с меченными заряженными частицами (КГС-МЗЧ). В статье рассматривается эксперимент с лабораторным макетом КГС-МЗЧ с полупроводниковым детектором из высокочистого германия.

ОПИСАНИЕ МАКЕТОВ ПРИБОРА КГС-МЗЧ

На начальном этапе разработки в макете прибора КГС-МЗЧ в качестве ДГЛ использовался детектор на основе кристалла бромида церия CeBr_3 : такие сцинтилляционные детекторы имеют достаточно высокое спектральное разрешение среди сцинтилляторов (~4,0–4,5 % для фотонов с энергией 662 кэВ), относительно

малое время высвечивания, высокую эффективность регистрации и низкий собственный фон (Kozyrev et al., 2016; Quarati et al., 2013). Однако такой детектор значительно уступает по разрешению детектору из высокоочищенного германия, который обладает спектральным разрешением около 2 кэВ для фотонов с энергиями 662 и 1333 кэВ. Высокое спектральное разрешение существенно повышает достоверность измерений характеристических ядерных линий, поэтому было принято решение об изучении возможности использования в составе КГС-МЗЧ детектора ДГЛ на основе HPGе.

Главный недостаток полупроводникового детектора состоит в его охлаждении до криогенной температуры, что ведёт к повышению массы всей аппаратуры в случае применения пассивного охлаждения, или к высокому энергопотреблению в случае активного охлаждения.

Сравнение характеристик макета КГС-МЗЧ с детекторами на основе CeBr_3 и HPGе

Характеристика	CeBr_3	HPGe
Время прогрева	~1,5 ч	~ 40 мин
Температурные эффекты во время измерений	До 20 каналов (норма до 10 каналов)	Не более 4 каналов (норма до 1–2 каналов)
Разрешение при темпе счёта до 1500 с^{-1} на 662 и 1333 кэВ (рис. 2, см. с. 19), кэВ	32	5,2
Эффективность регистрации на 1333 кэВ относительно NaI(Tl), %	170	30
Время нарастания полезного сигнала, нс	~20	~150–350
Коэффициент усиления быстрого дискриминатора	~7	~10 000
Погрешность определения времени прихода зарегистрированного гамма-кванта в значимых каналах, нс	<10	
Время прихода сигнала после реакции гамма-кванта с кристаллом, нс	0–2	0–2000
Окно поиска гамма квантов от меченных протонов, нс	0–100 (с запасом)	0–1800
Масса прибора, кг*	~5	~15–20
Потребление, Вт*	от 5	от 50

* Указаны параметры для приборов, спроектированных для установки на космические летательные аппараты.

Другой проблемной особенностью полупроводникового детектора представляется длительное время сбора полезного сигнала и как следствие трудности в присвоении временной метки гамма-кванту. Высокая временная разрешающая способность сцинтиллятора до 2 нс (таблица) позволяет использовать его при высокой скорости счёта. Для достижения приемлемых результатов с полупроводниковым детектором, где временные характеристики сильно зависят от скорости дрейфа электрон-дырочных пар в толще кристалла, появилась необходимость уменьшения времени сбора зарядов, что негативно сказалось на разрешающей способности спектрометра. Сама временная схема обработки сигналов для удовлетворения условию меченого гамма-кванта усложнилась по сравнению со сцинтилляционным детектором, поскольку момент регистрации

гамма-кванта электроникой может находиться в интервале $T_{\text{дрейф}}$ от 0 до 2000 нс от момента прихода частицы в кристалл германия. Данный параметр случаен и зависит от того, насколько близко от регистрирующих обкладок находится место попадания частицы. Форма сигнала с предусилителя детектора также нестабильна даже для частиц одной энергии и зависит от пространственного расположения трека зарядов. Характерная длительность фронта сигнала для энергии 1333 кэВ составляет $T_{\text{фронт}}$ от 150 до 350 нс (Мокроусов и др., 2023).

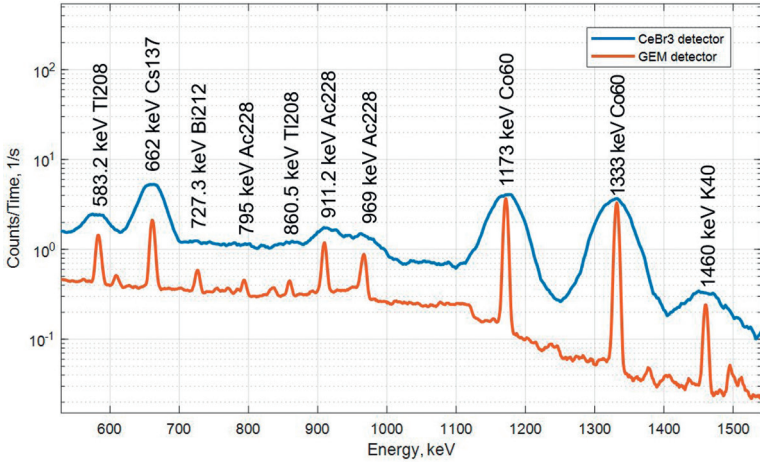


Рис. 2. Спектры гамма-излучения ОСГИ Co60, Cs137, Th228, измеренные макетами прибора КГС-МЗЧ с двумя типами детекторов: оранжевая линия — полупроводниковый детектор на основе высокочистого германия, синяя линия — сцинтилляционный детектор. Спектры получены в лабораторных условиях при одинаковой геометрии эксперимента для демонстрации разрешающих возможностей сконструированных макетов

Минимизировать $T_{\text{дрейф}}$ не представляется возможным из-за иной физики регистрации частицы в полупроводниковом детекторе, а для минимизации влияния $T_{\text{фронт}}$ на время регистрации частицы используется быстрый дискриминатор с коэффициентом усиления равным около 10^4 , что позволяет уменьшить погрешность определения времени прихода гамма-кванта без учёта $T_{\text{дрейф}}$ до 10 нс. Так, для сцинтилляционного детектора при математической обработке устанавливается окно совпадений от 0 до 100 нс, поскольку $T_{\text{дрейф}}$ стремится к нулю для данного типа детектора, и учитывается только время реакции раннего альбеда, а для полупроводникового — от 0 до 1800 нс. Более подробно про особенности присвоения меток времени см. в исследовании (Мокроусов и др., 2023).

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Лабораторные обработки макета прибора КГС-МЗЧ проводились на протонном пучке фазотрона Объединённого института ядерных исследований (ОИЯИ) в г. Дубне с энергией ~ 170 МэВ, импульсной микроструктурой с характерным временем банчей 70 нс и сечением 80×80 мм (Митрофанов и др., 2019). В состав экспериментальной установки (ЭУ) (рис. 3, см. с. 20) входила система из двух коллиматоров, лабораторный макет КГС-МЗЧ в составе ДЗЧ, ДГЛ и БЭ и также модуль облучаемых мишеней (МОМ). Для защиты детекторов от налетающих

высокоэнергетических протонов 170 МэВ использовалась пятидесятимиллиметровая свинцовая защита. В качестве основного материала-имитатора среднего состава грунта применялось силикатное стекло известного химического состава (рис. 4). В качестве неоднородностей приповерхностного слоя были изготовлены мишени-вставки 30×30×200 мм трёх типов:

- мишени-вставки из чистых порообразующих материалов и сплавов с существенным преобладанием в составе одного из изучаемых элементов с известными сильными линиями, предназначенные для первичной калибровки спектрометра: сплавы алюминия АМЦ, АМг6, сплав титана ВТ-6, сплав железа Ст3, углерод, контейнер с NaCl;
- мишени-аналоги, имитирующие средний состав марсианского грунта, составы с максимальной и минимальной концентрацией по каждому из следующих элементов: Al, Mg, Si, Ca, Fe, Ti (Mitrofanov et al., 2019, 2020a, 2021). Состав мишеней был выбран на основе данных эксперимента АРЕХ (англ. Active Plasma Experiments), на марсоходе Кьюриосити.
- мишени-вставки с окислами редкоземельных элементов: Eu_2O_3 , Nd_2O_3 , CeO , Dy_2O_3 , Y_2O_3 , La_2O_3 , Pr_6O_{11} , Er_2O_3 , Tm_2O_3 , Gd_2O_3 , Yb_2O_3 . Поиск и отождествление данных элементов в реголите станет в среднесрочной перспективе актуальной задачей для космической гамма-спектроскопии.

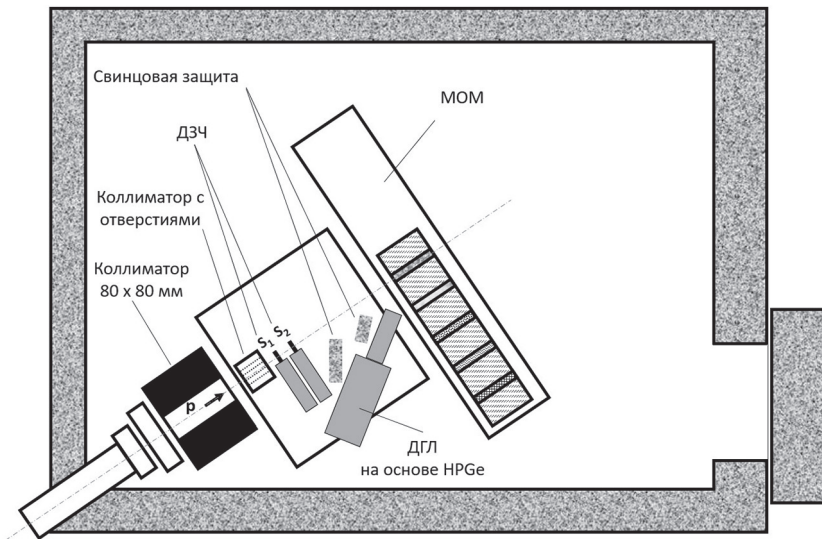


Рис. 3. Схема экспериментальной установки на протонном пучке фазотрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ г. Дубны. Иллюстрация воспроизведена из статьи (Мокроусов и др., 2023)

Для насыпных фракций использовались медные герметичные контейнеры с толщиной стенки 0,5 мм (Mitrofanov et al., 2020a). Герметизация происходила с помощью припоя ПОС-61. Всего было изготовлено 6 мишеней 1-го типа, 11 мишеней 2-го типа, 11 мишеней 3-го типа, 1 пустой (наполнен воздухом при атмосферном давлении) медный контейнер для фоновых измерений. На рис. 3 и 4 (см. с. 21) показано расположение мишеней-вставок внутри массива силикатного стекла в составе МОМ. У МОМ существовала возможность удалённого перемещения и позиционирования относительно пучка. Контроль положения осуществлялся с помощью видеонаблюдения.

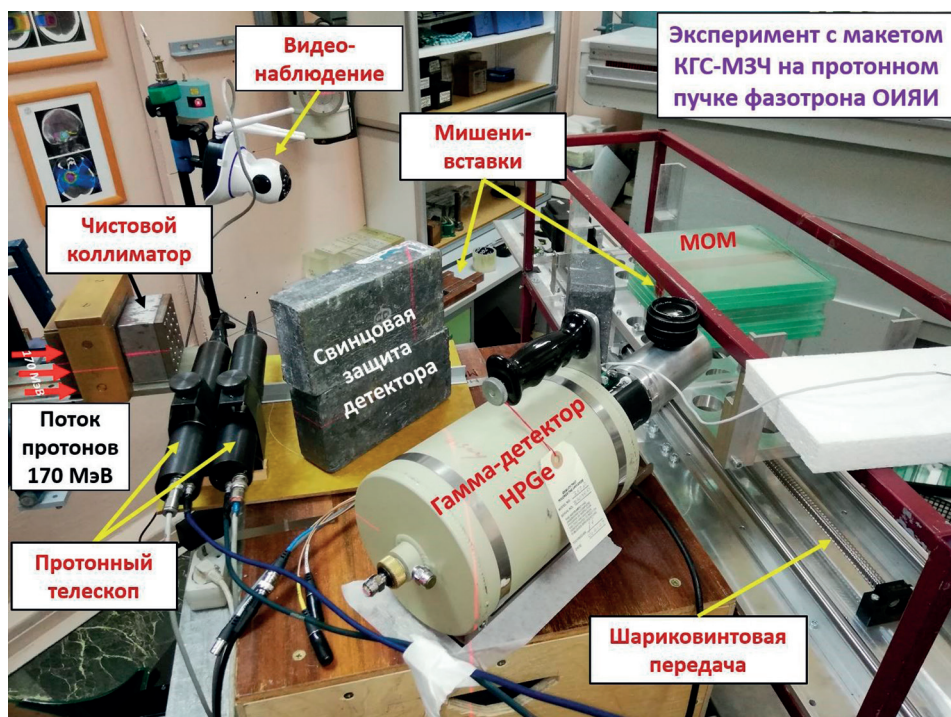


Рис. 4. Схема эксперимента с макетом КГС-МЗЧ на протонном пучке фазотрона ОИЯИ

РЕЗУЛЬТАТЫ

Главная задача КГС-МЗЧ заключается в регистрации пространственной переменности состава приповерхностного грунта. Для демонстрации данной характеристики прибора с полупроводниковым детектором был проведен эксперимент с шестью мишенями-вставками аналогами марсианского реголита с различным содержанием алюминия от 4 до 24 % (Мокроусов и др., 2023). На рис. 5 (см. с. 22) показано, как интенсивность линии алюминия меняется в зависимости от массовой доли алюминия. По оси Y отложена разность интенсивности спектральной линии алюминия с энергией 1369 кэВ, измеренной для MOM с мишенью-аналогом с данным содержанием алюминия и для MOM из чистого массива стекла. Статистическая значимость этой величины показывает, насколько выбранный режим измерений (интегральный или меченый) позволяет отличить неоднородный MOM с небольшой вставкой из мишени-аналога марсианского грунта от однородной мишени, состоящий целиком из стекла.

Анализ меченого режима измерений показывает сильную линейную корреляцию между интенсивностью линии 1369 кэВ и количеством алюминия в мишени-аналоге. Аналогичный анализ для интегрального спектра показывает, что статистически важная связь между интенсивностью выбранной линии и количественным содержанием алюминия в «неоднородности грунта» отсутствует — линия «тонет» в фоновом излучении. Эксперимент показал, что даже с учётом существенно худших временных характеристик полупроводникового детектора относительно сцинтилляционного метод МЗЧ даёт значимые результаты и существенное преимущество по сравнению с традиционной гамма-спектрометрией.

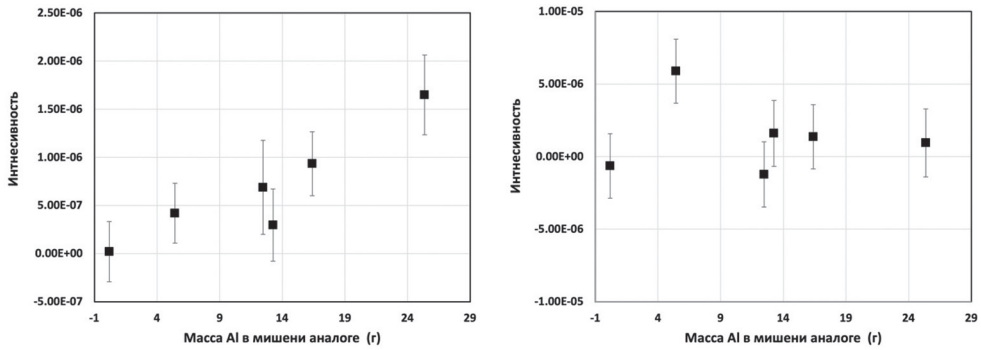


Рис. 5. Разность интенсивности спектральной линии алюминия 1369 кэВ, измеренной для МОМ с мишенями-аналогами с разным содержанием алюминия, и для интенсивности указанной линии для МОМ из чистого массива стекла. Представлены графики для меченого (*слева*) и интегрального (*справа*) режима измерений. Иллюстрация воспроизведена из статьи (Мокроусов и др., 2023)

ВЫВОДЫ

При лабораторных обработках макета космического гамма-спектрометра с мечеными заряженными частицами с обоими типами детекторов установлено, что метод МЗЧ позволяет значительно повысить соотношение сигнал/фон. Основными недостатками сцинтиляционного детектора можно считать небольшую разрешающую способность и температурную зависимость энергетической шкалы (см. таблицу), которые существенно затрудняют интерпретацию результатов. Так, например, основные породообразующие элементы Fe, Si, Ti, Al, Mg имеют множество соседних линий, которые не различимы или слабо различимы сцинтиляционным детектором, но при этом полупроводниковым детектором даже с ухудшенными характеристиками (см. таблицу) эффективно различаются. В качестве примера можно выделить следующие группы линий: а) ^{56}Fe 847 кэВ, ^{48}Ti 984 кэВ и ^{27}Al 1014 кэВ; б) ^{28}Si 1779 кэВ и ^{26}Mg 1809 кэВ. Показано, что с полупроводниковым детектором прибор КГС-МЗЧ представляется наиболее эффективным для исследований пространственной переменности состава приповерхностного грунта небесных тел с тонкой атмосферой или без неё. Данный вариант прибора имеет максимальную чувствительность, хорошую эффективность и отличную разрешающую способность, однако обладает существенно большей массой и энергопотреблением, более сложным конструктивом. Исполнение КГС-МЗЧ будет зависеть от задач исследовательской миссии и её технических возможностей.

Авторы благодарят коллектив отдела фазотрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ за обеспечение экспериментальной работы авторов на протонном ускорителе ОИЯИ и Российский научный фонд за поддержку исследований, результаты которых представлены в данной статье (грант РНФ № 18-12-00487).

ЛИТЕРАТУРА

Аникин А.А., Дьячкова М.В., Литвак М.Л. и др. Перспективный эксперимент с гамма-спектрометром на борту мобильного космического аппарата для изучения элементного состава вещества Луны, Марса и других небесных тел без атмосферы или

- с тонкой атмосферой // Космич. исслед. 2021. Т. 59. № 1. С. 44–50. DOI: 10.31857/S0023420621010015.
- Митрофанов И. Г., Головин Д. В., Санин А. Б. и др.* Результаты экспериментальной верификации гамма-спектрометра с мечеными заряженными частицами на протонном пучке ускорителя ОИЯИ // Письма в журнал «Физика элементарных частиц и атомного ядра». 2019. Т. 16. № 3. С. 233–239.
- Мокроусов М. И., Митрофанов И. Г., Аникин А. А. и др.* Лабораторные отработки космического эксперимента по гамма-спектрометрии планетного вещества детектором из высокочистого германия с применением метода меченых заряженных частиц // Письма в журнал «Физика элементарных частиц и атомного ядра». 2023 (в печати).
- Adler I., Trombka J. I.* Orbital chemistry — Lunar surface analysis from the X-ray and gamma ray remote sensing experiments // Physics and Chemistry of the Earth. 1977. V. 10. P. 17–43. [https://doi.org/10.1016/0079-1946\(77\)90004-0](https://doi.org/10.1016/0079-1946(77)90004-0).
- Evans L. G., Reedy R. C., Starr R. D. et al.* Analysis of gamma ray spectra measured by Mars Odyssey // J. Geophysical Research: Planets. 2006. V. 111. Iss. E3. Art. No. E03S04. <https://doi.org/10.1029/2005JE002657>.
- Feldman W. C., Barraclough B. L., Fuller K. R. et al.* The Lunar Prospector gamma-ray and neutron spectrometers // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research: Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 1999. V. 422. Iss. 1–3. P. 562–566. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(98\)00934-6](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(98)00934-6).
- Kozyrev A., Mitrofanov I., Owens A. et al.* A comparative study of $\text{LaBr}_3(\text{Ce}^{3+})$ and CeBr_3 based gamma-ray spectrometers for planetary remote sensing applications // Review of Scientific Instruments. 2016. V. 87. Art. No. 085112. <https://doi.org/10.1063/1.4958897>.
- Mitrofanov I. G., Golovin D. V., Sanin A. B. et al.* First results for laboratory tests of a concept of space Gamma-spectrometer with tagged protons method at the JINR particle accelerator // Physics of Particles and Nuclei Letters. 2019. V. 16. P. 251–255. DOI: 10.1134/S1547477119030142.
- Mitrofanov I. G., Litvak M. L., Golovin D. V. et al.* (2020a) Gamma spectrometry of composite models of planetary matter on the JINR accelerator proton beam with tagged protons // Physics of Particles and Nuclei Letters. 2020. V. 17. P. 348–357. DOI: 10.1134/S1547477120030115.
- Mitrofanov I. G., Sanin A. B., Nikiforov S. Y. et al.* (2020b) Cosmic gamma-ray spectrometer with tagged charged particles of galactic cosmic rays // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research: Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2020. V. 953. Art. No. 163148. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.163148>.
- Mitrofanov I. G., Litvak M. L., Sanin A. B. et al.* Laboratory demonstration of space experiment for spectrometry of planetary gamma-rays with tags of Galactic Cosmic Rays producing them // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research: Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2021. V. 1003. Art. No. 165286. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165286>.
- Prettyman T. H., Feldman W. C., McSween Jr. H. Y. et al.* Dawn's Gamma Ray and Neutron Detector // Space Science Reviews. 2011. V. 163. P. 371–459. DOI: 10.1007/s11214-011-9862-0.
- Quarati F. G. A., Dorenbos P., van der Biezen J. et al.* Scintillation and detection characteristics of high-sensitivity CeBr_3 gamma-ray spectrometers // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research: Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2013. V. 729. P. 596–604. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2013.08.005>.
- Vinogradov A. P., Surkov Yu. A., Chernov G. M. et al.* Measurements of Gamma Radiation of the Lunar Surface by the Luna-10 Space Station // Cosmic Research. 1966. V. 4. P. 751.

TESTS OF A DETECTOR MADE OF HIGHLY PURE GERMANIUM AS PART OF A LABORATORY MODEL OF A SPACE GAMMA-RAY SPECTROMETER WITH TAGGED CHARGED PARTICLES ON THE PROTON BEAM OF THE JINR PHASOTRON

A. A. Anikin¹, M. I. Mokrousov¹, I. G. Mitrofanov¹, D. V. Golovin¹, A. S. Kozyrev¹, M. L. Litvak¹, S. Yu. Nikiforov¹, A. B. Sanin¹, G. N. Timoshenko², V. N. Shvetsov², E. E. Pavlik²

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

² Joint Institute for Nuclear Research (JINR), Dubna, Russia

An experiment on the proton beam of the JINR Phasotron with a laboratory prototype of a space-based gamma-ray spectrometer with tagged charged particles (GRS-TCP) with a semiconductor detector made of highly pure germanium and the results of the obtained measurements are considered. It is shown that the configuration of the space gamma-ray spectrometer with a semiconductor detector is the most effective for studying the composition of the near-surface soil of a celestial body from the board of a lander than with a scintillation one. The high spectral resolution of high-purity germanium makes it possible to detect nuclear lines with maximum sensitivity for a detector with a given mass, and the use of the “tagged charged particles” method makes it possible to practically eliminate the intrinsic background from the spacecraft and significantly increase the spatial resolution of the gamma spectrometer.

Keywords: gamma rays, cosmic rays, nuclear lines, chemical composition of planetary matter, planets, Moon, space research, semiconductor detector, highly pure germanium

Anikin Artem — engineer, student, a.anikin@np.cosmos.ru

Mokrousov Maksim — head of the laboratory, candidate of physical and mathematical sciences

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

Golovin Dmitriy — researcher

Kozyrev Alexander — researcher, candidate of physical and mathematical sciences

Litvak Maksim — head of the laboratory, doctor of physical and mathematical sciences

Nikiforov Sergei — researcher

Sanin Anton — leading researcher, candidate of physical and mathematical sciences

Timoshenko Gennady — deputy director, doctor of physical and mathematical sciences

Shvetsov Valery — deputy director, candidate of physical and mathematical sciences

Pavlik Evgeny — senior engineer

ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТОВ ОКРУЖЕНИЯ НА СТАНДАРТИЗАЦИЮ СВЕРХНОВЫХ ТИПА Ia И КОСМОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

А. Ю. Балута¹, М. В. Пружинская²

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (МГУ),
Физический факультет, Москва, Россия

² Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга
Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (ГАИШ)
Москва, Россия

Стандартизация сверхновых типа Ia (СН Ia) необходима для более точного измерения космологических параметров Вселенной с помощью диаграммы Хаббла. В модели сверхновых SALT2 используется два параметра стандартизации — параметр цвета c и параметр растяжения x_1 . Известно, что светимость сверхновых также зависит от морфологии родительской галактики и других параметров окружения. В нашей работе мы воспроизводим фит диаграммы Хаббла для данных Pantheon, а также исследуем возможность введения различных уравнений стандартизации для сверхновых, взорвавшихся в галактиках ранних и поздних морфологических типов.

Ключевые слова: сверхновые, космология, космологические параметры, шкала расстояний

ВВЕДЕНИЕ

Сверхновые типа Ia (СН Ia) известны как «стандартные свечи» — индикаторы космологических расстояний. В 2011 г. астрофизики Сол Перлмуттер (*англ.* Saul Perlmutter), Брайан Шмидт (*англ.* Brian Schmidt) и Адам Рисс (*англ.* Adam Riess) получили Нобелевскую премию по физике «за открытие ускоренного расширения Вселенной посредством наблюдения далёких сверхновых» (Perlmutter et al., 1999; Riess et al., 1998). На самом деле, более правильно будет называть СН Ia стандартизируемыми объектами. По мере накопления наблюдательных данных учёные (Vaade, 1938) обнаружили универсальность их кривых блеска: быстрый за 2–3 дня рост к максимуму и затем падение на $\sim 3^m$ за каждые 25–30 дней. В 1970-х гг. советский учёный Ю. П. Псковский выявил эмпирическую зависимость, связывающую светимость СН с параметрами её кривой блеска (Pskovskii, 1977). После этого было предложено множество моделей стандартизации сверхновых Ia с использованием различных параметров кривой блеска.

В нашей работе мы используем одну из них — модель SALT2 (Guy et al., 2007) с двумя параметрами кривой блеска: цветом $c = (B - V)_{\max} - \langle B - V \rangle$ и растяжением x_1 кривой блеска СН. Наблюдаемый модуль расстояния μ с учётом уравнения стандартизации представлен следующим образом:

$$\mu = m_B - M_B + \alpha x_1 - \beta c + \Delta_M + \Delta_B, \quad (1)$$

где m_B — видимая звёздная величина в максимуме в фильтре B ; α , β , M_B — параметры уравнения стандартизации; Δ_M — поправка за звёздную массу родительской галактики; Δ_B — поправка, учитывающая эффекты селекции.

Эти поправки не являются оптимальными, поскольку не позволяют полностью избавиться от дисперсии модуля расстояния на диаграмме Хаббла. Существует остаточная дисперсия в светимости сверхновых, которая для одного из самых недавних космологических анализов составляет $\sim 0,1^m$ (Scolnic et al.,

Балута Анастасия Юрьевна — студентка, nast0307@mail.ru

Пружинская Мария Викторовна — кандидат физико-математических наук

2021). Мы считаем, что остаточный разброс может быть связан с эффектами окружения, которые не учитываются в текущих моделях стандартизации сверхновых. Поэтому нашу работу мы посвятили влиянию параметров окружения на стандартизацию СН Ia.

ДАННЫЕ И МЕТОДОЛОГИЯ

Цель настоящей работы заключается в воспроизведении диаграммы Хаббла (зависимости модуля расстояния от красного смещения) на основе данных выборки Pantheon (Scolnic et al., 2018), а также в улучшении уравнения стандартизации сверхновых с учётом окружения сверхновых. Мы исследуем возможность использования различных уравнений стандартизации для двух популяций сверхновых: тех, что взорвались в галактиках ранних (E-S0/a) и поздних (Sa-Sd, Ir) морфологических типов.

Выборка сверхновых типа Ia Pantheon состоит из 1047 спектрально подтверждённых СН Ia. Также в работе (Pruzhinskaya et al., 2020) были исследованы родительские галактики для 330 сверхновых из нашей выборки. Мы будем использовать эти данные.

Из литературы (Audcent-Ross et al., 2020; Lampeitl et al., 2010; Roman et al., 2018; Sullivan et al., 2006, 2010; Pruzhinskaya et al., 2020) известно, что светимость сверхновых зависит от параметров родительской галактики (например, металличности, звёздной массы, скорости звездообразования, локального цвета и др.). В нашей работе мы изучаем влияние двух поправок на космологический анализ на примере выборки СН Ia Pantheon — поправки за звёздную массу и морфологический тип родительской галактики.

ДИАГРАММА ХАББЛА

Для начала необходимо нанести все сверхновые выборки Pantheon на диаграмму Хаббла (рис. 1, см. с. 27). Далее мы находим значения параметров стандартизации сверхновых (α , β , M_B) и космологических параметров (Ω_m), минимизируя разницы наблюдаемых (уравнение (1)) и теоретических модулей расстояния СН. При этом мы проводим исследования в предположении плоской Λ CDM (Ω_m Lambda-Cold Dark Matter) космологии. Значение постоянной Хаббла соответствует одной из последних работ: $H_0 = 73,04 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{Мпк}^{-1}$ (Reiss et al., 2022). Полученные нами результаты представлены в таблице и совпадают с оригинальной работой (Scolnic et al., 2018).

Сравнение полученных значений свободных параметров фита диаграммы Хаббла с работой Scolnic et al., 2018 для $H_0 = 73,04 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{Мпк}^{-1}$

Параметр	Настоящая работа	(Scolnic et al., 2018)
Ω_m	$0,302 \pm 0,028$	$0,298 \pm 0,022$
M_B	$-19,204 \pm 0,016$	—
α	$0,155 \pm 0,007$	$0,157 \pm 0,007$
β	$3,687 \pm 0,107$	$3,689 \pm 0,089$
γ	$0,055 \pm 0,012$	$0,054 \pm 0,009$

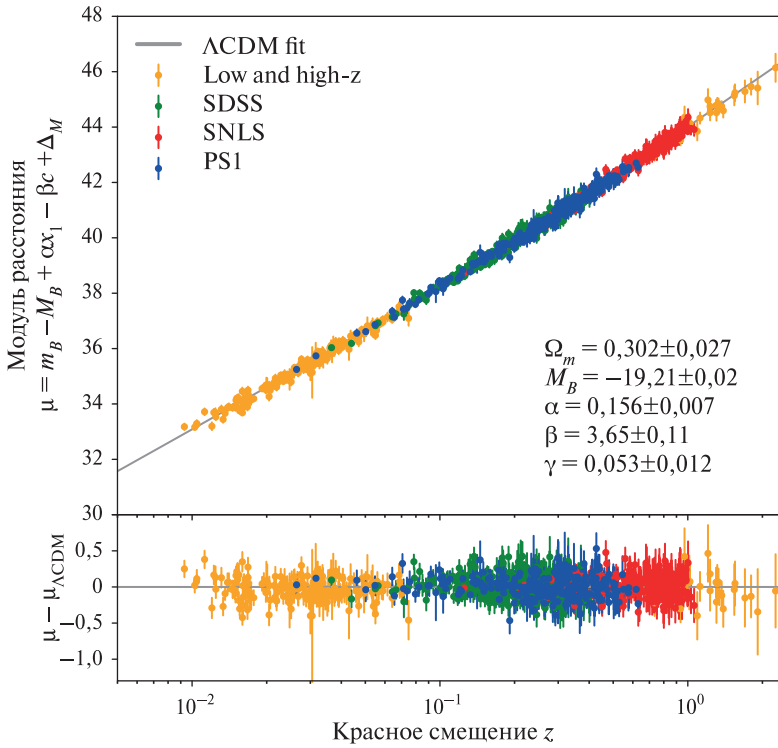


Рис. 1. Диаграмма Хаббла для выборки сверхновых типа Ia Pantheon

ВВЕДЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ УРАВНЕНИЙ СТАНДАРТИЗАЦИИ

В работе (Pruzhinskaya et al., 2020) найдена зависимость между параметром растяжения x_1 и морфологическим типом родительской галактики СН Ia: для сверхновых в галактиках раннего типа характерны меньшие значения параметра растяжения по сравнению со сверхновыми в галактиках позднего типа. Интересно посмотреть, будут ли разными углы наклона зависимости M_B^* — стандартизованная абсолютная звёздная величина — от параметров цвета и растяжения для двух популяций сверхновых. В случае наблюдения характерного излома на графике мы можем сделать вывод о целесообразности введения различных уравнений стандартизации сверхновых в галактиках различных типов:

$$\mu = m_B - M_B + \alpha^{\text{ET}} x_1^{\text{ET}} - \beta^{\text{ET}} c^{\text{ET}} + \alpha^{\text{LT}} x_1^{\text{LT}} - \beta^{\text{LT}} c^{\text{LT}},$$

где параметры стандартизации α^{ET} , x_1^{ET} , β^{ET} , c^{ET} относятся к сверхновым галактик ранних типов; α^{LT} , x_1^{LT} , β^{LT} , c^{LT} — к галактикам поздних типов.

На график зависимости светимости от параметров цвета (*англ.* color) и растяжения (*англ.* stretch) мы нанесли 330 СН Ia с известными морфологическими типами родительских галактик (рис. 2, см. с. 28). Значения α и β для расчёта абсолютных звёздных величин СН Ia были взяты из таблицы.

Мы не наблюдаем существенных различий в средних значениях угла наклона для двух популяций сверхновых. Однако на верхнем графике зависимости от цвета наблюдается сдвиг — он обусловлен тем, что параметр растяжения для старого окружения меньше, чем для молодого.

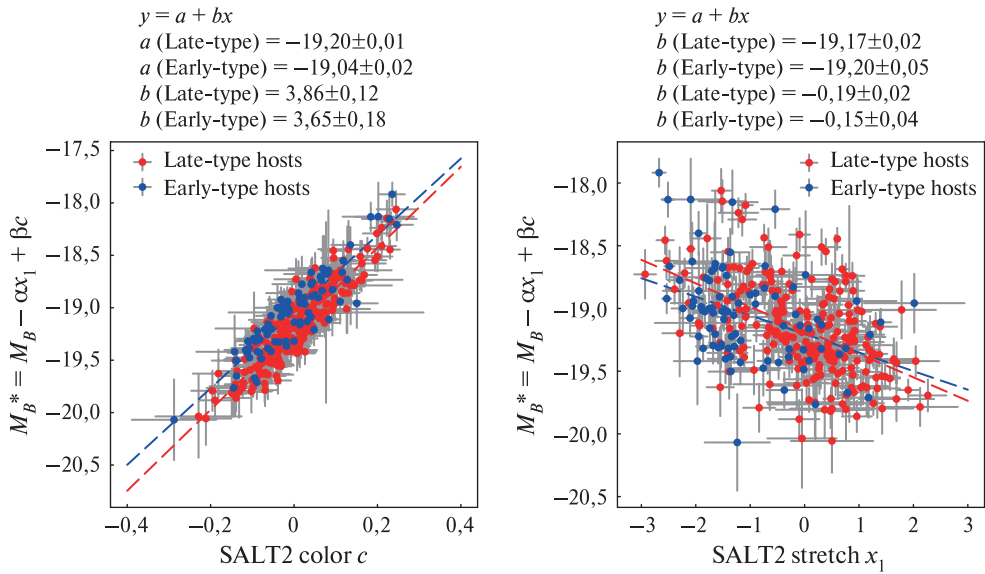


Рис. 2. Зависимость между абсолютной звёздной величиной СН Ia выборки Pantheon и параметрами цвета и растяжения. Синим цветом обозначены сверхновые, взорвавшиеся в старом окружении, красным — сверхновые в более молодом окружении, где идут процессы звездообразования

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОКРУЖЕНИЯ НА СТАНДАРТИЗАЦИЮ СН IA

Поскольку мы исследуем особенности окружения сверхновых, отдельно аппроксимируем диаграммы Хаббла для СН, взорвавшихся в галактиках ранних типов, и для СН, взорвавшихся в галактиках поздних типов.

Сначала выполним фит диаграммы Хаббла для двух подвыборок сверхновых без учёта поправки за окружение. Космологический параметр Ω_m фиксируем к значению, полученному в таблице для всей выборки сверхновых. Результаты в виде графиков с взаимными попарными корреляциями параметров стандартизации в пределах 1σ представлены на рис. 3 (см. с. 29). Синим цветом обозначены результаты аппроксимации для СН в старом окружении (*англ.* Early-type), красным — для СН в молодом и активном окружении (*англ.* Late-type). Зелёными звёздочками обозначили параметры стандартизации, полученные для всей выборки из 1048 сверхновых Pantheon. При этом для двух популяций мы наблюдаем явные несовпадения в значениях M_B в зависимости от параметров, соответствующих цвету и растяжению кривой блеска СН Ia.

Теперь выполним аналогичный анализ, но с учётом поправки за звёздную массу родительской галактики. Данная поправка вводится как добавочный член в случае, если масса родительской галактики сверхновой превышает $10^{10} M_\odot$. Эта поправка вводится через параметр γ . Полученные результаты представлены на рис. 4 (см. с. 29).

Мы видим, что даже после учёта поправки за окружения разброс между параметрами стандартизации для разных популяций СН Ia сохраняется. Это можно увидеть также на графике зависимости разности наблюдаемых и теоретических модулей расстояния сверхновых Pantheon от морфологических типов родительских галактик СН. На рис. 5 (см. с. 30) точки — значения для отдельных

сверхновых, квадраты — средние значения. Слева на горизонтальной оси лежат галактики ранних морфологических типов, справа — галактики поздних типов. Средние значения Δ_μ для двух подвыборок сверхновых представлены панели справа.

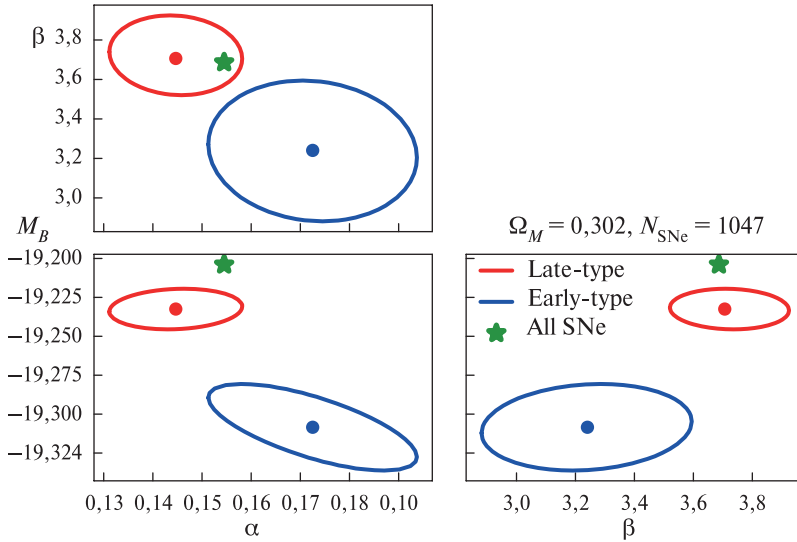


Рис. 3. Взаимные корреляции между всеми параметрами стандартизации без учёта окружения

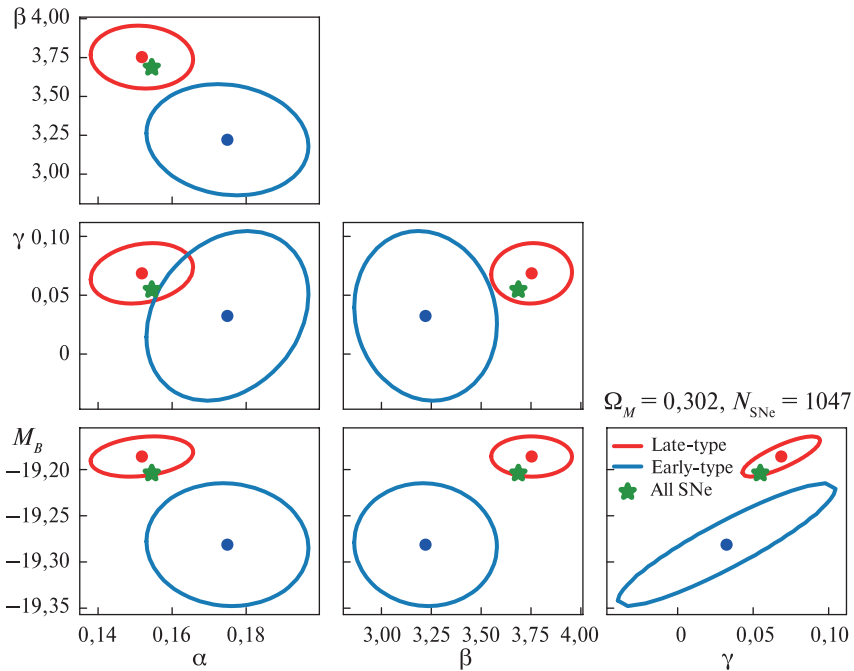


Рис. 4. Взаимные корреляции между всеми параметрами стандартизации с учётом поправки за звёздную массу родительской галактики

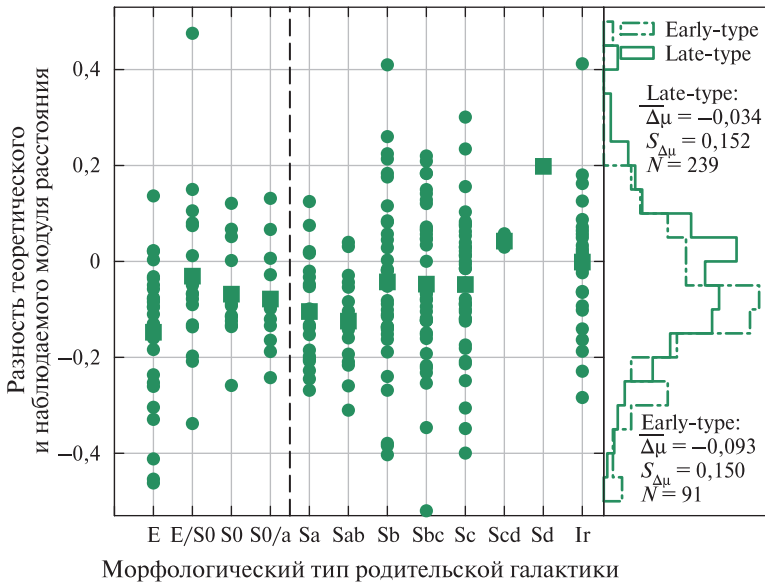


Рис. 5. Зависимость разности наблюдаемых и теоретических модулей расстояния сверхновых Pantheon от морфологического типа родительской галактики

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В ходе нашего исследования мы успешно аппроксимировали диаграмму Хаббла для выборки сверхновых типа Ia Pantheon. Это было сделано как для всей выборки в целом, так и для отдельных групп сверхновых в зависимости от типа их окружения — старого и молодого.

Однако остаётся открытым вопрос о введении различных параметров стандартизации, учитывающих окружение сверхновых. Построенные графики показали, что среднее абсолютное значение светимости сверхновых в максимуме может отличаться в зависимости от типа родительской галактики. В частности, сверхновые в галактиках поздних типов имеют большие значения параметра растяжения x_1 по сравнению со сверхновыми в старом окружении. Это приводит к наличию сдвига на графике зависимости от цвета (см. рис. 2). В дальнейшем мы планируем продолжать исследование возможности введения различных уравнений стандартизации для разных популяций сверхновых: в качестве критерия отнесения к той или иной популяции может быть рассмотрен не только морфологический тип родительской галактики, но и галактоцентрическое расстояние.

На основе рис. 3–5 установлено, что только поправка за звёздную массу родительских галактик сверхновых Pantheon не становится достаточной, и для полной стандартизации необходимо применять другие поправки, связанные с окружением сверхновых.

ЛИТЕРАТУРА

Audcent-Ross F. M., Meurer G. R., Audcent J. R. et al. The radial distribution of supernovae compared to star formation tracers // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2020. V. 492. Iss. 1. P. 848–862. <https://doi.org/10.1093/mnras/stz3282>.

- Baade W.* The Absolute Photographic Magnitude of Supernovae // *Astrophysical J.* 1938. V. 88. Art. No. 285. DOI: 10.1086/143983.
- Guy J., Astier P., Baumont S. et al.* SALT2: using distant supernovae to improve the use of type Ia supernovae as distance indicators // *Astronomy and Astrophysics.* 2007. V. 466. No. 1. P. 11–21. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20066930>.
- Lampeitl H., Smith M., Nichol R. C. et al.* The Effect of Host Galaxies on Type Ia Supernovae in the SDSS-II Supernova Survey // *Astrophysical J.* 2010. V. 722. No. 1. P. 566–576. DOI: 10.1088/0004-637X/722/1/566.
- Perlmutter S., Aldering G., Goldhaber G. et al.* Measurements of Ω and Λ from 42 High-Redshift Supernovae // *Astrophysical J.* 1999. V. 517. Iss. 2. P. 565–586. DOI: 10.1086/307221.
- Pruzhinskaya M. V., Novinskaya A. K., Pauna N., Rosnet P.* The dependence of Type Ia Supernovae SALT2 light-curve parameters on host galaxy morphology // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* 2020. V. 499. Iss. 4. P. 5121–5135. <https://doi.org/10.1093/mnras/staa3173>.
- Pskovskii Iu. P.* Light curves, color curves, and expansion velocity of type I supernovae as functions of the rate of brightness decline // *Soviet Astronomy.* 1977. V. 21. P. 675–682 (Translation. *Astronomicheskii Zhurnal.* 1977. V. 54. P. 1188–1201).
- Reiss A., Filipenko A. V., Challis P. et al.* Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant // *Astronomical J.* 1998. V. 116. No. 3. P. 1009–1038. DOI: 10.1086/300499.
- Reiss A., Yuan W., Macri L. M. et al.* Comprehensive Measurement of the Local Value of the Hubble Constant with 1 km/s/Mpc uncertainty from the Hubble Space Telescope and the SH0ES Team // *The Astrophysical J. Letters.* 2022. V. 934. No. 1. Art. No. L7. DOI: 10.3847/2041-8213/ac5c5b.
- Roman M., Hardin D., Betoule M. et al.* Dependence of Type Ia supernova luminosities on their local environment // *Astronomy and Astrophysics.* 2018. V. 615. P. A68. 24 p. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201731425>.
- Scolnic D. M., Jones D. O., Rest A. et al.* The Complete Light-curve Sample of Spectroscopically Confirmed SNe Ia from Pan-STARRS1 and Cosmological Constraints from the Combined Pantheon Sample // *Astrophysical J.* 2018. V. 859. No. 2. Art. No. 101. DOI: 10.3847/1538-4357/aab9bb.
- Scolnic D., Brout D., Carr A. et al.* The Pantheon+ Analysis: The Full Data Set and Light-curve Release // *Astrophysical J.* 2021. V. 938. No. 2. Art. No. 113. DOI: 10.3847/1538-4357/ac8b7a.
- Sullivan M., Le Borgne D., Pritchett C. J. et al.* Rates and Properties of Type Ia Supernovae as a Function of Mass and Star Formation in Their Host Galaxies // *Astrophysical J.* 2006. V. 648. No. 2. P. 868–883. DOI: 10.1086/506137.
- Sullivan M., Conley A., Howell D. A. et al.* The dependence of Type Ia Supernovae luminosities on their host galaxies // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* 2010. V. 406. Iss. 2. P. 782–802. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.16731.x>.

THE ENVIRONMENTAL INFLUENCE ON TYPE IA SUPERNOVAE STANDARDIZATION AND COSMOLOGICAL ANALYSIS

A. Y. Baluta¹, M. V. Pruzhinskaya²

¹ Lomonosov Moscow State University (MSU), Faculty of Physics, Moscow, Russia

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

Standardization of Type Ia Supernovae (SNe Ia) is necessary for a more accurate measurement of the cosmological parameters of the Universe using the Hubble diagram. In the SALT 2 SNe Ia light-curve fitting model 2 standardization parameters are used — the color parameter c and the

stretch parameter x_1 . It is well known that SN Ia luminosity depends on the host galaxy morphology and other environmental parameters. In our work we reproduce the Hubble diagram fit according to Pantheon data, and also explore the possibility of introducing various standardization equations for supernovae exploded in early-type and late-type galaxies.

Keywords: supernovae: general, cosmology, cosmological parameters, distance scale

Baluta Anastasia Yurievna — student, nast0307@mail.ru

Pruzhinskaya Maria Victorovna — candidate of physical and mathematical sciences

ОБРАБОТКА ДАННЫХ СПУТНИКОВЫХ МИССИЙ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ МАРСА

А. В. Батов, А. М. Сальников

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН), Москва, Россия
Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН)
Москва, Россия

Для построения аналитических моделей магнитного поля Марса на различных высотах с применением регионального метода S-аппроксимации и возможности их использования для моделирования магнитного поля марсианской коры с высоким разрешением проводились выборки из обширного массива исходных данных измерений магнитометра спутниковой миссии MAVEN. Использован подход, позволяющий разбивать сферическую поверхность, по которой двигаются подспутниковые точки, на равновеликие ячейки, которые легко визуализировать и интерпретировать как в прямоугольной, так и в сферической системах координат.

Ключевые слова: спутниковые данные, магнитное поле, выборка, аппроксимация, планеты, Марс

На Марсе отсутствует глобальное магнитное поле, как на Земле, однако в некоторых местах наблюдается остаточная намагниченность, достигающая нескольких тысяч нанотесла. Последняя современная модель магнитного поля Марса (Langlais et al., 2019) использует данные магнитометров спутниковых миссии MGS (*англ.* Mars Global Surveyor) и MAVEN (*англ.* Mars Atmosphere and Volatile EvolutioN). Измеренные значения магнитного потенциала на месте посадки миссии InSight (*англ.* Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport) значительно превысили предсказанные модельные значения (Johnson et al., 2020), в то время как для марсохода «Чжужун» миссии «Тяньвэнь-1» наоборот, измеренные значения магнитного потенциала оказались существенно ниже предсказанных модельных значений (Du et al., 2023).

Космический аппарат MAVEN имеет неполярную орбиту, обеспечивающую за один земной год трёхмерное охватывание плазмы в ближайшем окружении Марса, с наклоном 74° и периодом 4,5 ч. Перигеум близок к 150 км, но иногда понижается до 125 км и прецессирует как по широте, так и по местному времени. Аппарат оснащён двумя векторными магнитометрами, расположенными на концах двух солнечных батарей и проводящими измерения с точностью около 1 нТл на компонент. Результаты измерений публикуются в открытом доступе на сайте Planetary Plasma Interaction системы Planetary Data System (<https://pds-rpi.igpp.ucla.edu/search/?sc=MAVEN&i=MAG>).

Комплекты данных состоят из ASCII-файлов, поставляемых экспериментом MAG (*англ.* MAGnetometer), и содержат временные ряды векторов магнитного поля в геофизических единицах (нТл), полученных с помощью прибора Fluxgate Magnetometer на борту космического корабля MAVEN. Данные в файлах откалиброваны (скорректированы с учётом инструментальных эффектов и эффектов космического корабля) и преобразованы в физически значимые системы координат. Из нескольких доступных комплектов данных мы выбрали наиболее компактный вариант, где данные субдискретизированы до 1 с и выражены в планетоцентрических координатах. В нашей работе используются данные

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

Сальников Антон Михайлович — научный сотрудник, amsalnikov@hotmail.com

измерений за 2955 дней с 10 октября 2014 г. по 15 ноября 2022 г., что составляет более 255 млн измерений.

Таким образом, при моделировании магнитного поля Марса возникает проблема, связанная с огромным количеством доступных измерений и необходимостью определения процедур выборки данных. Чтобы справиться с этой проблемой, измерения уменьшаются количественно, а также оптимизируются с целью исключения влияния внешних полей и равномерного пространственного распределения, что представляется одним из логичных требований выбранного аппроксимационного подхода. Данные для выборок можно группировать в относительно небольших объёмах, где можно усреднять изменяющиеся во времени магнитные поля, дополнительно использовать только ночные выборки, а также пользоваться регулярными сетками, чтобы распределение данных было как можно более однородным в пространстве.

Для разделения сферической поверхности на ячейки мы использовали метод SREAG (англ. Spherical Rectangular Equal-Area Grid) (Malkin, 2019). Этот метод прост в использовании и основан на разделении сферы на широтные кольца почти постоянной ширины, а затем делении каждого кольца на ячейки равной площади. Такой подход позволяет разбить сферическую поверхность на прямоугольные ячейки с ориентированными по широте и долготе границами, обеспечивая приближённо квадратные ячейки в экваториальных кольцах и равномерную ширину широтных колец. Эти объединённые данные легко визуализировать и интерпретировать в рамках прямоугольной и сферической систем координат, что естественно для астрономии и геодезии. Метод позволяет строить сетки с произвольным количеством колец и, следовательно, с широким и теоретически неограниченным диапазоном размеров ячеек.

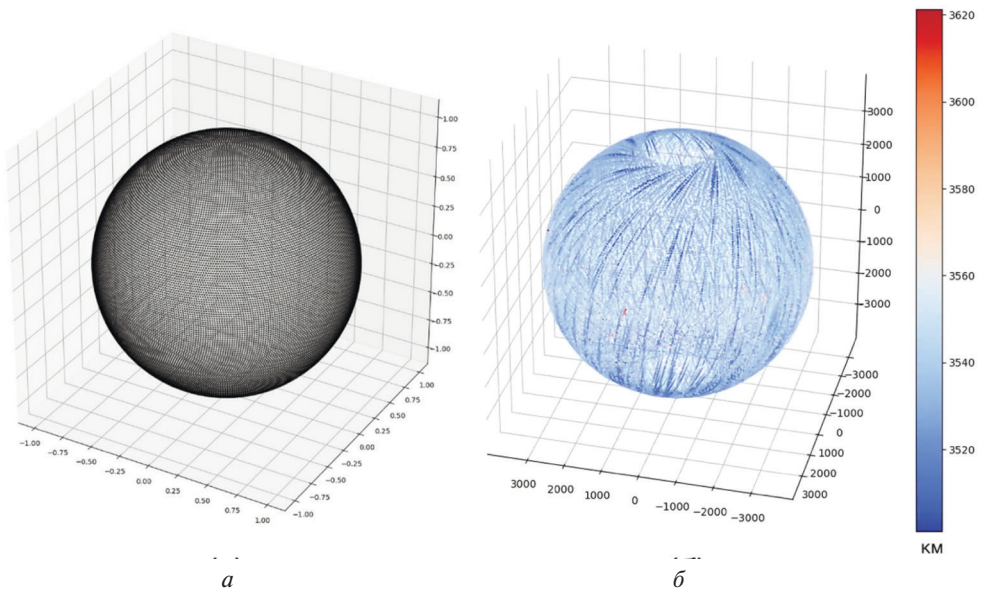


Рис. 1. Единичная сферическая сетка на 180 слоёв (а) и результат выборки измерений (расстояния до центра планеты) на минимальных высотах (б)

В качестве примера представлена единичная сферическая сетка (рис. 1а) и выборка измерений векторов магнитного поля, проведённых на минимальных высотах и равномерно распределённых на сферической сетке (рис. 1б).

Для этого с помощью описанного выше метода SREAG была построена сферическая прямоугольная равновеликая сетка единичного радиуса, состоящая из 180 колец шириной 1° и 41 252 ячеек соответственно (см. рис. 1а). Для каждого измерения из всего доступного комплекта данных проводился поиск ячейки на сфере, куда вертикально проецировалась точка с координатами спутника, и вычислялось расстояние до такой ячейки. Из всех измерений, проведённых над каждой ячейкой, выбиралось одно с минимальным вычисленным расстоянием до ячейки (см. рис. 1б). Для ускорения расчётов точки с координатами центров ячеек построенной сетки хранились в трёхмерном двоичном дереве поиска (Maneewongvatana et al., 2008).

Цель нашего исследования состоит в построении модели магнитного поля Марса модифицированным региональным методом S-аппроксимаций (Stepanova et al., 2019). Этот метод позволяет аппроксимировать известные компоненты магнитного поля суммой простых и двойных слоёв, распределённых на двух симметричных сферах различного диаметра. Такой подход позволяет создавать приближённые представления функций распределения плотности эквивалентных носителей магнитных масс в рамках вариационного подхода в методе линейных интегральных представлений и строить аналитические продолжения магнитного поля Марса на различных высотах. Метод может быть использован для построения модели магнитного поля марсианской коры с высоким разрешением.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-27-00392 (<https://rscf.ru/project/23-27-00392/>).

ЛИТЕРАТУРА

- Du A., Ge Y., Wang H. et al. Ground magnetic survey on Mars from the Zhurong rover // *Nature Astronomy*. 2023. <https://doi.org/10.1038/s41550-023-02008-7>.
- Johnson C. L., Mittelholz A., Langlais B. et al. Crustal and time-varying magnetic fields at the InSight landing site on Mars // *Nature Geoscience*. 2020. V. 13. P. 199–204. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0537-x>.
- Langlais B., Thébaud E., Houliéz A. et al. A new model of the crustal magnetic field of Mars using MGS and MAVEN // *J. Geophysical Research: Planets*. 2019. V. 124. P. 1542–1569. <https://doi.org/10.1029/2018JE005854>.
- Malkin Z. A. New Equal-area Isolatitudinal Grid on a Spherical Surface // *The Astronomical J.* 2019. V. 158. No. 4. <https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab3a44>
- Maneewongvatana S., Mount D. Analysis of approximate nearest neighbor searching with clustered point sets // *Data Structures, Near Neighbor Searches, and Methodology: Fifth and Sixth DIMACS Implementation Challenges*. 2008. P. 105–123. <https://doi.org/10.1090/dimacs/059/06>
- Stepanova I. E., Gudkova T. V., Batov A. V. Method of S-, and R-approximations in solving the problems of geophysics: application for Mars // *10M-S3*. 2019.

PROCESSING DATA FROM SATELLITE MISSIONS TO BUILD A MODEL OF THE MAGNETIC FIELD OF MARS

A. V. Batov, A. M. Salnikov

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

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

Sampling was made from a vast array of initial measurement data of the magnetometer of the MAVEN satellite mission. An approach was used that allows dividing a spherical surface along which sub-satellite points move into equal-sized cells that are easy to visualize and interpret both in rectangular and spherical coordinate systems. The samples were used to build analytical models of the Martian magnetic field at various altitudes using the regional S-approximation method and are planned to be used to build a high-resolution model of the Martian crustal magnetic field.

Keywords: satellite data, magnetic field, sampling, approximation, planets, Mars

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

Salnikov Anton Mickhailovich — researcher, amsalnikov@hotmail.com

ПРОБЛЕМА ПОДХОДА TRANSFER LEARNING В ЗАДАЧЕ СЕГМЕНТАЦИИ ОБЛАЧНЫХ И СНЕЖНЫХ ПОКРОВОВ ПО ДАННЫМ СО СПУТНИКА ДЗЗ «ЭЛЕКТРО-Л1»

Н. В. Беляков

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

Предлагается решение задачи сегментации облачности и снежного покрова со снимков с геостационарного спутника «Электро-Л1» через подход transfer learning — перенос обучения с одной обучающей выборки для нейросети на другую. Выделение областей с облачным покровом и снежными участками происходит посредством нейронной сети, являющейся модификацией модели U-Net. В качестве данных для обучения используется датасет с первого спутника китайской комплексной системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) Gaofen-1 («Гаофэнь-1») (датасет Levir_CS) с разрешением снимков участков Земли 160 м в четырёх спектральных каналах R, G, B (*англ.* red, green, blue) и ближнем инфракрасном диапазоне (*англ.* near-infrared — NIR). В качестве дополнительной информации на вход модели подаются карты высоты поверхности и привязка пикселей к географическим координатам широты и долготы. Проблема применения обученной модели для разметки облачности и снега для снимков с космического аппарата (КА) «Электро-Л1» и других КА серии «Электро-Л» заключается в разном разрешении снимков, разных спектральных диапазонах съёмочной аппаратуры, в неточности при разметке облачности и снега в обучающей выборке. В работе осуществляется преобразование данных с «Электро-Л1» под формат, схожий со снимками с Landsat-8 и Gaofen-1. Для получения лучшего качества сегментации используется композиция результатов моделей сегментации и сверхточного классификатора, обученного определять класс центрального пикселя текстур 11×11 с многозонального сканирующего устройства гидрометеорологического обеспечения МСУ-ГС.

Ключевые слова: КА «Электро-Л», сегментация облачности и снежного покрова, сверхточные нейронные сети, МСУ-ГС, геостационарный гидрометеорологический КА, мультиспектральные снимки, космические исследования, transfer learning, дистанционное зондирование Земли

ВВЕДЕНИЕ

Оперативность получения информации и относительно высокое пространственное разрешение позволяют рассматривать геостационарные спутники в качестве основного инструмента глобального мониторинга состояния окружающей среды, климата и атмосферы. Приборы, устанавливаемые на геостационарные космические аппараты (КА), позволяют производить съёмку в широком диапазоне длин волн от видимого до длинноволнового инфракрасного (ИК) излучения. Это даёт возможность решать ряд задач, связанных с определением опасных метеорологических явлений, мониторингом состояния атмосферы и др. Эти и многие другие задачи подразумевают использование маски облачности, а также маски снежного покрова, к которым выдвигается ряд требований. Расчёт маски должен выполняться за время, достаточное для работы в оперативном режиме с учётом высокой частоты съёмки (10–15 мин); маски должны рассчитываться для различных климатических условий. Кроме того, некоторые задачи предполагают расчёт маски не только в дневное, но и в ночное время суток. Задачи мониторинга снежных покровов и облачности являются очень востребованными

на сегодняшний день для улучшения точности прогноза погоды, оценки изменения глобального климата, уровня аэрозоля в атмосфере, а также для улучшения качества спутниковой съёмки.

Исходя из задач, решаемых в настоящее время в Научно-исследовательском центре космической гидрометеорологии «Планета» и центрах оперативного мониторинга Земли, возникает такая же потребность в создании алгоритмов получения масок облачности и снежного покрова, учитывающих выше обозначенные требования. Рассматриваемый в настоящей работе подход основан на применении нейросетевых свёрточных моделей сегментации, использующей спектральные и пространственные признаки, что позволяет извлечь из спутниковых снимков наибольший объём информации, полезной для выделения облачности и снега. Метод сегментации основывается на опыте ранее проведённых исследований в данной области для спутников дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) (Mohajerani et al., 2020; Wu et al., 2021; Yin et al., 2022) и оптимизирован для многозонального сканирующего устройства гидрометеорологического обеспечения (МСУ-ГС) на КА серии «Электро-Л», что позволяет использовать его в работе для геостационарных спутников в режиме реального времени с таким типом оборудования.

Главной сложностью задачи отделения участков снега от облаков представляется схожесть их спектральных характеристик как в видимом, так и в дальнем ИК диапазонах. Класс суша/вода легко отличим от классов облачности и снега в видимом спектральном диапазоне. Обычно для разделения зон облачности от снежного покрова используются коротковолновые ИК каналы в диапазоне от 1,3 до 1,8 мкм. Из-за отсутствия этих каналов на МСУ-ГС необходимо создать собственный алгоритм, позволяющий эффективно разделять данные классы.

МЕТОДЫ СЕГМЕНТАЦИИ ОБЛАЧНОСТИ И СНЕЖНЫХ ПОКРОВОВ

Семантическая сегментация — процесс, в котором на вход модели подаётся изображение, а на выходе для каждого пикселя формируется метка принадлежности этого пикселя к определённой категории. На сегодняшний день существует несколько подходов по сегментации облачности и снежных покровов по данным спутниковых снимков: методы на основе пороговых значений, статистические методы, подходы на основе машинного обучения и нейросетей.

Подходы на основе пороговых значений оказываются самыми простыми и распространёнными. В их основе лежит спектральный анализ подстилающей поверхности и облачности в каждом пикселе изображения. Результаты применения этих методов легко поддаются физическому обоснованию, но качество их работы сильно зависит от точности подбора пороговых коэффициентов. Процесс подбора этих коэффициентов становится трудоёмким для территорий с различными климатическими условиями и для каждого типа съёмочного оборудования. В сценах, где присутствует снег или оптически тонкая перистая облачность, качество сегментации значительно падает из-за схожести спектральных характеристик снега и ледяных облаков, а также из-за спектральных искажений, возникающих при прохождении излучения сквозь облака.

Статистические методы сегментации облачности и снега базируются на уравнениях регрессии, полученных из статистического анализа спектральных характеристик отражающей способности и яркостной температуры (*англ.* brightness temperature) среди облачных и безоблачных пикселей. На практике эти методы чаще всего используются для предварительного анализа данных и обладают теми же недостатками, что и пороговые методы.

Практика показывает, что нейросетевой подход в сочетании с текстурными и спектральными признаками показывает наибольшую точность в рассматриваемой задаче. Эта методика осложняется получением и сбором точной разметки. Создание масок выступает крайне трудоёмким процессом и допускает вероятность неверной ручной разметки. В ряде работ (Mohajerani et al., 2020; Yin et al., 2022) показано, что улучшение качества разметки в данных (датасеты 38-Cloud, 95-Cloud (Mohajerani et al., 2020)), увеличение размера и разнообразия обучающей выборки позволяют существенно улучшить качество сегментации нейросетевыми моделями.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИМЕЮЩИХСЯ РАБОТ И ОБЗОР ДАТАСЕТОВ

В настоящее время не найдено работ, использующих подход сегментации для мультиспектральных снимков с геостационарных КА в низком разрешении (>1 км). Наиболее близкими известными результатами — работы (Bloshchinskiy et al., 2020) и (Wu et al., 2021). В первой из них используются данные с МСУ-ГС КА «Электро-Л2». Поскольку ни один из спектральных каналов МСУ-ГС не находится в диапазоне 1,3–1,8 мкм, позволившем отличать снег от облаков, берётся набор спектральных каналов на 0,6; 0,7; 0,9; 3,8 и 10,7 мкм (каналы 1–3, 5, 8 (табл. 1)). Такая гамма спектральных каналов позволяет визуально идентифицировать снег и различные типы облаков на изображении, что потенциально даёт возможность модели разделять эти классы. Для ручной разметки используется синтез каналов 0,9; 3,8 и 10,7 мкм, поскольку их спектральные характеристики аналогичны спектральным каналам SEVIRI спутника Meteosat-8, которые использовались в программном обеспечении CAPSAT.

Таблица 1. Характеристики спектральных каналов аппаратуры МСУ-ГС КА «Электро-Л» (полужирным отмечены каналы, используемые в (Bloshchinskiy et al., 2020))

№ канала	Длина волны, мкм	Разрешение, км
1	0,5–0,65	1
2	0,65–0,8	
3	0,8–0,9	
4	3,5–4,0	4
5	5,7–7,0	
6	7,5–8,5	
7	8,2–9,2	
8	9,2–10,2	
9	10,2–11,2	
10	11,2–12,5	

В исследовании (Bloshchinskiy et al., 2020) используется нейросетевой классификатор, работающий на текстурах размером 11×11 пикселей в 5 каналах (см. табл. 1) при разрешении 4 км, и даёт предсказание класса для центрального пикселя. Таким образом, набор данных состоит из отдельных текстур (11, 11, 5) в вышеописанных спектральных каналах, для которых определён класс центрального пикселя. Выборка Electro Textures Dataset состоит из 112 000 текстур

и разделена на 3 подвыборки: обучающую (75 %), валидационную (10 %) и тестовую (15 %).

Текстуры собраны с марта 2018 по март 2019 г. Тестовый датасет составлен из 20 полигонов в диапазоне от 30 до 80° в.д. (зона совпадения спутниковых снимков КА «Электро-Л2» и Meteosat-8) с 9 спутниковых снимков.

Предварительно данные по трём каналам видимого спектра (0,6; 0,7 и 0,9 мкм) были скорректированы с использованием угла зенита Солнца на данный момент съёмки (*англ.* zenith solar angle, ZSA), что позволяет нивелировать эффект затенения на снимках из-за разного местоположения Солнца относительно КА в каждый момент съёмки:

$$\text{Rad}_{\text{ZSA}} = \frac{\text{Rad}}{\cos(\text{ZSA})}, \quad (1)$$

где Rad — текущее значение излучения в определённом спектральном канале. Спектральные ИК-каналы с длинами волн 3,8 и 10,7 мкм остались неизменными, так как содержат только температурные характеристики. Для обучения и валидации модели классификатора значения всех каналов были линейно масштабированы на отрезок [0, 1]. Отметим, что работа (Bloschinskiy et al., 2020) не использует географическую информацию о привязке текстур к широте, долготе и высоте, что потенциально даёт возможность улучшения результатов данной работы.

Для оценки качества классификации текстур используются метрики F_1 и FAR (*англ.* False Alarm Ratio):

$$F_1 = \frac{2\text{TP}}{(2\text{TP} + \text{FP} + \text{FN})}, \quad \text{FAR} = \frac{N_{\text{wrong}}}{N_{\text{all}}}, \quad (2)$$

где TP — количество верно классифицированных пикселей; FP — количество ложно положительно классифицированных пикселей; FN — количество ложно отрицательно классифицированных пикселей; N_{wrong} — число неверно классифицированных пикселей; N_{all} — всего пикселей в выборке или изображении. Архитектура свёрточного классификатора работы (Bloschinskiy et al., 2020) содержит четыре свёрточных и два линейных слоя (подробное описание архитектуры и параметры обучения см. в работе (Bloschinskiy et al., 2020)).

Отметим, что на тестовых частях снимков в зоне перекрытия «Электро-Л2» и Meteosat-8 авторы получили качество классификации ниже, чем на тестовой части датасета текстур, что свидетельствует о недостаточной полноте используемой выборки.

Авторы работы (Wu et al., 2021) используют мультиспектральные данные Levir_CS с КА ДЗЗ Gaofen-1, имеющего 4 канала (R, G, B, ближний ИК), а также географическую информацию о широте, долготе и высоте каждого пикселя снимка. Изображения в датасете Levir_CS имеют размер 1200×1320 пикселей в разрешении 160 м. Для создания пространственной информации о высоте земной поверхности на снимках использовалась карта высот The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) в разрешении 90 м. Кроме этого, каждое мультиспектральное изображение содержит географическую привязку к широте и долготе, соответствующую картографической проекции геодезической системы WGS84 (*англ.* World Geodetic System 1984). Отметим, что существует заметная корреляция распределения снежного и облачного покрова относительно широты, долготы и высоты на снимках, поэтому использование этой дополнительной информации оправдано.

В качестве архитектуры для сегментации снега и облачности на снимках с Gaofen-1 в работе (Wu et al., 2021) создана модель GeoInfoNet, продемонстри-

ровавшая лучшее качество в сравнении с другими архитектурами (подробное описание архитектуры, её сравнение с другими архитектурами и параметры обучения см. в статье (Wu et al., 2021)). После проверки качества сегментации на тестовой подвыборке Levir_CS авторы получили следующие метрики: $F_{1cloud} = 0,9515$, $F_{1snow} = 0,8393$, $IoU_{snow} = 0,9074$, $FAR = 2,2\%$. Также было проведено исследование на возможность применения обученной модели GeoInfoNet на данных с других КА (датасет L8 Biome) (*англ.* transfer learning — перенос обучения способностей модели, обученной на одних данных, применительно к данным с другой аппаратуры), имеющих те же спектральные каналы, но более высокое разрешение снимков (30 м).

МОДЕЛИ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В настоящей работе объединены подходы сегментации и классификации мультиспектральных данных для получения итоговых масок снега и облачности с КА «Электро-Л». В силу отсутствия размеченных данных исходных снимков с МСУ-ГС в качестве данных для обучения модели сегментации был взят Levir_CS Dataset с предварительно уменьшенным разрешением его экземпляров до нужного (1 км). На основе работы (Wu et al., 2021), показавшей преимущество в использовании дополнительной географической информации, и с её подмешиванием к мультиспектральным признакам, была выбрана архитектура U-Net++, ставшая усовершенствованной версией U-Net (Ronneberger, 2015) и способная решать ряд задач сегментации, в том числе и на снимках ДЗЗ (Yin et al., 2022; Zhang et al., 2020). Из соображений необходимой скорости работы модели в режиме реального времени и отсутствия очень большого количества размеченных данных, сжимающая часть (*англ.* encoder) модели была выбрана архитектура EfficientNet-B0 (Tan, Le, 2019).

Из анализа распределения экземпляров снега и облачности в Levir_CS, для достижения сходимости обучения необходимо использовать функции потерь и метрики для сильного дисбаланса классов. В работе (Zhang et al., 2020) для детекции облачности успешно представлена реализация линейной комбинации DiceLoss и CrossEntropyLoss (формулы для данных функций потерь см. в работе (Zhang et al., 2020); для используемых здесь данных с учётом сильного дисбаланса классов в датасете Levir_CS последняя была заменена на FocalLoss (3):

$$\text{FocalLoss} = (1 - p_{pred})^\gamma \log(p_{pred}), \quad (3)$$

где γ — штрафующий коэффициент для наиболее трудно классифицируемых объектов в выборке (здесь $\gamma = 2$); p_{pred} — вероятность верно предсказанного класса для пикселя. В силу того, что FocalLoss в формуле (3) обеспечивает лучшую сходимость обучения модели, а DiceLoss — лучшее качество сегментации, то в качестве итоговой функции потерь для исследуемой задачи сегментации взята следующая (здесь $\beta = 0.2$):

$$\text{Loss} = \beta \text{DiceLoss} + (1 - \beta) \text{FocalLoss}, \quad (4)$$

где β — линейный коэффициент приоритетности для функций потерь в их линейной комбинации. Выбор такой функции потерь (4) показал лучшую сходимость модели, чем у функции WeightedCrossEntropyLoss, используемой в публикации (Wu et al., 2021).

Для ускорения сходимости обучения модели U-Net++ были инициализированы веса ImageNet, а выборки в Levir_CS были стандартизированы. Для увеличения объёма данных и улучшения сходимости нейросети использовались аугментации: повороты, отражения, перевороты (группа симметрии D4), fancy

(выделение главных компонент цвета) PCA (*англ.* Principle Component Analysis) для каналов видимого спектра, а также геометрические аугментации типа дисторсии, растяжений и других аффинных преобразований. Отметим, что использование аугментаций, изменяющих спектральные характеристики в каналах, недопустимо и мешает процессу обучения модели. Употребление данных аугментаций позволило повысить качество сегментации с $\text{IoU} = 0,729$ до $\text{IoU} = 0,745$ на валидационной выборке Levir_CS.

Модель U-Net++ обучалась с Ranger21 optimizer (Wright, 2021) и AdamW (Loshchilov, 2019) optimizer с использованием переменного шага градиентного спуска за счёт CosineAnnealing scheduler, что позволило получить несколько моделей, показывающих схожие результаты по метрикам F_1 , IoU, но в разных локальных минимумах функции потерь (4). Дальнейшее усреднение весов этих моделей (Wortsman et al., 2022) дало прирост в качестве сегментации с $\text{IoU} = 0,7138$ до $\text{IoU} = 0,7271$ на тестовой выборке Levir_CS. Модель обучалась на протяжении 125 эпох на графическом процессоре NVIDIA Quadro 2000 (6 GB).

При визуальной проверке качества сегментации на снимках «Электро-Л1» модель неудовлетворительно выделяет участки снега в горных хребтах, ошибочно относя их к облакам. Дальнейшее улучшение качества сегментации на снимках «Электро-Л1» осуществляется за счёт второй модели — классификатора из работы (Bloshchinskiy et al., 2020), обученного на Electro Textures Dataset.

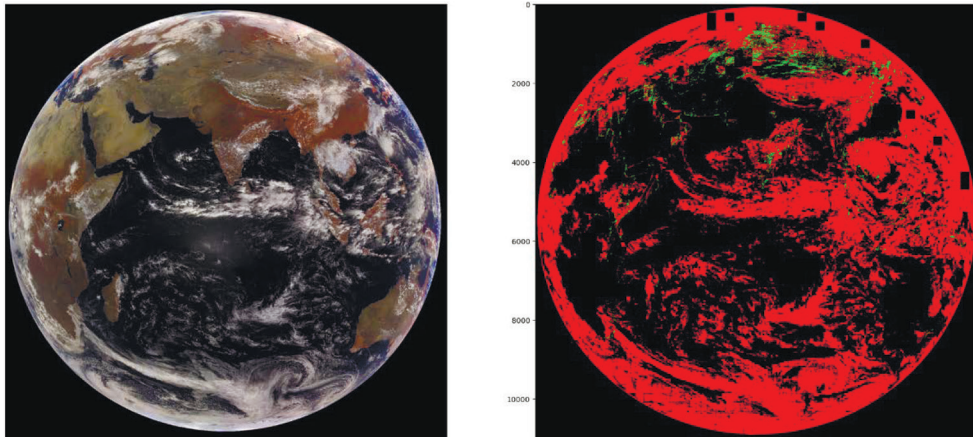


Рис. 1. Результат сегментации модели U-Net++ (справа) (красный цвет — облака, зелёный — снег) на снимке с «Электро-Л1» (слева)

Отметим также сравнение архитектуры U-Net++ с DeepLab V3+ (все реализации архитектур моделей взяты из фреймворка https://github.com/qubvel/segmentation_models.pytorch). Предполагалось, что результаты последней могли бы оказаться точнее за счёт Atrous (dilated) convolutions (Chieh, 2017) в свёрточных слоях, это потенциально способствует более чёткому выделению сложных границ классов, что свойственно структурам облачных и снежных покровов. Однако при тех же параметрах обучения и обучающей выборке (Levir_CS) данная архитектура продемонстрировала худшее качество: $F_1 = 0,9241$, $\text{IoU} = 0,7213$ на валидации и $F_1 = 0,9189$, $\text{IoU} = 0,6888$ на тесте после 50 эпох обучения, в то время как при визуальной оценке качества сегментации на снимках «Электро-Л1» DeepLab V3+ упускает все тусклые облака и почти не выделяет снег. При этом время обработки всего снимка данной моделью на порядок

больше (19 мин), чем моделью U-Net++ (3,5 мин) (рис. 1, см. с. 42). Таким образом, для задачи сегментации снимков с КА «Электро-Л» в режиме реального времени архитектура DeepLab V3+ не подходит не только по качеству сегментации, но и по длительности работы.

Следующим вариантом архитектуры для сегментации была взята модель MANet (*англ.* Multi-Scale Attention Network) (Fan et al., 2020). Её результаты при тех же параметрах обучения и обучающей выборке (Levir_CS) составили заметно лучшее качество: $F_1 = 0,9265$, $IoU = 0,724$ на валидации при меньшем числе (43) эпох обучения. При визуальном анализе сегментации на снимках «Электро-Л1» MANet продемонстрировал те же проблемы, что и DeepLab V3+ (полная обработка всего снимка занимает около 5,5 мин), что свидетельствует о необходимости соответствия спектральных каналов съёмочной аппаратуры КА, а также добавления ИК-каналов для улучшения сегментации на геостационарных снимках.

Исходя из результатов сравнения качества архитектур (табл. 2), в качестве наиболее эффективной архитектуры для дальнейшей работы на геостационарных снимках подходит модель MANet, хотя визуально лучшее качество демонстрирует U-Net++.

Таблица 2. Сравнение результатов моделей U-Net++, DeepLab V3+, MANet с одинаковым энкодером EfficientNet-B0 на тестовой выборке датасета Levir_CS с КА Gaofen-1

Модель	Micro F1 по классам	Macro IoU по классам
U-Net++	0,9286	0,7271
DeepLab V3+	0,9189	0,6888
MANet	0,9323	0,7434

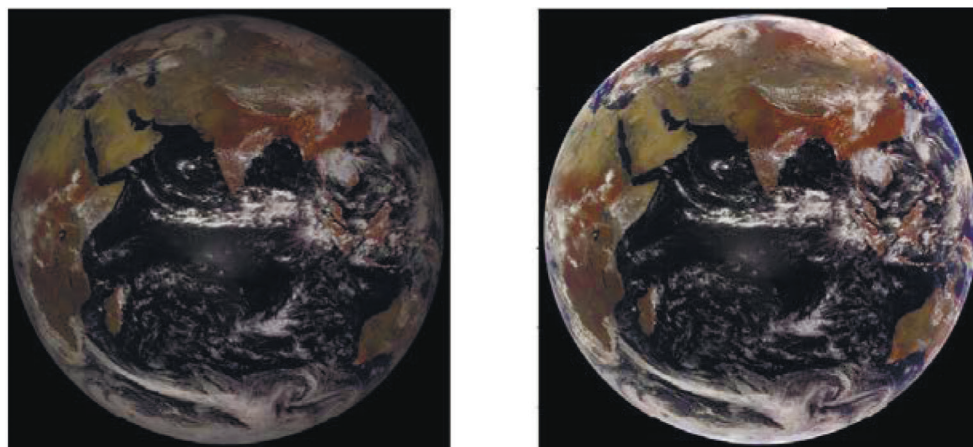


Рис. 2. Снимок с КА «Электро-Л1» в видимом и ближнем ИК-спектрах до (слева) и после (справа) световой коррекции по углу зениту Солнца

Кроме обучения моделей сегментации были повторены результаты работы (Bloschinskiy et al., 2020) для последующего сравнения свёрточного (*англ.* convolutional neural network, CNN) классификатора с моделью U-Net++ и усреднения результатов выделения облачности и снега обеими моделями.

Для проверки качества сегментации целевые снимки КА «Электро-Л1» предварительно были разделены на патчи размера 224×224 с первых трёх каналов аппаратуры МСУ-ГС, для которой была применена коррекция по углу зенита Солнца (1) (рис. 2, см. с. 43). Матрицы коррекции по углу зенита Солнца вычисляются на основе местоположения Солнца относительно КА и Земли на момент съёмки с использованием Python `pylib` (Holmgren, 2018). Данная коррекция применима только для зон съёмки, где угол зенита Солнца не превышает 80° , поэтому предварительно для матрицы углов осуществляется клиппинг на диапазон $[0^\circ, 80^\circ]$.

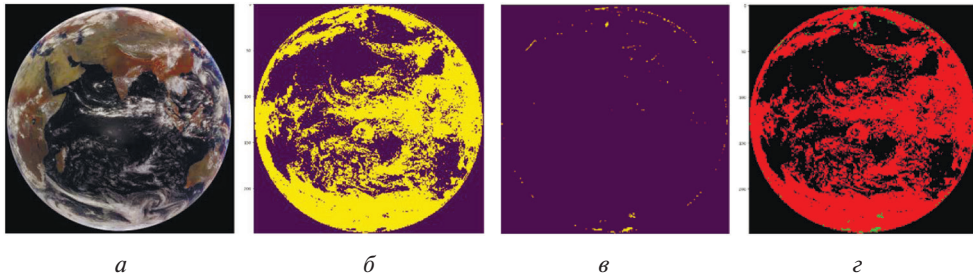


Рис. 3. Снимок с КА «Электро Л1» (а); результат сегментации классификатора классов облачности (б) и снега (в); маски облачного и снежного покрова, соединенные в RGB-изображение (г) (красный цвет — облака, зелёный — снег)

После визуальной оценки работы обеих моделей (см. рис. 1, 3) итоговые маски получаются умножением масок облачности U-Net++ и CNN-классификатора и объединением их масок снега с последующей коррекцией через умножение на среднесуточную маску снежного покрова с Terra/MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Эта комбинация результатов моделей позволяет уменьшить FAR для участков облачности и повысить полноту предсказаний зон снежного покрова, при этом уменьшая его FAR (2) и убирая ложные детекции снега в ледяных облаках и на засвеченных границах дисков Земли.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В настоящей работе представлен перспективный подход объединения результатов нескольких моделей нейросетей с разной архитектурой свёрточного типа и обученных на разных наборах мультиспектральных данных с метеорологических спутников и КА ДЗЗ с разным разрешением снимков и съёмочной аппаратурой для решения задачи сегментации облачности и снежных покровов применительно к данным геостационарных КА.

В работе показана эффективность подхода transfer learning (переноса обучения модели нейросети с данных одних КА на данные съёмочной аппаратуры с целевого КА) при отсутствии разметки в целевых данных с других КА. С одновременным учётом спектральных, географических и текстурных характеристик облачности и подстилающей поверхности для снимков Земли в низком разрешении возможно добиться лучшего качества выделения зон снега и облачности. С учётом частоты выдачи снимков, настоящий метод позволяет обрабатывать снимки с КА «Электро-Л1» в режиме реального времени.

ЛИТЕРАТУРА

- Bloshchinskiy V. D., Kuchma M. O., Andreev A. I. et al.* Snow and cloud detection using a convolutional neural network and low-resolution data from the Electro-L No. 2 Satellite // *J. Applied Remote Sensing*. 2020. V. 14. Iss. 3. Art. No. 034506. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.14.034506>
- Chen L.-C., Papandreou G., Schroff F., Adam H.* Rethinking Atrous Convolution for Semantic Image Segmentation. 2017. arXiv:1706.05587. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.05587>.
- Fan T., Wang G., Li Y., Wang H.* MA-Net: A Multi-Scale Attention Network for Liver and Tumor Segmentation // *IEEE Access*. 2020. V. 8. P. 179656–179665. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3025372>.
- Holmgren W. F., Hansen C. W., Mikofski M. A.* pvlib python: a python package for modeling solar energy systems // *J. Open Source Software*. 2018. V. 3. Iss. 29. Art. No. 884. <https://doi.org/10.21105/joss.00884>.
- Loshchilov I., Hutter F.* Decoupled weight decay regularization. 2019. arXiv:1711.05101. <https://arxiv.org/pdf/1711.05101>.
- Mohajerani S., Saeedi P.* Cloud-Net+: A Cloud Segmentation CNN for Landsat-8 Remote Sensing Imagery Optimized with Filtered Jaccard Loss Function: preprint. 2020. arXiv:2001.08768v1. <https://www.researchgate.net/publication/338840200>.
- Ronneberger O., Fischer P., Brox T.* U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation CoRR. 2015. arXiv:1505.04597. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1505.04597>.
- Tan M., Le Q. V.* EfficientNet: Rethinking Model Scaling for Convolutional Neural Networks. 2019. arXiv:1905.11946. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.11946>.
- Wortman M., Ilharco G., Gadre S. Y. et al.* Model soups: averaging weights of multiple fine-tuned models improves accuracy without increasing inference time. 2022. arXiv:2203.05482. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.05482>.
- Wright L., Demeure N.* Ranger21: a synergistic deep learning optimizer. 2021. arXiv:2106.13731. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2106.13731>.
- Wu Xi, Shi Zh., Zou Zh.* A geographic information-driven method and a new large scale dataset for remote sensing cloud/snow detection // *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*. 2021. V. 174. P. 87–104. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.01.023>.
- Yin M., Wang P., Ni C. et al.* Cloud and snow detection of remote sensing images based on improved Unet3+ // *Scientific Reports*. 2022. V. 12. Art. No. 14415. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18812-6>.
- Zhang J., Li X., Li L. et al.* Lightweight U-Net for cloud detection of visible and thermal infrared remote sensing images // *Optical and Quantum Electronics*. 2020. V. 52. Art. No. 397. <https://doi.org/10.1007/s11082-020-02500-8>.

PROBLEM OF TRANSFER LEARNING APPROACH FOR CLOUD AND SNOW SEGMENTATION BASED ON ELECTRO L1 SATELLITE MULTISPECTRAL DATA

N. V. Belyakov

Lomonosov Moscow State University (MSU), Moscow, Russia

We consider cloud and snow segmentation problem on Electro L1 satellite multispectral imagery. The main approach to use convolutional neural network for semantic segmentation trained on other satellites labeled data, such as Gaofen-1 and Landsat-8 to apply transfer learning to Electro L1 imagery. As input data visible spectrum and near infrared channels are used. In addition we use geographical information about longitude latitude and altitude of each pixel of image. The main problem in transfer learning approach is domain shift of training data and Electro L imagery, as there are different spectral bands ranges as well as different resolution of images.

We process Electro L1 multispectral imagery to the most common format with Gaofen-1 and Landsat-8 data and combine the results on segmentation U-Net modification model and convolutional classifier trained on small 11×11 MSU-GS textures to make segmentation results more accurate.

Keywords: multispectral satellite imagery, Electro L satellites, cloud and snow segmentation, convolutional neural network, geographical information features, atmosphere monitoring, remote sensing, hydrometeorology

Belyakov Nikita Viktorovich — specialist student, nikita.belyakov@cosmos.msu.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗНОСЕЗОННОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ СПУТНИКОВОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ОЗИМЫХ КУЛЬТУР В ВЕСЕННЕ-ЛЕТНИЙ ПЕРИОД ВЕГЕТАЦИИ

Ю. Ш. Бойматов¹, Д. Е. Плотников²

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

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

Исследованы возможности использования разносезонной спутниковой информации для повышения точности дистанционного распознавания озимых культур на больших территориях методами машинного обучения. В качестве признаков были использованы восстановленные сезонные временные серии ежедневных измерений NDVI, полученные с помощью прибора MODIS (спутники Terra и Aqua) в период с 2015 по 2019 гг. Для обучения модели использовались карты сезонного размещения озимых культур, создаваемые в ИКИ РАН и обновляемые на регулярной основе. Разносезонная модель была создана с использованием спутниковых данных и карт за пять последовательных лет, методов Random Forest и XGBoost, а также подходов для оптимизации и анализа больших данных. Полученные с помощью разносезонной модели карты размещения культур были использованы для расчёта площадей озимых на уровне субъектов Российской Федерации с целью сравнения с данными Федеральной службы государственной статистики (Росстат). Было установлено, что разносезонные модели обеспечивают систематическое улучшение результатов распознавания озимых по сравнению с исходными картами, построенными на основе использования только внутрисезонной фенологической информации.

Ключевые слова: градиентное усиление, Random Forest, озимые культуры, MODIS, спутниковое картографирование

ВВЕДЕНИЕ

Спутниковый мониторинг является источником объективной и оперативной информации о размещении и состоянии сельскохозяйственных культур в целях обеспечения продовольственной безопасности на национальном и глобальном уровне пространственного охвата (Wu et al., 2023). Ранее было показано, что разносезонные данные, описывающие фенологию сельскохозяйственных культур, могут способствовать улучшению результатов распознавания и оценки различных культур целевого сезона вегетации (Плотников и др., 2018). Для решения задач оперативного спутникового агромониторинга используют композитные изображения, содержащие ежедневные измерения коэффициентов спектральной яркости земной поверхности и производные вегетационные индексы, восстановленных на основе весового подхода и метода LOWESS (*англ.* LOcally WEighted Scatterplot Smoother) (Plotnikov et al., 2022). Было показано, что разработанный ранее в Институте космических исследований автоматический метод для оперативного распознавания озимых культур России на национальном уровне пространственного охвата обеспечивает своевременную оценку состояния и урожайности озимых (Денисов и др., 2021) и характеризуется региональной точностью от 70 до 98 % (Лупян и др., 2021; Плотников и др., 2017, 2020; Трошко и др., 2022). Однако указанный метод ограничивается использованием спутниковых данных, соответствующих только целевому сезону вегетации озимых.

Бойматов Юсуфджон Шухратович — студент бакалавриата, boimatov.ush@phystech.edu
Дмитрий Евгеньевич Плотников — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, dmitplot@d902.iki.rssi.ru

Цель настоящей работы заключалась в исследовании возможности повышения точности распознавания озимых культур путём создания и применения единой разнوسезонной модели на основе непараметрического классификатора с использованием в качестве признаков ежедневных безоблачных изображений нормализованного вегетационного индекса NDVI (англ. Normalized difference vegetation index), полученных с 2015 по 2019 г. с помощью спектрорадиометра MODIS (англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Целью также являлось картографирование озимых культур на больших территориях с помощью созданной универсальной модели и оценка результатов картографирования в сравнении со стандартными картами (разметкой), получаемыми методом экспансии обучающей выборки для каждого из пяти указанных сезонов вегетации.

Для решения задачи использовались архитектуры Random Forest и XGBoost (англ. eXtreme Gradient Boosting), которые представляются классическими непараметрическим классификаторами, стойкими к переобучению, и демонстрирующие высокую точность на похожих задачах дистанционного зондирования Земли. Входные разносезонные данные имели объём порядка нескольких сотен гигабайт, существенно превышая объёмы оперативной памяти на стандартном процессоре, поэтому в программной реализации были задействованы методы обработки и анализа больших данных, а также подходы по оптимизации алгоритмов с использованием технологии CUDA (англ. Compute Unified Device Architecture).

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате работы были обучены разносезонные модели на основе архитектур Random Forest и XGBoost, с помощью которых были получены карты размещения озимых культур для 43 субъектов преимущественно Европейской части РФ для каждого из годов в интервале с 2015 по 2019.

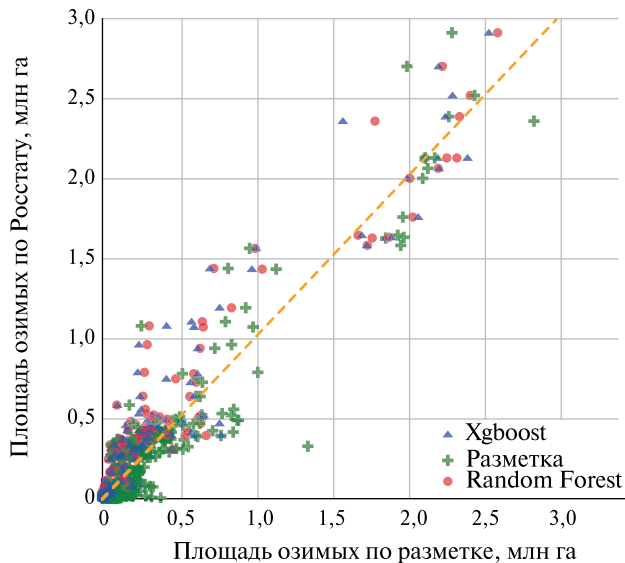


Рис. 1. Соответствие площадей озимых по данным разметки, двум разносезонным моделям и данным Росстата для 43 субъектов РФ за пять последовательных лет (с 2015 по 2019 г.)

Рассчитанные на основе этих карт площади озимых сравнивались с площадями, извлечёнными из стандартных карт озимых (разметкой) и данных Росстата с расчётом метрик стандартного отклонения (*англ.* Root Mean Square Error — RMSE) и коэффициента детерминации (R^2). На агрегированной за пять лет диаграмме рассеяния (рис. 1, см. с. 48) красные метки соответствуют модели Random Forest, синие — XGBoost, а зелёные — стандартным картам.

Оценки значений стандартного отклонения (рис. 2) и коэффициента детерминации (рис. 3) были получены для каждого из пяти сезонов для территории 43 субъектов РФ из региона исследования. Результаты по разносезонной модели Random Forest обозначены на этих рисунках красным цветом, по XGBoost — синим, по данным стандартных карт — зелёным.

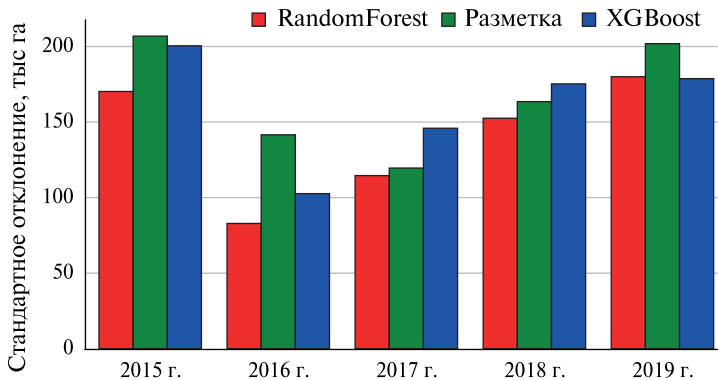


Рис. 2. Стандартное отклонение площадей озимых от площадей Росстата по данным разметки и двух разносезонных моделей

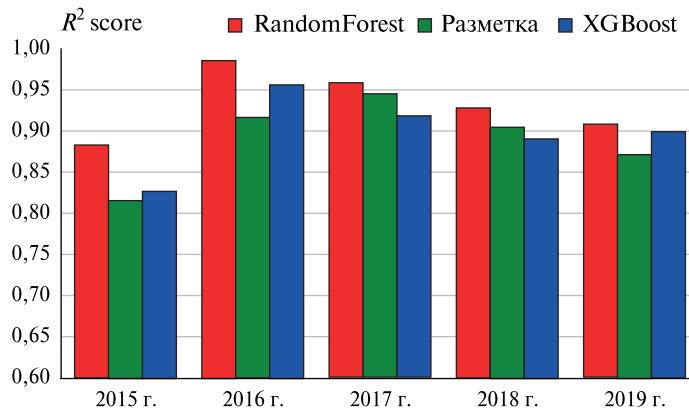


Рис. 3. Коэффициент детерминации R^2 при сопоставлении площадей озимых по данным Росстата, по данным разметки и по данным двух разносезонных моделей

Графики демонстрируют систематическое улучшение оценок площадей, полученных с помощью обеих разносезонных моделей в сравнении с оценками по данным односезонного подхода (разметкой). В частности, было обнаружено, что среднеквадратическое отклонение от данных Росстата по данным модели Random Forest оказалось ниже в среднем на 26,6 тыс. га, а коэффициент детерминации вырос в среднем на 0,037 (3,7 %). XGBoost в среднем также

демонстрирует улучшение результатов в сравнении с разметкой, будучи в среднем хуже, чем Random Forest, однако результаты этой модели выглядят менее устойчивыми между сезонами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках исследования были параметризованы и на основе больших объёмов спутниковых данных обучены разносезонные модели непараметрических классификаторов для распознавания озимых культур текущего сезона вегетации на больших территориях. В процессе построения моделей была проведена их существенная оптимизация, что привело к значительному сокращению временных затрат на обучение и получению новых результатов, имеющих важное практическое значение. Было показано, что с использованием разносезонных спутниковых данных можно создать универсальную модель, которая в среднем лучше справляется с задачей субнационального распознавания озимых культур, чем метод, основанный на данных лишь текущего сезона вегетации. В частности, полученные в результате работы разносезонной моделей Random Forest и XGBoost карты озимых систематически лучше соответствовали данным Росстата о площадях культур на уровне субъектов для территории Европейской части РФ для всего исследуемого интервала лет с 2015 по 2019. Разносезонная модель Random Forest показала себя лучше всех исследуемых подходов, что может объясняться высокими характеристиками этого метода, в частности, высокой обобщающей способностью и стойкостью к переобучению, которые превосходят аналогичные характеристики многих других методов машинного обучения.

ЛИТЕРАТУРА

- Денисов П. В., СерEDA И. И., Трошко К. А. и др. Возможности и опыт оперативного дистанционного мониторинга состояния озимых культур на территории России // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 2. С. 171–185. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-171-185.
- Лузян Е. А., СерEDA И. И., Денисов П. В. и др. Дистанционный мониторинг состояния озимых культур зимой 2020–2021 г. на Европейской территории России // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 165–172. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-165-172
- Плотников Д. Е., Барталев С. А., Лузян Е. А., Толтин В. А. Оценка точности выявления посевов озимых культур в весенне-летний период вегетации по данным прибора MODIS // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 4. С. 132–145. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-132-145.
- Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Барталев С. А. Метод автоматического распознавания сельскохозяйственных культур на основе спутниковых данных и имитационной модели развития растений // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 131–141. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-131-141.
- Плотников Д. Е., Ёлкина Е. С., Дунаева Е. А. и др. Развитие метода автоматического распознавания озимых культур на основе спутниковых данных для оценки их состояния на территории Республики Крым // Таврический вестн. аграр. науки. 2020. № 1(21). С. 64–83. DOI: 10.33952/2542-0720-2020-1-21-64-83.
- Трошко К. А., Денисов П. В., Дунаева Е. А. et al. Особенности развития озимых сельскохозяйственных культур на юге европейской части России весной 2022 г. по данным дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондиро-

вания Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 261–267. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-261-267.

Plotnikov D. E., Loupian E. A., Kolbudaev P. A. et al. Daily surface reflectance reconstruction using LOWESS on the example of various satellite systems // 8th Intern. Conf. Information Technology and Nanotechnology (ITNT). 2022. Art. No. 21992120. DOI: 10.1109/ITNT55410.2022.9848630.

Wu B., Zhang M., Zeng H. et al. Challenges and opportunities in remote sensing-based crop monitoring: A review // National Science Review. 2023. V. 10. Iss. 4. Art. No. nwac290. DOI: doi.org/10.1093/nsr/nwac290.

STUDY OF THE EFFICIENCY OF USING MULTISEASONAL INFORMATION FOR SATELLITE MAPPING OF WINTER CROPS IN THE SPRING-SUMMER VEGETATION PERIOD

Yu. Sh. Boymatov¹, D. E. Plotnikov²

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

² Space Research Institute of Russian Academy of Sciences (IKI), Moscow, Russia

This study elaborates the perspectives of using multi-season satellite information to improve of satellite mapping of winter crops over large scales using machine learning were investigated. The reconstructed seasonal time series of daily NDVI obtained using MODIS (Terra and Aqua) in the period from 2015 to 2019 were used as mapping features. To train the model, we used winter crops seasonal maps being built in Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences and updated on a regular basis. The multi-season model was created using satellite data and winter crops maps for five consecutive years, Random Forest and XGBoost classifiers, as well as approaches for optimization and analysis of big data. The winter crop maps derived with created multi-season model were used to calculate areas under winter crops at oblast level of Russian Federation in order to compare them with state statistics data (ROSSTAT). It was found that multi-season-trained machine learning models provide a systematic improvement winter crops mapping compared to the original seasonal maps based solely on intra-seasonal phenological information.

Keywords: gradient boosting, Random Forest, winter crops, MODIS, satellite mapping

Boymatov Yusufjon Shukhratovich — undergraduate student, boimatov.ush@phystech.edu
Dmitry Evgenyevich Plotnikov — senior researcher, candidate of physical and mathematical sciences

АПРОБАЦИЯ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО ДЛЯ РЕШЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ПЛАНЕТАРНОЙ ГЕОФИЗИКИ

И. А. Боронин, Т. В. Гудкова

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

Вероятностный подход к решению обратных задач может существенно упростить задачу стыковки результатов наблюдения за планетами и предполагаемых теоретических гипотез об их строении (априорная информация). В процессе решения обратной задачи вводится функция правдоподобия, которая количественно отражает степень соответствия наблюдаемых величин и величин, полученных в результате проведения расчётов с помощью модели. В общем случае существуют бесконечно много моделей, которые включают в себя и данные наблюдения, и априорную информацию, процесс отбора и интерпретация результата представляются ключевыми моментами решения обратных задач. Для последней задачи используется метод Монте-Карло. Апробация численного метода была проведена на классическом модельном примере инверсии данных гравитационного поля проверена.

Ключевые слова: метод Монте-Карло, обратная задача, байесовская статистика, внутреннее строение планет

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время для уточнения внутреннего строения планет и спутников всё чаще используют методы решения нелинейных обратных задач (Mosegaard, 1998; Mosegaard, Tarantola, 1995; Tarantola, 1987, 2005; Tarantola, Valette, 1982). Это связано с тем, что данные, полученные из наблюдений, имеют погрешность, что может существенно повлиять на решение прямой задачи. Оказалось, например, что существуют серьёзные противоречия между геофизическими и геохимическими классами моделей химического состава и внутреннего строения Луны, и поиск согласования между моделями был осуществлён в рамках решения обратной задачи (Kronrod et al., 2022), что свидетельствует о проблеме согласования модельных параметров с наблюдаемыми величинами.

Один из способов разрешить данную проблему заключается в использовании вероятностного подхода к решению обратных задач. Байесовский подход к статистике позволяет оценить с вероятностной точки зрения соответствие между теоретическими гипотезами о модели и данным наблюдения за моделью с помощью использования метода Монте-Карло с марковскими цепями. Ниже мы сначала опишем алгоритм, затем приведём результаты тестирования на классическом примере инверсии данных гравитационного поля (Mosegaard, Tarantola, 1995)

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Недра условной планеты показаны на рис. 1. Допустим, имеется вертикальная граница до глубины 100 км. Слева от границы среда однородная и плотность $\rho_1 = 2570 \text{ кг/м}^3$, а справа среда поделена горизонтальными пластами с плотностью $\rho(z)$, зависящей от глубины z . Верхняя и нижняя граница каждого слоя па-

Боронин Иван Андреевич — инженер, anarsull23@yandex.ru

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

параллельна поверхности, которая моделируется прямой. На глубине более 100 км среда однородна и имеет плотность, равную значению плотности слева от вертикальной границы (см. рис. 1).

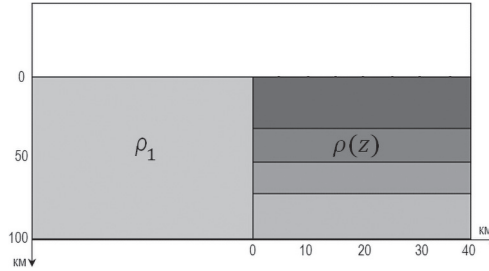


Рис. 1. Модель планеты

Определим данные наблюдений и теоретические гипотезы о строении планеты, которые необходимо согласовать при помощи вероятностного распределения.

Определим теоретические гипотезы о строении планеты, которые мы хотим согласовать с данными наблюдений. Во-первых, предположим, что распределение толщины слоёв справа от вертикальной границы подчиняется экспоненциальному закону распределения со средним значением 4 км. Во-вторых, предположим, что плотность каждого слоя подчиняется нормальному закону распределения со средним значением $\mu = 2570$ и среднеквадратичным отклонением $\sigma = 850$.

Неоднородность плотности создаёт на поверхности гравитационную аномалию, величина которой равна $d(x)$, x — расстояние по оси X на поверхности от вертикальной границы:

$$d(x) = 2G \int_0^{100} dz \frac{z\rho(z)}{z^2 + x^2}.$$

Данные наблюдений — это известные величины гравитационной аномалии в 20 точках d_{obs}^i с интервалом 2 км по оси X (см. рис. 1). Погрешность измерений гравитационной аномалии имеет независимые ошибки ϵ_i в виде суммы двух нормальных распределений:

$$f(\epsilon) = \frac{a}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_1} \exp\left(-\frac{\epsilon^2}{2\sigma_1^2}\right) + \frac{1-a}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} \exp\left(-\frac{\epsilon^2}{2\sigma_2^2}\right),$$

где $\sigma_1 = 0,25 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-2}$, $\sigma_2 = 1,25 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-2}$ и $a = 0,25$.

Для нахождения значений d_{obs}^i создаётся случайная модель, называемая «настоящая», удовлетворяющая всем теоретическим гипотезам и на основе полученной модели вычисляются значения d_{obs}^i .

АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ

Для применения метода Монте-Карло необходимо описать пространство моделей и сам алгоритм семплирования моделей в этом пространстве, дополнительно необходимо описать, как алгоритм семплирования может быть изменён при помощи функции правдоподобия.

Предположим, что M — пространство всех моделей, для описанной выше задачи. Каждая точка m из модельного пространства M представляет собой экземпляр модели заданными параметрами, а именно: количество и толщина горизонтальных слоёв определены и плотность каждого слоя известна (толщина и плотность созданы при помощи соответствующего распределения вероятности), следовательно, на основе всех известных параметров модели можно рассчитать значение гравитационной аномалии на поверхности.

Решение обратной задачи заключается в подборе таких параметров модели, чтобы расчёт гравитационных аномалий на этих моделях был равен известным значениям гравитационных аномалий на поверхности в пределах заданной погрешности. Стоит отметить, что чем в больших точках требуется совпадение значений гравитационной аномалии, тем выше размерность задачи.

Для применения метода Монте-Карло необходимо описать алгоритм семплирования. В качестве алгоритма семплирования выбран алгоритм случайного блуждания, подробные рассуждения о выборе такого алгоритма, а также о корректности его модификации для апостериорного распределения приведены в статье (Mosegaard, Tarantola, 1995), мы же воспользуемся полученными результатами и опишем алгоритм, который был выбран как один из лучших для данной задачи.

Рассмотри пространство моделей M как связный граф. Вершины графа — это элементы множества моделей, а рёбра — допустимые шаги с точки зрения алгоритма семплирования. Определение правила допустимости шага существенно влияет на скорость работы метода Монте-Карло. Шаг в пространстве моделей означает: с вероятностью 0,5 выполнить одно из двух действий. Первое — изменить плотность случайно выбранного слоя, второе — добавить или удалить границу слоя.

Изменение плотности случайным образом выбранного слоя означает выбор нового значения плотности на основе априорной функции распределения плотности и присвоение этого значения слою.

Добавление границы слоя означает выбор точки на глубине от 0 до 100 км и с вероятностью 0,01 добавление границы слоя с последующей выбором нового значения плотности на основе априорной функции распределения новых двух слоёв сверху и снизу от границы. Если в случайно выбранной точке уже присутствует граница, то с вероятностью 0,01 она удаляется и образуется новый горизонтальный слой с толщиной, равной сумме слоёв сверху и снизу от границы, затем выбирается новое значение плотности на основе априорной функции распределения плотности. Выбор вероятности 0,01 для добавления или удаления слоя обосновывается тем, что, согласно априорной информации, средняя толщина слоя равна 4 км, а шаг расчётной сетки по глубине равен 40 м, следовательно, в среднем на каждых 100 шагов сетки присутствует граница слоёв.

Для того чтобы случайные блуждания в пространстве априорных моделей превратить в направленные, с точки зрения наилучшего соответствия данным наблюдения, используется функция правдоподобия. Другими словами, необходимо получить апостериорное распределение, которое зависит как от априорного распределения, так и от функции правдоподобия, т. е. $\sigma(m) = C\rho(m) \cdot L(m)$, где $L(m)$ — функция правдоподобия, измеряющая соответствие между данными из модели m и наблюдений; $\sigma(m)$ — апостериорная плотность вероятности; $\rho(m)$ — априорная плотность вероятности; C — константа нормировки, подробнее можно посмотреть в публикации (Mosegaard, Tarantola, 1995).

Для модификации алгоритма семплирования априорных вероятностных величин в него добавляются вычисления на каждом шаге функции правдоподобия $L(m)$ для текущей позиции i и предполагаемой на следующем шаге позиции j . Вероятность успешного шага вычисляется по правилу Метрополиса: если

$L_j(m) \geq L_i(m)$, то шаг делается всегда, если $L_j(m) < L_i(m)$, то шаг принимается с вероятностью $L_j(m)/L_i(m)$.

Целиком алгоритм решения обратной задачи методом Монте-Карло выглядит следующим образом:

- 1) создаётся случайная модель, удовлетворяющая всей известной априорной информации;
- 2) предпринимается попытка сделать шаг в модельном пространстве от модели с номером i к модели с номером j ;
- 3) согласно правилу Метрополиса, шаг принимается или отклоняется; в случае отклонения шага п. 3 повторяется;
- 4) делаются шаги в пространстве моделей до достижения заданного ограничения на количество шагов.

Для применения центральной предельной теоремы лучше не ограничиваться движением из одной начальной точки для построения апостериорных вероятностных распределений с целью избегания попадания в локальные максимумы.

ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Было проведено 20 численных экспериментов, каждый из которых состоял из последовательного создания более 300 000 моделей с учётом функции правдоподобия. Как правило, функция правдоподобия возрастает примерно в 100 000–150 000 первых моделей, затем она стабилизируется около определённого значения и незначительно отклоняется от него в большую или меньшую сторону. Эти модели не рассматриваются для построения вероятностных характеристик, так как они недостаточно хорошо соответствуют либо теоретическим гипотезам, либо наблюдаемым величинам. Из оставшихся примерно 200 000 моделей отбрасывается часть моделей, поскольку ближайшие соседние модели выступают зависимыми, и в результате откидывания с помощью проверки на автокорреляцию моделей оставалось около 100 моделей, которые использовались для построения распределения вероятностей.

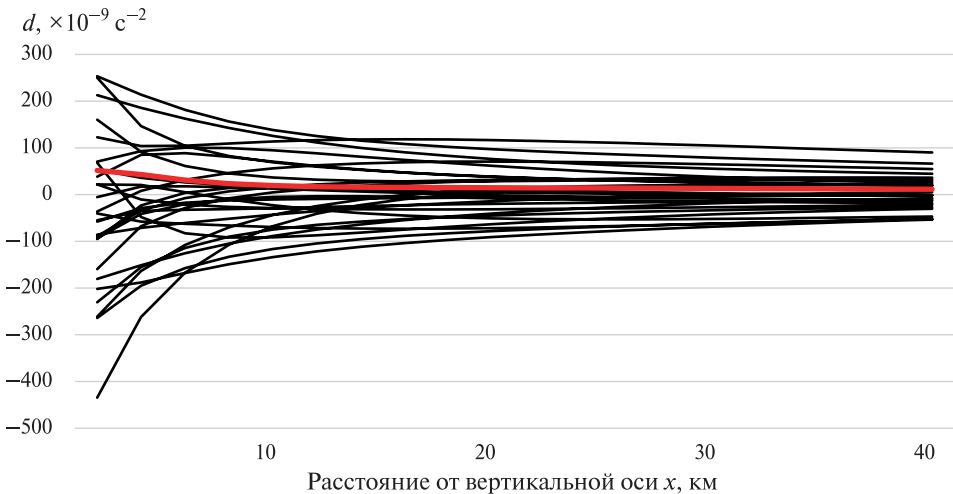


Рис. 2. Гравитационные аномалии для априорных моделей

На рис. 2 (см. с. 55) показаны результаты вычисления гравитационных аномалий в 20 точках с шагом 2 км по оси X для априорных моделей (модели которые удовлетворяют только теоретическим гипотезам), красная кривая — гравитационная аномалия для настоящей модели.

На рис. 3 показаны результаты вычисления гравитационных аномалий в 20 точках с шагом 2 км по оси X для апостериорных моделей (модели, которые удовлетворяют теоретическим гипотезам и результатам наблюдений за настоящей моделью с точки зрения функции правдоподобия), красная кривая — гравитационная аномалия для настоящей модели.

На рис. 3 видно, что гравитационные аномалии для всех апостериорных моделей отличаются в 20 расчётных точках от значений гравитационных аномалий настоящей модели на величину не более погрешности измерения настоящей модели, другими словами эти модели удовлетворяют наилучшим образом данным наблюдений и теоретическим гипотезам, на их основе будет строиться распределение вероятности параметров модели.

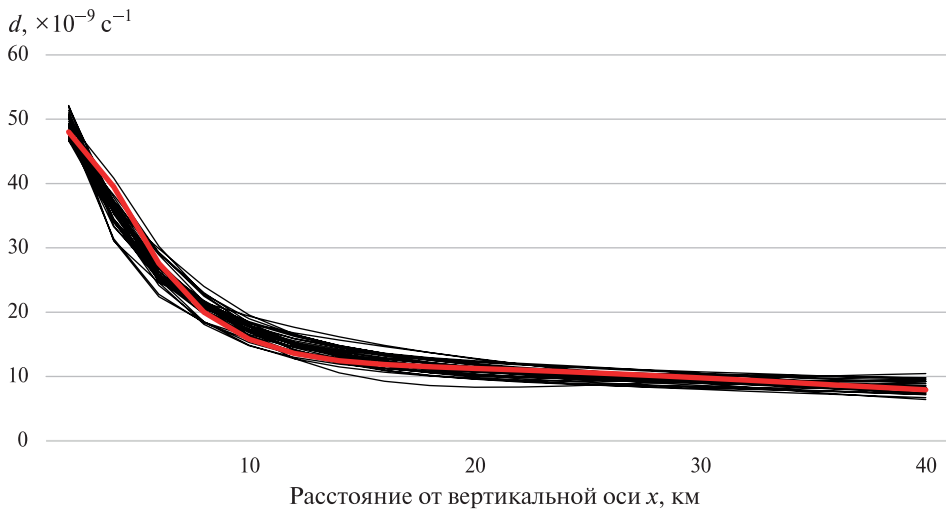


Рис. 3. Гравитационные аномалии для апостериорных моделей

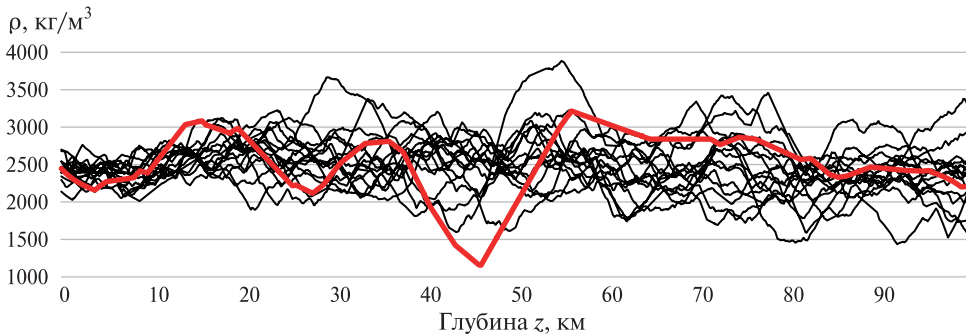


Рис. 4. Гравитационные аномалии для апостериорных моделей

На рис. 4 представлены различные зависимости апостериорных моделей, а именно их плотность по оси Y от глубины z — ось X , красная кривая — плотность настоящей модели.

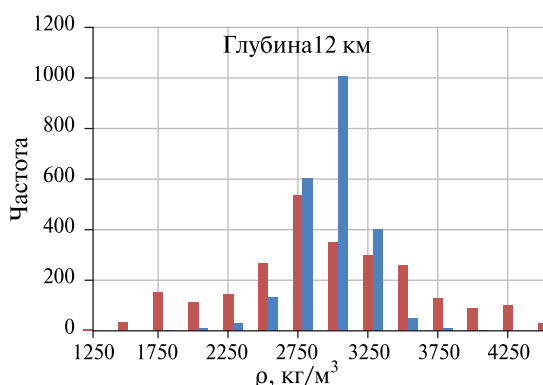


Рис. 5. Гистограмма плотности для апостериорных моделей на глубине 12 км

На рис. 4 видно, что у настоящей модели на глубине 12 км функция плотности имеет локальный экстремум. В результате численных экспериментов (рис. 5) выявлено, что на глубине 12 км чаще встречаются значения апостериорной функции плотности больше 2570, а именно в интервале 2750–3250 кг/м³.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты численного эксперимента показали качественно схожие результаты с исследованием (Mosegaard, Tarantola, 1995). Применение Метода Монте-Карло позволяет учитывать результаты наблюдений и предполагаемые теоретические гипотезы наилучшим образом с точки зрения функции правдоподобия. Построение функции правдоподобия становится ключевым моментом решения обратной задачи, поскольку неверно подобранный критерий может привести к ошибочным выводам.

Работа выполнена за счёт гранта Российского научного фонда № 23-22-00074 (<https://rscf.ru/project/23-22-00074/>).

ЛИТЕРАТУРА

- Kronrod E., Matsumoto K., Kuskov O.L. et al.* Towards geochemical alternatives to geophysical models of the internal structure of the lunar mantle and core // *Advances in Space Research*. 2022. V. 69. Iss. 7. P. 2798–2824. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.01.012>.
- Mosegaard K.* Resolution analysis of general inverse problems through inverse Monte-Carlo sampling // *Inverse Problems*. 1998. V. 14. No. 3. P. 405–426. DOI: 10.1088/0266-5611/14/3/004.
- Mosegaard K., Tarantola A.* Monte Carlo sampling of solutions to inverse problems // *J. Geophysical Research*. 1995. V. 100. Iss. B7. P. 12431–12447. <https://doi.org/10.1029/94JB03097>.
- Tarantola A.* *Inverse Problem Theory and Methods for Model Parameter Estimation*. P.: Institut de Physique du Globe de Paris, 2005. 358 p. Ser. Other Titles in Applied Mathematics. <https://doi.org/10.1137/1.9780898717921>.
- Tarantola A.* *Inverse Problem Theory: Methods for Data Fitting and Model Parameter Estimation*. Amsterdam; N. Y.: Elsevier, 1987. 613 p.
- Tarantola A., Valette B.* Inverse problems — Quest for information // *J. Geophysics*. 1982. V. 50. P. 159–170. <https://n2t.net/ark:/88439/y048722>.

TESTING OF THE MONTE CARLO METHOD FOR SOLVING INVERSE PROBLEMS OF PLANETARY GEOPHYSICS

I. A. Boronin, T. V. Gudkova

Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences (IPE RAS)
Moscow, Russia

Probabilistic approach to solving inverse problems can significantly simplify connecting the results of observed data with theoretical hypotheses about planet structure. In the process of solving the inverse problem, a likelihood function is introduced, which is a measure of the degree of fit between the observed data with data predicted from the model. In general, there are infinite models that include both observation data and a priori information, the selection process and interpretation of the result are the key points in solving inverse problems. For the latter task, the Monte Carlo method is used. The numerical method was tested on the classical model example of the inversion of the gravitational field data.

Keywords: Monte-Carlo method, inverse problem, Bayesian statistics, internal structure of the planets

Boronin Ivan Andreevich — engineer, anarsull23@yandex.ru

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

СУЩЕСТВУЮЩИЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ НАКОПЛЕНИЯ РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СОСТОЯНИЙ

Е. В. Виноградова, А. М. Богачев

Институт информационных технологий и радиоэлектроники
Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых (ИИТР ВлГУ), Владимир, Россия

Приведён анализ существующих моделей процессов накопления радиационно-индуцированных поверхностных состояний (ПС). Поскольку на сегодняшний день нет полного понимания механизма накопления ПС при радиационном облучении, актуален вопрос изучения и совершенствования существующих моделей процессов накопления радиационно-индуцированных ПС и создания новых, описывающих кинетику послерадиационного образования ПС.

Ключевые слова: ионизирующее излучение, поверхностное состояние, электронно-дырочная пара, ловушка, граница раздела

Воздействие ионизирующего излучения (ИИ) приводит к образованию электронно-дырочных пар в оксиде МОП-транзисторов (металл – окисел – полупроводник). В оксиде накапливается объёмный положительный заряд Q_{ot} , поскольку в результате частичной рекомбинации электроны покидают оксид, а дырки могут захватываться на глубокие ловушки. ИИ космического пространства вызывает образование радиационно-индуцированных поверхностных состояний (ПС) N_{it} . В отличие от механизма встраивания объёмного положительного заряда (Barth, 1997) физические процессы образования ПС до сих пор остаются до конца не изученными. На сегодняшний день нет полного понимания механизма накопления ПС при радиационном облучении. Более изученными оказались модели, в которых накопление ПС рассматривается как процесс, состоящий из двух стадий и протекающий с участием высвобождаемых в диоксиде кремния ионов водорода (Schwank, 2002). Во время первой стадии при воздействии ИИ генерированные в диоксиде кремния дырки могут переноситься как по направлению к границе раздела кремний – диоксид кремния, так и по направлению к границе затвор – диоксид кремния. Во время этого процесса они способны разрывать напряжённые связи Si–O и слабые связи комплексов «трёхвалентного кремния» с водородом, в результате чего высвобождаются ионы водорода. На второй стадии высвобожденные ионы водорода образуют ПС из-за разрыва связей Si–H и Si–OH во время дрейфа по направлению к границе раздела диоксид кремния – кремний. Исходя из этой модели только при подаче на затвор МОП-структуры положительного смещения будет наблюдаться накопление ПС. В целом это согласуется с имеющимися экспериментальными данными (Schwank et al., 1986).

На сегодняшний день достаточно информации существует по трём моделям накопления радиационно-индуцированных ПС: водородной, конверсионной и связанной с разрывом напряжённых связей.

Исторически одной из начальных гипотез образования поверхностных состояний была возможность разрыва напряжённых связей у поверхности полупроводника. Действительно, из-за разности в коэффициентах линейного расширения кремния и оксида на поверхности кремния всегда содержатся напряжённые связи,рывающиеся в первую очередь при воздействии частиц

Виноградова Елизавета Владимировна — аспирантка, tikhonravova.elizaveta@mail.ru
Богачев Алексей Михайлович — аспирант, bogachev-al2012@yandex.ru

ионизирующего излучения. В результате эксперимента, заключающегося в облучении оксида толщиной 100 нм гамма квантами с энергией 1,2 МэВ и ультрафиолетовым излучением с энергией 10,2 эВ, было выявлено, что гипотеза о разрыве напряжённых связей вряд ли достоверна (Winokur, Sokoloski, 1976). В эксперименте (Winokur, Sokoloski, 1976) доза гамма- и ультрафиолетового излучения подбиралась таким образом чтобы количество электронно-дырочных пар, образующихся в объёме оксида, было одинаковым. Отличием стал тот факт, что гамма излучение вызывало однородную ионизацию оксида, а ультрафиолетовое излучение поглощалось в слое толщиной порядка 10 нм. Таким образом, только в случае воздействия гамма-излучения поверхность раздела оксид – полупроводник подвергалась воздействию квантов. В итоге оказалось, что в обоих случаях накапливалось одинаковое количество радиационно-индуцированных поверхностных состояний. Результат свидетельствует о том, что при воздействии ИИ важно общее количество электронно-дырочных пар, образующихся в окисле для образования ПС.

В случае водородной модели придерживаются предположения, что за счёт радиолиза водородосодержащих соединений (например, ОН-групп) или в результате выделения энергии при процессах рекомбинации электрон – дырка, в оксиде высвобождаются ионы водорода, депассивирующие поверхностные связи в процессе миграции к границе раздела кремний/диоксид кремния, что приводит к встраиванию ПС (McLean, 1980).

Конверсионная модель основана на том, что рост плотности ПС происходит в результате нейтрализации положительного заряда (Lai, 1983). В ходе эксперимента, проводившегося в 1980-е гг., в течение облучения наблюдалось небольшое увеличение плотности ПС ΔN_{it} и осязаемое увеличение объёмного заряда в оксиде ΔQ_{ot} . Но во время процесса отжига объёмный заряд в оксиде почти полностью отжигался, а плотность ПС значительно возрастала. Эти данные позволили говорить о конверсионной модели встраивания ПС, вызванных радиационным излучением. На самом деле, в случае захвата электрона конфигурация положительно заряженного центра может конвертироваться в нейтральное состояние, эквивалентное поверхностной ловушке. Конверсионная модель не получила столько внимания, сколько водородная, но различные экспериментальные данные (Lai, 1983) позволяют судить о достоверности этой концепции.

В результате экспериментального исследования кинетики послерадиационного образования поверхностных состояний в МОП-структуре в среде молекулярного водорода в различных полевых режимах группой учёных из Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» было выявлено, что взаимодействие водородосодержащих комплексов с электронами подложки выступает важным элементом процесса накопления радиационно-индуцированных ПС. Полученные данные позволяют рассматривать водородную и конверсионную модели с точки зрения единой водородно-электронной модели встраивания ПС. В случае данного подхода для образования ПС необходимо не только наличие у границы оксид – кремний положительно заряженных водородосодержащих комплексов, но и взаимодействие этих комплексов с электронами из подложки. Результаты учёных соответствуют предположению о том, что если количество водородных соединений у границы кремний – оксид кремния мало, то можно ожидать, что темп и энергия активации генерации ПС в целом определяются переносом соединений водорода в окисле. Напротив, при наличии соединений водорода у границы раздела кинетика, энергия активации и полевая зависимость процесса связаны с электронным обменом с подложкой. Такой подход согласуется как с обширной экспериментальной базой водородных моделей, надёжно устанавливающей влияние водорода на процессы образования поверхностных состояний, так и с конверсионной концепцией (Согоян и др., 2014).

ЛИТЕРАТУРА

- Согоян А. В., Черепко С. В., Першенков В. С. Водородно-электронная модель накопления поверхностных состояний на границе раздела окисел—полупроводник при воздействии ионизирующего излучения // Микроэлектроника. 2014. V. 43. № 2. С. 156–158. <https://doi.org/10.7868/S0544126914020100>.
- Barth J. L. Applying modeling space radiation environments // IEEE Nuclear and Space Radiation Effects: Short Course; Applying Computer Simulation Tools to Radiation Effects Problems. 21 July 1997, Snowmass Conf. Center, Snowmass Village, Colorado. 1997. P. 354–367.
- Lai S. K. Interface trap generation in silicon dioxide when electrons are captured by trapped holes // J. Applied Physics. 1983. V. 54. Iss. 5. P. 2540–2546. <https://doi.org/10.1063/1.332323>.
- McLean F. B. A framework for understanding radiation-induced interface states in SiO₂ MOS structures // IEEE Trans. Nuclear Science. 1980. V. NS–27. Iss. 6. P. 1651–1657. <https://doi.org/10.1109/TNS.1980.4331084>.
- Schwank J. R. Total dose effects in MOS devices // IEEE Nuclear and Space Radiation Effects: Short Course. 15–19 July 2002, Phoenix, Arizona, USA. 2002. P. III-1–III-123. <https://doi.org/10.1109/redw.2007.4342542>.
- Schwank J. R., Winokur P. S., Sexton F. W. et al. Radiation-induced interface-state generation in MOS devices // IEEE Trans. Nuclear Science. 1986. V. 33. Iss. 6. P. 1177–1184. <https://doi.org/10.1109/TNS.1986.4334575>.
- Winokur P. S., Sokoloski M. M. Comparison of interface state buildup in MOS capacitors subjected to penetrating and nonpenetrating radiation // J. Applied Physics. 1976. V. 28. Iss. 10. P. 627–730. <https://doi.org/10.1063/1.88592>.

EXISTING MODELS OF PROCESSES OF ACCUMULATION OF RADIATION-INDUCED SURFACE STATES

E. V. Vinogradova, A. M. Bogachev

Institute of Information Technologies and Radioelectronics,
Vladimir State University (IITR VIGU), Vladimir, Russia

The paper presents an analysis of existing models of the processes of accumulation of radiation-induced surface states (SS). Since today there is no complete understanding of the mechanism of SS accumulation during radiation exposure, the issue of studying and improving existing models of the processes of accumulation of radiation-induced PS and creating new ones that describe the kinetics of post-radiation SS formation is topical.

Keywords: ionizing radiation, surface states, electron-hole pairs, traps, interface

Vinogradova Elizaveta Vladimirovna — postgraduate, tikhonravova.elizaveta@mail.ru
Bogachev Alexey Mikhailovich — postgraduate, bogachev-al2012@yandex.ru

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЗВЁЗДНОГО ДАТЧИКА ОРИЕНТАЦИИ ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ И МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЕГО ЗВЁЗДНОГО КАТАЛОГА

В. Ю. Дементьев

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

Насущная потребность в высокоточных измерениях ориентации особо востребована на спутниках дистанционного зондирования Земли. Среди бортовых средств измерения ключевая роль здесь отводится звёздным датчикам, которые способны определять угловую ориентацию космического аппарата с приемлемой точностью. В статье дано описание современного звёздного датчика производства ИКИ РАН. Его характерной чертой является высокая точность измерений угловой ориентации, погрешность которой не превышает единицы угловых секунд, а в преимуществе достигает десятые доли угловых секунд. Обсуждается состав элементной базы прибора с обоснованием принятых решений. Рассмотрены основные конструктивные особенности звёздного датчика, включающие применённые средства тепло- и радиационной защиты. Представлены последствия эксплуатации прибора при изменении условий среды с воздуха на космический вакуум. Описаны особенности наземной фокусировки звёздного датчика с учётом перехода прибора из атмосферы в вакуум. Рассмотрены подходы формирования бортового звёздного каталога на базе современных астрономических каталогов Gaia и Hipparcos. Описаны проблемы, стоящие на пути их корректного использования в звёздном датчике. Рассмотрены причины формирования собственного звёздного каталога с учётом решающей способности прибора, его преимущества и недостатки. Разработка звёздного датчика ориентации повышенной точности завершена и его применение предполагается на перспективных космических аппаратах дистанционного зондирования Земли.

Ключевые слова: ИКИ РАН, ДЗЗ, звёздный датчик, погрешность измерений ориентации

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время звёздные датчики ориентации широко используются в комплексе средств управления угловым движением космического аппарата. Вместе со средствами спутниковой навигации и гироскопами ими ведётся непрерывное управление движением космического аппарата. Средства спутниковой навигации ответственны за определение местоположения космического аппарата на орбите, а звёздные датчики и гироскопы отвечают за ориентацию и угловое движение космического аппарата. В системе ориентации космического аппарата могут применяться также и другие устройства: солнечные датчики, датчики горизонта и магнитометры. Конечный состав и число измерительных бортовых инструментов определяется назначением и целями космического аппарата.

Чтобы свести к минимуму ошибку определения ориентации используются показания не одного звёздного датчика, а сразу нескольких. Во-первых, это помогает поддерживать непрерывность показаний ориентации и служит своеобразной страховкой в тех ситуациях, когда поступление измерений с одного из приборов временно прерывается. В этом случае их подменяют гироскопы или другие звёздные датчики, развёрнутые в противоположном направлении и располагающие другим углом обзора. Одним из примеров, препятствующих нормальной работе звёздного датчика, служит появление в зоне видимости прибора ярких ослепляющих объектов (Солнце, Луна, Земля). Другой возможной ситу-

Дементьев Владимир Юрьевич — инженер-конструктор, dementyev@cosmos.ru

ацией становится попадание прибора под бомбардировку протонов в период повышенной солнечной активности. Низкоорбитальные спутники связи подвергаются подобной атаке при пролёте над зоной Южно-Атлантической магнитной аномалии. В этом месте магнитное поле Земли ослаблено, и внутренний радиационный пояс Земли (пояс Ван-Аллена) располагается на минимальном удалении от поверхности нашей планеты. Во-вторых, совместная обработка данных от нескольких приборов обеспечивает выравнивание погрешности угловой ориентации по всем трём углам, включая азимутальное вращение вокруг оптической оси. В-третьих, сглаживается разночтение в показаниях приборов, исключаются аномальные и низкоточные измерения. В связи с этим на спутниках дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) рекомендовано использовать три-четыре прибора звёздной ориентации с разнесённым углом поля зрения. Благодаря объединению показаний с нескольких звёздных датчиков удаётся существенно повысить точность угловой ориентации до приемлемого уровня.

Современные звёздные датчики ориентации представляют собой оптико-электронные приборы, которые сочетают в себе функции двух устройств: цифровой фотокамеры и вычислительного устройства с собственным программным обеспечением. Алгоритм их работы заключается в следующем. В процессе экспонирования на фотоприёмнике прибора регистрируется участок звёздного неба. После оцифровки полученного изображения и вычитания низкочастотной составляющей на снимке выделяются звёзды, обладающие наибольшей яркостью. Далее координаты найденных звёзд сопоставляются с координатами звёзд из бортового каталога, составленного на базе высокоточного астрономического каталога. На основе этой процедуры рассчитывается ориентация звёздного датчика относительно второй экваториальной системы координат в виде кватерниона или матрицы ориентации.

В одном из старейших отделов института ИКИ РАН (оптико-физических исследований) разработкой, созданием и исследованием приборов звёздной ориентации занимаются уже в течение нескольких десятилетий. За это время было изготовлено множество приборов различной модификации, надёжность которых подтверждена временем. Приборы звёздной ориентации ИКИ РАН успешно эксплуатировались и продолжают эксплуатироваться на борту космических аппаратов различного назначения. Среди них можно отметить: спутник связи «Ямал-100», метеорологический спутник «Метеор-М», спутник дистанционного зондирования Земли «Ресурс-П» и др. (Аванесов и др., 2010, 2014, 2016).

Знаковым событием в истории ИКИ РАН стал запуск самых первых образцов звёздных датчиков, относящихся теперь к уходящему «старому поколению», но заложивших фундамент становления «нового поколения». Это были самые настоящие приборы-«первопроходцы», срок службы которых поражает до сих пор. Они проработали более десяти лет на геостационарном спутнике «Ямал-100» и не прекратили своё функционирование вплоть до окончания миссии.

Самое продолжительное пребывание в космосе показали звёздные датчики, установленные на Международной космической станции (23 года) и спутнике связи «Ямал-202» (20 лет). Их запуск состоялся практически следом за «Ямал-100». Это может показаться невероятным, но их функционирование не остановлено и продолжается по настоящий момент. Один из двух действующих спутников серии «Ямал-200» («Ямал-202») осенью текущего 2023 г. поставит настоящий рекорд — двадцать лет своего непрерывного нахождения на орбите. Всё это время его управление поддерживается с помощью звёздных датчиков производства ИКИ РАН.

В начале 2000-х гг. в ИКИ РАН состоялось долгожданное появление полностью автономного звёздного датчика ориентации. Его установка и предварительная обкатка на нескольких краткосрочных спутниках позволила ввести

его в контур управления на спутнике ДЗЗ «Ресурс-ДК». Это была уже не просто выносная головка, а настоящее самодостаточное устройство, не требующее привлечения вычислительных мощностей бортовой вычислительной системы. Бесценный опыт первых приборов, испытанных на себе давление солнечных вспышек и радиационного поля в районе Южно-Атлантической магнитной аномалии, предвосхитил создание специалистами ИКИ РАН алгоритмических подходов, повлиявших на все будущие поколения. Впервые было осуществлено частичное считывание информации с матрицы и реализовано фрагментарное слежение за звёздами. Это основной режим работы прибора, считающийся теперь привычным делом, в то время стал настоящим открытием. Была в разы повышена частота обновления информации и сделан серьёзный задел по помехозащищённости за счёт ухода от полнокадрового наблюдения. Одновременно стало возможным организовать два параллельных режима ориентации с гироскопов и звёздных датчиков. Последующий прогресс в развитии звёздных датчиков вывел их уже к прямому управлению космического аппарата при поддержке гироскопов на кратковременных участках потери ориентации.



Звёздный датчик ориентации повышенной точности. Внешний вид прибора

Многолетний опыт по развитию и совершенствованию приборов звёздной ориентации нашёл своё воплощение в новой разработке ИКИ РАН (рисунок). По замыслу разработчиков, в новом звёздном датчике точность измерений ориентации должна быть достигнута на порядок выше относительно предыдущего поколения приборов и составлять единицы и доли угловых секунд. Поставленная амбициозная задача наметила разные подходы к её решению, обусловленные различной природой происхождения ошибки измерения ориентации. Были внесены изменения в элементные, конструкционные и алгоритмические особенности будущего прибора. Рассмотрим более детально особенности конструкции и начнём с описания оптической части прибора звёздной ориентации.

ОПТИЧЕСКИЙ БЛОК ЗВЁЗДНОГО ДАТЧИКА ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ

Чтобы достичь высокого углового разрешения, был осуществлён переход на широкоформатный фоточувствительный сенсор, выполненный по КМОП-технологии (комплементарная структура металл-оксид-полупроводник) с уменьшенным размером пикселя. Угловой размер пикселя напрямую влияет на точность расчёта параметров ориентации, поскольку координаты энергетического центра звезды на матрице определяются в субпиксельном представлении.

На сегодняшний день матрицы КМОП завоёвывают всё большую популярность у разработчиков звёздных датчиков и можно сказать, что практически вытеснили собой матричные фотоприёмники на основе ПЗС (прибор с зарядовой связью), применявшиеся долгое время. Радиационно-стойкие, высокоскоростные, с низким уровнем шума и темнового тока в полезном сигнале, способные производить экспозиции в процессе считывания предыдущего кадра — вот далеко не полный перечень преимуществ, объясняющих их всё возрастающую востребованность.

Другим важным элементом звёздного датчика стало применение светосильного объектива с фокусным расстоянием 60 мм. Ещё одной неотъемлемой частью оптической части звёздного датчика выступает светозащитная бленда. Бленда предназначена для подавления паразитных засветок, исходящих от Солнца или других ярких излучателей. В звёздном датчике повышенной точности она получила не совсем обычный способ крепления и установлена на изо-статические опоры теплоизолятора, которые минимизируют тепловой поток от Солнца на корпус прибора. Как показано в ряде опубликованных работ, это направлено на устранение погрешности измерений, вызванной термоупругими деформациями. Это принципиально важная составляющая погрешности измерений, которая не учитывалась в предыдущем поколении приборов. Далее будут рассмотрены другие приёмы отвода тепла и рассмотрен вопрос о радиационной стойкости фотоприёмника.

СРЕДСТВА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ И РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ

Между матрицей и объективом установлен узел тепловой развязки. Это необходимо, чтобы избежать взаимной передачи тепла, провоцирующей негативные последствия на точностные характеристики прибора. Похожая проблема теплообмена возникает между блендой и составной частью прибора. В этом случае тепловое излучение, передаваясь через бленду от Солнца, переносится на корпус прибора. Это вызывает тепловое расширение материалов и потенциально способствует образованию микродеформаций, что впоследствии сказывается на результате измерений прибора. Это обстоятельство отразилось на конструктивном исполнении прибора, в котором бленда прибора стала теплоизолированной от остальной части прибора. Для стабилизации температурного режима прибор впервые для отечественных космических аппаратов будет расположен внутри приборного отсека и будет охлаждаться за счёт радиационного теплообмена с конструкцией космического аппарата.

Непреодолимую актуальность сохранил вопрос о возможности эксплуатации прибора на орбитах с умеренным и повышенным радиационным фоном. Известно, что при длительном воздействии радиационного излучения наступает постепенная деградация фотоприёмника. Кумулятивный эффект от облучения приводит к скачку уровня фоновой подставки (темнового сигнала) и образованию «мёртвых участков» матрицы — битых пикселей, перестающих реагировать на световой поток от звёзд. Это создаёт прямую угрозу точности выполняемых измерений. В связи с этим были проведены многочисленные испытания по радиационной стойкости КМОП-матрицы. После облучения нейтронами изучался вопрос её состояния, сопровождавшийся сравнительным анализом с ПЗС-матрицей. В отличие от КМОП-матрицы ПЗС-матрицы содержат встроенный модуль охлаждения. В ряде опубликованных работ показано, что при отсутствии охлаждения в КМОП-матрице ПЗС-матрицы показывают лучшие результаты по радиационной стойкости. Однако указывается и следующий их недостаток, несвойственный для КМОП. В ПЗС-матрице наблюдается уменьшение эффективности переноса заряда, которое выражается в возникновении целого столбца матрицы с повышенным уровнем темнового сигнала. В результате для обеспечения радиационной стойкости КМОП-матрицы на уровне ПЗС была реализована система охлаждения элементами Пельтье. Требуемый уровень поддержания температуры кристалла матрицы будет находиться ниже 0 °С, а включения элементов Пельтье будет выполняться только в вакууме, чтобы не допустить преждевременного выпадения конденсата на Земле. В программно-математическое обеспечение также внесён ряд изменений по выделению

битых пикселей и их дальнейшему игнорированию. Ограниченное число таких пикселей заносится в специальный буфер памяти и исключается из обработки в алгоритме определения ориентации.

ОСОБЕННОСТИ ФОКУСИРОВКИ ЗВЁЗДНОГО ДАТЧИКА ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ. ДЕФОКУСИРОВКА ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРИ ПЕРЕХОДЕ В ВАКУУМ И БАРИЧЕСКАЯ ПОПРАВКА

Звёздный датчик фокусируется на Земле, в воздушной среде. В процессе наземной фокусировки выбирается положение матрицы относительно плоскости наилучшего изображения объектива, обеспечивающее требуемое изображение звезды. При изменении среды с воздуха на вакуум плоскость наилучшего изображения смещается в сторону объектива. Как показано в работе (Строилов и др., 2022) для звёздного датчика повышенной точности величина этого сдвига составляет 35 мкм и влечёт за собой дефокусировку изображения. Кроме того при включении элементов Пельтье КМОП-матрица приближается к объективу на расстояние около 10 мкм. Дефокусировка может исказить форму изображения звезды и неблагоприятно сказаться на точности локализации. Это подразумевает проведение дополнительных исследований, контролирующих степень дефокусировки как в воздухе, так и в специальных камерах, моделирующих космический вакуум. Подобное стендовое оборудование уже создано в ИКИ РАН и обладает обширным функционалом по исследованию оптических характеристик звёздного датчика (Бессонов и др., 2017). С помощью этой установки, например, осуществляется оценка качества наземной фокусировки и определяется барическая поправка — разница между фокусным расстоянием прибора на воздухе и в вакууме.

Для математического описания исходного изображения звезды на матрице используется её аппроксимация двумерной функцией Гаусса или её ближайшими аналогами. Аргументами этой функции выступают параметры сигмы, определяющие колоколообразную форму звезды по двум осям, соосным сторонам матрицы. Её рекомендуемое значение лежит в пределах $\sigma = [0,6 \ 0,8]$. Значение сигмы вне этого диапазона соответствует двум крайним областям: острой фокусировки и расфокусировки. При проведении экспериментов на воздухе и в вакууме была подобрана оптимальная настройка фокусировки, ограждающая от попадания в эти области. Найдено значение сигмы, при котором форма изображения звезды практически не меняется для двух состояний среды. В работе (Строилов и др., 2022) показано, что параметр σ лежит в допустимом коридоре для обоих случаев и составляет 0,7 (на воздухе) и 0,6 (в вакууме).

БОРТОВОЙ ЗВЁЗДНЫЙ КАТАЛОГ. ДВА МЕТОДА КОРРЕКЦИИ

Несоответствие измеренных и каталожных значений координат для отдельных звёзд приводит к образованию систематической ошибки измерения, которая накладывается на общий результат вычисления параметров ориентации. В работе (Аванесов и др., 2019а) исследованы причины таких отклонений на основе уникального по своей ценности эксперимента, транслировавшего на Землю большой объём телеметрической информации со звёздных приборов ИКИ РАН, функционирующих в космосе. Была сформирована доказательная база, подтверждающая, что положение центра изображения каталожной звезды определяется влиянием соседних звёзд и подвержено смещению. Величина этого смещения может колебаться от нескольких единиц до нескольких десятков угловых

секунд. Вероятную опасность представляют звёзды, расположенные в радиусе нескольких угловых минут от каталожной. Эффект от такого присутствия в общем случае индивидуален и может проявляться по-разному: постоянным или переменным отклонением, когда изображение центра звезды концентрируется вокруг одной или нескольких групп измерений. Полученные результаты, нашли своё логическое продолжение в последующем цикле работ (Аванесов и др., 2019б, в), посвящённых корректировке бортового каталога двумя основными методами: введением поправочных коэффициентов на основе многочисленной статистики измерений и использованию материалов современного астрономического каталога Gaia.

Каталог Gaia — это звёздный каталог, созданный космическим телескопом Gaia и ставшим преемником проекта HIPPARCOS (*англ.* HIgh Precision PARallax COLlecting Satellite) (https://en.wikipedia.org/wiki/Gaia_catalogues). В нём представлена карта распределения звёзд нашей Галактики, постоянно пополняемая и содержащая более 1 млрд объектов с точностью выше 25 угл. мкс. Опубликование в открытой печати материалов каталога Gaia изменило подход к построению звёздного каталога. Впервые открылась возможность подробного изучения влияния звёзд-соседей, входящих в окружение каталожных звёзд (включая самые слабые звёзды, обладающие наименьшим блеском). А также компенсировать недостаток их близкого расположения внесением соответствующих исправлений в бортовой каталог.

Первый способ коррекции бортового каталога подразумевает накопление значительного объёма статистического материала, достаточного для определения поправок каталожных звёзд с учётом их ближайших окрестностей (статистический метод). В работе (Аванесов и др., 2019б) показано снижение систематической ошибки измерений координат звёзд на примере коррекции фрагмента бортового каталога. Вместе с тем полученные результаты можно распространить только на определённый класс приборов и с определённым угловым разрешением. При этом серия приборов, принадлежащих одному классу, должна иметь идентичные показатели по фотометрии и фокусировке. Идея второго метода предусматривает выполнение математического моделирования, в котором осуществляется проецирование звёздного каталога (Gaia) и его пропускание через модель звёздного датчика. Сложностью использования этого метода представляется разработка математической модели звёздного датчика ориентации, равноценно замещающей реальный прибор. Исследование обоих методов продолжается и заложено в рамках научной программы по составлению атласа звёздного неба звёздным датчиком повышенной точности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен звёздный датчик ориентации повышенной точности разработки ИКИ РАН. Приведены основные факторы, оказывающие влияние на точность вычисления ориентации звёздным датчиком и методы их компенсации. Дано описание конструкции, состав и основные технические характеристики звёздного датчика. Относительно предыдущего поколения приборов в нём впервые внедрены специальные средства теплозащиты, направленные на подавление термоупругих деформаций. Для этих целей была модернизирована конструкция как звёздного датчика, так и самого космического аппарата. Рассмотрены особенности наземной фокусировки звёздного датчика с учётом перехода прибора из атмосферы в вакуум. На базе последних редакций астрономического каталога Gaia в сочетании с результатами лётной эксплуатации приборов ИКИ РАН предыдущего поколения были пересмотрены подходы к комплектации бортового

звёздного каталога, не учитываемые ранее. Наряду с целевой задачей управления космическим аппаратом планируется продолжение научной программы по составлению атласа звёздного неба посредством наблюдений звёздного датчика повышенной точности.

ЛИТЕРАТУРА

- Аванесов Г. А., Дунаев Б. С., Красиков В. А., Куделин М. И., Форш А. А.* Датчики звездной ориентации семейства БОКЗ. Опыт 11-летней эксплуатации в космосе // 2-я Всерос. научно-техн. конф. «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов»: тез. М.: ИКИ РАН, 2010. С. 3–4.
- Аванесов Г. А., Бессонов Р. В., Форш А. А., Залялова Р. Г., Филатов А. Д.* Опыт эксплуатации и перспективы развития приборов звездной ориентации БОКЗ // 4-я Всерос. научно-техн. конф. «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов»: тез. М.: ИКИ РАН, 2014. С. 3–4.
- Аванесов Г. А., Бессонов Р. В., Форш А. А., Куделин М. И.* Результаты летных испытаний приборов БОКЗ // 5-я Всерос. научно-техн. конф. «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов»: тез. М.: ИКИ РАН, 2016. С. 6–7.
- Аванесов Г. А., Бессонов Р. В., Сметанин П. С., Филиппова О. В., Эльязев Я. Д.* (2019а) Особенности измерения координат звезд оптико-электронными приборами с различными угловыми разрешениями // 6-я Всерос. научно-техн. конф. «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов»: сб. тр. М.: ИКИ РАН, 2019. С. 103–114.
- Аванесов Г. А., Куркина А. В., Филиппова О. В., Эльязев Я. Д.* (2019б) Эксперимент по коррекции фрагмента бортового каталога прибора БОКЗ-М60 // 6-я Всерос. научно-техн. конф. «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов»: сб. тр. М.: ИКИ РАН, 2019. С. 130–141.
- Аванесов Г. А., Строилов А. Н., Филиппова О. В., Шамис В. А., Эльязев Я. Д.* (2019в) Адаптация звездных каталогов к условиям их применения в звездных датчиках ориентации // 6-я Всерос. научно-техн. конф. «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов»: сб. тр. М.: ИКИ РАН, 2019. С. 141–158.
- Бессонов Р. В., Брысин Н. Н., Полянский И. В., Воронков С. В., Белинская Е. В., Полищук Г. С., Трегуб В. П., Завгородний Д. С.* Стендовое оборудование для определения оптических характеристик звездных датчиков // 5-я Всерос. научно-техн. конф. «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов»: сб. тр. М.: ИКИ РАН, 2017. С. 51–61.
- Строилов Н. А., Белинская Е. В., Брысин Н. Н. и др.* Критерии и методы фокусировки высокоточных измерительных систем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 119–130. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-119-130.

DESIGN FEATURES OF A HIGH-PRECISION STAR ORIENTATION SENSOR AND METHODS OF FORMING ITS STAR CATALOG

V. Yu. Demytyev

Space Research Institute RAS (IKI), Moscow, Russia

The urgent need for high-precision orientation measurements is particularly in demand on Earth remote sensing satellites. Among the onboard measuring instruments, the key role here is assigned to star sensors, which are able to determine the angular orientation with acceptable ac-

curacy. The article describes a modern star sensor manufactured by IKI RAN. Its characteristic feature is the high accuracy of angular orientation measurements, the error of which does not exceed units of angular seconds, and in advantage reaches tenths of angular seconds. The paper discusses the composition of the element base of the device with the justification of the decisions made. The main design features of the star sensor, including the applied means of heat and radiation protection, are considered. The consequences of the operation of the device when environmental conditions change – from air to space vacuum are presented. The features of the ground-based focusing of the stellar sensor are described, taking into account the transition of the device from the atmosphere to vacuum. Approaches to the formation of an onboard star catalog based on modern astronomical catalogs Gaia and Hipparcos are considered. The problems that stand in the way of their correct use in the star sensor are described. The reasons for the formation of its own star catalog, taking into account the resolution of the device, its advantages and disadvantages are considered. The development of a high-precision stellar orientation sensor has been completed and its application is expected on promising spacecraft for remote sensing of the Earth.

Keywords: IKI RAN, remote sensing, star sensor, orientation measurement error

Dementyev Vladimir Yurievich — design engineer, dementyev@cosmos.ru

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ НАЗЕМНОЙ ОТРАБОТКИ ПРОГРАММНО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗВЁЗДНОГО ДАТЧИКА ОРИЕНТАЦИИ ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ

В. Ю. Дементьев

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

Рассмотрен высокоточный звёздный датчик ИКИ РАН, разработка которого продолжалась около семи лет и завершилась последними испытаниями только в 2021 г. Даны краткое описание и основные характеристики прибора, которые улучшены по всей палитре показателей. Среди них стоит выделить сочетание высокой частоты работы и угловой скорости прибора на фоне точности измерения параметров ориентации в десятые доли угловых секунд ($\sigma = 0,1$ угл. с). Описаны основные этапы проверок звёздного датчика в наземных условиях. Сформулированы задачи и методы контроля каждого этапа. Представлена обобщённая программа наземных испытаний звёздного датчика с подробностями наиболее важных испытаний. Изложены методика и ключевые результаты наземной отработки высокоточного звёздного датчика на стенде динамических испытаний, традиционно используемом в ИКИ РАН для проверки программно-математического обеспечения. Результаты стендовых испытаний дополнены и сопоставлены с данными, полученными в ходе натурных испытаний. Вся программа наземных испытаний была успешно апробирована на специально изготовленном образце звёздного датчика и впоследствии перенесена на штатные приборы. Результаты всех испытаний признаны положительными. Первые лётные образцы приборов уже готовы к поставке для оснащения перспективных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли.

Ключевые слова: ИКИ РАН, звёздный датчик, наземная отработка

ВВЕДЕНИЕ

Процесс наземных испытаний звёздного датчика включает сложную многоуровневую систему проверок. Условно их можно разделить на три категории. К первой категории испытаний относят проверки, в которых осуществляется попытка воссоздать жёсткие условия космической среды и поместить в них тестируемый прибор. Здесь выполняется контроль прочности элементов конструкции звёздного датчика в специальных наземных установках, моделирующих враждебное влияние космической среды. К числу таких испытаний относят: климатические, термовакуумные, механические и др. Ко второй категории испытаний относят различные проверки программно-математического обеспечения прибора на специализированных стендах, моделирующих звёздное небо. Здесь выполняется большой спектр задач контроля, о которых пойдёт речь в дальнейшем, где алгоритм работы прибора тщательно исследуется на соответствие требований технического задания и протокола информационного обмена. В ИКИ РАН одним из таких инструментальных средств выступает стенд динамических испытаний, который в течение многих лет успешно используется для отработки программно-математического обеспечения звёздных датчиков различной модификации (Кондратьева, 2005). Результаты стендовых испытаний в обязательном порядке подтверждаются натурными экспериментами, проводимыми в обсерватории ИКИ РАН. Третья категория испытаний — это калибровочные работы. Этот вид испытаний сопряжён с настройкой и исследованием оптических характеристик звёздного датчика. Проведение этого этапа подразумевает контроль фотоме-

трических характеристик прибора, оценку правильности фокусировки, определение матрицы взаимной ориентации и построение математической модели оптической системы (фокусное расстояние, обобщённая дисторсия, координаты главной точки). Укрупнённая схема наземных испытаний звёздного датчика приведена в таблице.

Программа наземных испытаний звёздного датчика

Проверка прочности элементов конструкции	Проверка программно-математического обеспечения	Калибровка
Климатические испытания	Стенд динамических испытаний	Фотометрическая
Термовакуумные испытания	Натурные испытания (обсерватория ИКИ РАН)	Геометрическая
Механические испытания		
Электромагнитные испытания и др.		

В ИКИ РАН описанной процедуре наземной отработки подвергается каждый изготавливаемый прибор, за исключением первого образца серии. Он проходит более расширенную версию программы испытаний. Все испытания проводятся в соответствии с разработанной документацией, базирующейся на требованиях технического задания с привлечением типовых программ и стандартизированных методик.

В ИКИ РАН разработан и изготовлен звёздный датчик ориентации повышенной точности. Необходимость разработки нового прибора была обусловлена потребностью в высокоточных измерениях ориентации, особо востребованных на спутниках дистанционного зондирования Земли. Конструктивно звёздный датчик ориентации имеет моноблочное исполнение и построен на базе современной высокоскоростной, радиационно-стойкой КМОП-матрицы (комплементарная структура металл-оксид-полупроводник). Отличительной особенностью звёздного датчика стало применение комплекса мер конструктивного и программного характера, позволивших существенно повысить точность измерений угловой ориентации (до $\sigma = 0,1$ угл. с). Внешний вид прибора, закреплённого на транспортной плите, представлен на рис. 1. В статье будут представлены ключевые результаты испытаний программно-математического обеспечения звёздного датчика ориентации повышенной точности, полученные на стенде динамических испытаний и в обсерватории ИКИ РАН.

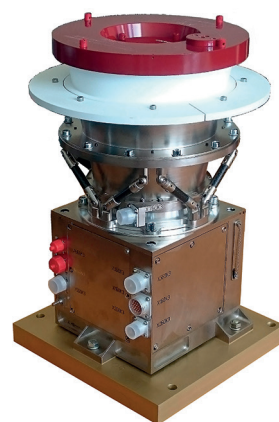


Рис. 1. Звёздный датчик ориентации повышенной точности. Внешний вид прибора

МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ НА ДИНАМИЧЕСКОМ СТЕНДЕ

Для отработки программно-математического обеспечения звёздного датчика повышенной точности выполнялся цикл проверок на стенде динамических испытаний, позволяющем моделировать статичное и динамичное изображение звёздного неба. Статичная картина звёздного неба была использована для под-

тверждения функционирования прибора в различных точках небесной сферы. На длительном интервале опроса оценивалась погрешность определения угловых параметров ориентации. Благодаря статичному положению проверялась реакция прибора на различные команды, заложенные протоколом информационного обмена. Динамичная картина звёздного неба была использована для подтверждения функционирования прибора в условиях имитации орбитального полёта. Параметры орбит последовательно варьировались в целях полноценного сканирования бортового звёздного каталога. Угловая скорость и ускорение выбирались исходя из требований технического задания. При положительном результате полёт возобновлялся по той же орбитальной траектории, но с ухудшением светооптической обстановки. Рассматривалось сложное движение по криволинейной орбитальной траектории. В рамках дополнительных испытаний проводилась проверка реакции прибора к условиям, заведомо непригодным для функционирования, таким как: отсутствие объектов в поле зрения, полная и частичная засветка, а также ложная конфигурация звёзд, не соответствующая астрономическому атласу неба.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ НА ДИНАМИЧЕСКОМ СТЕНДЕ

Статика. Оценка случайной составляющей погрешности измерения ориентации

Для оценки шума, вносимого в результат вычисления угловых параметров ориентации звёздным датчиком, на испытательном стенде был смоделирован неподвижный участок звёздного неба (рис. 2). Координаты участка: прямое восхождение $\alpha = 45^\circ$, склонение $\delta = 0^\circ$. Суть эксперимента заключалась в получении от прибора продолжительной сессии измерений с её последующей статистической обработкой.

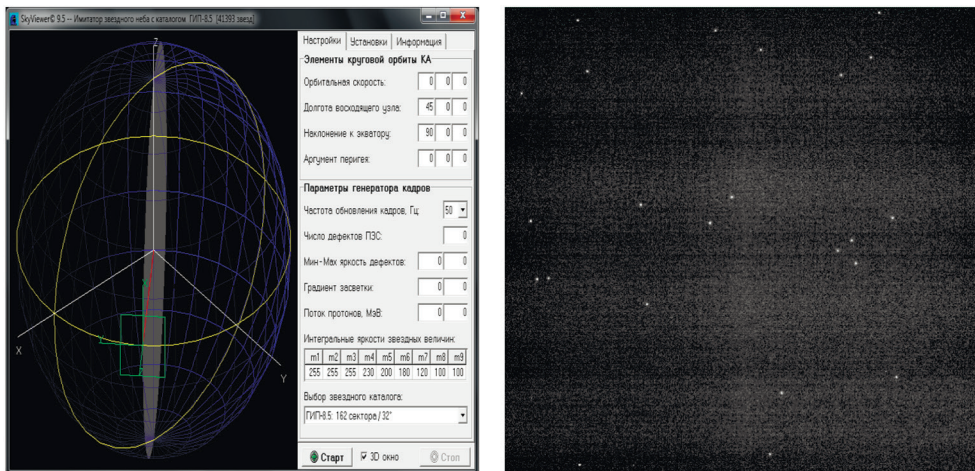


Рис. 2. Моделирование статичного участка звёздного неба на стенде динамических испытаний и его фоторегистрация прибором

Наблюдения показали, что в течение всего съёма данных прибором стабильно проецировалось 20 фрагментов вокруг выбранных каталожных звёзд. Все они были благополучно идентифицированы, локализованы и распознаны.

После извлечения угловых координат (прямого восхождения, склонения и азимута) из кватерниона ориентации были построены соответствующие графики ориентации во времени за вычетом средней составляющей. В качестве примера на рис. 3 приведён график угла склонения во времени. Среднеквадратическое отклонение ($СКО = 1\sigma$) всех трёх углов составило: 0,148; 0,109 и 0,512 угл.с. соответственно.

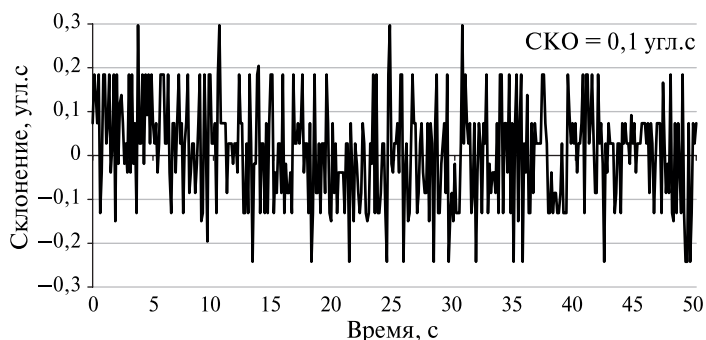


Рис. 3. График угла склонения, зарегистрированный звёздным датчиком на стенде динамических испытаний (статика)

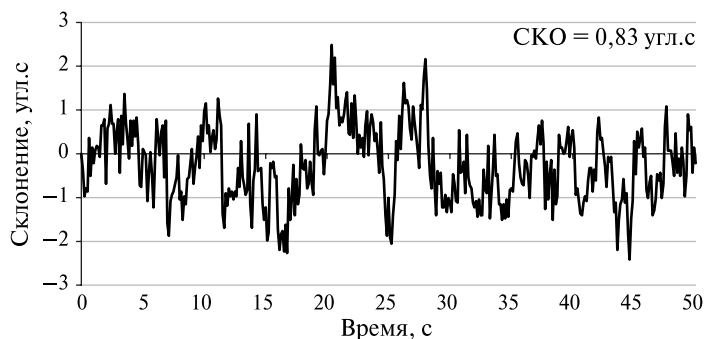


Рис. 4. График угла склонения, зарегистрированный звёздным датчиком при натурной съёмке (скорость вращения Земли)

Для сравнения представим аналогичный график, полученный в ходе натурных испытаний, с прибора, в котором СКО не превысило значения 1 угл.с. (рис. 4). Изменение положения прибора определялась только скоростью вращения Земли $\omega = 15 \text{ угл.с/с}$.

Динамика. Моделирование движения по различным круговым орбитам

Испытания в динамике подразумевают моделирование орбитального полёта и построение соответствующей траектории движения звёздным датчиком ориентации. Имитация орбитального полёта на испытательном стенде осуществлялась перемещением «звёзд» на экране монитора. Были поставлены многочисленные полёты с постоянной угловой скоростью по различным круговым орбитам. Формирование орбит на испытательном стенде строилось исходя из вариации

двух основных орбит: экваториальной и полярной. У экваториальной орбиты варьировался наклон к экватору без изменения долготы. У полярной орбиты варьировалась долгота без изменения наклона к экватору. Соответствующие орбитальные параметры изменялись в диапазоне от 0 до 180° с дискретностью в 10°, что приблизительно соответствует полю зрения прибора.

В статье нет возможности вывести результаты для всех моделируемых круговых орбит. Поэтому ограничимся представлением только двух ключевых из них — это экваториальной и полярной. На рис. 5 приведены результаты моделирования круговой орбиты (слева) и её обработка высокоточным звёздным датчиком ориентации (справа).

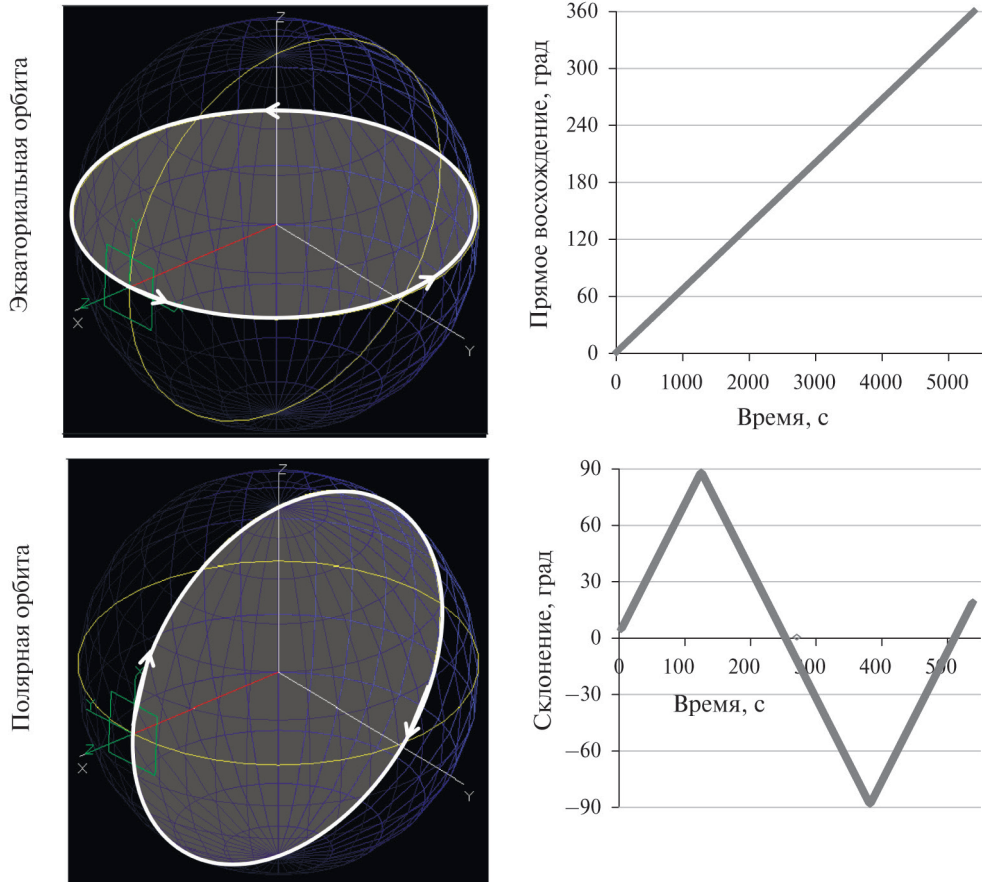


Рис. 5. Непрерывное определение ориентации звёздным датчиком при моделировании движения по круговой орбите с постоянной угловой скоростью

Движение по экваториальной орбите осуществлялось с угловой скоростью $\omega = 240$ угл.с/с, время оборота вокруг орбиты составило 90 мин. Движение по полярной орбите осуществлялось с угловой скоростью $\omega = 2700$ угл.с/с, время оборота вокруг орбиты — 8 мин.

Проведённые испытания подтвердили надёжность функционирования звёздного датчика повышенной точности в любой точке небесной сферы, а также в широком диапазоне угловых скоростей.

Динамика. Моделирование движения по криволинейной орбитальной траектории

На основе положительных результатов, достигнутых высокоточным звёздным датчиком в динамике, исследования были продолжены с усложнением задачи моделирования орбитального полёта. В настоящем эксперименте имитация орбитального полёта на испытательном стенде осуществлялась по криволинейной траектории, в которой закладывалось смещение по изначально заданной круговой орбите. Для построения сложного движения были задействовано вращение вокруг нескольких проекций угловой скорости, попеременно включающиеся в определённые интервалы времени (рис. 6).

На рис. 7 (см. с. 76) представлен процесс отработки высокоточным звёздным датчиком заданной циклограммы вращения в виде графика зависимости двух угловых параметров ориентации: склонение/прямое восхождение (с демонстрацией промежуточных результатов в фиксированные моменты времени).

Высокоточным звёздным датчиком на протяжении всего эксперимента непрерывно обеспечивалась выдача угловых параметров ориентации. Сбоёв в работе прибора не обнаружено.

Полученные результаты подтвердили надёжность функционирования звёздного датчика повышенной точности при движении по орбитальной траектории различной степени сложности.

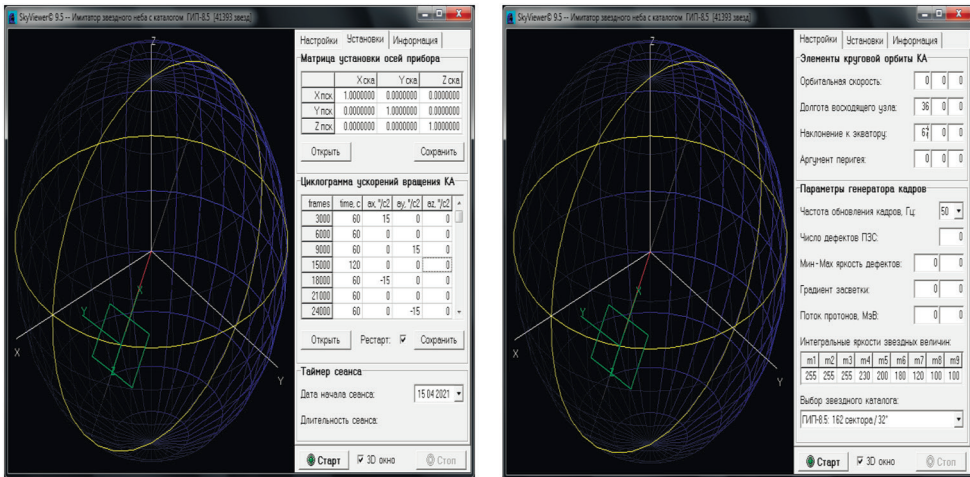


Рис. 6. Моделирование движения по криволинейной орбитальной траектории на стенде динамических испытаний

Динамика. Моделирование движения с постоянным угловым ускорением

На смену движению с постоянной угловой скоростью была реализована серия моделирований с введением углового ускорения. В качестве примера приведём результаты эксперимента, в котором движение осуществлялось по экваториальной орбите с угловым ускорением $0,5 \text{ град}\cdot\text{с}^{-2}$ ($1800 \text{ угл. с}\cdot\text{с}^{-2}$). Моделируемое движение носило волнообразный характер и содержало в себе отрезки разгона до угловой скорости 1800 угл. с/с и отрезки торможения, в которых прибор двигался в обратном направлении с угловой скоростью -1800 угл. с/с . Результаты моделирования приведены на рис. 8 (см. с. 76).

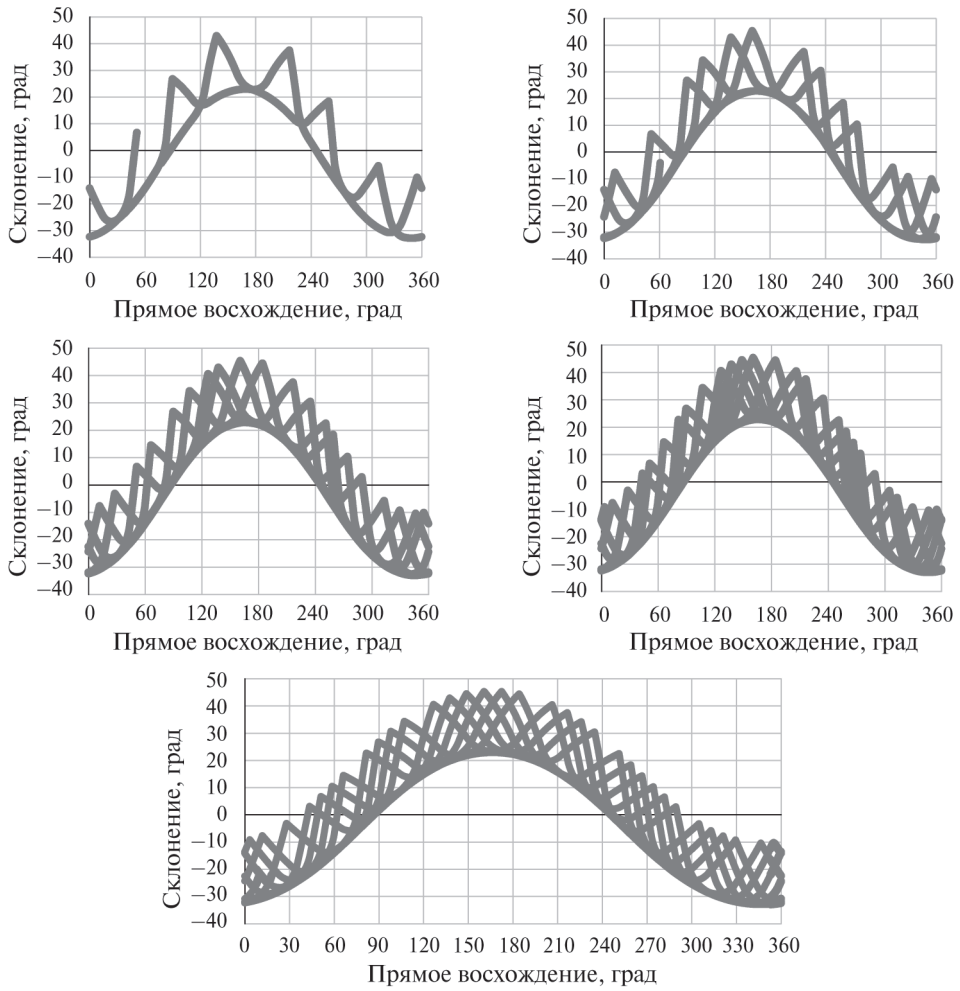


Рис. 7. Непрерывное определение ориентации звёздным датчиком при движении по криволинейной траектории

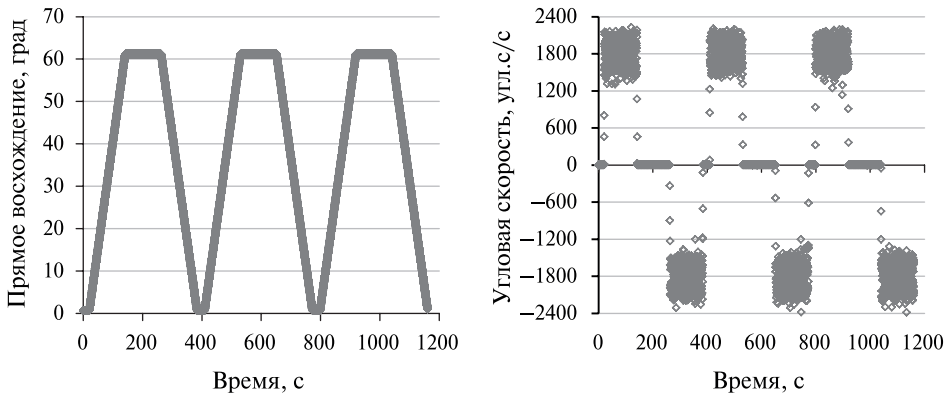


Рис. 8. Непрерывное определение ориентации звёздным датчиком при моделировании движения по экваториальной орбите с угловым ускорением

На протяжении всего эксперимента высокоточным звёздным датчиком непрерывно обеспечивалась выдача угловых параметров ориентации. Сбоёв в работе прибора не обнаружено.

Аналогичные результаты были получены в ходе натуральных экспериментов, где вращение прибора выполнялось при помощи поворотной платформы. Была доказана устойчивая работа прибора на предельных значениях угловых скоростей и ускорений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен звёздный датчик ориентации повышенной точности разработки ИКИ РАН. Описаны основные этапы проверок звёздного датчика в наземных условиях. Представлена обобщённая программа наземных испытаний звёздного датчика. Приведены методика и результаты отработки программно-математического обеспечения прибора как в лабораторных условиях (на стенде динамических испытаний), так и в натуральных испытаниях. Измерено среднеквадратическое отклонение угловых параметров ориентации прибора в двух контрольных положениях: в статике и при скорости вращения Земли. СКО прибора в статике соответствует значению 0,1 угл. с. В рамках стендовых испытаний подтверждена работоспособность звёздного датчика при движении по различным круговым орбитам. Доказана непрерывность измерения угловых параметров ориентации с заданной частотой работы. Установлена надёжность функционирования прибора в широком диапазоне угловых скоростей и ускорений. Таким образом, по результатам проведённых испытаний получено соответствие требованиям технического задания, протокола информационного обмена и заявленным техническим характеристикам разработанного звёздного датчика ориентации.

ЛИТЕРАТУРА

Кондратьева Т. В. Моделирование параметров движения космических аппаратов и внешних условий космического пространства в процессе наземных испытаний звёздных координаторов: препринт. М.: ИКИ РАН, 2005. Пр-2120. 21 с.

METHODOLOGY AND RESULTS OF GROUND-BASED TESTING OF SOFTWARE AND MATHEMATICAL SUPPORT FOR A HIGH-PRECISION STAR ORIENTATION SENSOR

V. Yu. Demytyev

Space Research Institute RAS (IKI), Moscow, Russia

The high-precision star sensor of the IKI RAN, the development of which lasted about seven years and ended with the last tests only in 2021, is considered. A brief description and the main characteristics of the device are given, which are improved across the entire palette of indicators. Among them, it is worth highlighting the combination of high operating frequency and angular velocity of the device against the background of the accuracy of measuring orientation parameters in tenths of angular seconds ($\sigma = 0.1$ angular seconds). The main stages of checking the star sensor in ground conditions are described. The tasks and methods of control of each stage are formulated. A generalized program of ground tests of the star sensor with details of the most important tests is presented. The methodology and key results of ground-based testing of a high-precision star sensor on a dynamic test bench, traditionally used in the IKI of the Russian Academy

of Sciences to test software and mathematical support, are described. The results of bench tests are supplemented and compared with the data obtained during field tests. The entire program of ground tests was successfully tested on a specially manufactured sample of the star sensor and subsequently transferred to standard instruments. The results of all tests were recognized as positive. The first flight samples of the instruments are already ready for delivery to equip promising spacecraft for remote sensing of the Earth.

Keywords: IKI RAN, star sensor, ground testing

Dementyev Vladimir Yurievich — design engineer, dementyev@cosmos.ru

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ СО ЗВЁЗДНОГО ДАТЧИКА ОРИЕНТАЦИИ ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ

В. Ю. Дементьев

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

Представлен разработанный программный комплекс обработки и анализа телеметрической информации со звёздного датчика ориентации повышенной точности. Созданный инструмент позволяет максимально быстро обработать большой массив данных, поступающий с прибора звёздной ориентации в ходе наземных испытаний или непосредственно с борта космического аппарата. К числу преимуществ программного комплекса входит удобная каталогизация информации с возможностью селекции данных по заданным условиям и её эффективному анализу. Стало возможным ускоренно оценить поведение звёздного прибора в процессе многочасовых испытаний и выявить соответствующие недочёты в его алгоритмической части. Приведены примеры практического применения программного комплекса на базе климатических испытаний. В рамках апостериорной обработки было многократно измерено время определения ориентации звёздным датчиком в различных режимах работы. В результате суточного наблюдения за прибором в термокамере было установлено, что время определения начальной ориентации в среднем не превышает 3 с и не зависит от внешней температуры. Были выделены ключевые параметры прибора, получившие графическую и статистическую интерпретацию. Также были проведены расчёты отклонения угловых параметров ориентации прибора, смещение энергетических координат звёзд на КМОП-матрице при нормальных и экстремальных температурных значениях. Благодаря этому было достигнуто цельное представление о влиянии температуры окружающей среды на фотометрические характеристики прибора, величины темнового тока и выбора им порога отсечки.

Ключевые слова: ИКИ РАН, звёздный датчик, телеметрия, анализ данных

ВВЕДЕНИЕ

В ходе производственного цикла прибор звёздной ориентации проходит большое количество проверочных мероприятий. Речь идёт о проведении наземного комплекса испытаний, в процессе которых прибор ставится в условия, максимально приближённые к условиям космической среды. В качестве примера можно привести следующие виды испытаний: климатические, термовакуумные, стендовые, натурные и др. В ходе каждого такого эксперимента происходит получение и аккумулярование значительных объёмов телеметрических массивов. В настоящий момент эта информация хранится в сыром и расшифрованном виде в протоколах контрольно-испытательной аппаратуры без каталогизирования, что затрудняет её использование и анализ. Это особенно чувствительно в многочасовых испытаниях с одновременным участием нескольких приборов. Трансляция телеметрической информации в таких экспериментах ведётся параллельно с каждого прибора и регистрируется во множестве файлов.

Обозначенная проблема предстала особенно остро для звёздного датчика ориентации повышенной точности, характеризующимся увеличенной частотой опроса и заметно расширенной телеметрией. Для её решения было создано специальное программное обеспечение, которое позволяло в кратчайшие сроки выполнить детальный анализ информации, поступившей с одного или несколь-

ких приборов с различных видов испытаний. Это дало возможность ускоренно оценить результат работы прибора в целом, обнаружить точечные аномалии в измерениях и оперативно отреагировать на них внесением соответствующих корректив в программно-математическом обеспечении. Протоколы испытаний существенно обогатились ценной сопроводительной информацией о состоянии прибора, наполнились статистическими оценками и графической визуализацией ключевых параметров.

В настоящей работе приведены результаты климатических испытаний звёздного датчика ориентации повышенной точности. Данные результаты были получены обработкой множественных телеметрических массивов информации разработанным программным комплексом.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА НА ПРИМЕРЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ



Рис. 1. Звёздный датчик со статическим имитатором

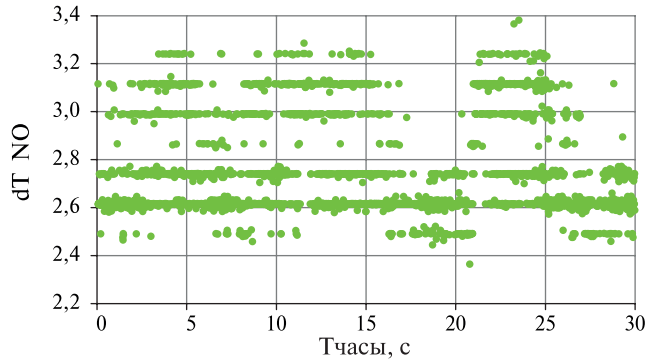
Проведение климатических испытаний предусматривало тестирование звёздного датчика в течении 30 ч при непрерывном изменении температуры в широком диапазоне значений от -15 до $+45$ °С (туда и обратно). В течение всего хода испытаний производился съём данных с прибора по заданной циклограмме, подразумевающей автоматическую смену режима работы после накопления фиксированного количества измерений.

При нахождении в термокамере звёздный датчик комплектовался специальным статическим имитатором (рис. 1). Состав имитатора включал следующие основные компоненты: слайд с изображением точечных источников, светодиод и коллиматорный объектив. При подаче питания на имитатор в поле зрения прибора формировалось постоянное изображение участка небесной сферы с известными координатами.

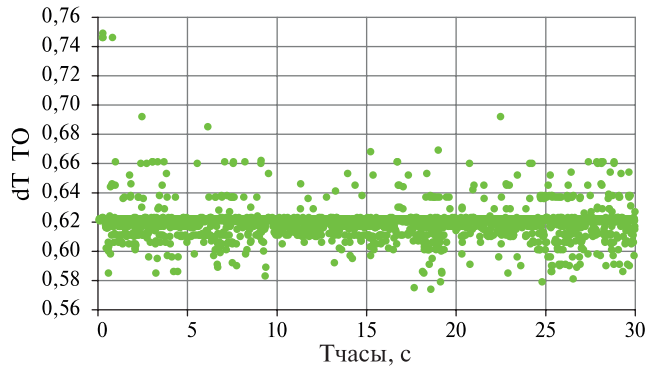
Время определения ориентации звёздным датчиком повышенной точности в режимах «Начальная ориентация»/«Текущая ориентация»

Перед демонстрацией результатов климатических испытаний, полученных посредством программного комплекса, рассмотрим основные режимы работы звёздного датчика ориентации повышенной точности. Их насчитывается всего три. Это режимы «Начальная ориентация» (НО), «Текущая ориентация» (ТО) и режим «Слежение». В режиме НО априорная информация об ориентации не известна. При запуске этого режима прибор выполняет съёмку видимого изображения, попадающего в его поле зрения. На запечатлённом снимке выделяются изображения звёзд и определяются координаты их энергетических центров. Далее проводится отождествление полученной конфигурации звёзд со звёздами бортового каталога, хранящимся в памяти прибора. Решив задачу НО прибор переходит в режим «Слежение», в котором проводится считывание отдельных участков матрицы («фрагментов») на основе данных о предыдущих измерениях. Режим ТО тождественен режиму НО за одним лишь исключением: наличием априорной информации об ориентации, которая сужает круг поиска по бортовому каталогу и осуществляет переход в режим «Слежение» значительно быстрее.

Время определения ориентации НО, с
 Среднее = 2,7499
 СКО = 0,20093
 Минимум = 2,364
 Максимум = 3,381
 Амплитуда = 1,017
 Число измерений = 3255



Время определения ориентации ТО, с
 Среднее = 0,61999
 СКО = 0,0096995
 Минимум = 0,574
 Максимум = 0,749
 Амплитуда = 0,175
 Число измерений = 3247



Температура КМОП-матрица
 Среднее = 19,594
 СКО = 19,538
 Минимум = -8
 Максимум = 48,2
 Амплитуда = 56,2
 Число измерений = 3254

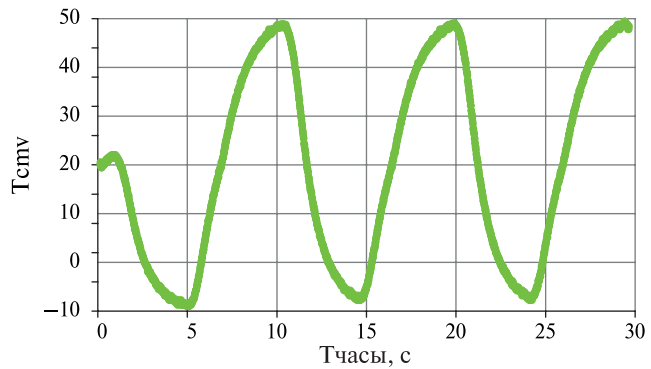
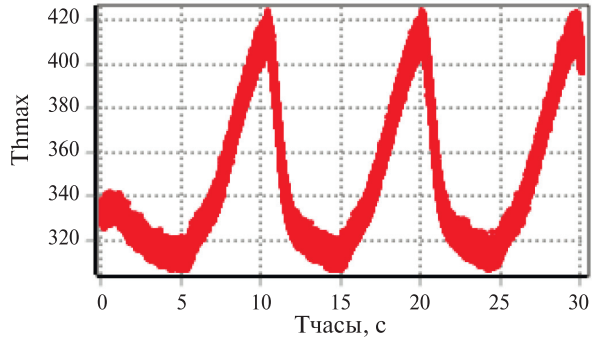


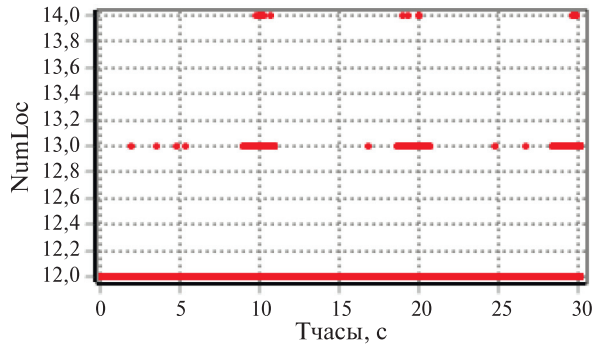
Рис. 2. Демонстрация результатов работы программного комплекса. Измерение времени определения ориентации звёздным датчиком в режимах НО/ТО

На рис. 2 приведены результаты многократного измерения времени определения ориентации звёздным датчиком в режимах НО/ТО, полученные с помощью программного комплекса. Количество инициированных командных запусков ориентации составило свыше 3000. Время определения ориентации в режиме НО составило в среднем 2,7 с, а в режиме ТО — 0,6 с. Также на рис. 2 приведён график зависимости температуры КМОП-матрицы (комплементарная структура металл-оксид-полупроводник) прибора от времени согласно показаниям контролирующего датчика. Полученные результаты подтвердили, что время расчёта ориентации звёздным датчиком постоянно и не зависит от изменения внешней температуры.

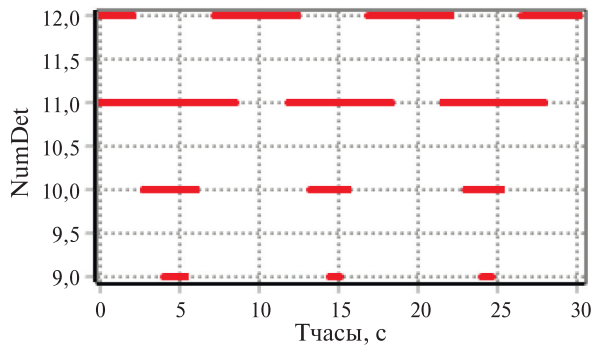
**Максимальный порог
во фрагменте»**
Среднее=346.43
СКО=32.889
Минимум=307
Максимум=424
Амплитуда=117
Число измерений=659391



Локализованные объекты
Среднее=12.004
СКО=0.065546
Минимум=12
Максимум=14
Амплитуда=2
Число измерений=659391



Распознанные объекты
Среднее=11.206
СКО=0.7119
Минимум=9
Максимум=12
Амплитуда=3
Число измерений=659391



**Температура
КМОП матрица**
Среднее=19.867
СКО=19.592
Минимум=-8
Максимум=48.5
Амплитуда=56.5
Число измерений=659391

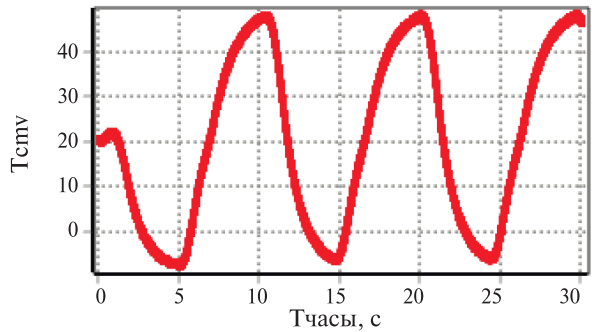


Рис. 3. Демонстрация результатов работы программного комплекса. Визуализация отдельных параметров звездного датчика в режиме «Слежение» с подсчетом статистики

Функционирование в режиме «Слежение»

Количество успешных измерений ориентации звёздным датчиком повышенной точности в режиме «Слежение» составило свыше полумиллиона значений за 30-часовой интервал опроса. На рис. 3 (см. с. 82) приведена визуализация отдельных параметров прибора в режиме «Слежение», полученная с помощью программного комплекса. Визуализация выделенных параметров прибора может быть распространена на все другие параметры с возможностью селекции данных, соответствующих экстремальным или нормальным температурным значениям. Таким образом, для каждого выбранного параметра может быть построена подобающая графическая интерпретация с подсчётом статистики. Также в программном комплексе есть опция сравнения показаний интересующих параметров, приходящихся на один момент времени.

Наблюдение за одной звездой

На рис. 4 приведена визуализация наблюдения за одной из звёзд на кадре, полученная с помощью программного комплекса. Визуализация наблюдения за одной звездой может быть распространена на все звёзды снимка с возможностью селекции данных, соответствующих экстремальным или нормальным температурным значениям. Также в программном комплексе заложен контроль характеристик выбранной звезды: оценка смещения её энергетического центра, флуктуация интегральной яркости и площади на фотоприёмнике.

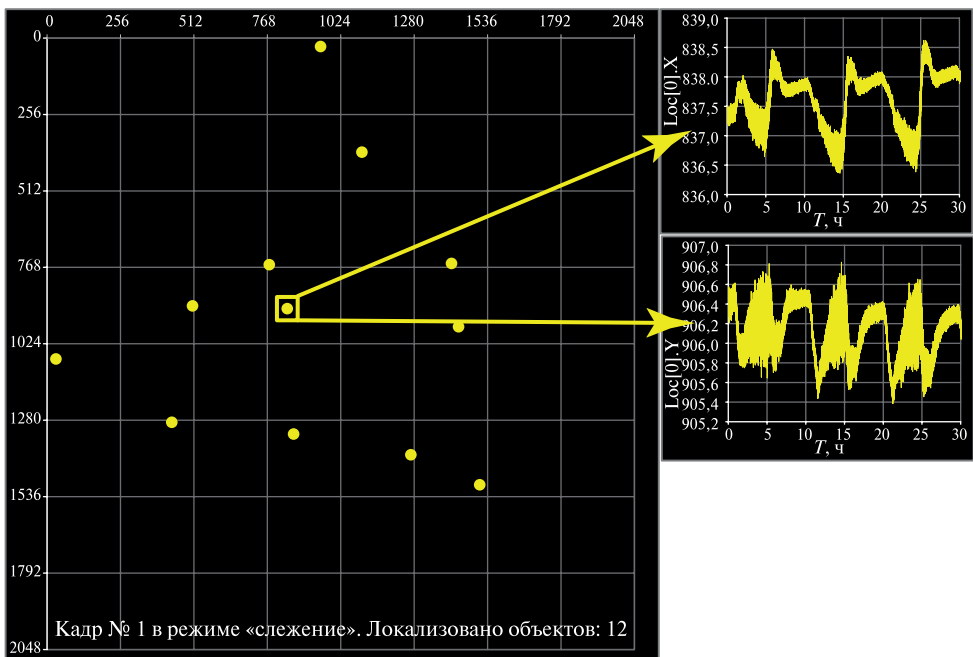


Рис. 4. Демонстрация результатов работы программного комплекса.
Визуализация наблюдения за одной звездой

Контроль термодатчиков

Звёздный датчик ориентации повышенной точности укомплектован специальными датчиками, контролирующими его температурный режим. На рис. 5 приведена визуализация показаний термодатчика с КМОП-матрицы и четырёх аналоговых термодатчиков. В программном комплексе заложена возможность объединения всех показаний термодатчиков на один график, а также построения каждого графика в отдельности и отображения соответствующей статистики. Результаты испытаний, проведённых через программный комплекс, подтвердили правильность определения температурного режима со стороны всех термодатчиков.

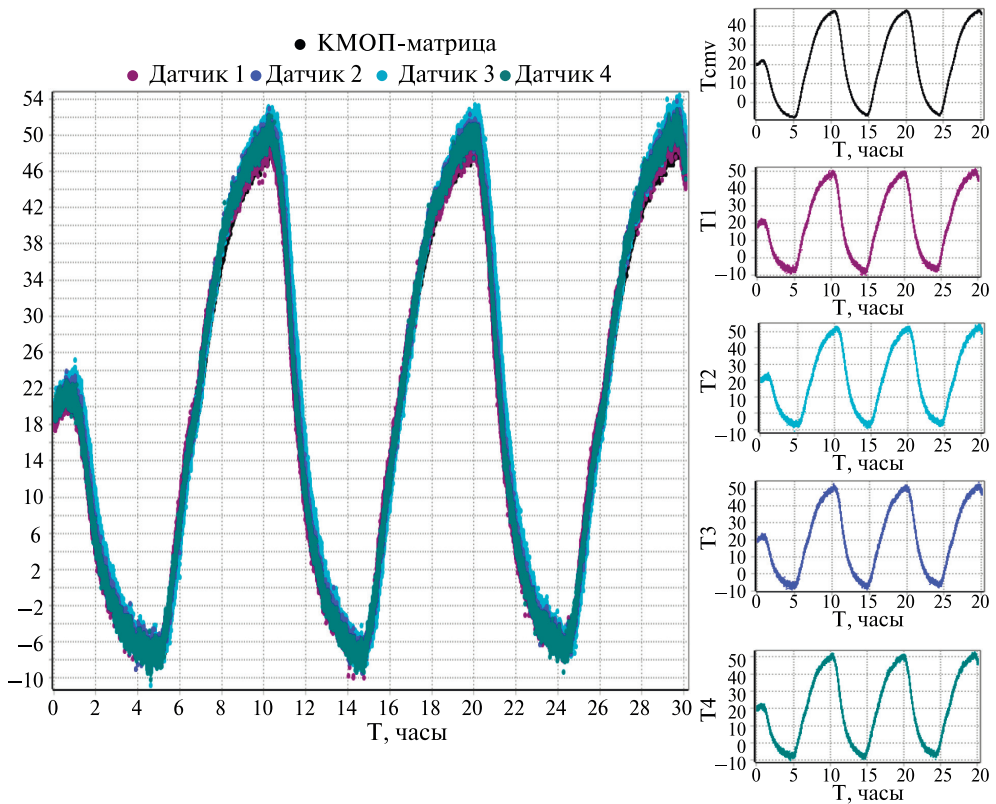


Рис. 5. Демонстрация результатов работы программного комплекса. Визуализация работы термодатчиков (совместно на одном графике и по отдельности)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан программный комплекс обработки и анализа телеметрической информации со звёздного датчика ориентации повышенной точности. Он позволяет оперировать с большим массивом телеметрической информации, осуществлять структурирование, каталогизирование и проводить детальный анализ по широкому спектру получаемых данных. На примере климатических испытаний показана возможность получать обширную статистику и визуализацию

ключевых параметров звёздного датчика с селекцией данных по заданному условию. Также с помощью программного комплекса стало возможным измерять время определения ориентации прибором в различных режимах работы. Установлено, что время определения начальной ориентации прибором в среднем не превышает 3 с и не зависит от внешней температуры. Благодаря применению программного комплекса было достигнуто цельное представление о влиянии температуры окружающей среды на фотометрические характеристики прибора, величины темнового тока и выбора им порога отсечки.

DEVELOPMENT OF SOFTWARE TOOLS FOR PROCESSING AND ANALYZING TELEMETRIC INFORMATION FROM A HIGH-PRECISION STAR ORIENTATION SENSOR

V. Yu. Demytyev

Space Research Institute RAS (IKI), Moscow, Russia

The developed software package for processing and analyzing telemetric information from a high-precision star orientation sensor is presented. The created tool allows you to process as quickly as possible a large array of data coming from the stellar orientation device during ground tests or directly from the spacecraft. The advantages of the software package include convenient cataloging of information with the ability to select data according to specified conditions and its effective analysis. It became possible to rapidly evaluate the behavior of the stellar device during many hours of testing and identify the corresponding shortcomings in its algorithmic part. Examples of practical application of the software package based on climate tests are given. Within the framework of a posteriori processing, the time for determining the orientation by a star sensor in various operating modes was repeatedly measured. As a result of daily monitoring of the device in a thermal chamber, it was found that the time for determining the initial orientation does not exceed 3 seconds on average and does not depend on the external temperature. The key parameters of the device were identified, which received graphical and statistical interpretation. Also, calculations were made of the deviation of the angular parameters of the orientation of the device, the displacement of the energy coordinates of the stars on the CMOS matrix at normal and extreme temperature values. Thanks to this, a complete understanding of the influence of ambient temperature on the photometric characteristics of the device, the magnitude of the dark current and the choice of the cut-off threshold was achieved.

Keywords: IKI RAN, star sensor, telemetry, data analysis

Demytyev Vladimir Yurievich — design engineer, dementyev@cosmos.ru

РАСПРОСТРАНЁННОСТЬ ВОДЫ И ХЛОРА В ГЕОЛОГИЧЕСКИХ РАЙОНАХ КРАТЕРА ГЕЙЛ НА МАРСЕ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТА ДАН

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

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

В настоящем исследовании изучено содержание воды и хлора, а также других элементов, поглощающих нейтроны, в подповерхностном слое грунта кратера Гейл на основе измерений с помощью прибора «Динамическое альbedo нейтронов» (ДАН) на борту марсохода НАСА «Кьюриосити». Рассмотрены результаты активных и пассивных измерений, выполненных с 2012 по 2021 г. Содержание воды и хлора наряду с другими поглотителями нейтронов изучалось отдельно для различных геологических регионов вдоль траверса марсохода, соответствующих стратиграфической колонке, разработанной научной командой «Кьюриосити». Для каждого региона представлены средние значения и особенности распределения содержания воды и хлора. Содержание воды повышается вдоль движения марсохода по траверсу и имеет наиболее высокие значения в формации Каролин Шумейкер. Большая часть геологических регионов имеет средние значения воды от 2 до 3 %, в то время как в регионах во второй части траверса — выше 3 %. Средние значения хлора не имеют больших вариаций для всех исследованных геологических регионов и составляют около 1 %.

Ключевые слова: Марс, исследования Марса, марсоход, нейтронная спектроскопия, вода, хлор

ВВЕДЕНИЕ

На марсоходе НАСА «Кьюриосити» размещён российский научный прибор «Динамическое альbedo нейтронов» (ДАН) (Mitrofanov et al., 2012). Этот прибор выполняет измерения в двух режимах: с использованием активного нейтронного генератора и в режиме пассивного мониторинга собственного нейтронного излучения от Марса без использования генератора. Главные параметры, которые измеряет прибор ДАН, — это водородный эквивалент воды (ВЭВ) и эквивалентный хлор. Они позволяют определить наличие воды и других элементов в верхних слоях поверхности вдоль маршрута марсохода. ВЭВ служит индикатором водорода, а эквивалентный хлор отражает поглощение от всех остальных элементов.

Данные измерений ДАН связаны со стандартными элементами поверхности или пикселями, которые были исследованы марсоходом при его перемещении по поверхности. Такая пикселизация данных ДАН считается наиболее подходящим способом сделать их полезными для дальнейшего анализа в контексте геоморфологии в соответствии с другими научными данными, полученными марсоходом «Кьюриосити».

В настоящем исследовании представлено распределение значений ВЭВ и эквивалентного хлора в кратере Гейл в отдельных геологических регионах,

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

Никифоров Сергей Юрьевич — научный сотрудник

Лисов Денис Игоревич — младший научный сотрудник

Митрофанов Игорь Георгиевич — заведующий отделом,

доктор физико-математических наук

Литвак Максим Леонидович — заведующий лабораторией,

доктор физико-математических наук

определённых научной группой проекта. Оно основано на измерениях, выполненных в течение почти девяти лет миссии «Кьюриосити» с августа 2012 г. по декабрь 2021 г., в течение которых марсоход преодолел около 27 км (Mitrofanov et al., 2022; Vasavada et al., 2022).

АНАЛИЗ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДАН ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ РЕГИОНОВ

Маршрут марсохода пересекает несколько геологических регионов, которые были идентифицированы созданием стратиграфической колонки (Rampe et al., 2020). Стратиграфическая колонка разделена на неформальные группы, формации и элементы на основе литологии, полученной с помощью наблюдений марсохода. Геологические регионы могут иметь разные условия формирования и, следовательно, различаться по элементному составу.

Исследования поверхности прибором ДАН определяют содержание воды, измеряемое как ВЭВ, и содержание хлора и других поглотителей нейтронов, измеряемое как эквивалентный хлор. Для оценки ВЭВ и эквивалентного хлора проводится анализ временных профилей динамического альбеда нейтронов, измеренных в каждом тестируемом участке поверхности во время измерений в активном режиме ДАН. Эта процедура основана на сравнении измеренных профилей постимпульсной эмиссии нейтронов с численно смоделированными профилями такой эмиссии, рассчитанными для моделей поверхности с определённым базовым составом образующих элементов и переменными долями параметров ВЭВ и эквивалентного хлора.

Выбор элементного состава, используемого в моделировании, основан на предположении, что изменения содержания поглотителей нейтронов, например, таких как Fe, будут учитываться изменениями содержания эквивалентного хлора, в то время как различия в содержании других элементов не оказывают существенного влияния на смоделированные временные профили постимпульсной эмиссии нейтронов. Таким образом, в выбранном составе используются массовые доли элементов, основанные на усреднении измерений инструмента APXS (*англ.* Alpha Particle Induced X-ray Spectroscopy) (Gellert et al., 2015), который также установлен на марсоходе. Все значения ВЭВ и эквивалентного хлора, представленные для элементарных пикселей по маршруту ровера, были получены с использованием одного и того же усреднённого по APXS состава элементов.

СРАВНЕНИЕ ОЦЕНОК ВЭВ И ЭКВИВАЛЕНТНОГО ХЛОРА ПО ДАННЫМ ДАН СРЕДИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ РЕГИОНОВ КРАТЕРА ГЕЙЛ

Кратер Гейл образовался примерно 3,8–3,6 млрд лет назад вблизи границы марсианской топографической дихотомии. Его наиболее заметной особенностью представляется большая осадочная возвышенность (гора Шарп) вокруг центральной вершины кратера. Внутренние равнины кратера Гейл содержат остатки эродированных аллювиальных конусообразных отложений. Осадочные толщи горы Шарп содержат слои, которые коррелируют с признаками филлосиликатных и сульфатных минералов по наблюдениям орбитальных спектрометров. Считается, что современная топография горы Шарп стала результатом эоловой эрозии отложений, которые когда-то более широко покрывали дно кратера (Grotzinger et al., 2015).

Группа Брэдбери

Группа Брэдбери расположена в топографической возвышенности под названием Эолис Палус, которая стратиграфически находится под группой горы Шарп (Vasavada et al., 2022). Обнажения группы Брэдбери считаются остатками аллювиальной равнины, которая когда-то находилась примерно выше нынешнего уровня залива Йеллоунайф. Эти обнажения в основном состоят из осадочных пород флювиально-дельтового происхождения (Grotzinger et al., 2015).

В группе Брэдбери ДАН провёл 212 активных измерений со средним значением ВЭВ, равным 2,49 мас.%, что ниже среднего значения ВЭВ по всему маршруту, составляющему 2,80 мас.%. Значение эквивалентного хлора для группы Брэдбери оказалось равным 0,97 мас.%, что согласуется со значениями для всего пути марсохода. Значения ВЭВ для пассивных измерений ДАН распределены по 3938 пикселям (Nikiforov et al., 2020). Они были получены в соответствии с оценкой значения ДАН для эквивалентного хлора из активных измерений. Их среднее значение ВЭВ, равное 2,38 %, по пассивным данным оказывается очень близким к таковому по активным измерениям. Хорошее соответствие между значениями ВЭВ, полученными по активным и пассивным параметрам, обусловлено хорошей статистикой измерений в группе Брэдбери.

Сравнение среднего элементного состава пород группы Брэдбери и среднего марсианского грунта показывает, что они относительно похожи. Тем не менее, есть некоторые различия, например, в содержании K_2O и Cl .

ВЭВ варьируется от 0,5 до 4,1 % (активные измерения) или даже 5,2 % (пассивные измерения). Эквивалентный хлор варьируется от 0,01 до 2,56 %. Такие большие вариации могут указывать на то, что поверхность Брэдбери довольно неоднородна.

Также с использованием данных APXS для химического состава поверхности в пределах Брэдбери было проведено преобразование значений эквивалентного хлора, измеренных прибором ДАН, в содержание химического Cl (Sanin et al., 2015). Среднее значение Cl , полученное таким образом, равно 0,92 %. Оно почти совпадает со средним значением эквивалентного хлора и хорошо согласуется со средним значением 92 измерений APXS, выполненных в группе Брэдбери, равным 1,01 мас.%.

Группа горы Шарп

Формация Мюррей

Формация Мюррей в основном состоит из озёрных аргиллитов с включениями дельтовых, речных или эоловых песчаников (Grotzinger et al., 2015). В целом породы формации Мюррей отличаются от пород группы Брэдбери по своему элементному составу. Породы формации Мюррей имеют более низкий уровень Ca , Mg , Mn , K и Na , но более высокий уровень Si и Al (Thompson et al., 2016, 2020).

В целом для формации Мюррей среднее значение ВЭВ, усреднённое по 311 активным измерениям ДАН, равно 2,81 % и согласуется со средним значением ВЭВ за весь путь марсохода. Точно так же среднее значение ВЭВ для 3500 пассивных пикселей равно 2,98 %, что немного выше, чем среднее значение пассивного ВЭВ для всего пути марсохода. Из-за речного и озёрного происхождения пород формация Мюррей значительно «влажнее», чем группа Брэдбери.

Среднее значение эквивалентного хлора по активным измерениям ДАН составляет 0,97 %, что хорошо согласуется со средним значением эквивалентного хлора для всего пути марсохода — 1,00 %.

Среднее значение химического Cl, рассчитанное на основе эквивалентного хлора, измеренного прибором ДАН, составляет 0,85 %, что значительно ниже среднего значения Cl, измеренного с помощью APXS. Среднее значение Cl из 408 измерений APXS составляет 1,23 %. Разница может быть связана как с поверхностной, так и с подповерхностной неоднородностью.

Формация Каролин Шумейкер

Формация Каролин Шумейкер идентифицируется по значительному литологическому изменению по сравнению с аргиллитом нижележащей формации Мюррей. Увеличение отношения песчаника к аргиллиту характеризует древние аллювиальные условия, соответствующие условиям формирования осадочных структур формации Кэролин Шумейкер (Fedo et al., 2022). Нижние слои формации Кэролин Шумейкер содержат филлосиликаты, при этом их содержание — самое высокое из обнаруженных в кратере Гейл (до 34 %).

Среднее значение ВЭВ, измеренное в формации Каролин Шумейкер, оказывается самым высоким среди всех формаций и равно 3,40 % для 140 активных измерений и 3,84 % для 1815 пассивных пикселей.

Среднее значение эквивалентного хлора для формации Каролин Шумейкер составляет 1,11 %, что согласуется со средним значением эквивалентного хлора для всего пути марсохода. Химический Cl, оценённый по значениям эквивалентного хлора, и составу поверхности из измерений APXS, имеет почти такое же среднее значение — 0,96 %, в то время как Cl, полученный непосредственно из измерений прибора APXS в пределах формации Каролин Шумейкер, имеет значение несколько выше — 1,23 %. Более высокие значения измерений прибора APXS могут быть связаны с пылевым компонентом, содержащим большее количество Cl.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Содержание водородного эквивалента воды и эквивалентного хлора было оценено с использованием пиксельной карты измерений ДАН. Эти измерения были проведены с августа 2012 г. по декабрь 2021 г. и охватывают маршрут марсохода протяжённостью более 27 км. Измерения прибора ДАН были связаны с отдельными геологическими регионами вдоль маршрута.

Наибольшее наблюдаемое содержание ВЭВ в активных данных находится в формации Каролин Шумейкер. Стратиграфические подразделения начальной части пути марсохода «Кьюриосити» имеют средние значения ВЭВ в диапазоне от 2 до 3 %, в то время как вторая часть маршрута имеет средние значения ВЭВ выше 3 %. С другой стороны, среднее значение эквивалентного хлора остаётся относительно постоянным во всех исследованных геологических регионах, при этом значения колеблются около 1 %.

Измерения ДАН постоянно производятся по мере того, как марсоход «Кьюриосити» исследует поверхность кратера Гейл. Прибор ДАН продолжает обеспечивать два типа наблюдений — пассивные и активные. По мере поступления новых данных представленный здесь анализ будет обновляться.

ЛИТЕРАТУРА

Fedo C. M., Bryk A. B., Edgar L. A. et al. Geology and Stratigraphic Correlation of the Murray and Carolyn Shoemaker Formations Across the Glen Torridon Region, Gale Crater, Mars // J. Geophysical Research: Planets. 2022. V. 127(9). DOI: 10.1029/2022JE007408, 2022.

- Gellert R., Clark B. C. In situ compositional measurements of rocks and soils with the alpha particle X-ray spectrometer on NASA's mars rovers // *Elements*. 2015. V. 11(1). P. 39–44. DOI: doi.org/10.2113/gselements.11.1.39.
- Grotzinger J. P., Gupta S., Malin M. C. et al. Deposition, exhumation, and paleoclimate of an ancient lake deposit, Gale crater, Mars // *Science*. 2015. V. 350(6257). Art. No. aac7575–aac7575. DOI: 10.1126/science.aac7575
- Mitrofanov I. G., Litvak M. L., Varenikov A. B. et al. Dynamic Albedo of Neutrons (DAN) experiment onboard NASA's Mars Science Laboratory // *Space Science Reviews*. 2012. V. 170(1–4). P. 559–582. DOI: doi.org/10.1007/s11214-012-9924-y.
- Mitrofanov I. G., Nikiforov S. Y., Djachkova M. V. et al. Water and Chlorine in the Martian Subsurface Along the Traverse of NASA's Curiosity Rover: 1. DAN Measurement Profiles Along the Traverse // *Journal of Geophysical Research: Planets*. 2022. V. 127(11). Art. No. e2022JE007327. DOI: doi.org/10.1029/2022JE007327.
- Nikiforov S. Y., Mitrofanov I. G., Litvak M. L. et al. Assessment of water content in martian subsurface along the traverse of the Curiosity rover based on passive measurements of the DAN instrument // *Icarus*. 2020. V. 346. Art. No. 113818. DOI: 10.1016/j.icarus.2020.113818.
- Rampe E. B., Blake D. F., Bristow T. F. et al. 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(2). Art. No. 125605. DOI: 10.1016/j.chemer.2020.125605.
- Sanin A. B., Mitrofanov I. G., Litvak M. L. et al. 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. DOI: 10.1016/j.nima.2015.03.085.
- Thompson L. M., Schmidt M. E., Spray J. G. et al. Potassium-rich sandstones within the Gale impact crater, Mars: The APXS perspective // *J. Geophysical Research: Planets*. 2016. V. 121(10). P. 1981–2003. DOI: 10.1002/2016JE005055.
- Thompson L. M., Berger J. A., Spray J. G. et al. APXS-Derived Compositional Characteristics of Vera Rubin Ridge and Murray Formation, Gale Crater, Mars: Geochemical Implications for the Origin of the Ridge // *J. Geophysical Research: Planets*. 2020. V. 125(10). DOI: 10.1029/2019JE006319.
- Vasavada A. R. Mission overview and scientific contributions from the Mars Science Laboratory curiosity rover after eight years of surface operations // *Space Science Reviews*. 2022. V. 218(3). Art. No. 14. DOI: 10.1007/s11214-022-00882-7.

THE ABUNDANCE OF WATER AND CHLORINE IN THE GEOLOGICAL REGIONS OF THE GALE CRATER ON MARS ACCORDING TO THE DAN EXPERIMENT

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

Space Research Institute (IKI), Moscow, Russia

In this study, the content of water and chlorine, as well as other neutron-absorbing elements, in the subsurface of Gale crater was studied based on measurements using the Dynamic Neutron Albedo (DAN) instrument aboard NASA's Curiosity rover. The results of active and passive measurements performed from 2012 to 2021 were reviewed. The contents of water and chlorine, along with other neutron absorbers, were studied separately for various geological regions along the rover's traverse, corresponding to the stratigraphic column developed by the Curiosity science team. For each region, the average values and features of the distributions of the values of water and chlorine content are presented. The water content rises along the traverse of the rover and is highest in the Caroline Shoemaker formation. Most of the geological regions have average water values between 2 and 3 wt.%, while regions in the second part of the traverse have average water

values above 3 wt.%. The average values of chlorine do not have large variations for all the studied geological regions and are about 1 wt.%.

Keywords: Mars, Mars exploration, rover, neutron spectroscopy, water, chlorine

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

Nikiforov Sergey Yurievich — researcher

Lisov Denis Igorevich — 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

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ПРИБЛИЖЕНИЯ УГЛОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НЕЙТРИНО В СВЕРХНОВОЙ С КОЛЛАПСОМ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ

Е. А. Коптяева

Ярославский государственный университет имени П. Г. Демидова
(ЯрГУ им. П. Г. Демидова), Ярославль, Россия

Рассмотрены два однопараметрических приближения для углового распределения нейтрино в сверхновой с коллапсом центральной части. На основе данных по одномерному моделированию взрыва сверхновой, полученных кодом PROMETHEUS-VERTEX, найдены параметры рассмотренных аналитических приближений, как функции расстояния от центра сверхновой и времени после начала взрыва для всех сортов нейтрино. Проанализирована точность приближений в разных частях сверхновой. Получено, что за фронтом ударной волны поведение параметров, как функции радиальной координаты, может быть описано степенным законом, который, по-видимому, для каждого типа нейтрино определяется радиусом их энергетической сферы и радиусом, задающим масштаб эддингтоновского потока в самой наружной части сверхновой.

Ключевые слова: сверхновая с коллапсом центральной части, угловое распределение нейтрино, протонейтронная звезда, радиус энергетической сферы

ВВЕДЕНИЕ

Одна из существенных задач в изучении сверхновых с коллапсом центральной части — исследование влияния нейтрино на динамику взрыва сверхновой. Это связано с тем, что нейтринное излучение играет ключевую роль в успешном взрыве, по крайней мере в большинстве моделей. Для оценки вкладов многих процессов с участием нейтрино важно знание их углового распределения. В настоящей работе проведено сравнение двух однопараметрических вариантов аналитического приближения углового распределения нейтрино на численных данных моделирования. Рассмотрена зависимость их параметров от радиальной координаты на всём масштабе сверхновой.

Приближения углового распределения

Одно из приближений представляется в виде гауссоподобной функции:

$$\Phi_G(x) = \exp\left[-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right], \quad (1)$$

где переменная $x = 1 - \cos\theta$ содержит угол θ между импульсом нейтрино и радиальным направлением распространения; σ — параметр, который определяет ширину углового распределения нейтрино при каждом расстоянии r от центра сверхновой и времени t после начала взрыва. Отметим, что данный вариант приближение уже исследовался (Dobrynina et al., 2020), он хорошо описывает распределение нейтрино при малых углах во внешней части сверхновой при времени, соответствующем стадии стагнации ударной волны ($t \geq 200$ мс после начала взрыва), и не описывает нейтринное гало, которое имеет более широкое угловое распределение по сравнению с основной частью нейтринного потока (Sarikas et al., 2012). Другое, ранее не рассматриваемое в литературе линейное приближение:

Коптяева Евгения Андреевна — аспирантка, koptiaeva2016@yandex.ru

$$\Phi_L(x) = \left(1 - \frac{x}{s}\right) \Theta(s - x), \quad (2)$$

где $\Theta(x)$ — ступенчатая функция Хевисайда; s — параметр, также характеризующий ширину распределения.

ДАнные МОДЕЛИРОВАНИЯ: ИЗВЛЕЧЕНИЕ УГЛОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Для исследования распределения нейтрино по углам использовались данные одномерного моделирования взрыва сверхновой, самосогласованного с расчётом переноса нейтрино, полученные на основе программного кода Prometheus-Vertex (Hüderohl, 2014), для предсверхновых с массами 11,2; 13,8; 15; 17,8; 20,6 и $25M_{\odot}$. Ядерное уравнение состояния взято из публикации (Lattimer, Swesty, 1991) с модулем сжимаемости $K = 220$ МэВ. Предшественники предсверхновых подобраны из серии моделей с фазой аккреции, приведённых в обзоре (Woosley et al., 2002). В дополнение к набору выше перечисленных масс рассмотрена хорошо изученная в литературе модель s15s7b2 с массой $15M_{\odot}$. Перенос излучения в данных описан для следующих сортов нейтрино: ν_e , $\bar{\nu}_e$ и ν_x , где $\nu_x = \nu_{\mu}, \nu_{\tau}, \bar{\nu}_{\mu}, \bar{\nu}_{\tau}$.

Интенсивность нейтрино $I(r, \mu, \omega)$, связанная с их полной функцией распределения f_{ν} следующим образом

$$I(r, \mu, \omega) = \left(\frac{\omega}{2\pi}\right)^3 f_{\nu}, \quad (3)$$

для выбранных моментов времени t в данных представлена в виде дискретной величины на сетке касательных лучей I_{ijk} , называемой удельной интенсивностью нейтрино. Данная величина представляет собой интенсивность нейтрино, проинтегрированную в пределах одного энергетического диапазона:

$$I_{ijk} = \int_{\omega_i}^{\omega_{i+1}} I(r_{i+1/2}, \mu_{ij}, \omega) d\omega, \quad (4)$$

где индекс i соответствует каждому радиальному значению r_i точки сетки, индекс j — значению зенитного угла в терминах $\mu_{ij} = \cos\theta$ и k — энергии нейтрино ω . Мы завершали интегрирование по энергии суммированием по индексу k , получившиеся массивы значений I_{ij} при каждом r_i нормировали на единицу:

$$\tilde{\mathcal{J}}(r, \mu) = \sum_k^{N_{\omega}} I_{ijk} / I_{ij}^{\max}, \quad (5)$$

где N_{ω} — количество диапазонов, на которые разбита сетка по энергии, в рассматриваемых данных такое разбиение представлено на масштабе энергии от 0 до 380 МэВ. Далее переходили от μ к зависимости от новой переменной $x = 1 - \mu$ и получали угловое распределение нейтрино $\mathcal{J}(r, x) = \tilde{\mathcal{J}}(r, 1 - \mu)$ в каждой точке сверхновой, которое уже удобно сравнивать с моделями приближений.

СРАВНЕНИЕ ПРИБЛИЖЕНИЙ ПО ОБЛАСТЯМ

Методом наименьших квадратов с использованием данных $\mathcal{J}(r, x)$ были найдены параметры аналитических приближений $\sigma(r, t)$ и $s(r, t)$ как функции радиальной координаты r и времени t после начала взрыва. При поиске параметров мы пред-

полагали, что максимум углового распределения приходится на радиальное направление $x = 0$, такая ситуация реализуется не всегда, особенно в центральной части сверхновой для ν_x и $\bar{\nu}_e$. Это объясняется тем, что поток нейтрино идёт не наружу, а внутрь. В таких областях параметры приближений не находились. Зависимость параметров как функции радиальной координаты представлена (рис. 1) в логарифмическом масштабе. Видно, что в центральной области сверхновой значения параметров отличаются на несколько порядков, однако параметр $\sigma \approx \sqrt{s}$ до значения $\sigma \sim 10$ при каждом t . Как только значение параметра в каждый момент времени становится ~ 1 , параметры σ и s описываются практически одинаковым законом. Как показал анализ, отношение параметров во внешней области сверхновой становится константой: $\sigma/s = \text{const}$, причём такое отношение практически не зависит от времени.

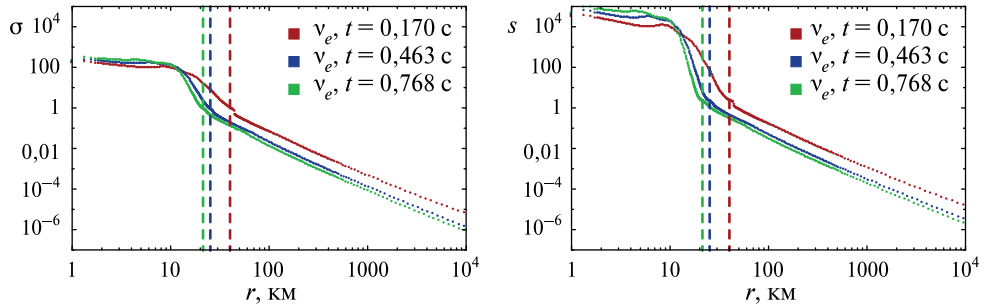


Рис. 1. Зависимость параметров $\sigma(r)$ (слева) и $s(r)$ (справа) электронного типа нейтрино ν_e модели s11.2 выборочно для некоторого времени. Вертикальные пунктирные линии соответствующих цветов указывают положение радиуса протонейтронной звезды R_{pns} . Значения R_{pns} определялись по плотности $\rho = 10^{11} \text{ г/см}^3$

Соответствие приближений данным моделирования и сравнение их между собой на масштабе всей сверхновой проводилось в терминах линейного функционала:

$$\mathcal{F}(r) = \frac{\sum_j^{N_x-1} \left[\int_{x_j}^{x_{j+1}} |\mathcal{J}(r, x) - \Phi(r, x)| dx \right]}{\int_0^{x_{N_x}} \mathcal{J}(r, x) dx}, \quad (6)$$

где N_x — количество угловых диапазонов. Полученные значения функционалов представлены выборочно на рис. 2 (см. с. 95) на всём масштабе сверхновой. Сравнение показало, что линейное приближение лучше описывает распределение нейтрино по углам в центральной области сверхновой. Точность обоих приближений существенно снижается к границе формирования протонейтронной звезды. За пределами радиуса протонейтронной звезды и до фронта остановившейся ударной волны меньше отклонение между данными и моделями наблюдается в случае гауссоподобного приближения, однако его точность составляет $\sim 10\text{--}25\%$ в зависимости от типа нейтрино и существенно изменяется со временем. Стоит отметить, что в данной области может наблюдаться отклонение от сферической симметрии за счёт происходящих в этой области конвективных опрокидывающих движений (Rampp, Janka, 2002). Во более внешней области

и непосредственно за фронтом ударной волны однозначно выигрывает гауссоподобное приближение, его точность для времени $t \geq 200$ мс после начала взрыва составляет $\sim 5\text{--}10\%$.

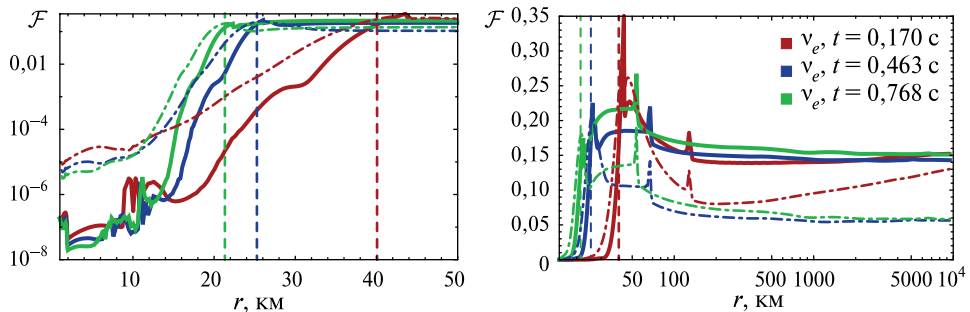


Рис. 2. Сравнение функционалов, посчитанных для электронного типа нейтрино модели s11.2, в центральной области (*слева*). Значения функционала гауссоподобного приближения \mathcal{F}_G выведены штрих-пунктирной линией, для \mathcal{F}_L — сплошной. Сравнение в другом масштабе с учётом внешней области (*справа*). Красный цвет — $t = 0,170$ с; синий — $t = 0,463$ с; зелёный — $t = 0,768$ с после начала взрыва. Вертикальные пунктирные линии соответствующих цветов указывают положение радиуса протонейтронной звезды R_{pns} . Значения R_{pns} определялись по плотности $\rho = 10^{11}$ г/см³

АППРОКСИМАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ВО ВНЕШНЕЙ ОБЛАСТИ

Поиск зависимости параметров от радиальной координаты становится частью задачи построения полной неравновесной функции распределения нейтрино. Как показал анализ параметров, достаточно сложно найти их полную аппроксимацию на масштабе всей сверхновой. Поэтому было принято решение искать приближения параметров по отдельным пространственным областям, соответствующих разным физическим условиям.

Наиболее просто найти приближение параметров во внешней области, где нейтрино распространяются практически свободно. Как видно из графиков, представленных на рис. 1, поведение параметров может быть приближённо степенным законом. Поскольку в данной области лучше работает гауссоподобное приближение, то исследовалась зависимость параметра $\sigma(r)$. В ходе работы оказалось удачным рассматривать его зависимость от радиальной координаты в следующей конфигурации: $r^2\sigma(r)$. Это дало понять, что аппроксимацию целесообразно искать до положения фронта ударной волны, и позволило сделать вывод, что в самых внешних областях поведение параметра определяется квадратичным законом. Отметим, что это достаточно установившийся факт, так как в областях, где нейтрино распространяется свободно, концентрация частиц $\sim r^{-2}$, и такое поведение не может определяться параметрами энергетического распределения. В связи с этим дополнительно анализировались угловые моменты различных порядков, посчитанные на данных моделирования:

$$\{J, H, K\}(r) = \frac{1}{2} \int_0^2 \mathcal{J}(r, x) \cdot (1-x)^{\{0,1,2\}} dx, \quad (7)$$

где $J(r)$ — угловой момент нулевого порядка; $H(r)$ и $K(r)$ — первого и второго порядков, соответственно. Для гауссоподобного приближения формулы угловых моментов представлены ниже:

$$J_G = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \sigma \cdot \text{Erf} \left[\frac{\sqrt{2}}{\sigma} \right], \tag{8}$$

$$H_G = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \sigma \cdot \text{Erf} \left[\frac{\sqrt{2}}{\sigma} \right] + \sigma^2 \left(e^{-2/\sigma^2} - 1 \right) \right), \tag{9}$$

$$K_G = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \sigma (1 + \sigma^2) \cdot \text{Erf} \left[\frac{\sqrt{2}}{\sigma} \right] - 2 \sigma^2 \right), \tag{10}$$

где $\text{Erf} \left[\frac{\sqrt{2}}{\sigma} \right]$ — функция ошибок. Из выражения (8) видна связь параметра σ и нулевого углового момента. В ходе рассмотрения задачи о серой сферическо-симметричной атмосфере для случая консервативного рассеяния (Hummer, Rybicki, 1971) можно показать, что поведение углового момента нулевого порядка во внешней области сверхновой, где $J \sim H \sim K$, может быть описано степенным законом:

$$J(r) \sim \left(\frac{R^{(H)}}{r} \right)^2 \left(1 + \left(\frac{R}{r} \right)^{n-1} \right), \quad n > 1, \tag{11}$$

где $R^{(H)}$ — значение, которым определяется эддингтоновский поток или первый угловой момент в самой внешней области сверхновой; R — масштабный фактор. Предполагая, что параметр σ представляется определяющим в соотношении (8), мы выяснили, что его можно приблизить следующим образом до положения фронта ударной волны:

$$\sigma(r) \approx \sigma_J(r) = \left(\frac{R_2}{r} \right)^2 + \left(\frac{R_3}{r} \right)^3, \tag{12}$$

где R_2 и R_3 — нормировочные радиусы.

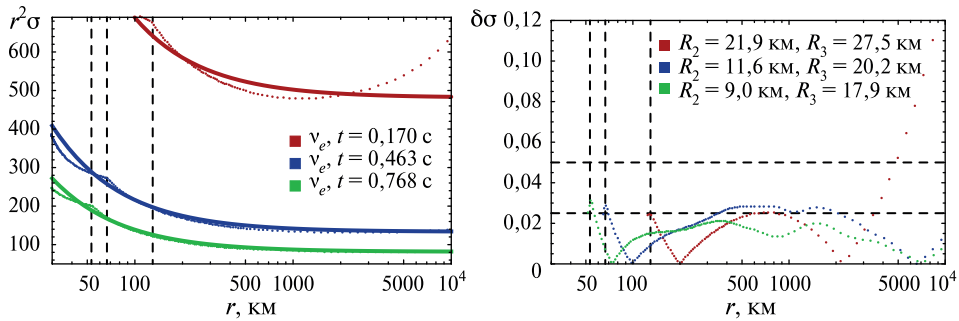


Рис. 3. Результат приближения параметра σ для v_e модели s11.2 (справа). Результаты проверки в терминах относительного отклонения (слева). Серой пунктирной вертикальной линией отмечено положение ударной волны в каждый соответствующий момент времени

Производя простые и несложные манипуляции с данными, пошагово нашли параметры методом наименьших квадратов для времени, где значение линейного функционала в среднем до фронта ударной волны $\mathcal{F}_G \leq 0.14$. Результат приближения представлен на (рис. 3), проверка аппроксимации проводилась в терминах:

$$\delta\sigma(r) = \frac{|\sigma(r) - \sigma_J(r)|}{\sigma(r) + \sigma_J(r)}. \quad (13)$$

Получено, что относительное отклонение $\delta\sigma$ максимально составляет $\sim 3\text{--}5\%$ для времени $t \geq 200$ мс. Эволюция со временем параметров R_2 и R_3 для всех типов нейтрино, а также R_{pns} — радиуса протонейтронной звезды показана на (рис. 4). Радиусы R_2 и R_3 изменяются со временем аналогично R_{pns} . Их значения уменьшаются с течением времени и отличаются для разных типов нейтрино, однако различие между радиусами ν_e и $\bar{\nu}_e$ практически нивелируется со временем. Значения радиусов R_2 и R_3 мюонных и тауонных сортов нейтрино ν_x меньше, чем для ν_e и $\bar{\nu}_e$. Анализ нормировочных радиусов R_3 показал, что их значения могут характеризовать радиус энергетической сферы $R_{\nu,e}$ — это характерные расстояния, в пределах которых нейтрино находятся в равновесии со звёздной средой. Первичный анализ проводился с использованием параметров распределения Ферми — Дирака. Параметры R_2 характеризуют величину эддингтоновских характеристик J, H, K с учётом фактора $\sim (1/2) \times 0,77^{-1}$ в самой внешней части сверхновой, так как лучшее совпадение наблюдается, если $\sqrt{\pi/2} \sim 0,77^{-1}$ (см. формулы (8), (9), (10)).

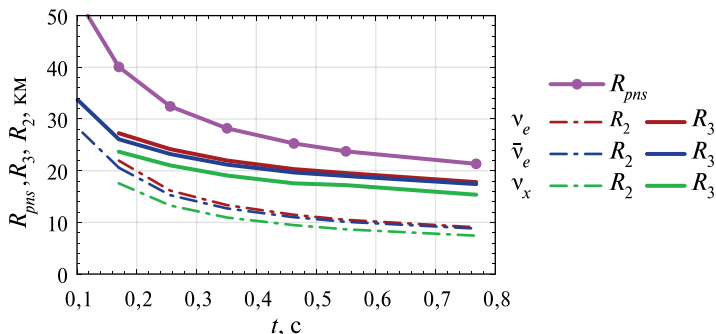


Рис. 4. Эволюция радиусов R_2 и R_3 со временем после начала взрыва для всех сортов нейтрино модели s11.2

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено исследований двух аналитических приближений углового распределения нейтрино в сверхновой с коллапсом центральной части с использованием численных данных одномерного моделирования. Получена зависимость параметров приближений от радиальной координаты и времени после начала взрыва для всех сортов нейтрино. На основе линейного функционала оценена точность приближений в разных частях сверхновой и проведён их сравнительный анализ. Показано, что линейное приближение более точно описывает распределение нейтрино по углам до границы формирующейся протонейтронной звезды, однако точность линейного приближения на расстояниях $\approx R_{pns}$ составляет $\sim 5\text{--}10\%$ для электронного типа нейтрино, для других сортов хуже, резкое отклонение от данных наблюдается в их случае при меньших расстояниях, чем для ν_e . В области между R_{pns} и остановившейся ударной волной R_{shock} , как показало сравнение, начинает лучше работать гауссоподобное приближение, но и его точность составляет $\sim 10\text{--}25\%$, она существенно меняется с расстоянием и временем после начала взрыва, причём в данной области может

наблюдаться отклонение от сферической симметрии. За фронтом ударной волны распределение нейтрино по углам значительно лучше описывает гауссоподобное приближение, его точность для времени $t \geq 200$ мс после начала взрыва составляет $\sim 10\%$ в районе фронта ударной волны, в более внешних областях — $\sim 5\%$. Такая ситуация наблюдается для всех сортов нейтрино. Найдена аппроксимация параметра гауссоподобного приближения до фронта ударной волны. Показано, что она определяется двумя нормировочными радиусами, и их временная эволюция аналогична изменению R_{pms} . Однако значения нормировочных радиусов отличаются для разных сортов нейтрино. По предварительным результатам один из радиусов определяет положение энергетической сферы, другой характеризует эддингтоновский поток во внешней области сверхновой.

Автор выражает благодарность И. С. Огневу и А. А. Добрыниной за постоянное внимание к работе и обсуждение полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

- Dobrynina A.A., Koptyaeva E.A., Ognev I.S.* Analytical approximation of neutrino distribution function in core-collapse supernova // J. Physics: Conference Ser. V. 1690(1). 5th Intern. Conf. Particle Physics and Astrophysics MEPhI. 5–9 Oct. 2020, Moscow, 2020. Art. No. 012003. DOI 10.1088/1742-6596/1690/1/012003.
- Hüdepohl L.* Neutrinos from the Formation, Cooling and Black Hole Collapse of Neutron Stars: PhD thesis. Technische Universität München; Max-Planck-Institut für Astrophysik, 2014. 145 p.
- Hummer D. G., Rybicki G. B.* Radiative transfer in spherically symmetric systems. The conservative grey case // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 1971. V. 152. Iss. 1. 15 p. <https://doi.org/10.1093/mnras/152.1.1>.
- Lattimer J. M., Swesty D. F.* A generalized equation of state for hot, dense matter // Nuclear Physics A. 1991. V. 535. Iss. 2. P. 331–376. [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(91\)90452-C](https://doi.org/10.1016/0375-9474(91)90452-C).
- Rampp M., Janka H-Th.* Radiation hydrodynamics with neutrinos: Variable Eddington factor method for core collapse supernova simulations // Astronomy and Astrophysics. 2002. V. 396. P. 361–392. DOI: 10.1051/0004-6361:20021398.
- Sarikas S., Tamborra I., Raffelt G. et al.* Supernova neutrino halo and the suppression of self-induced flavor conversion // Physical Review D. 2012. V. 85. Art. No. 108.061101. P. 113007-1–113007-5. DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.061101.
- Woosley S.E., Heger A., Weaver T.A.* The evolution and explosion of massive stars // Reviews of Modern Physics. 2002. V. 74. P. 1015–1071. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.74.1015>.

ANALYTICAL APPROXIMATIONS OF NEUTRINO ANGULAR DISTRIBUTION IN CORE-COLLAPSE SUPERNOVA

E. A. Koptyaeva

P.G. Demidov Yaroslavl State University (YSU), Yaroslavl, Russia

Two one-parameter approximations of angular neutrino distribution in core-collapse supernovae are considered. Based on result of a one-dimensional supernova simulation, performed in Prometheus-Vertex code, the parameters of analytical approximations are found as functions of the distance from the supernova center and the time after core bounce for all types of neutrinos. The accuracy of approximations in different parts of the supernova is analyzed. We have obtained

that the parameters as a function of the radial coordinate can be described by a power law behind the shock wave. This law for each type of neutrino is given by their radius of the energy sphere and the radius that sets the scale of the Eddington flux in the outer part of the supernova.

Keywords: core-collapse supernovae, angular neutrino distribution, protoneutron star, radius of the energy sphere

Коптяева Eugenia Andreevna — postgraduate, koptiaeva2016@yandex.ru

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СТРОЕНИЯ МАРСА ПО ГЕОДЕЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Е. А. Кулик^{1,2}, 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

Предпринята попытка построить модели внутреннего строения Марса, удовлетворяющие всем имеющимся на сегодняшний день наблюдаемым данным, а именно среднему радиусу, массе, моменту инерции, приливному числу Лява k_2 и полученным из обработки сейсмических данных толщине коры и радиусу ядра. Для модельного распределения плотности было определено распределение сейсмических скоростей с использованием формул конечных деформаций третьего порядка, рассчитаны модельные значения момента инерции и упругого приливного числа Лява k_2 и проведён сравнительный анализ с наблюдаемыми значениями с учётом поправки за неупругость для числа Лява. Для учёта неупругости использовалась реология Андраде: построены сначала однослойная модель (распределение вязкости было принято одинаковым для всей мантии и коры), а затем многослойная для разных значений параметра Андраде.

Ключевые слова: Марс, модель внутреннего строения, момент инерции, приливные числа Лява, неупругость, реология Андраде

ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

При построении моделей внутреннего строения Марса необходимо, чтобы они удовлетворяли накладываемыми на них ограничениями. Этими ограничениями служат измеряемые геодезические параметры, такие как средний радиус, масса, момент инерции $I = 0,3640 \pm 0,0006$, приливное число Лява $k_2 = 0,174 \pm 0,008$ (Konopliv et al., 2020), а также полученные в результате обработки данных сейсмического эксперимента толщина коры и радиус ядра. На Марсе до декабря 2022 г. работал сейсмометр эксперимента SEIS (*англ.* Seismic Experiment for Interior Structure), размещённый на борту посадочного модуля космического аппарата миссии InSight (см. Banerdt et al., 2020; Lognonne et al., 2019).

Данные наблюдений, используемые в работе

Параметры	Значение	Источник
Масса Марса	$M = 6,4185 \cdot 10^{23}$ кг	(Konopliv et al., 2020)
Средний радиус Марса	$R = 3389,92$ км	
Средний момент инерции	$I/(MR^2) = 0,3640 \pm 0,0006$	
Число Лява	$k_2 = 0,174 \pm 0,008$	
Толщина коры	$l_{\text{crust}} = 24\text{--}70$ км	(Knapmeyer-Endrun et al., 2021; Wiczorek et al., 2022)
Плотность коры	$\rho_{\text{crust}} = 2700\text{--}3100$ кг/м ³	
Радиус ядра	$r_{\text{core}} = 1830 \pm 40$ км	(Stähler et al., 2021)

Кулик Егор Александрович — студент, инженер, kulik.ea@phystech.edu

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

Сейсмические данные, полученные в ходе успешного сейсмического эксперимента SEIS, наложили ряд существенных ограничений на внутреннее строение планеты: средняя толщина коры составляет от 32 до 70 км, а её средняя плотность — не более 3100 кг/м^3 (Knapmeyer-Endrun et al., 2021; Wiczorek et al., 2022), радиус ядра $1830 \pm 40 \text{ км}$ (Stähler et al., 2021). Используемые в работе данные наблюдений и значения, полученные из анализа сейсмических данных, представлены в таблице.

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ВНУТРЕННЕГО СТРОЕНИЯ

Для построения моделей необходимо иметь некоторое представление о химическом составе планеты. Определение химического состава — одна из задач построения моделей внутреннего строения. За нулевое приближение в данной работе принимаем модель DW85 (Dreibus, Wänke, 1985), которая была получена из анализа состава марсианских метеоритов. Построение упругой модели внутреннего строения Марса следует методу, изложенному в работе (Жарков, Гудкова, 2005). На первом этапе принимаем модельное распределение плотности в коре и ядре постоянными, а сама плотность при этом выступает варьируемым параметром. Толщина коры полагается равной 50 км, что соответствует значению, полученному по сейсмическим данным. Распределение плотности в мантии находится по экспериментальным данным, полученным в исследовании (Bertka, Fei, 1997), в котором авторы подвергали образцы, соответствующие химическому составу DW85, условиям, которые предположительно существуют в недрах Марса. Процесс вычисления плотности минералов в мантии Марса представлен в виде блок-схемы на рис. 1 (см. с. 102).

Распределение плотности и давления в моделях внутреннего строения получаем из решения системы уравнений: уравнения гидростатического равновесия и уравнения для массы:

$$\begin{cases} \frac{dP}{dr} = -\frac{GM(r)}{r^2} \rho(r) = -g(r)\rho(r), \\ \frac{dM(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r), \end{cases} \quad (1)$$

где P — давление; ρ — плотность и r — расстояние от центра планеты.

Граничные условия имеют вид: $M(R) = M$ на поверхности планеты $r = R$, $M(0) = 0$ — в центре планеты; M и R — наблюдаемые масса и средний радиус планеты.

Для нахождения решения системы добавляется уравнение состояния $\rho = \rho(p)$.

Момент инерции для моделей рассчитывается по формуле:

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

Профиль сейсмических скоростей в мантии Марса получаем, используя метод, изложенный в статье (Duffy, Anderson, 1989). Для расчёта сейсмических скоростей на ареотерме для ряда мантийных минералов применяются формулы теории конечных деформаций третьего порядка (Жарков, Гудкова, 2005). Для коры используем следующие постоянные значения сейсмических скоростей: $v_p = 7 \text{ км/с}$, $v_s = 4 \text{ км/с}$. Выбор этих значений основан на анализе результатов статьи (Duran et al., 2022).

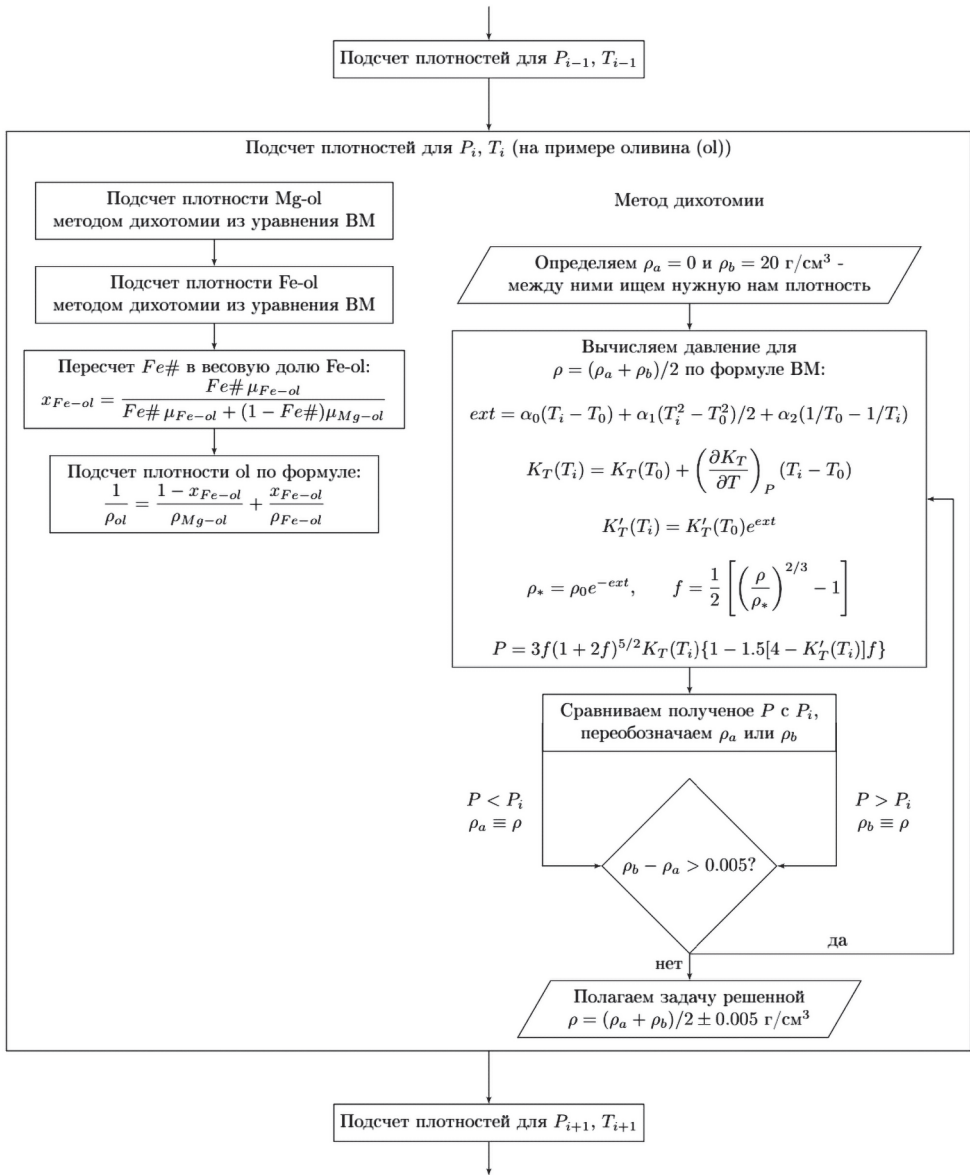


Рис. 1. Блок-схема вычислений плотности минералов в мантии Марса

Числа Лява, которые служат граничными условиями при отборе моделей внутреннего строения, являются функционалами от распределения плотности ρ , модуля сдвига μ и модуля сжатия K в недрах планеты и находятся из решения системы уравнений из работы (Alterman et al., 1959). Для этих расчётов была написана программа на языке Python. Число Лява k_2 , приведённое в таблице, включает в себя как упругую, так и неупругую составляющую, а построенные модели являются упругими. Вклад неупругости составляет около 0,005 (Жарков, Гудкова, 2005).

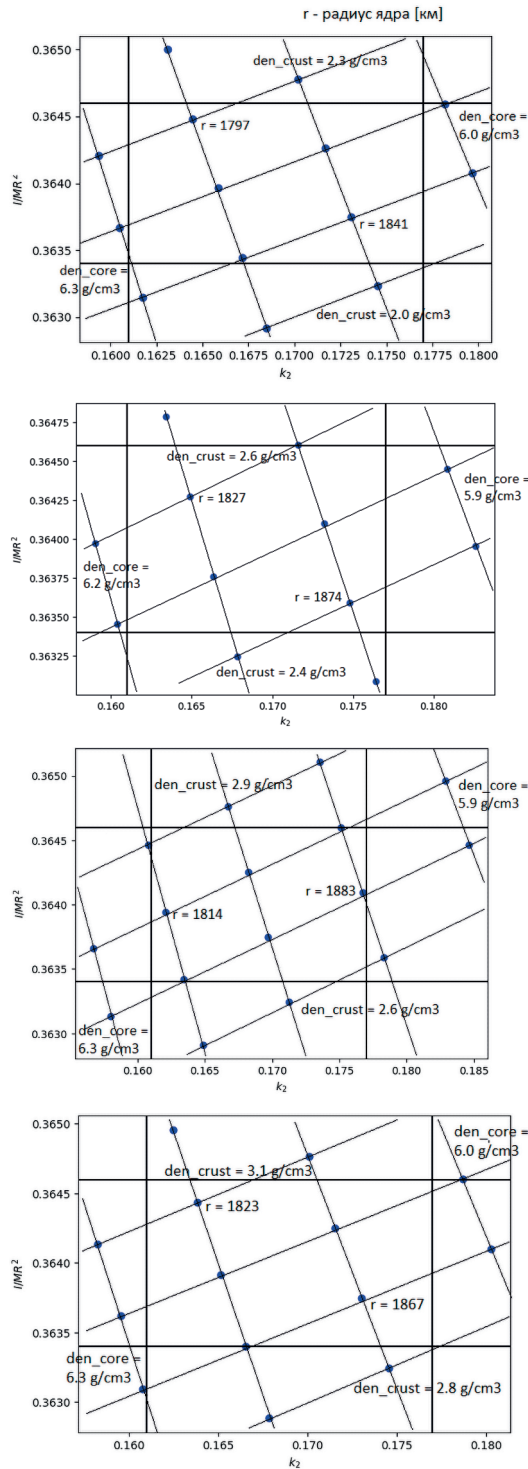


Рис. 2. Отбор моделей: горизонтальные сплошные линии указывают допустимые значения момента инерции, вертикальные — числа Лява k_2 . Сверху вниз: Fe# = 25, 22, 20 и 18

ОТБОР МОДЕЛЕЙ

Варьируемыми параметрами моделей являются: железистое число мантии $Fe\#$ ($Fe\# = Fe^{2+}/(Fe^{2+} + Mg) \times 100$, которое составляет 18–25, плотность и радиус ядра, плотность коры. Результат отбора моделей представлен на рис. 2 (см. с. 103). На графике точками указаны отдельные модели, варьируется плотность коры и ядра. Границы допустимых момента инерции I и числа Лява k_2 указаны толстыми линиями, а линии постоянной плотности коры и ядра — тонкими. Для моделей, которые попали в квадрат, также указаны минимальный и максимальный радиус ядра.

На рис. 2 (сверху вниз) представлен результат отбора моделей с $Fe\# = 25, 22, 20$ и 18 , соответственно. Как можно заметить, модели с железистым числом $Fe\# = 25$, которые одновременно удовлетворяют наблюдаемым значениям момента инерции I и числа Лява k_2 , имеют слишком низкую плотность коры $\rho_{crust} = 2000\text{--}2300 \text{ кг/м}^3$. Это может быть связано с тем, что железистое число $Fe\# = 25$ не соответствует реальному значению, которое имеет место в марсианской мантии. Отметим, что модели с $Fe\# = 20$ и $Fe\# = 18$ удовлетворяют допустимым значениям плотности коры. Кроме того, они также попадают в интервал допустимых значений радиуса ядра $r_{core} = 1830 \pm 40 \text{ км}$.

ЭФФЕКТ НЕУПРУГОСТИ

Модели внутреннего строения Марса, построенные выше, упругие. При интерпретации k_2 требуется знание реологических свойств материалов планетных недр, которые точно не определены даже для Земли. Без учёта реологии, полученные модельные значения числа Лява k_2 занижены. Модуль сдвига и приливное число Лява k_2 — функции частоты. При описании вязкоупругой модели Андраде комплексный модуль сдвига $\hat{\mu}$ равен $1/\hat{J}$, где \hat{J} называется комплексной податливостью и задаётся формулой (Castillo-Rogez et al., 2011):

$$\hat{J}(\chi) = J \left[1 + (i\tau_M \chi)^{-\alpha} \Gamma(1 + \alpha) \right] - \frac{i}{\eta \chi}, \quad (3)$$

где α — параметр Андраде, $J = 1/\mu$, $\tau_M = \eta/\mu$ — время Максвелла; χ — частота прилива; Γ — гамма-функция.

Параметр Андраде лежит в интервале 0,2–0,5 (Castillo-Rogez et al., 2011), хотя для мантийного вещества планет часто используется $\alpha = 0,3$.

С использованием реологии Андраде для пробных значений вязкости в недрах Марса рассчитаны модельные числа Лява k_2 . Рассмотрим многослойную неупругую модель. Параметром данной модели примем вязкость коры η_0 . Предположим, что вязкость в каждом слое постоянная величина,

- в коре вязкость полагается равной параметру модели η_0 ;
- в верхнем слое мантии (оливин-содержащий слой) вязкость полагается равной $10^{-2}\eta_0$;
- в среднем слое мантии (β -слой) вязкость полагается равной $10^{-1}\eta_0$;
- в нижнем слое мантии (γ -слой) вязкость полагается равной η_0 .

Поскольку значения вязкости в недрах Марса точно не определены, в качестве пробных значений были взяты величины из модели Земли PREM (англ. Preliminary reference Earth Model) (Dziewonski, Anderson, 1981) с некоторым разбросом. Для пробного распределения вязкости было построено распределение диссипативного фактора (рис. 3, см. с. 105).

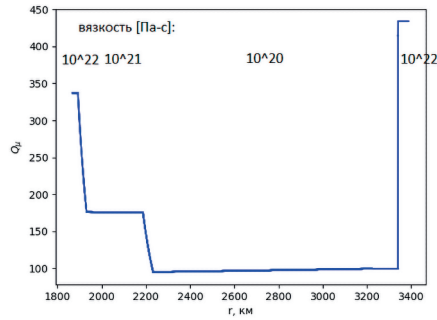


Рис. 3. Распределение диссипативного фактора Q_{II} в недрах Марса для многослойной модели. Параметр Андраде $\alpha = 0,3$ и параметр модели $\eta_0 = 10^{22}$ Па·с

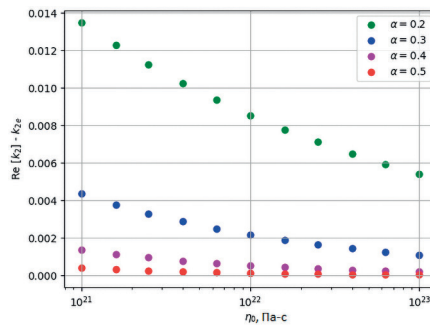


Рис. 4. Отклонение реальной части числа Лява k_2 от упругого значения в зависимости от вязкости и параметра α для многослойной модели (в коре вязкость принята η_0 , в оливиновой мантии — $10^{-2}\eta_0$, в слое β — $10^{-1}\eta_0$, в слое γ — η_0)

Увеличение числа Лява k_2 за счёт неупругости показано на рис. 4. Цветом показаны модели с разными значениями параметра α : зелёным — $\alpha = 0,2$; синим — $\alpha = 0,3$; фиолетовым — $\alpha = 0,4$ и красным — $\alpha = 0,5$. Отметим, что для многослойной модели наблюдается та же тенденция при изменении параметров, что и для однослойной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были построены модели внутреннего строения Марса: получено распределение плотности, давления, сейсмических скоростей в недрах Марса. Для учёта неупругости в недрах планеты была использована реология Андраде. Модели со значениями $Fe\# = 20$ и $Fe\# = 18$ имеют значения плотности $\rho_{crust} = 2700\text{--}3100$ кг/м³, соответствующие данным, полученным из результата сейсмического эксперимента на Марсе. При изменении параметров Андраде от значений $\alpha = 0,5$, $\eta_0 = 10^{23}$ Па·с до $\alpha = 0,2$, $\eta_0 = 10^{21}$ Па·с вклад неупругости в число Лява k_2 вырастает от нуля до 0,014. Для наиболее часто используемого значения $\alpha = 0,3$ и $\eta_0 = 10^{21}$ Па·с вклад неупругости составляет 0,005, что соответствует оценкам из работы (Жарков, Гудкова, 2005).

Работа выполнена за счёт гранта РНФ № 23-22-00074 (<https://rscf.ru/project/23-22-00074>).

ЛИТЕРАТУРА

- Жарков В. Н., Гудкова Т. В.* Построение модели внутреннего строения Марса // *Астрон. вестн.* 2005. Т. 39. № 5. С. 387–418.
- 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. <https://doi.org/10.1098/rspa.1959.0138>.
- Banerdt W. B., Smrekar S. E., Banfield D. et al.* Initial results from the InSight mission on Mars // *Nature Geoscience.* 2020. V. 13. P. 183–189. DOI:10.1038/s41561-020-0544-y.
- Bertka C. M., Fei Y.* Mineralogy of the Martian interior up to core-mantle boundary pressures // *J. Geophysical Research.* 1997. V. 102. Iss. B3. P. 5251–5264. <https://doi.org/10.1029/96JB03270>.
- Castillo-Rogez J. C., Efroimsky M., Lainey V.* The tidal history of Japetus: Spin dynamics in the light of a refined dissipation model // *J. Geophysical Research: Planets.* 2011. V. 116. Iss. E9. Art. No. E09008. <https://doi.org/10.1029/2010JE003664>.
- 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. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(81\)90046-7](https://doi.org/10.1016/0031-9201(81)90046-7).
- Dreibus G., Wanke H.* Mars, a Volatile-Rich Planet // *Meteoritics.* 1985. V. 20. Pt. 2. P. 367–381.
- Duffy T. S., Anderson D. L.* Seismic velocities in mantle minerals and the mineralogy of the upper mantle // *J. Geophysical Research.* 1989. V. 94. Iss. B2. P. 1895–1912. <https://doi.org/10.1029/JB094iB02p01895>.
- Duran C., Khan A., Ceylan S. et al.* Seismology on Mars: An analysis of direct, reflected, and converted seismic body waves with implications for interior structure // *Physics of the Earth and Planetary Interiors.* 2022. V. 325. Art. No. DI35B-0015. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2022.106851>.
- Knapmeyer-Endrun B., Panning M. P., Bissig F. et al.* Thickness and structure of the martian crust from insight seismic data // *Science.* 2021. V. 373. Iss. 6553. P. 438–443. DOI: 10.1126/science.abf8966.
- Konopliv A. S., Park R. S., Rivoldini A. et al.* Detection of the Chandler wobble of Mars from orbiting spacecraft // *Geophysical Research Letters.* 2020. V. 47. Iss. 21. Art. No. e2020GL090568. <https://doi.org/10.1029/2020GL090568>.
- Lognonne P., Banerdt W. B., Giardini D. et al.* SEIS: Insight’s seismic experiments for internal structure of Mars // *Space Science Reviews.* 2019. V. 215. Iss. 1. Art. No. 12. DOI: 10.1007/s11214-018-0574-6.
- Stähler S. C., Khan A., Banerdt W. B. et al.* Seismic detection of the martian core // *Science* 2021. V. 373. Iss. 6553. P. 443–448. DOI: 10.1126/science.abi77.
- Wieczorek M. A., Broquet A., McLennan S. M. et al.* InSight constraints on the global character of the Martian crust // *J. Geophysical Research: Planets.* 2022. V. 127. Iss. 5. Art. No. e2022JE007298. <https://doi.org/10.1029/2022JE007298>.

CONSTRUCTION OF THE INTERIOR STRUCTURE MODELS OF MARS BASED ON GEODETIC DATA

Е. А. Кулик^{1,2}, Т. В. Гудкова²

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

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

An attempt was made to construct the interior structure models of Mars that would satisfy all currently available observable data, namely, the average radius, mass, moment of inertia, tidal Love number k_2 , and values of crustal thickness and core radius obtained from seismic data processing.

For the obtained model density distributions, the seismic velocity distributions were determined using the third-order finite strain formulas, the model values of the moment of inertia and the elastic tidal Love number k_2 were calculated, and a comparative analysis was carried out with the observed values, taking into account the anelasticity correction for the Love number. To account for anelasticity, Andrade's rheology was used: first, a single-layer model was built (the viscosity distribution was assumed to be the same for the entire mantle and crust), and then a multilayer model, for different Andrade parameters.

Keywords: Mars, interior structure model, moment of inertia, tidal Love numbers, Andrade rheology

Kulik Egor Aleksandrovich — student, engineer, kulik.ea@phystech.edu

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕГМЕНТИРОВАННОГО ДЕТЕКТОРА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

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

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

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

Измерения линейной поляризации гамма-излучения до сих пор является сложной задачей. Решение этой задачи необходимо для проверки моделей излучения различных источников, например, астрофизических источников (космические гамма-всплески, линия излучения электрон-позитронной аннигиляции из центра Галактики) и земных источников (гамма-вспышки земного происхождения). Для регистрации поляризации гамма-излучения используются комптон-эффект в сегментированном сцинтиляционном детекторе. В работе проведено моделирование сегментированного гамма-спектрометра (СГС) в составе микроспутника «Чибис-АИ» с помощью программного пакета Geant4 и исследуется его возможность регистрации линейной поляризации.

Ключевые слова: комптоновский поляриметр, Geant4, линейная поляризация, космические гамма-всплески (GRB), гамма-вспышки земного происхождения (TGF)

ВВЕДЕНИЕ

Космические гамма-всплески GRB (*англ.* Gamma-ray burst) — одни из самых мощных электромагнитных явлений во Вселенной. До сих пор известно о двух моделях происхождения гамма-всплесков: взрыв сверхновой типа Ic с коллапсирующим ядром и слияние двух нейтронных звёзд.

Гамма-вспышки земного происхождения TGF (*англ.* Terrestrial gamma-ray flash) — это короткие импульсы гамма-излучения, возникающие в областях грозовой активности Земли. Они регистрируются космическими детекторами со стороны Земли. Известно, что данное гамма-излучение обусловлено тормозным излучением релятивистских электронов.

Гамма-вспышки земного происхождения эффективно регистрируются теми же детекторами, размещёнными на орбите Земли, которые предназначены для регистрации космических гамма-всплесков. Однако, несмотря на многолетние исследования, остаётся много открытых вопросов о происхождении и природе этих явлений.

Предполагается, что измерения линейной поляризации излучения космических гамма-всплесков и гамма-вспышек земного происхождения могут быть использованы, чтобы проверить модели излучения и этих явлений. А для регистрации поляризации гамма-излучения используются сегментированные сцинтиляционные детекторы, основанные на анизотропии комптоновского рассеяния поляризованных фотонов. Одним из первых комптоновских поляриметров стал COMPTEL (*англ.* Imaging Compton Telescope) (Lei et al., 1996). На данный момент наиболее успешным экспериментом, позволившим измерить поляризацию в гамма-диапазоне, представляется POLAR (Kole et al., 2021).

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

Позаненко Алексей Степанович — ведущий научный сотрудник, кандидат физико-математических наук

Минаев Павел Юрьевич — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук

В настоящей работе исследовано влияние многократного комптоновского рассеяния на регистрацию поляризации излучения. Ранее также было изучено влияние мёртвого времени детектора на измерение поляризации в комптоновских детекторах (Мкртчян и др., 2022).

КОМПТОНОВСКИЙ ПОЛЯРИМЕТР

Сегментированные детекторы гамма-излучения используются для измерения их поляризации с помощью комптоновского рассеяния. Рассмотрим принцип работы комптоновских поляриметров на примере сегментированного гамма-спектрометра (СГС) в составе микроспутника «Чибис-АИ», который разрабатывается в Институте космических исследований (ИКИ РАН). Спектрометр состоит из множества стержней, представляющих собой сцинтилляторы из германата висмута (BGO), каждый из которых сопряжён с кремниевым фотоумножителем.

Пусть, например, падающий поляризованный фотон испытал комптоновское рассеяние в одном из стержней и фотопоглотился в другом стержне (рис. 1). Тогда первый стержень зарегистрирует энергию рассеянного электрона $E_1 = E_e$, а второй — энергию рассеянного фотона $E_2 = E_{\gamma'}$. С учётом закона сохранения энергии $E_{\gamma} = E_{\gamma'} + E_e$ получим, что $E_{\gamma} = E_1 + E_2$ и $E_{\gamma'} = E_2$. Поскольку время регистрации энергии E_1 и E_2 практически одинаково, то можно определить, в каких стержнях произошло комптоновское рассеяние и фотопоглощение. Таким образом, используя геометрию положений двух стержней детектора, можно зарегистрировать азимутальный угол комптоновского рассеяния φ , после чего можно сделать вывод о поляризации.

Рассмотрим подробнее, куда отклоняется фотон после рассеяния на свободном электроны. В случае если падающие фотоны поляризованы, рассеянные фотоны не будут изотропными по отношению к азимутальному углу рассеяния. Для линейно поляризованных фотонов дифференциальное сечение комптоновского рассеяния даётся формулой Клейна – Нишины (Klein, Nishina, 1929):

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

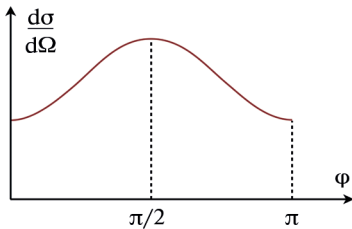


Рис. 2. Модуляционная кривая

где r_e — классический радиус электрона; E_{γ} и $E_{\gamma'}$ — энергия падающего и рассеянного фотона; φ — азимутальный угол рассеяния; θ — зенитный угол рассеяния. Согласно формуле (1), наиболее вероятный угол рассеяния $\varphi = 90^\circ$, т.е. когда плоскость комптоновского рассеяния перпендикулярна плоскости поляризации.

Зависимость дифференциального сечения комптоновского рассеяния от азимутального

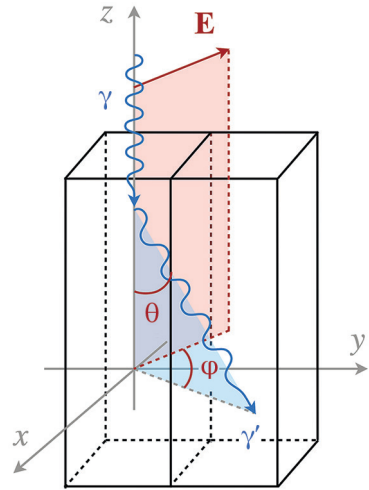


Рис. 1. Принцип работы комптоновского поляриметра

угла рассеяния называется модуляционной кривой (рис. 2, см. с. 109). Видно, что в результате эффекта Комптона фотоны рассеиваются преимущественно перпендикулярно плоскости поляризации падающих фотонов.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТЕКТОРА

Программный комплекс Geant4 (*англ.* GEometry ANd Tracking) — это инструмент для моделирования прохождения элементарных частиц через вещество с использованием методов Монте-Карло. Geant4 был разработан с использованием языка программирования C++. По сути, он представляет собой набор классов для описания геометрии эксперимента, для описания физических процессов взаимодействия частиц с веществом, для создания генератора первичных частиц и т. п. Geant4 используется во многих науках, в том числе и астрофизике.

В настоящей работе была создана симуляция взаимодействия фотонов с сегментированным сцинтилляционным детектором из германата висмута (рис. 3). Сегментированный гамма-спектрометр (СГС), который разрабатывается в ИКИ РАН в качестве полезной нагрузки микроспутника «Чибис-АИ», состоит из 32 стержней, каждый из которых имеет размер $17 \times 17 \times 60$ мм, расстояние между стержнями 1,4 мм.

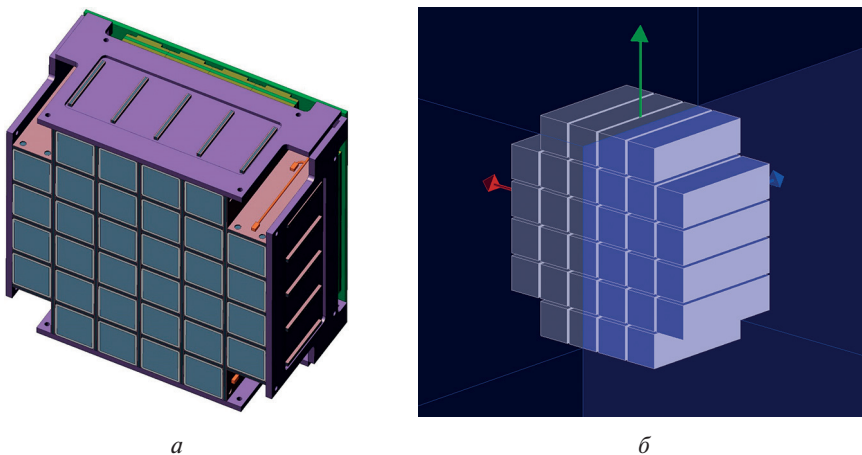


Рис. 3. Детекторная часть СГС: а — макет; б — Geant4

В Geant4 были подключены необходимые библиотеки для описания физических процессов взаимодействия излучения с веществом: фотоэффекта, комптоновского рассеяния, рождения электронно-позитронных пар и др. Дополнительно включена библиотека, основанная на формуле Клейна–Нишины, для учёта поляризации фотонов. На каждом шаге взаимодействия сделан вывод характеристик фотонов: направление движения, положение в пространстве, энергия, вектор поляризации. Сделан вывод физических моделей, за счёт которых происходит взаимодействие в веществе и образуются новые частицы в процессе взаимодействия. Также сделан вывод физического времени взаимодействия с начала симуляции и вывод энергии, зарегистрированной детектором, в том числе каждым стержнем по отдельности.

В созданной симуляции энергия падающих фотонов составляла 511 кэВ. Точка падения фотонов на детектор разыгрывалась случайным образом. Вектор

движения фотонов направлен по нормали вдоль стержней детектора. Плоскость поляризации падающих фотонов вертикальная. Степень поляризации 100 %. Количество падающих фотонов 100 тыс.

Целью моделирования стало исследование влияния количества комптоновских рассеяний в индивидуальном стержне на модуляционную кривую для данного сегментированного детектора.

В результате моделирования была построена модуляционная кривая для детектора СГС (рис. 4). Отличие от теоретической кривой, описываемой формулой Клейна – Нишины, связана с геометрией детектора, а именно толщиной стержня, его поперечных размеров. Также здесь играет роль телесный угол, который отличается для разных стержней. Например, количество отсчётов для угла $\varphi = 45^\circ$ меньше, чем для угла $\varphi = 0^\circ$, потому что число фотонов, которые попадают в стержень, расположенный под углом 45° , меньше из-за меньшего угла раствора, в котором рассеиваются фотоны (рис. 5).

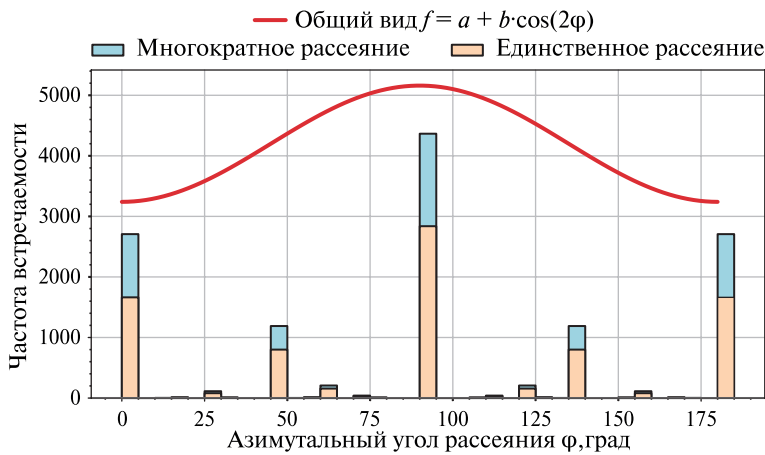


Рис. 4. Модуляционная кривая для СГС

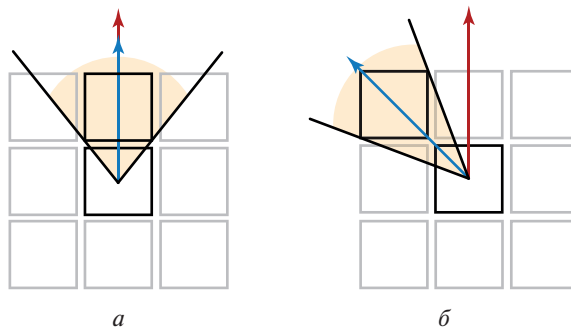


Рис. 5. Неопределённость угла рассеяния φ : *a* — при $\varphi = 0^\circ$; *б* — при $\varphi = 45^\circ$

Стоит отметить, что на модуляционной кривой отмечены только те реализации, в которых энергия была зарегистрирована только двумя стержнями, поскольку в противном случае нельзя определить азимутальный угол рассеяния φ . Также нужно заметить, что ширина бина 5° не является неопределённостью угла рассеяния.

Для определения того, как количество комптоновских рассеяний в стержне, на который упал фотон (стержень падения), влияет на модуляционную кривую, на рис. 4 были также нанесены отсчёты только для тех случаев, в которых произошло всего одно комптоновское рассеяние в стержне падения.

Для оценки влияния количества комптоновских рассеяний в стержнях детектора введём параметр μ , называемый модуляционным фактором:

$$\mu = \frac{N(\varphi = 90^\circ) - N(\varphi = 0^\circ)}{N(\varphi = 90^\circ) + N(\varphi = 0^\circ)},$$

где $N(\varphi)$ — количество отсчётов для данного угла рассеяния φ . Для многократного комптоновского рассеяния $\mu = 0,234$, для единственного рассеяния $\mu = 0,261$.

МОДУЛЯЦИОННЫЙ ФАКТОР

Важный параметр модуляционной кривой — модуляционный фактор (рис. 6), отражающий степень линейной поляризации излучения. Выведем теоретическое значение модуляционного фактора. В результате эффекта Комптона рассеянный на неподвижном электроны фотон будет обладать энергией:

$$E_{\gamma'} = \frac{E_{\gamma}}{1 + e_{\gamma}(1 - \cos\theta)},$$

где $e_{\gamma} = E_{\gamma}/m_e c^2$ — энергия падающего фотона, выраженная в единицах энергии покоя электрона.

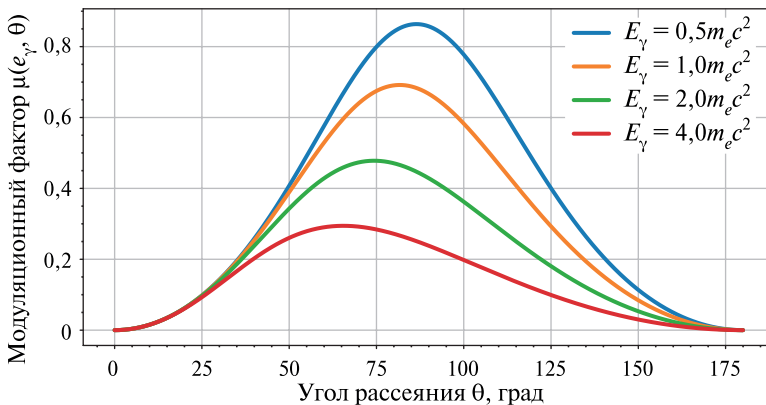


Рис. 6. Модуляционный фактор при разных энергиях падающих фотонов

Дифференциальное сечение комптоновского рассеяния:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = A(c + d \cdot \cos^2 \varphi),$$

где $A = \frac{1}{2} r_e^2 \cdot E_{\gamma'}^2 / E_{\gamma}^2$, $c = E_{\gamma'} / E_{\gamma} + E_{\gamma} / E_{\gamma'} > 0$, $d = -2 \cdot \sin^2 \theta \leq 0$ — параметры в формуле Клейна – Нишины.

Максимумы и минимумы дифференциального сечения по азимутальному углу ϕ :

$$\max_{\phi} \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right) = Ac, \quad \min_{\phi} \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right) = A(c+d).$$

Модуляционный фактор:

$$\mu = \frac{\max - \min}{\max + \min} = \frac{-d}{2c+d},$$

$$\mu(e_{\gamma}, \theta) = \frac{\sin^2 \theta}{1 + e_{\gamma}(1 - \cos \theta) + \frac{1}{1 + e_{\gamma}(1 - \cos \theta)} - \sin^2 \theta}.$$

Усреднённое по зенитному углу рассеяния θ значение модуляционного фактора $\mu(e_{\gamma}, \theta)$ для падающих фотонов с энергией $E_{\gamma} = m_e c^2$:

$$\bar{\mu} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \mu(1, \theta) d\theta = 0,295.$$

ВЫВОДЫ

В работе исследовано, как многократное комптоновское рассеяние в индивидуальных сегментах комптоновского поляриметра влияет на измерение поляризации. При фиксированном количестве падающих фотонов значение модуляционного фактора $\mu = 0,261$, полученное с учётом, что в стержне произошло только одно комптоновское рассеяние, оказалось выше на 10 % по сравнению со случаем $\mu = 0,234$, когда ограничений на количество рассеяний не было. В свою очередь модуляционный фактор с единственным рассеянием отличается от теоретического (максимального) значения $\bar{\mu} = 0,295$ на 12 %. Из этого следует, что для увеличения модуляционного фактора и улучшения параметров сцинтилляционного поляриметра необходимо уменьшение влияния многократных комптоновских рассеяний, чего можно достичь уменьшением размера индивидуального стержня сегментированного детектора. Для регистрации поляризации фотонов используется только однократное комптоновское рассеяние, увеличение доли которого можно добиться уменьшением поперечных размеров каждого сегмента детектора. Уменьшение длины стержня слабее влияет на уменьшения доли многократных рассеяний, однако позволяет минимизировать неопределённость по зенитному углу рассеяния θ .

ЛИТЕРАТУРА

- Мкртчян А. А., Позаненко А. С., Минаев П. Ю.* Влияние мертвого времени на измерение линейной поляризации в комптоновских детекторах // 19-я Конф. молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования»: сб. тр. М.: ИКИ РАН, 2022. С. 66–71. DOI: 10.21046/KMU-2022-66-71.
- 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.* et al. 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>.

Lei F., Hills G. L., Dean A. J., Swinyard B. M. Characteristics of COMPTEL as a polarimeter and its data analysis // *Astronomy and Astrophysics Supplement*. 1996. V. 120. P. 695–698. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1996A%26AS..120C.695L/abstract>.

SIMULATION OF A SEGMENTED DETECTOR FOR GAMMA RADIATION DETECTION

*A. A. Mkrтчyan*¹, *A. S. Pozanenko*², *P. Yu. Minaev*²

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

² Space Research Institute of the RAS (IKI), Moscow, Russia

Measuring the linear polarization of gamma radiation is still a difficult task. The solution of this problem is necessary to test radiation models of various sources, for example, astrophysical sources (cosmic gamma-ray bursts, electron-positron annihilation radiation line from the center of the Galaxy) and Terrestrial sources (terrestrial gamma-ray flashes). To register the polarization of gamma radiation, the Compton effect is used in a segmented scintillation detector. The paper simulates a segmented gamma-ray spectrometer (SGS) as part of the Chibis-AI microsatellite using the Geant4 software package and investigates its possibility of registering linear polarization.

Keywords: Compton polarimeter, Geant4, linear polarization, gamma-ray bursts (GRB), terrestrial gamma-ray flashes (TGF)

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

Pozanenko Alexey Stepanovich — leading researcher, candidate of physical and mathematical sciences

Minaev Pavel Yurievich — senior researcher, candidate of physical and mathematical sciences

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ВЕНЕРЫ В ОКНЕ ПРОЗРАЧНОСТИ 1 мкм

А. В. Назарова¹, Д. Г. Евдокимова², А. А. Федорова², О. И. Кораблев²

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

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

Дистанционные исследования Венеры в «окнах прозрачности» позволяют анализировать процессы под облаками, в том числе на поверхности. В работе было смоделировано влияние различных факторов атмосферы и поверхности на спектральную интенсивность теплового излучения в окне прозрачности 1 мкм. Изучено влияние счётной концентрации аэрозольных частиц облачного слоя, относительного содержания водяного пара, излучательной способности, вариаций температуры и высоты поверхности. Также были рассмотрены различия спектроскопических баз данных High-T и CDSD-296 для воспроизведения поглощения CO₂. Теоретические данные анализировались с учётом вариативности излучения в окне прозрачности 1 мкм по наблюдениям спектрометра СПИКАВ-ИК космической миссии «Венера-Экспресс». Получено, что наибольшее влияние на вариации спектральной интенсивности оказывает рассеяние в облаках Венеры. Кроме того, спектральная интенсивность излучения возрастает до 60 % при увеличении температуры поверхности на 25 К, что может быть использовано для поиска «горячих точек» и возможной вулканической активности.

Ключевые слова: Венера, спектрометр, окно прозрачности, тепловое излучение, рассеяние, атмосфера

ВВЕДЕНИЕ

Дистанционные наблюдения поверхности Венеры затруднены ввиду свойств плотной атмосферы планеты и высокого альбеда облачного слоя, расположенного на высотах от 47 до 70 км. При этом углекислый газ (CO₂), содержание которого достигает 96,5 %, поглощает большую часть теплового излучения от поверхности и подоблачного слоя атмосферы. Дистанционное наблюдение этого излучения возможно только в узких диапазонах спектра, где не происходит поглощения CO₂, — в «окнах прозрачности». В ближнем инфракрасном диапазоне окна прозрачности Венеры (между 1 и 3 мкм) были открыты в 1983 г. (Allen, Crawford, 1984). Было выявлено, что процент теплового излучения поверхности падает, и растёт вклад от излучения нижней атмосферы с ростом высоты и с увеличением длины волны окна прозрачности (Meadows & Crisp, 1996). В окне прозрачности на 1 мкм излучение поверхности составляет более 95 % от общего, что позволяет исследовать возможные изменения температуры (Meadows, Crisp, 1996).

Для дистанционных исследований атмосферы и поверхности к Венере в 2005 г. был отправлен космический аппарат «Венера-Экспресс», который проработал на орбите вокруг планеты с 2006 по 2014 г. Наблюдения нижней

Назарова Анастасия Витальевна — студент магистратуры, enemoriam@gmail.com

Евдокимова Дарья Геннадьевна — научный сотрудник,
кандидат физико-математических наук

Федорова Анна Александровна — ведущий научный сотрудник,
кандидат физико-математических наук

Кораблев Олег Игоревич — заведующий отделом, заместитель директора,
доктор физико-математических наук

атмосферы и поверхности в окнах прозрачности проводились в ближнем инфракрасном диапазоне прибором СПИКАВ (SPICAV — *англ.* Spectroscopy for Investigation of Characteristics of the Atmosphere of Venus) (Bertaux et al., 2007; Korablev et al., 2012) и ВИРТИС (VIRTIS — *англ.* Visible and Infrared Thermal Imaging Spectrometer) (Drossart et al., 2007). По данным ВИРТИС были зафиксированы «горячие точки» — вероятная вулканическая активность на поверхности Венеры (Shalygin et al., 2015; Smrekar et al., 2010). Но ещё в 1990–1995 гг. с помощью радиолокационной съёмки, выполненной космической миссией «Магеллан», было обнаружено более 80 тыс. вулканов на Венере (Hahn, Вугне, 2023). Недавний анализ изменений ландшафта при повторном наблюдении одних и тех же областей по данным «Магеллан» обнаружил действующий вулкан (Herrick, Hensley, 2023). Настоящая работа направлена на исследование причин вариативности наблюдаемого теплового излучения Венеры в окне прозрачности 1 мкм на основе измерений прибором СПИКАВ с помощью модели переноса излучения.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ

Спектр теплового излучения окна прозрачности 1 мкм рассчитывается численно в диапазоне от 0,9 до 1,05 мкм. Расчёт основан на модели, которая была разработана для окон прозрачности 1,1 и 1,18 мкм (Bezard et al., 2011; Fedorova et al., 2015), где программой для численного решения уравнения радиационного переноса стала SHDOMPP (*англ.* Spherical Harmonic Discrete Ordinate Method) (Evans, 2007), реализующая метод дискретных ординат и сферических гармоник в приближении плоскопараллельной атмосферы. В настоящей работе модель была модифицирована для волновых чисел от 9500 до 11 100 см⁻¹, соответствующим длинам волн от 0,9 до 1,05 мкм. Установлено, что для данной задачи уменьшение шага сетки (0,1 см⁻¹) или увеличение количества потоков (16) не влияет на точность моделирования.

Модель переноса излучения учитывает многократное рассеяние частицами облачного слоя и молекулярное рассеяние CO₂. Рассеяние на каплях аэрозоля вычисляется по теории Ми в приближении сферических частиц (Fedorova et al., 2015). Облака приняты состоящими из 75%-го водного раствора серной кислоты (H₂SO₄). По результатам экспериментов во время спуска аппаратов в атмосфере Венеры в облачном слое выделено 4 моды аэрозольных частиц: моды 1, 2, 2', 3 (Haus et al., 2016). Моды характеризуются средним радиусом 0,3; 1,0; 1,4 и 3,65 мкм, соответственно (Haus et al., 2016). В рассеяние вносят наибольший вклад самые большие частицы — мод 2' и 3, который учитывается в модели с помощью масштабирования вертикальных профилей их счётной концентрации.

Углекислый газ — основной поглотитель инфракрасного (ИК) излучения в исследуемом диапазоне, однако водяной пар, содержащийся в нижних слоях атмосферы, также вносит вклад в поглощение. Ввиду высоких значений температуры и давления у поверхности Венеры при расчёте сечений поглощения газов необходимо использовать высокотемпературные спектроскопические базы данных. В случае с CO₂ была использована такая база данных High-T (Bezard et al., 2011) для диапазона от 0,93 до 1,05 мкм дополненная адаптированной для нормальных условий базой CDSD-296 (*англ.* Carbon Dioxide Spectroscopic Databank) (Tashkun et al., 2019) от 0,9 до 0,93 мкм. В базе данных CDSD-296 отсутствуют слабые линии поглощения, т.е. с интенсивностью при 296 К меньшей, чем 10⁻³⁰ см/молекула. Было проведено сравнение моделирования при использовании описанной выше комбинации баз данных и CDSD-296 для всего диапазона. Поглощение H₂O описывается с помощью высокотемпературной базы

данных НИТЕМР (*англ.* High Temperature Engine Materials Technology Program) (Rothman et al., 2010). Из-за высокой плотности атмосферы Венеры необходимо учитывать фактор континуального поглощения, пропорциональный квадрату плотности атмосферы, возникающий как следствие суперпозиции дальних крыльев линий CO_2 и влияния запрещённых столкновительных переходов. Для окна прозрачности 1,1 мкм по данным СПИКАВ-ИК был оценён диапазон значений этого фактора в $0,29-0,66 \cdot 10^{-9} \text{ см}^{-1} \cdot \text{амагат}^{-2}$ (Fedorova et al., 2015). В настоящей работе для окна прозрачности 1 мкм эмпирически выбрано значение $0,38 \cdot 10^{-9} \text{ см}^{-1} \cdot \text{амагат}^{-2}$.

Рассмотренная модель использовалась для исследования влияния на спектральную интенсивность излучения следующих параметров: излучательной способности ϵ и температуры поверхности T_p , высоты наблюдаемой области H , параметра масштабирования вертикального профиля счётной концентрации аэрозольных частиц мод 2' и 3A, относительного содержания водяного пара в подоблачной атмосфере $R_{\text{H}_2\text{O}}$.

ДАННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТА СПИКАВ-ИК

СПИКАВ — один из спектрометрических комплексов на борту космической миссии «Венера-Экспресс», состоял из инфракрасного (СПИКАВ-ИК) и ультрафиолетового (СПИКАВ-УФ) спектрометров, проводивших наблюдения в течение 8 лет. СПИКАВ-ИК состоял из коротковолнового (0,65–1,05 мкм) и длинноволнового (1,05–1,07 мкм) каналов (Korablev et al., 2012) с полем зрения 2° . Данные записывались для обоих диапазонов двумя детекторами, которые регистрировали излучение ортогональных поляризаций. Измерение одного спектра осуществлялось последовательно с помощью узкополосного акустооптического перестраиваемого фильтра (АОПФ). Фильтр настраивался на каждую длину волны, и сигнал экспонировался в течение некоторого времени. Каждый канал имел собственный вид аппаратной функции, являющейся полосой пропускания АОПФ на выбранной длине волны. Для коротковолнового канала спектральное разрешение составляло $5,2 \text{ см}^{-1}$ (Korablev et al., 2012). Тепловое излучение регистрировалось прибором при наблюдении ночной стороны Венеры в надир. Время экспонирования одной спектральной точки в этом случае составляло 44,8 или 88,9 мс (Korablev et al., 2012).

Для анализа были отобраны 1955 спектров спектральной интенсивности излучения 104 сеансов наблюдений, которым были сопоставлены значения топографической высоты наблюдаемых областей по данным картографирования Венеры аппаратом «Магеллан» (Saunders et al., 1992). Были получены вариации значения спектральной интенсивности излучения в максимуме окна прозрачности 1 мкм, за которое принято среднее в диапазоне 1,02–1,03 мкм. Стандартное отклонение для каждого полученного значения $\sim 0,003 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{мкм}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$. Зависимость полученных значений от топографической высоты приведена на рис. 1 (см. с. 118). Присутствует корреляция $-0,55$ между высотой поверхности в наблюдаемой области и интенсивностью: последняя убывает с возрастанием высоты. Спектральная интенсивность в максимуме окна прозрачности варьируется в диапазоне от 0,025 до 0,084, со средним значением равным $0,047 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{мкм}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ и стандартным отклонением $0,010 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{мкм}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$. Такой разброс значений указывает на наличие одного или нескольких факторов, влияющих на интенсивность теплового излучения поверхности.

Полученный теоретический спектр необходимо свернуть с функцией АОПФ и привести к сетке волновых чисел, используемой в эксперименте. Теоретическое моделирование с параметрами $H = -1 \text{ км}$, $A = 0,7$, $R_{\text{H}_2\text{O}} = 30 \text{ ppm}$,

$\epsilon = 0,9$ показало качественно сопоставимый результат с примером спектра от области на долготе 334° и широтах $19\text{--}22^\circ$ с.ш. в сеансе наблюдений 0025A10 от 16.05.2006 (рис. 2).

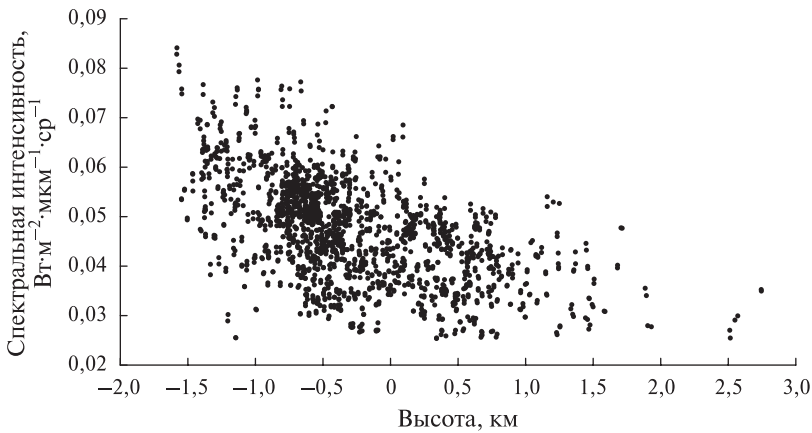


Рис. 1. Зависимость средней спектральной интенсивности в диапазоне $1,02\text{--}1,03$ мкм от топографической высоты

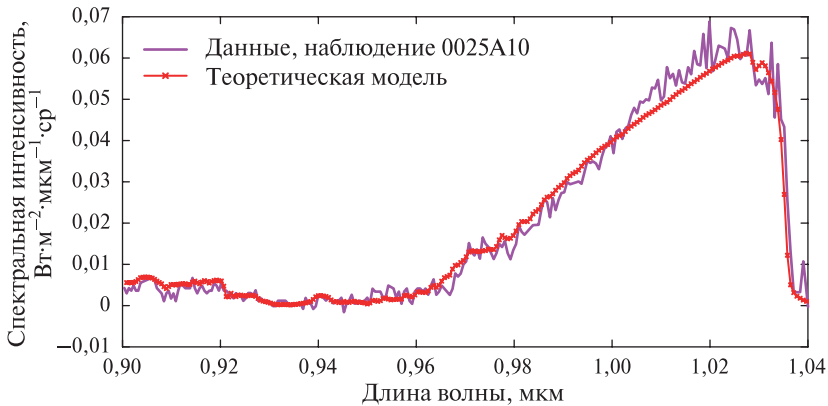


Рис. 2. Вид теоретического спектра излучения поверхности Венеры в окне прозрачности 1 мкм и спектр, измеренный СПИКАВ-ИК

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Для изучения параметров A , $R_{\text{H}_2\text{O}}$, H и ϵ , определяющих вариативность спектральной интенсивности излучения в окне прозрачности 1 мкм, модель переноса излучения рассчитывается для их следующих значений. Параметр масштабирования счётной концентрации аэрозольных частиц мод $2'$ и $3 A$ принимается равным $0,7$; $1,6$; $2,2$. Рост параметра ведёт к падению прозрачности спектрального диапазона. При его увеличении приблизительно в три раза спектральная интенсивность в максимуме окна прозрачности ($1,02\text{--}1,03$ мкм) должна уменьшиться приблизительно в два раза: с $0,060$ до $0,029$ Вт·м $^{-2}$ ·мкм $^{-1}$ ·ср $^{-1}$ (рис. 3а, см. с. 119). Содержание водяного пара $R_{\text{H}_2\text{O}}$ задаётся равным 10 , 30 и 50 ppm

(англ. parts per million, частей на миллион). Моделирование показывает, что поглощение молекулами H_2O пренебрежимо мало меняет значение интенсивности в диапазоне 1,02–1,03 мкм, где наблюдается максимальная спектральная интенсивность. Полоса поглощения водяного пара оказывает основное влияние на интенсивность излучения в диапазоне 0,93–1 мкм (рис. 3б). При увеличении излучательной способности поверхности ϵ от 0,7 до 0,9 наблюдается только небольшой рост спектральной интенсивности теплового излучения: с 0,056 до 0,060 Вт·м⁻²·мкм⁻¹·ср⁻¹ (рис. 3в). Высота поверхности H изменялась в соответствии с наблюдениями СПИКАВ-ИК в диапазоне от –1 до 4 км с шагом 1 км. С увеличением высоты на 5 км температура поверхности модели уменьшается на 35 К, что вызывает падение спектральной интенсивности в 1,86 раза: с 0,060 до 0,032 Вт·м⁻²·мкм⁻¹·ср⁻¹. Профиль температуры, давления и плотности атмосферы взят из модели VIRA (англ. Venus International Reference Atmosphere) (Seiff et al., 1985).

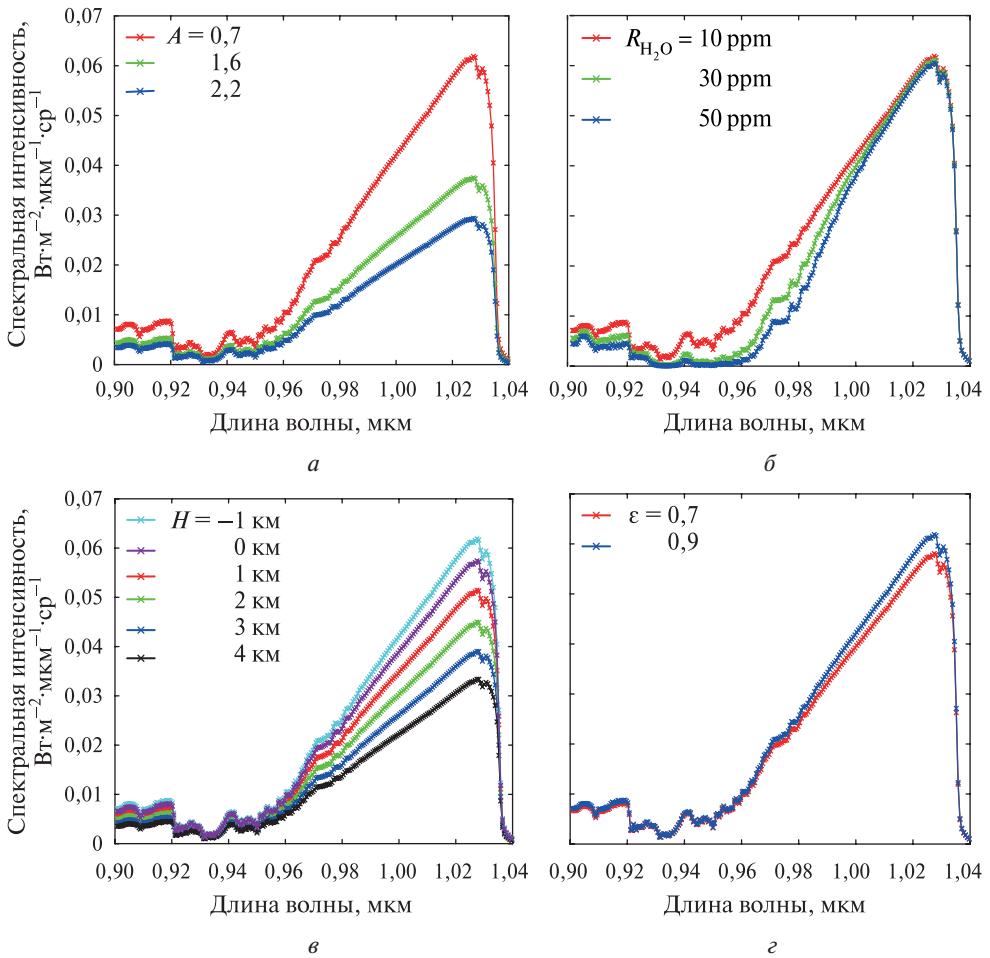


Рис. 3. Теоретический спектр окна прозрачности Венеры на 1 мкм при варьировании: *а* — параметра вертикального масштабирования счётной концентрации аэрозоля мод 2' и 3; *б* — относительного содержания H_2O ; *в* — высоты поверхности наблюдаемой области; *г* — излучательной способности поверхности

На рис. 4а показан расчёт с учётом и без учёта параметров линий высоко-температурной спектроскопической базы данных High-T в диапазоне 0,93 до 1,05 мкм в сравнении с базой данных CDS-296 при фиксированных $A = 0,7$; $R_{\text{H}_2\text{O}} = 10 \text{ ppm}$; $\epsilon = 0,9$. В диапазоне 1,02–1,04 учёт слабых линий поглощения определяет вид спектра излучения в окне прозрачности Венеры, но в спектроскопической базе данных High-T в диапазоне 0,96–1 мкм отсутствуют некоторые сильные линии поглощения CO_2 , представленные в CDS-296 (см. рис. 4а), а также в базу данных High-T включён диапазон окна прозрачности 1 мкм не в полном объёме.

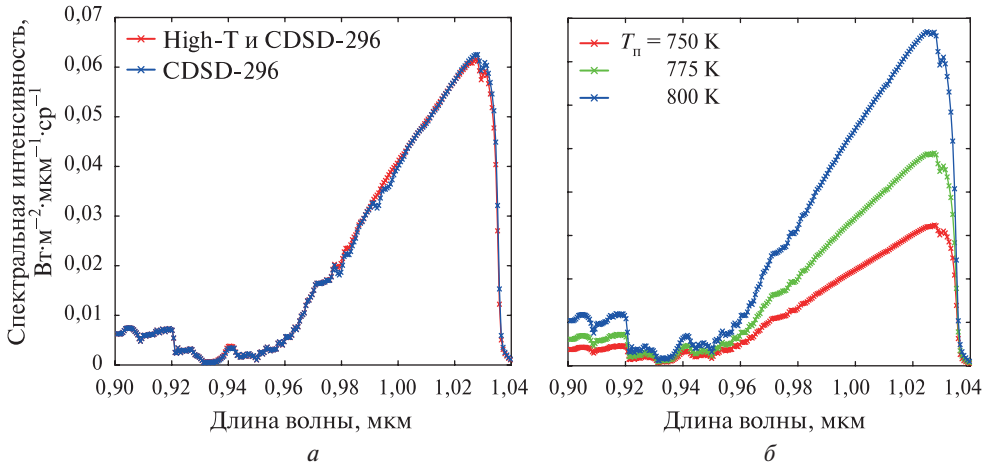


Рис. 4. Теоретический спектр окна прозрачности Венеры на 1 мкм: *a* — при использовании различных спектральных баз данных High-T в комбинации с CDS-296 и только CDS-296; *б* — при различной температуре поверхности

При исследовании перечисленных параметров учитывается равновесие между поверхностью и атмосферой: значения температуры подстилающей поверхности и атмосферы на этой высоте равны. Для исследования влияния резких изменений температуры поверхности $T_{\text{п}}$ варьировалась температура чёрного тела. Для начальной высоты -1 км , когда $A = 0,7$; $R_{\text{H}_2\text{O}} = 10 \text{ ppm}$; $\epsilon = 0,9$ спектр окна прозрачности 1 мкм рассчитан для $T_{\text{п}} = 750, 775$ и 800 K (рис. 4б). Увеличение температуры поверхности более чем на 25 K при $H = -1 \text{ км}$ даёт рост спектральной интенсивности более 60 % (см. рис. 4б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы исследовались наблюдения ночной стороны Венеры прибором СПИКАВ-ИК, соответствующие окну прозрачности 1 мкм (0,9–1,05 мкм). Для отобранных данных значения спектральной интенсивности в максимуме окна прозрачности варьировались от 0,025 до 0,084 Вт·м⁻²·мкм⁻¹·ср⁻¹, а стандартное отклонение от среднего (0,047 Вт·м⁻²·мкм⁻¹·ср⁻¹) составило 0,010 Вт·м⁻²·мкм⁻¹·ср⁻¹, что указывает на наличие факторов, существенно влияющих на тепловое излучение поверхности.

Для данного диапазона была адаптирована модель радиационного переноса излучения. Теоретические спектры были рассчитаны с учётом вариаций

таких факторов, как параметр масштабирования счётной концентрации аэрозольных частиц мод 2' и 3, излучательная способность и температура поверхности, высота наблюдаемой области и относительное содержание водяного пара. В результате получено, что наибольший вклад вносит аэрозольное рассеяние, где при увеличении счётной концентрации частиц приблизительно в три раза, интенсивность снижается приблизительно в два раза. При этом увеличение высоты наблюдаемой области на 5 км снижает интенсивность в 1,8 раз, а влияние поглощения водяным паром на спектральную интенсивность в максимуме окна прозрачности пренебрежимо мало. Излучательная способность наименьшим образом влияет на спектральную интенсивность. Варьирование температуры поверхности приводит к существенному возрастанию интенсивности излучения: рост превышает 60 % с увеличением T_p на 25 К.

С помощью полученной модели также были изучены спектроскопические базы данных параметров линий поглощения CO_2 : High-T (Bezard et al., 2011) и CDS-296 (Tashkun et al., 2019). В базе данных CDS-296 не учитывается влияние слабых линий поглощения. Однако в высокотемпературной базе данных High-T диапазон 0,9–1,05 мкм представлен не в полном объёме: отсутствуют некоторые сильные линии, отмеченные в CDS-296.

Таким образом, в окне прозрачности 1 мкм вариативность теплового излучения определяет главным образом счётная концентрация аэрозольных частиц в облачном слое. Прочие факторы, влияющие на излучение, вносят меньший вклад. Изменение температуры поверхности возможно отследить при значительных отклонениях от температуры атмосферы в приповерхностном слое, но это становится затруднительно при значениях отклонений менее, чем на 20 К.

ЛИТЕРАТУРА

- Allen D.A., Crawford J.W. Cloud structure on the dark side of Venus // *Nature*. 1984. V. 307. No. 5948. P. 222–224. <https://doi.org/10.1038/307222a0>.
- Bertaux J.L., Nevejans D., Korabely O. et al. SPICAV on Venus Express: Three spectrometers to study the global structure and composition of the Venus atmosphere // *Planetary and Space Science*. 2007. V. 55. Iss. 12. P. 1673–1700. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2007.01.016>.
- Bézard B., Fedorova A., Bertaux J.-L. et al. The 1.10- and 1.18- μm nightside windows of Venus observed by SPICAV-IR aboard Venus Express // *Icarus*. 2011. V. 216. Iss. 1. P. 173–183. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2011.08.025>.
- Drossart P., Piccioni G., Adriani A. et al. Scientific goals for the observation of Venus by VIRTIS on ESA/Venus Express mission // *Planetary and Space Science*. 2007. V. 55. Iss. 12. P. 1653–1672. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2007.01.003>.
- Evans K.F. SHDOMPPDA: A radiative transfer model for cloudy sky data assimilation // *J. Atmospheric Sciences*. 2007. V. 64. Iss. 11. P. 3854–3864. <https://doi.org/10.1175/2006JAS2047.1>.
- Fedorova A., Bézard B., Bertaux J.-L. et al. The CO_2 continuum absorption in the 1.10- and 1.18- μm windows on Venus from Maxwell Montes transits by SPICAV IR onboard Venus Express // *Planetary and Space Science*. 2015. V. 113–114. P. 66–77. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2014.08.010>.
- Hahn R.M., Byrne P.K. A Morphological and Spatial Analysis of Volcanoes on Venus // *J. Geophysical Research: Planets*. 2023. Art. No. e2023JE007753. <https://doi.org/10.1029/2023JE007753>.
- Haus R., Kappel D., Tellmann S. et al. Radiative energy balance of Venus based on improved models of the middle and lower atmosphere // *Icarus*. 2016. V. 272. P. 178–205. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.02.048>.
- Herrick R.R., Hensley S. Surface changes observed on a Venusian volcano during the Magellan mission // *Science*. 2023. V. 379. No. 6638. P. 1205–1208. DOI: 10.1126/science.abm7735.

- Korablev O., Fedorova A., Bertaux J.-L. et al. SPICAV IR acousto-optic spectrometer experiment on Venus Express // *Planetary and Space Science*. 2012. V. 65. Iss. 1. P. 38–57. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2012.01.002>.
- Meadows V.S., Crisp D. Ground-based near-infrared observations of the Venus nightside: The thermal structure and water abundance near the surface // *J. Geophysical Research: Planets*. 1996. V. 101. Iss. E2. P. 4595–4622. <https://doi.org/10.1029/95JE03567>.
- Rothman L.S., Gordon I.E., Barber R.J. et al. HITEMP, the high-temperature molecular spectroscopic database // *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2010. V. 111. Iss. 15. P. 2139–2150. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2010.05.001>.
- Saunders R.S., Spear A.J., Allin P.C. et al. Magellan mission summary // *J. Geophysical Research: Planets*. 1992. V. 97. Iss. E8. P. 13067–13090. <https://doi.org/10.1029/92JE01397>.
- Seiff A., Schofield J.T., Kliore A.J. et al. Models of the structure of the atmosphere of Venus from the surface to 100 kilometers altitude // *Advances in Space Research*. 1985. V. 5. Iss. 11. P. 3–58. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(85\)90197-8](https://doi.org/10.1016/0273-1177(85)90197-8).
- Shalygin E.V., Markiewicz W.J., Basilevsky A.T. et al. Active volcanism on Venus in the Gani-chi Chasma rift zone // *Geophysical Research Letters*. 2015. V. 42. Iss. 12. P. 4762–4769. <https://doi.org/10.1002/2015GL064088>
- Smrekar S.E. et al. Recent hotspot volcanism on Venus from VIRTIS emissivity data // *Science*. 2010. V. 328. Iss. 5978. P. 605–608. DOI: 10.1126/science.11867.
- Tashkun S.A., Perevalov V.I., Gamache R.R., Lamouroux J. CDSD-296, high-resolution carbon dioxide spectroscopic databank: An update // *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2019. V. 228. P. 124–131. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2019.03.001>.

STUDY OF VENUS SURFACE THERMAL RADIATION IN 1- μ m TRANSPARENCY WINDOW

A. V. Nazarova¹, D. G. Evdokimova², A. A. Fedorova², O. I. Korablev²

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

² Space Research Institute RAS (IKI), Moscow, Russia

Remote sensing of Venus in “transparency windows” is a way to study processes below the cloud layer and at the surface. In this paper, we investigate the influence of several atmospheric and surface parameters on radiance of the 1- μ m transparency window using radiative transfer model. These parameters are cloud aerosol particle number density, water vapor volume mixing ratio, surface emissivity, temperature and altitude. Our study also examines a difference between High-T and CDSD-296 spectroscopic databases reproducing CO₂ absorption. The model results have been studied taking into account experimentally obtained variability of the 1- μ m transparency window emission. The experimental dataset analyzed is measured by the SPICAV IR spectrometer on board the Venus Express space mission. It was concluded that scattering in the Venusian clouds is the strongest modulator of the 1- μ m transparency window emission. In addition, the radiance increases up to 60% when the surface temperature rises by 25 K, which could be used to search for “hot spots” and possible volcanic activity.

Keywords: Venus, spectrometer, transparency window, thermal radiation, scattering, atmosphere.

Nazarova Anastasiia Vitalievna — master’s degree student, enemorian@gmail.com

Evdokimova Daria Gennadiyevna — researcher, candidate of physical and mathematical sciences

Fedorova Anna Aleksandrovna — leading researcher, candidate of physical and mathematical sciences

Korablev Oleg Igorevich — head of the department, deputy director, doktor of physical and mathematical sciences

КАТАЛОГИЗАЦИЯ ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТА ДАН ПО ОЦЕНКЕ СОДЕРЖАНИЯ ВОДЫ И ХЛОРА ВДОЛЬ ПУТИ СЛЕДОВАНИЯ МАРСОХОДА «КЬЮРИОСИТИ» В КРАТЕРЕ ГЕЙЛ

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

Работа содержит результаты каталогизации данных измерений прибора «Динамическое альbedo нейтронов» (ДАН), установленного на марсоходе «Кьюриосити». Данные получены в процессе активных и пассивных операций прибора, когда он измерял поток нейтронов альbedo поверхности Марса. Представлены профили измерений прибора ДАН, которые включают оценку содержания воды и хлора, полученную из данных за несколько лет непрерывной работы. Данные ДАН были представлены в виде пикселей регулярного размера вдоль пути движения марсохода, что позволило проанализировать их в соответствии с особенностями геоморфологии кратера. Пиксель размером 3×3 м позволяет охватить каждое отдельное измерение прибора, как активное, так и пассивное. Приведено содержание воды и хлора для каждой точки вдоль траектории движения марсохода. Значения, которые соотносятся в пределах одного пикселя, усредняются и присваиваются данному пикселю.

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

ВВЕДЕНИЕ

Последние исследования научными приборами с использованием ядерно-физических методов, как на поверхности Марса, так и на борту орбитальных космических аппаратов, принесли много новых знаний о марсианской поверхности (Boynton, 2002; Boynton et al., 2004; Feldman et al., 2011; Mitrofanov et al., 2014, 2022; Litvak et al., 2008, 2014; Sanin et al., 2015). Особенно следует отметить новые результаты нейтронного спектрометра FRENД на борту космического аппарата ESA TGO, который обнаружил мерзлотный оазис в районе Valles Marineris (Malakhov et al., 2020; Mitrofanov et al., 2022).

Марсоход «Кьюриосити» (*англ.* Curiosity, любопытство, любознательность) является частью программы НАСА по исследованию Марса. Основная цель миссии — марсохода поиск пригодной для жизни среды Марса, а также изучение эволюции марсианского климата (Grotzinger et al., 2012; Vasavada, 2022). В качестве района исследований выбран кратер Гейла, который расположен в районе экватора планеты. Результаты предыдущих исследований показали, что поверхность кратера была сформирована при контакте с водной средой, предположительно в долгоживущих озёрах (например, (Rampe et al., 2020)).

На борту марсохода также установлен российский научный прибор «Динамическое альbedo нейтронов» (ДАН) (Mitrofanov et al., 2012), который представляет собой активный и пассивный нейтронный спектрометр. Прибор ДАН

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

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

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

Дьячкова Майя Викторовна — младший научный сотрудник

Лисов Денис Игоревич — младший научный сотрудник

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

предназначен для измерения содержания водорода (как индикатора воды) и других элементов, поглощающих нейтроны (в основном хлора), вдоль пути движения марсохода в верхних слоях поверхности кратера Гейла.

ОПИСАНИЕ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЙ ЭКСПЕРИМЕНТА ДАН

Прибор «Динамическое альbedo нейтронов» состоит из двух отдельных блоков: детекторно-электронного блока ДАН ДЭ и генератора импульсных нейтронов ДАН ИНГ, подробнее о которых можно узнать в работе И. Г. Митрофанова с коллегами (2012). ДАН ДЭ содержит два пропорциональных счётчика, заполненных газом ^3He , для регистрации тепловых и эпитепловых нейтронов до энергии 100 эВ (детектор СТН) и эпитепловых нейтронов от 0,4 до 100 эВ (детектор СЕТН).

При работе в пассивном режиме прибора ДАН ДЭ его детекторы регистрируют локальный нейтронный фон, который состоит из двух компонент. Первая компонента — это нейтроны, созданные в марсианских недрах в результате бомбардировки галактическими космическими лучами (ГКЛ). Вторая компонента — это нейтроны, созданные многоцелевым радиоизотопным термоэлектрическим генератором (РИТЭГ). Некоторые из этих нейтронов попадают непосредственно на счётчики, а другие рассеиваются в неглубоких недрах до обнаружения.

Измерения, полученные с помощью нейтронного генератора ДАН, называются активными измерениями по аналогии с активацией вещества подповерхностного слоя. Результаты этих измерений показали высокую эффективность при применении для планетных исследований. Пространственное разрешение нейтронного зондирования в одном измерении составляет порядка 3 м (Sanin et al., 2015; Lisov et al., 2018).

В активном режиме прибора ДАН ИНГ генерируются короткие импульсы нейтронов с энергией 14 МэВ, а ДАН ДЭ регистрирует дополнительные нейтроны, замедленные до энергий, пригодных для определения химического состава недр. После взаимодействия с ядрами мелких недр, эти нейтроны зарегистрированы в виде дополнительных отсчётов на счётчиках прибора ДАН ДЭ.

Результаты активных измерений позволяют определить характерные значения концентрации воды и нейтрон-абсорбирующей компоненты (основным представителем которой является хлор) в веществе кратера Гейл. Однако по этим данным невозможно определить, как изменяется содержание воды вдоль трассы движения марсохода на какой-либо линейной дистанции, а также какие особенности локального рельефа могут влиять на эти изменения.

Данные, полученные с помощью прибора ДАН, не предоставляют прямой информации о содержании воды (измеряемого как концентрация водорода в поверхностном слое или водного эквивалента водорода) или о содержании хлора и других компонентов, поглощающих нейтроны (Sanin et al., 2015).

Для определения концентрации воды и хлора на каждом исследуемом участке поверхности во время измерений в активном режиме ДАН, проводится процедура оценки временных профилей динамического альbedo нейтронов, которая основывается на сравнении измеренных профилей послеимпульсной эмиссии нейтронов с численно моделированными профилями такой эмиссии. Численные модели рассчитываются для моделей подповерхностного материала, состоящего из элементов и переменных долей воды и хлора.

Для каждого исследуемого пятна на поверхности значения концентрации воды и хлора, дающие наилучшее соответствие измеренным профилям, выбираются в качестве полученных эмпирических значений. Этот метод используется

для оценки содержания воды и других элементов в материале на поверхности (см., например, Mitrofanov et al., 2016; Lisov et al., 2018).

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ДАННЫХ ДАН В ВИДЕ ЕДИНИЧНЫХ ПИКСЕЛЕЙ

Метод оценки воды и хлора в недрах марсианской поверхности с помощью активных данных эксперимента ДАН основывается на их временных профилях и численной модели. Для создания модели используется набор опорных профилей, полученных моделированием переноса нейтронов при помощи программы численного моделирования MCNPX. Опорные профили представлены сеткой с двумя параметрами воды и хлора. Активные измерения производятся только в моменты остановки марсохода, в выполненной работе было рассмотрено около 1000 участков с такими измерениями на дистанции более 27 км.

Оценка содержания воды в верхнем слое марсианской поверхности с помощью пассивных измерений эксперимента ДАН основана на эмпирической зависимости между пассивными нейтронными измерениями и значениями концентрации воды и хлора, полученными из активных данных. Эта методика называется «Методом привязки по активным данным» (*англ.* Method of Referencing by Active Data — MRAD) и позволяет получить временной профиль содержания воды на поверхности Марса. Измерения в пассивном режиме получаются непрерывно, что позволяет получить оценку воды для каждого участка движения марсохода. Размер детектируемого измеренного «пятна» составляет около 3 м в диаметре. Для проведения такого анализа необходимо иметь оценку концентрации хлора в исследуемом районе, которую можно получить из интерполяции между площадками с активными измерениями ДАН или из данных других приборов. Применение этого метода более подробно описано в работе (Nikiforov et al., 2020).

Для анализа измерений эксперимента ДАН вдоль сложной траектории движения марсохода, соответствующей местной геоморфологии, данные были представлены по отдельным пикселям для первых 27 км траверса. Стороны пикселей были ориентированы в широтно-продольном направлении. Усреднённые значения концентрации воды и хлора для точек, расположенных в пределах одного пикселя на траектории движения марсохода, были присвоены конкретному пикселю. Размер пикселя был выбран в соответствии с пространственным разрешением активных измерений, которые охватывали область диаметром в 3 м. Таким образом, использование пикселя размером 3×3 м позволило получить лучшее представление результатов и обеспечило полное покрытие траектории марсохода, сохраняя при этом достаточное пространственное разрешение. Этот выбор размера пикселя стал компромиссом между качеством представления и охватом исследования за счёт пикселизации. Данные были опубликованы в виде каталога в общедоступном научном архиве Zenodo.org, и представлены в табличном виде.

В представленном каталоге данных прибора ДАН результаты активных и пассивных измерений эксперимента отображаются на двух типах независимых пикселей: «пиксель с активными данными» (ПАД), который включает в себя содержание воды и хлора, и «пиксель с пассивными данными» (ППД), который содержит только данные о содержании воды. Распределение результатов воды в обоих типах пикселей показывает хорошее согласование между ними. Однако картирование пикселями с пассивными данными значительно улучшает интерпретацию локальных областей на поверхности с высоким содержанием воды, соответствующих геоморфологическим изменениям. Знание воды для последовательности пикселей ППД обеспечивает непрерывный профиль расстояния вариаций воды с пространственным разрешением 3 м.

Траектория движения марсохода пересекает несколько геологических регионов, которые были определены с использованием данных, доступных от миссии «Кьюриосити» и других исследований. Научная группа миссии использует и дополняет стратиграфическую колонку для организации наблюдаемой геологии, основываясь главным образом на литологии. Колонка разделена на неформальные группы и формации, отображающие литологию, полученную из исследований марсохода, в соответствии с высотой.

Для каждого пикселя эксперимента ДАН был определён соответствующий элемент. Если пиксель пересекает границу элемента, он относится к тому элементу, который имеет большую площадь пикселя.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Данные эксперимента ДАН представлены в виде двух типов пикселей. Активные пиксели ПАД содержат оценки активных измерений, включая содержание воды и эквивалентного хлора, в то время как пассивные пиксели ППД содержат только оценки по измерениям нейтронного излучения — концентрации воды. Все данные доступны в каталоге научного архива Zenodo.org в табличном формате по ссылке: <https://zenodo.org/record/6974535> (Nikiforov et al., 2022).

В таблице приведено описание формата представленных данных. Столбцы таблицы включают: 1) порядковый номер пикселя, 2) тип пикселя (ПАД или ППД), 3) долготу и 4) широту центра пикселя, 5) ассоциированную геологическую единицу стратиграфической колонки, 6) расчётную концентрацию воды для ППД и ПАД (%) и 7) содержание эквивалентного хлора для ПАД (%). В таблице также приведены несколько строк в качестве примера, относящиеся к пикселям ПАД или ППД с максимальным содержанием воды.

Результаты измерений прибора ДАН для отдельных пикселей поверхности

Порядковый номер пикселя	Тип пикселя	Долгота (центр пикселя)	Широта (центр пикселя)	Ассоциированная геологическая единица стратиграфической колонки	Концентрация воды (%)	Концентрация эквивалентного хлора (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
...
6106	ППД	137,36097	-4,71608	Murray/ Sutton Island	6,1±0,7	—
...
8704	ППД	137,39154	-4,73010	Carolyn Shoemaker/ Knockfarrill Hill	4,62±0,58	—
8704.1	ПАД	137,39154	-4,73010	Carolyn Shoemaker/ Knockfarrill Hill	4,83±0,27	1,07±0,14
...

ВЫВОДЫ

Главные научные выводы эксперимента ДАН связаны с вариациями оценки воды и эквивалентного хлора в разных геологических условиях и процессах на марсианской поверхности, о которых свидетельствуют данные, полученные марсоходом «Кьюриосити» в течение 10 лет. Наблюдаемые вариации могут указывать на эволюционные процессы, которые происходили в истории кратера Гейл.

Было обнаружено, что наибольшее содержание воды в активных пикселях отражает присутствие в формации Carolyn Shoemaker. В то время как несколько стратиграфических единиц, таких как Bradbury, Sheepbed и Pahrump Hills, имеют средние значения в диапазоне от 2 до 3 %, другие единицы, такие как Jura, Knockfarrill Hill, Glasgow и Pontours, имеют более высокое содержание воды (средние значения выше 3 %). Средняя концентрация эквивалентного хлора остаётся относительно постоянной во всех геологических единицах, её значения варьируют около 1 %.

ЛИТЕРАТУРА

- Boynnton 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.1073722.
- Boynnton W. V., Feldman W. C., Mitrofanov I. G. et al.* 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.
- Feldman W. C., Pathare A., Maurice S. et al.* Mars Odyssey neutron data: 2. Search for buried excess water ice deposits at nonpolar latitudes on Mars // *J. Geophysical Research*. 2011. V. 116(E11). Art. No. E11009. <https://doi.org/10.1029/2011JE003806>.
- Grotzinger J. P., Crisp J., Vasavada A. R. et al.* 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.
- Lisov D. I., Litvak M. L., Kozyrev A. S. et al.* 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. et al.* 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. et al.* 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. DOI: 10.1002/2013JE004556.
- Malakhov A. V., Mitrofanov I. G., Litvak M. L. et al.* Ice Permafrost 'Oases' Close to Martian Equator: Planet Neutron Mapping Based on Data of FRENDE 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., Litvak M. L., Varenikov A. B. et al.* 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. et al.* 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>.
- Mitrofanov I. G., Kozyrev A. S., Lisov D. I. et al.* Active neutron sensing of the Martian surface with the DAN experiment onboard the NASA "Curiosity" Mars rover: Two types of soil with different water content in the Gale crater // *Astronomy Letters*. 2016. V. 42(4). P. 251–259. <https://doi.org/10.1134/S1063773716040058>.
- Mitrofanov I., Malakhov A., Djachkova M. et al.* The evidence for unusually high hydrogen abundances in the central part of Valles Marineris on Mars // *Icarus*. 2022. V. 374. Art. No. 114805. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2021.114805>.
- Nikiforov S. Y., Mitrofanov I. G., Litvak M. L. et al.* Assessment of water content in martian subsurface along the traverse of the Curiosity rover based on passive measurements of the

- DAN instrument // *Icarus*. 2020. V. 346. Art. No. 113818. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2020.113818>.
- Nikiforov S., Djachkova M., Lisov D.* Water and chlorine in the Martian subsurface along the traverse of NASA's curiosity rover: DAN measurement profiles along the traverse (version 1) [Dataset] // *Zenodo*. 2022. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6974535>.
- Rampe E. B., Blake D. F., Bristow T. F. et al.* 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(2). Art. No. 125605. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2020.125605>.
- Sanin A. B., Mitrofanov I. G., Litvak M. L. et al.* 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. DOI: 10.1016/j.nima.2015.03.085.
- Vasavada A. R.* Mission overview and scientific contributions from the Mars Science Laboratory curiosity rover after eight years of surface operations // *Space Science Reviews*. 2022. V. 218(3). Art. No. 14. <https://doi.org/10.1007/s11214-022-00882-7>.

CATALOGING THE DYNAMIC NEUTRON ALBEDO (DAN) EXPERIMENT DATA FOR ESTIMATING WATER AND CHLORINE CONTENT ALONG THE PATH OF THE CURIOSITY ROVER IN GALE CRATER

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 study reports cataloged data from the Dynamic Neutron Albedo (DAN) instrument measurements made onboard the Curiosity rover during its active and passive operations of measuring the neutron flux albedo of the Mars surface. The instrument measurement profiles include estimates of water and chlorine content derived from data collected during several years of continuous operation. The DAN data was presented as pixels that had a regular size along the path of rover movement, which allowed for the analysis of the features of the crater geomorphology. A pixel size of 3×3 m was used to cover each individual measurement taken by the instrument, both active and passive methods. The values of water and chlorine content for each point along the rover's trajectory were provided, and values that correlated within a single pixel were averaged and assigned to that pixel.

Keywords: Mars exploration, rover, neutron spectroscopy, water

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

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

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

Djachkova Maya Viktorovna — junior researcher

Lisov Denis Igorevich — junior researcher

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

О ВЛИЯНИИ РАЗЛИЧНЫХ ВОЗМУЩАЮЩИХ ФАКТОРОВ НА НАБЛЮДАЕМОЕ ПОЛОЖЕНИЕ ОБЪЕКТА КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

Т. Н. Санникова

Крымская астрофизическая обсерватория РАН (КрАО РАН), пос. Научный, Россия

Проведена оценка влияния различных возмущающих факторов на наблюдаемое положение космического объекта с целью выявления факторов, которыми можно пренебречь при прогнозировании движения объектов на коротких интервалах времени, а также при теоретическом моделировании действия радиационных сил. Получено, что на интервалах времени до шести недель в случае геостационарной и геосинхронной орбиты можно пренебречь такими возмущающими факторами как сопротивление атмосферы, приливы в теле Земли и океанические приливы, притяжение планет и Плутона, релятивистские эффекты, несферичность лунного гравитационного потенциала. Также можно учитывать гравитационное поле Земли, включая гармоники геопотенциала только до 8-го порядка и степени. В случае орбиты «Молния» необходимо в модель возмущающих сил включать гармоники геопотенциала не ниже 15-го порядка и степени, а также приливы в теле Земли, релятивистские эффекты и сопротивление атмосферы.

Ключевые слова: космический мусор, отношение площади к массе, геостационарная область, орбита «Молния», орбита «Тундра», давление солнечного излучения, релятивистские эффекты, несферичность геопотенциала, несферичность лунного гравитационного потенциала, притяжение планет и Плутона, приливы, сопротивление атмосферы

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проблема накопления космического мусора (КМ) в околоземном пространстве (ОКП) приобрела глобальный характер. Количество объектов искусственного происхождения постоянно растёт не только за счёт вывода из эксплуатации отработавших спутников, но и в результате разрушения объектов из-за физического износа, взрывов и столкновений. Это порождает серьёзную угрозу для действующих космических аппаратов и экологии Земли и ОКП.

Вследствие воздействия различных возмущающих факторов элементы орбиты объектов КМ изменяются со временем, что требует их регулярных наблюдений. Для выдачи целеуказаний необходимо рассчитать эфемериды для большого количества объектов. Чем больше возмущающих факторов при этом будет учитываться, тем больше требуется вычислительных ресурсов. Но пренебрежение каким-либо возмущающим фактором может привести к ошибкам прогноза и потере объекта.

Настоящее исследование посвящено оценке влияния различных эффектов на наблюдаемое положение космического объекта (КО) с целью выявления факторов, которыми можно пренебречь при прогнозировании движения объектов на коротких интервалах времени (до шести недель), а также при теоретическом моделировании действия радиационных сил. В качестве критерия влияния возмущающего фактора на положение тела принято пространственное расстояние D и соответствующее ему угловое расстояние θ между координатами, вычисленными с учётом всех возмущающих факторов и без учёта одного или нескольких факторов. Рассмотрены три модельных объекта с различными типами орбит и при шести отношениях площади к массе (ОПМ).

Для исследования влияния возмущающих сил на положение объекта использован высокоточный программный комплекс «Численная модель движения систем ИСЗ» (Aleksandrova et al., 2017), разработанный в Научно-исследовательском институте прикладной математики и механики Томского государственного университета.

Базовый набор положений, с которым далее производится сравнение, вычислен исходя из следующих возмущающих факторов, включённых в модель сил программного комплекса: гравитационное поле Земли с учётом гармоник геопотенциала до 30-го порядка и степени включительно, притяжение Солнца и Луны, притяжение всех планет и Плутона, гармоника селенопотенциала до 2-го порядка и степени включительно, приливы в теле Земли, океанические приливы, сопротивление атмосферы, релятивистские эффекты (шварцшильдовские возмущения, эффекты прецессии Лензе–Тирринга, релятивистские квадрупольные члены), радиационные силы, включая возмущения от светового давления и эффекта Пойнтинга–Робертсона, при этом использована конусная модель светового давления с тенью и полутенью и предположено, что тело имеет сферическую форму, т. е. отношение площади к массе A/m постоянно.

Уравнения движения проинтегрированы методом Эверхарта 19-го порядка с автоматическим выбором шага. При этом ошибка округления, определённая интегрированием на 42 дня туда и обратно и сравнения координат на начальную эпоху до и после интегрирования, составила менее 1 мм для всех моделей.

В результате численного интегрирования получены геоцентрические координаты и скорость модельных объектов в течение шести недель с интервалом 5 мин.

Вектор положения найден с учётом всех вышеперечисленных возмущающих факторов (назовём его «возмущённое» положение) и с поочерёдным отключением одного или нескольких факторов («невозмущённое» положение). Между возмущённым и невозмущённым положением вычислены пространственное расстояние D и соответствующее ему угловое расстояние θ (относительно подспутниковой точки), а также изменение элементов орбиты. Далее определены максимальные расстояния D_{\max} и θ_{\max} в течение заданных интервалов времени.

Рассмотрены три модельных объекта с элементами орбиты, приведёнными в табл. 1. Для каждой модели вычисления проводились при шести значениях ОПМ: 0,01; 1,0; 10,0; 40,0; 70,0 и 100,0 м²/кг, и коэффициенте отражения 1,44, что соответствует полному диффузному рассеянию.

Таблица 1. Начальные элементы орбиты модельных объектов

Орбита	№ 1 «Молния»	№ 2 «Тундра»	№ 3 ГСО (орбита захоронения)
Большая полуось, км	26 500	42 500	42 400
Эксцентриситет	0,7	0,35	0,02
Наклон, град	64	40	5
Долгота восходящего узла, град	90	130	30
Аргумент перигея, град	270	270	190
Средняя аномалия, град	0		
Период, ч	11,93	24,22	24,136
Перигейное расстояние, км	7950	27 625	41 552
Начальная эпоха	0 ч 0 мин 0,0 с 1 июня 2018 г.		

РЕЗУЛЬТАТЫ

Радиационные силы

Очень большое влияние, конечно же, со стороны радиационных сил (рис. 1). Даже в течение одной недели при больших ОПМ ($10 \text{ м}^2/\text{кг}$ и более) угловое смещение составляет десятки градусов, а для модели № 1 — более 100° , пространственное же смещение достигает десятки тысяч километров, т. е. возмущённое и невозмущённое положения находятся в диаметрально противоположных точках орбиты относительно Земли. Поэтому малейшие неточности в моделировании этого возмущающего фактора могут привести к большим ошибкам в прогнозируемом положении КО.

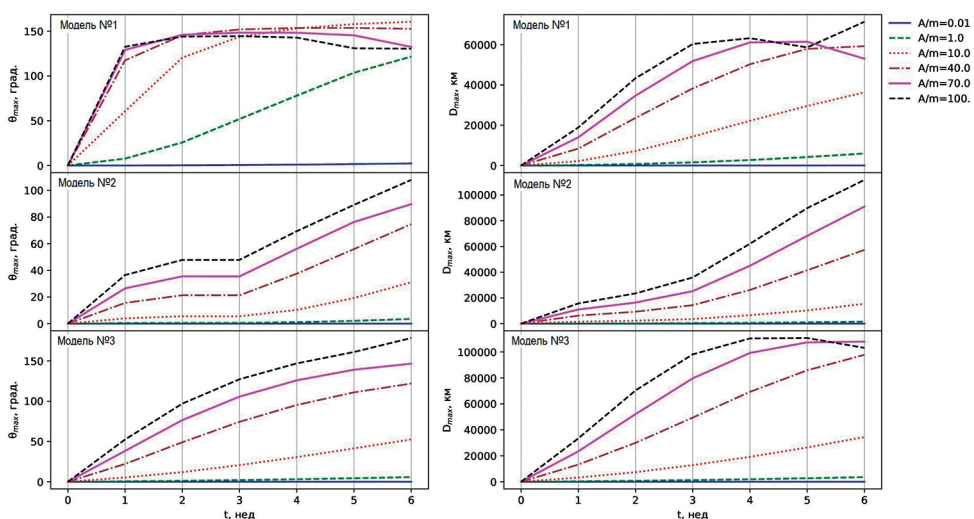


Рис. 1. Максимальные в течение соответствующей недели пространственное расстояние D_{\max} между положениями, вычисленными с учётом радиационных сил и без их учёта (справа); максимальное угловое расстояние θ_{\max} (слева)

Максимальные значения пространственного D_{\max} и углового θ_{\max} расстояния в течение одной и шести недель при $A/m \leq 1,0 \text{ м}^2/\text{кг}$ дополнительно приведены в табл. 2, так как масштаб рис. 1 не позволяет оценить их величины.

Таблица 2. Значения D_{\max} и θ_{\max} в течение одной и шести недель при $A/m \leq 1,0 \text{ м}^2/\text{кг}$ между координатами, вычисленными с учётом светового давления и без его учёта

$A/m, \text{ м}^2/\text{кг}$	Модель	№ 1		№ 2		№ 3		
		Интервал времени, недели	1	1–6	1	1–6	1	1–6
0,01	$D_{\max}, \text{ км}$		2,210	60,965	1,548	15,622	3,204	35,435
	$\theta_{\max}, \text{ угл. мин}$		4,701	138,639	0,239	2,155	0,313	3,443
1,0	$D_{\max}, \text{ км}$		220,810	5974,164	154,874	1560,571	320,687	3540,821
	$\theta_{\max}, \text{ угл. мин}$		464,299	7298,323	23,933	212,973	31,371	344,117

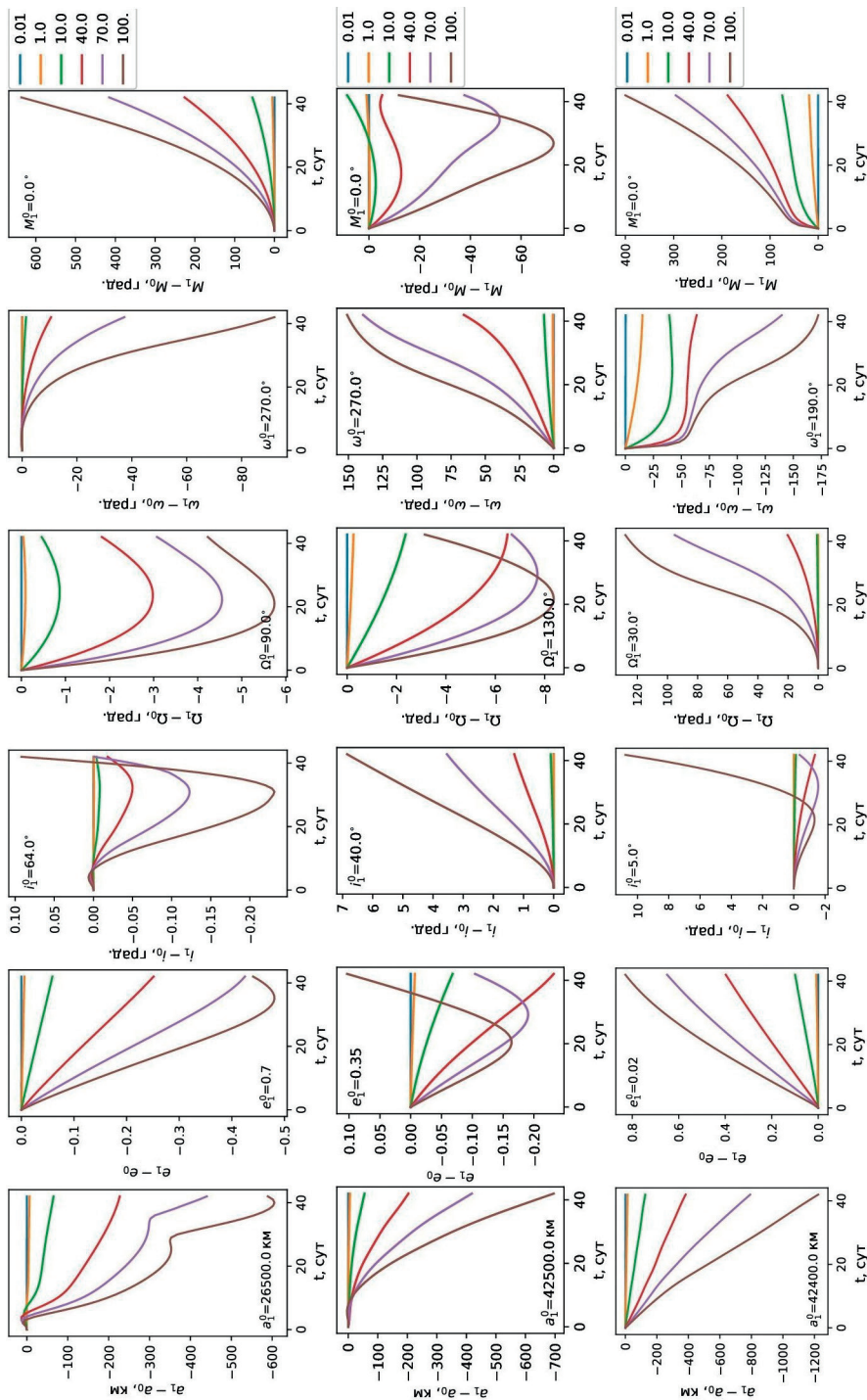


Рис. 2. Изменение элементов орбиты (слева направо: большая полуось, эксцентриситет, наклон, долгота восходящего узла, аргумент перигея, средняя аномалия) за счёт влияния радиационных сил в течение 42 сут для моделей № 1–3 (сверху вниз). В легенде справа указано соответствие цвета линии отношению площади к массе A/m

Элементы орбиты также значительно изменяются (рис. 2, см. с. 132). На рис. 2 применены обозначения: e_1 — элемент орбиты, вычисленной с учётом радиационных сил, e_0 — без их учёта, e_1^0 — элемент орбиты в начальную эпоху. Видно, что для всех моделей большая полуось уменьшается. Для моделей № 1 и 2 эксцентриситет сначала уменьшается, затем увеличивается, т. е. скорее всего имеют место периодические колебания, причём период меньше, а амплитуда больше для объектов с большей парусностью. В случае объекта № 3 с почти круговой орбитой в начальный момент времени эксцентриситет растёт. При $A/m = 100 \text{ м}^2/\text{кг}$ рост эксцентриситета очень быстрый, что приводит к уменьшению перигейного расстояния. В дальнейшем этот объект входит в плотные слои атмосферы и сгорает.

Количество учитываемых гармоник геопотенциала

Проведено численное интегрирование с учётом гармоник геопотенциала до 8-го, 10-го, 15-го и 20-го порядка и степени включительно. Получено, что для моделей № 2 и 3 при всех A/m (кроме модели № 3 при $A/m = 100,0 \text{ м}^2/\text{кг}$) в течение 42 сут смещение менее 1 угл. с даже при учёте гармоник геопотенциала только до 8-го порядка и степени включительно. Но для орбиты «Молния» с $A/m = 0,01 \text{ м}^2/\text{кг}$ при учёте восьми гармоник расхождение в положении объекта по сравнению с 30 гармониками через одну неделю достигает 4 км, что соответствует угловому смещению 8 угл. мин и превышает эффекты от светового давления (см. табл. 2). Максимумы пространственных и угловых расстояний в сравнении с базовым набором положений в течение одной, трёх и шести недель для случаев больших смещений приведены в табл. 3.

Таблица 3. Значения D_{\max} и θ_{\max} в течение одной, трёх и шести недель при учёте различного количества гармоник геопотенциала в сравнении с 30 гармониками

A/m , $\text{м}^2/\text{кг}$	Кол-во гармоник	20		15		10		8		
		1	1–6	1	1–6	1	1–6	1	1–3	1–6
<i>Модель № 1</i>										
0,01	D_{\max} , км	0,061	1,337	0,277	2,217	0,658	34,519	3,750	4,160	37,601
	θ_{\max} , УГЛ. МИН	0,132	3,040	0,602	5,043	1,427	78,505	8,132	9,100	85,514
1,0	D_{\max} , км	0,060	1,257	0,279	1,927	0,648	30,972	3,763	4,161	28,394
	θ_{\max} , УГЛ. МИН	0,129	2,596	0,599	3,978	1,394	63,947	8,089	8,936	58,626
10,0	D_{\max} , км	0,053	0,659	0,285	0,487	0,564	14,753	3,843	4,440	8,027
	θ_{\max} , УГЛ. МИН	0,099	0,742	0,534	0,750	1,058	16,612	7,204	7,822	9,039
40,0	D_{\max} , км	0,039	0,210	0,289	1,192	0,376	3,139	4,037	6,184	7,237
	θ_{\max} , УГЛ. МИН	0,053	0,091	0,389	0,530	0,506	1,346	5,434	5,624	5,624

A/m , m^2/kg	Кол-во гармоник	20		15		10		8		
		1	1–6	1	1–6	1	1–6	1	1–3	1–6
70,0	D_{\max} , КМ	0,032	0,132	0,282	1,043	0,269	1,485	4,122	7,785	11,247
	θ_{\max} , УГЛ. МИН	0,033	0,040	0,292	0,324	0,279	0,416	4,271	4,314	4,314
100,0	D_{\max} , КМ	0,028	0,112	0,271	1,034	0,202	0,996	4,125	8,023	13,379
	θ_{\max} , УГЛ. МИН	0,023	0,030	0,225	0,274	0,168	0,264	3,428	3,443	3,556
<i>Модель № 3</i>										
100,0	D_{\max} , М	$1,5 \cdot 10^{-8}$	41,767	$1,5 \cdot 10^{-8}$	134,60	0,0002	180,70	0,0014	0,068	1020,4
	θ_{\max} , УГЛ. МИН	$1,7 \cdot 10^{-12}$	0,476	$1,7 \cdot 10^{-12}$	1,326	$2,1 \cdot 10^{-8}$	2,628	$1,7 \cdot 10^{-7}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	14,837

Со временем смещение нарастает быстрее для объектов с малым ОПМ, так как для них эксцентриситет сохраняется высоким, и объекты в перигее проходят близко к поверхности Земли.

Приливы в теле Земли, релятивистские эффекты

Значения D_{\max} и θ_{\max} , достигаемые в течение 1–2, 3–4 и 5–6 недели вследствие приливов в теле Земли и релятивистских эффектов, для модели № 1 приведены в табл. 4.

Таблица 4. Значения D_{\max} и θ_{\max} , достигаемые в течение указанных интервалов времени вследствие приливов в теле Земли и релятивистских эффектов, для модели № 1

A/m , m^2/kg	Возмущение	Приливы в теле Земли			Релятивистские эффекты		
	Интервал времени, недели	1–2	3–4	5–6	1–2	3–4	5–6
0,01	D_{\max} , КМ	0,57	1,25	2,06	260,3	526,9	810,3
	θ_{\max} , УГЛ. МИН	1,23	2,71	4,68	0,559	1,147	1,843
1,0	D_{\max} , КМ	0,57	1,23	2,03	259,9	522,9	800,5
	θ_{\max} , УГЛ. МИН	1,22	2,54	4,18	0,552	1,077	1,653
10,0	D_{\max} , КМ	0,55	1,14	1,77	251,9	489,9	721,2
	θ_{\max} , УГЛ. МИН	0,93	1,52	1,99	0,422	0,653	0,812
40,0	D_{\max} , КМ	0,49	0,90	1,20	227,0	399,8	533,6
	θ_{\max} , УГЛ. МИН	0,47	0,53	0,52	0,216	0,235	0,235
70,0	D_{\max} , КМ	0,44	0,73	0,95	205,7	334,5	435,9
	θ_{\max} , УГЛ. МИН	0,29	0,28	0,26	0,134	0,134	0,123
100,0	D_{\max} , КМ	0,40	0,61	0,90	187,4	287,6	417,1
	θ_{\max} , УГЛ. МИН	0,20	0,20	0,24	0,094	0,092	0,111

Видно, что в случае высокоэллиптической орбиты через шесть недель приливы в теле Земли могут вызвать угловое смещение более 4,5 угл. мин, а без учёта релятивистских эффектов возможна ошибка в прогнозе положения до 2 угл. мин. Причём наблюдается большее влияние этих эффектов на объекты с малым ОПМ. Это объясняется уменьшением эксцентриситета и увеличением высоты перигея орбит фрагментов с большой парусностью из-за влияния радиационных сил (см. рис. 2).

Для объектов № 2 и 3 влияние этих возмущающих факторов мало, угловое смещение менее 1 угл. с в течение шести недель для всех A/m , кроме модели № 3 при $A/m = 100,0 \text{ м}^2/\text{кг}$, для которой наблюдается увеличение θ_{max} на 6-й неделе в случае приливов в теле Земли до 52,1 угл. с, релятивистских эффектов до 13,8 угл. с, что вызвано увеличением эксцентриситета орбиты и уменьшением перигейного расстояния.

Малозначимые возмущающие факторы

Несколько эффектов вызвали малое смещение (менее 1 угл. с) в течение шести недель для всех рассматриваемых моделей. Это притяжение планет и Плутона, несферичность лунного гравитационного потенциала, сопротивление атмосферы (что вероятно связано со значительным перигейным расстоянием у орбит № 2, 3 и быстрым уменьшением эксцентриситета орбиты и увеличением высоты перигея для модели № 1) и океанические приливы, кроме модели № 3 при $A/m = 100,0 \text{ м}^2/\text{кг}$, для которой вследствие океанических приливов наблюдается увеличение θ_{max} на 6-й неделе до 14,8 угл. с.

Минимум возмущений

Суммарно при учёте минимума возмущений (гравитационное поле Земли, включая гармоники геопотенциала до 8-го порядка и степени, притяжение Солнца и Луны, радиационные силы) в сравнении с базовым набором положений получим смещение, приведённое в табл. 5.

Таблица 5. Значения D_{max} и θ_{max} в течение указанных интервалов времени при учёте минимума возмущений в сравнении с учётом максимального количества возмущающих факторов

A/m , $\text{м}^2/\text{кг}$	Модель Интервал времени, недели	№ 1			№ 2			№ 3		
		1–2	3–4	5–6	1–2	3–4	5–6	1–2	3–4	5–6
0,01	D_{max} , км	4,866	9,516	40,460	0,026	0,073	0,104	0,002	0,007	0,009
	θ_{max} , угл. мин	9,017	20,721	92,017	0,004	0,012	0,017	0,0002	0,0006	0,0009
1,0	D_{max} , км	4,888	8,096	31,212	0,026	0,072	0,103	0,002	0,007	0,009
	θ_{max} , угл. мин	10,462	16,554	64,443	0,004	0,012	0,017	0,0002	0,0006	0,0009
10,0	D_{max} , км	5,181	5,153	5,543	0,026	0,068	0,095	0,002	0,008	0,013
	θ_{max} , угл. мин	8,940	6,300	6,242	0,004	0,010	0,014	0,0002	0,0008	0,0015
40,0	D_{max} , км	6,321	7,854	8,966	0,024	0,058	0,078	0,002	0,011	0,024
	θ_{max} , угл. мин	6,224	5,969	4,574	0,003	0,007	0,009	0,0003	0,0016	0,0046

A/m , $\text{м}^2/\text{кг}$	Модель	№ 1			№ 2			№ 3		
		1–2	3–4	5–6	1–2	3–4	5–6	1–2	3–4	5–6
70,0	D_{max} , км	6,901	10,074	12,630	0,023	0,052	0,089	0,003	0,008	0,025
	θ_{max} , угл. мин	4,714	4,475	3,688	0,003	0,006	0,012	0,0003	0,0018	0,0113
100,0	D_{max} , км	7,001	10,202	14,699	0,022	0,053	0,113	0,002	0,011	1,065
	θ_{max} , угл. мин	3,734	3,407	3,907	0,003	0,007	0,023	0,0004	0,0045	15,483

Для модели № 1 в течение четырёх недель пространственное отклонение не превышает 10 км, что даёт угловое смещение до 20 угл. мин. Далее смещение увеличивается, особенно при малых ОПМ, происходит это в основном при учёте малого количества гармоник геопотенциала. Для моделей № 2 и 3 в течение пяти недель при всех A/m пространственное смещение менее 90 м, что соответствует смещению положения на небесной сфере менее 1 угл. с.

Поскольку зависимость пространственного расстояния D и соответствующего ему углового расстояния θ от времени носит колебательный характер, максимумы расстояний D_{max} и θ_{max} на более поздних интервалах времени могут быть меньше, чем ранее (см. рис. 1, табл. 5). Также в некоторых случаях наблюдается уменьшение θ_{max} , несмотря на рост D_{max} . Это связано с увеличением расстояния между объектом и подспутниковой точкой.

Исследовано также, насколько влияет учёт меньшего количества возмущающих факторов на изменение элементов орбиты. На рис. 3 (см. с. 137) показана относительная погрешность δe элементов орбиты e_1 , вычисленная с учётом минимума возмущений, относительно элементов орбиты e_0 , полученных с учётом максимального количества возмущающих факторов (базовый набор положений):

$$\delta e = \frac{e_1 - e_0}{e_0} \times 100 \text{ \%}.$$

Графики демонстрируют относительную погрешность менее 1 % во всех случаях. Следовательно, для теоретического изучения влияния радиационных сил на малых интервалах времени достаточно учитывать минимум возмущений, особенно в случае объектов в геостационарной области.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из вышесказанного можно сделать выводы:

- Наибольший эффект на движение объектов с $A/m \geq 1,0 \text{ м}^2/\text{кг}$ выявлен от действия радиационных сил. Малейшие ошибки в моделировании этих эффектов могут привести к значительным ошибкам прогноза положения объектов.
- Быстрая эволюция элементов орбиты объектов с большим отношением площади к массе вследствие эффектов со стороны радиационных сил приводит к зависимости от парусности возмущающих факторов, которые теоретически от неё не зависят.
- На малых интервалах времени в случае геостационарных и геосинхронных объектов можно пренебречь такими возмущающими факторами как сопротивление атмосферы, приливы в теле Земли и океанические приливы, притяжение планет и Плутона, релятивистские эффекты, несферичность лунного потенциала.

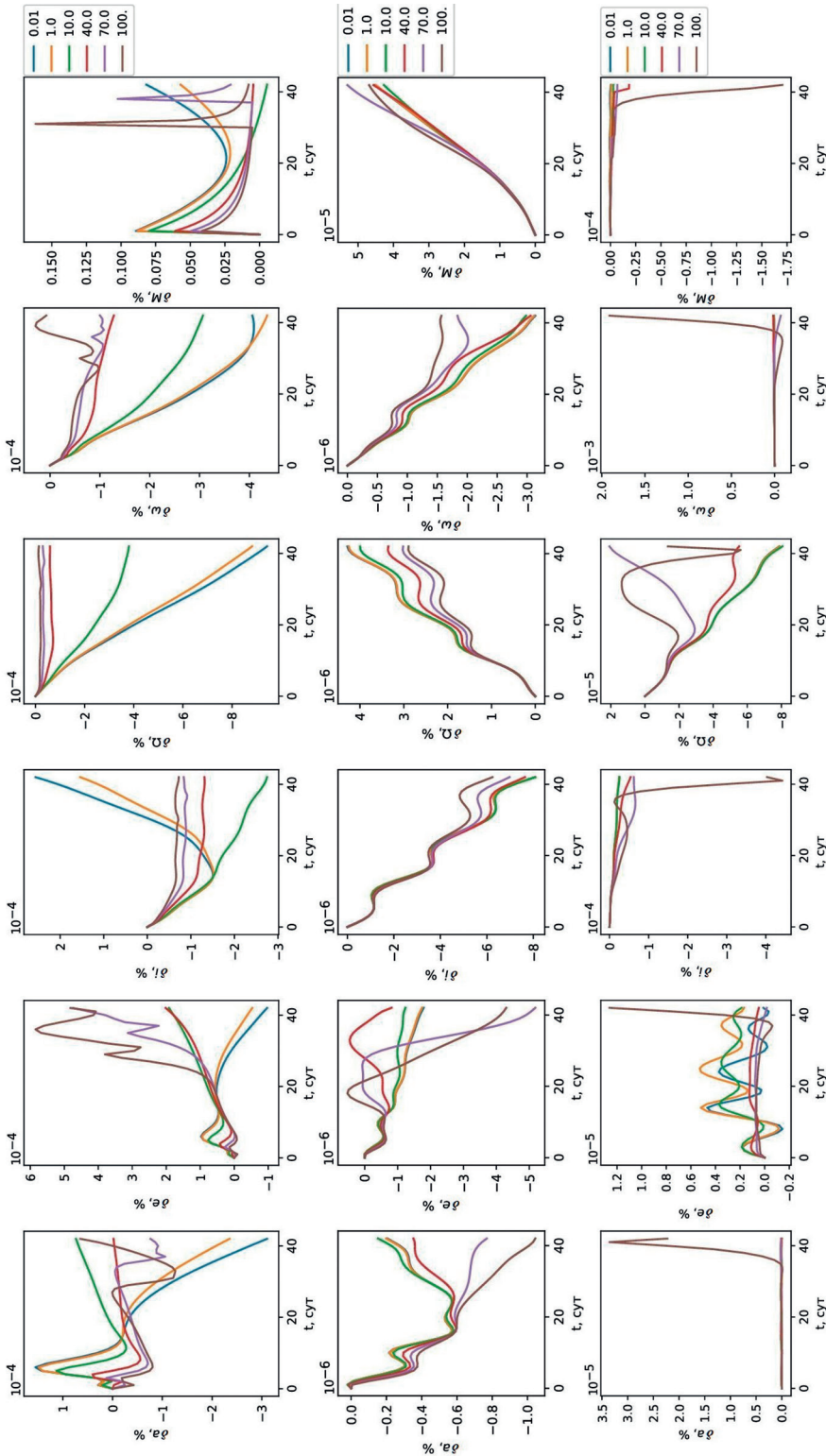


Рис. 3. Относительная погрешность элементов орбиты (слева направо: большая полуось, эксцентриситет, наклон, долгота восходящего узла, аргумент перигея, средняя аномалия) при учёте минимума возмущений для моделей № 1, 2 и 3 (сверху вниз). В легенде справа соответствие цвета линии отношению площади к массе A/m

Также можно учитывать гравитационное поле Земли, включая гармоники геопотенциала только до 8-го порядка и степени.

- В случае высокоэллиптических орбит («Молния») необходимо учитывать большее количество гармоник (не менее 15), а также на интервалах времени более одного месяца приливы в теле Земли и релятивистские эффекты. При большой парусности и наличии сближения с Землёй, что имеет место для орбит с большим эксцентриситетом, необходимо учитывать сопротивление атмосферы.
- Поскольку наблюдается быстрый рост эксцентриситета у объектов с большим отношением площади к массе даже при начальном малом эксцентриситете, то со временем становится актуальным учёт большего количества возмущающих факторов и для них.
- Теоретическое изучение влияния радиационных сил на малых интервалах времени (30–40 дней) можно проводить при учёте минимума возмущений, особенно в случае объектов в геостационарной области.

Автор благодарит И. Н. Чувашова за предоставленный программный комплекс «Численная модель движения систем ИСЗ».

ЛИТЕРАТУРА

Aleksandrova A. G., Bordovitsyna T. V., Chuvashov I. N. Numerical Modeling in Problems of Near-Earth Object Dynamics // Russian Physics J. 2017. V. 60. No. 1. P. 80–89. DOI: 10.1007/s11182-017-1045-3.

ON THE INFLUENCE OF DIFFERENT DISTURBING FACTORS ON THE OBSERVED POSITION OF A SPACE DEBRIS OBJECT

T. N. Sannikova

Crimean astrophysical observatory RAS (CrAO RAS), Nauchny, Russia

The influence of various disturbing factors on the observed position of a space object has been assessed in order to identify factors that can be neglected when predicting the movement of objects over short time intervals, as well as in theoretical modeling of the action of radiation forces. It is found that at time intervals up to 6 weeks in the case of geostationary and geosynchronous orbits, one can neglect such disturbing factors as atmospheric drag, tides in the Earth's body and ocean tides, the attraction of planets and Pluto, relativistic effects, and the nonsphericity of the lunar gravitational potential. It is also possible to take into account the gravitational field of the Earth, including harmonics of the geopotential only up to the 8th order and degree. In the case of the Molniya orbit, it is necessary to include harmonics of the geopotential of at least the 15th order and degree, as well as tides in the Earth's body, relativistic effects and atmospheric drag, into the model of disturbing forces.

Keywords: space debris, area-to-mass ratio, geostationary region, Molniya orbit, Tundra orbit, solar radiation pressure, relativistic effects, nonsphericity of geopotential, nonsphericity of lunar gravitational potential, attraction of planets and Pluto, tides, atmospheric drag

Sannikova Tatiana Nikolaevna — researcher, candidate of physical and mathematical sciences, tnsannikova@crao.crimea.ru

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОРБИТАЛЬНЫХ СИСТЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

Р. С. Сирый, П. С. Баранов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»), Санкт-Петербург, Россия

Цель настоящей работы заключается в формировании вариантов построения орбитальных систем компьютерного зрения при едином методе оценки обнаружения для мониторинга космического мусора (КМ), разработанного ранее авторами. На базе предложенного метода была проведена оценка возможности регистрации КМ запущенными космическими аппаратами. Теоретическая оценка показала малое расхождение с практическими данными, что говорит о корректности метода. Было предложено несколько конфигураций систем на современной компонентной базе, что позволило увеличить количество регистрируемых объектов в кадре более чем в 100 раз по сравнению с системами в запущенных миссиях.

Ключевые слова: система компьютерного зрения, космический мусор, отношение сигнал/шум, обнаружение объекта, космический аппарат

ВВЕДЕНИЕ

С постоянным увеличением активности человека на околоземной орбите растёт количество неуправляемых объектов, называемых космическим мусором (КМ). КМ представляет собой отходы, которые остаются на орбите после запуска космических объектов, таких как спутники, ракеты и другие космические аппараты (КА). Он может иметь различную форму, двигаться с разной скоростью и состоять из разных материалов (Шустов, 2013).

Длительность пребывания искусственных объектов КМ на орбите Земли в зависимости от высоты и отсутствия внешних воздействующих факторов варьируется от нескольких десятков до нескольких миллионов лет. Учитывая ежегодное увеличение космических запусков, создаётся постоянная угроза столкновения, шанс которого также увеличивается (Johnson, 1998).

Для безопасной деятельности на околоземной орбите необходимо осуществлять непрерывный мониторинг космических объектов, который заключается в определении и регулярном (каждые 2–3 дня) обновлении информации о траектории каждого отдельного объекта в базе данных (Rossi, 2005).

На сегодняшний день существует множество систем компьютерного зрения (СКЗ), выполняющих задачу мониторинга КМ, причём наиболее точные по позиционированию объекта представляются оптические системы. Однако все они позиционируются как наземные, что приводит к ряду ограничений.

Вывод таких систем на орбиту Земли позволит обойти данные ограничения. Существует ряд миссий, в рамках которых на орбиту был запущен ряд оптических систем, выполнявших ограниченный мониторинг и доказавших принципиальную возможность регистрации КМ на базе таких систем.

Согласно документу (http://www.inasan.ru/wp-content/uploads/2022/05/Cont_1801_2022.pdf), в 2022 г. в Госкорпорации «Роскосмос» была утверждена концепция создания системы информационно-аналитического обеспечения безопасности космической деятельности в околоземном космическом пространстве «Млечный Путь» на период 2022–2025 гг. и на перспективу до 2035 г.,

Сирый Руслан Сергеевич — ассистент, RuslanSiriy@yandex.ru

Баранов Павел Сергеевич — доцент, кандидат технических наук

которая предусматривает использование современных технологий и развитие новых методов мониторинга, анализа и прогнозирования опасных явлений в космосе, а также унификацию методологического и программного обеспечения для поддержки эффективной работы системы.

Исходя из задач, сформированных в концепции, а также из анализа технической и аналитической базы и возможностей эксплуатируемых на сегодняшний день систем, существует необходимость разработки систем мониторинга, которая обеспечивала бы:

- обнаружение и наблюдение с требуемой периодичностью потенциально опасных объектов КМ естественного и искусственного происхождения;
- обработку информации по всему разнообразию КМ, которые находятся в околоземном космическом пространстве;
- гарантированное поддержание требуемого уровня полноты, достоверности, точности и оперативности обработки информации мониторинга.

В настоящей работе было предложено несколько конфигураций систем на современной компонентной базе, что позволило бы увеличить количество регистрируемых объектов в кадре более чем в 100 раз по сравнению с системами в уже запущенных миссиях.

СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

Система, обеспечивающая мониторинг, позволяет определить позицию, скорость и траекторию движения каждого объекта, а также другие необходимые параметры и характеристики (Koshkin et al., 2018).

Мониторинг состоит из следующих этапов (Медведев, 2008; Зверев, Довгаль, 2010):

- 1) обнаружение КМ в космическом пространстве — для этого используются различные методы, такие как радиоэлектронное и оптическое наблюдение;
- 2) отслеживание движения КМ — после обнаружения необходимо следить за траекторией и скоростью движения КМ, чтобы предсказать его дальнейшее положение и возможность столкновения с другими космическими объектами;
- 3) идентификация КМ — для этого необходимо собрать и проанализировать данные об объекте, такие как его размер, форма, скорость, состав и другие характеристики, чтобы определить, какой именно объект наблюдается;
- 4) принятие мер при возникновении опасности — в зависимости от характеристик объекта и вероятности столкновения с другими космическими объектами могут быть приняты различные меры по предотвращению столкновения.

Системы, которые способны выполнять задачу мониторинга, могут быть как радиоэлектронными, так и оптическими. Они выполняют задачу мониторинга объектов с размерами больше 10 см (Mehrholtz et al., 2002). Все эти системы имеют наземное базирование, что имеет ряд преимуществ, таких как лёгкость в обслуживании, а также возможность установки крупногабаритных систем. Однако из-за ряда ограничений, таких как атмосферные искажения регистрируемого излучения и зависимость от погодных условий, эти системы не могут отслеживать объекты в целевой области интереса. Все эти ограничения можно обойти, выведя телевизионную систему на орбиту.

Орбитальный мониторинг космических объектов имеет несколько преимуществ:

- возможность мониторинга космического пространства в широком диапазоне длин волн и различных спектральных диапазонах;
- постоянное наблюдение за космическим пространством, что позволяет быстро обнаруживать новые объекты и отслеживать их перемещение в реальном времени;
- обнаружение и отслеживание объектов, находящихся на больших расстояниях, например, в геостационарной орбите или на высоких геосинхронных орбитах;
- получение более точных данных о параметрах космических объектов, таких как масса, размер, форма, состав и т. д.;
- контролирование космического мусора и предотвращение возможных столкновений объектов в космическом пространстве;
- сокращение затрат на создание и обслуживание наземных инфраструктурных объектов для мониторинга космических объектов.

На сегодняшний день в силу комплексности решаемой задачи мониторинга, а также многообразия конкретных решений, описываемых в различных работах, имеется необходимость в разработке методов, которые обеспечивали бы максимально возможную оценку качества сбора и обработки информации о фотометрических и траекторных характеристиках потенциально опасных объектов КМ (ОКМ). Кроме того, данный метод послужил бы основой для разработки аппаратно-программной базы таких систем мониторинга.

На сегодняшний день проблема состоит в том, что среди всех описанных решений не существует единой методики оценивания эффективности мониторинга. Более того, использование различных метрик для оценки работы ведёт к тому, что затруднительно провести анализ среди данных работ, а также оценивать комбинацию различных методов, которые рассматривают разные части системы компьютерного зрения.

МЕТОД ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

Предложенный авторами метод оценки эффективности орбитальной системы компьютерного зрения (ОСКЗ) для мониторинга ОКМ схематично изображён на рис. 1 (см. с. 142). Данный метод состоит из двух этапов: формирование данных и обработка данных, в каждом из которых находятся локальные метрики оценки. На первом этапе формирования данных рассчитывается общее количество объектов, которое обнаружила сформированная конфигурация в каждом кадре, а на втором этапе проводится цифровая обработка полученных данных, где локальными метриками выступает вероятность правильного обнаружения, качество сегментации по критерию Дайса, ошибка вычисления оптического центра объектов КМ, а также ошибка вычисленной траектории.

Итоговой метрикой метода оценки эффективности орбитальной системы компьютерного зрения для мониторинга КМ служит общее его количество по критерию размеров от 1 до 10 см в одном кадре изображения.

В настоящей работе предлагается рассмотреть ряд конфигураций, основанных на данных СКЗ, которые ранее запускались в космос в рамках исследовательских миссий и которые проводили мониторинг объектов КМ, а также на основе предложенных авторами конфигураций на базе упомянутых в работах (Сирый, Баранов, 2023; Vaganov et al., 2021; Siryi, Baranov, 2023). Кроме этого предлагается произвести оценку эффективности рассмотренных конфигураций

по метрике общего количества зарегистрированных объектов, а также по доле из общего числа обнаруженных объектов по размерам и углам взаимных скоростей.

Таким образом, в настоящей работе рассматривается только первый этап предложенного метода оценки эффективности: метод формирования изображений.

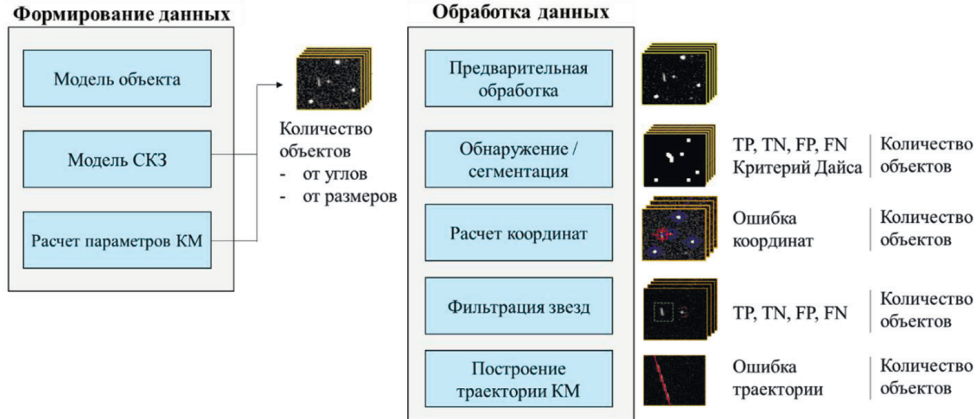


Рис. 1. Схематическое представление метода оценки эффективности

В работе (Сирый, Баранов, 2023) рассмотрена проблема отсутствия единой методики оценки эффективности системы при выполнении задачи мониторинга. Был предложен метод, который позволяет провести расчёт общего количества объектов КМ размерами от 1 до 10 см, регистрируемых во всём объёме пространства, наблюдаемого СКЗ.

Было выведено выражение для отношения сигнал/шум, в котором отражены все факторы, влияющие на эффективность обнаружения. Это параметры, характеризующие среду, обнаруживаемый объект, а также саму СКЗ:

$$SNR = \frac{\int R_{ref}(\lambda) P_s(\lambda) \frac{r_{min}^2}{R^2} \tau_{lens}(\lambda) \frac{\pi}{4} D_{lens}^2 a_0 \frac{R}{v} \cdot \frac{\Delta_{pix}}{F} \cdot \frac{\lambda}{hc} Q_e(\lambda)}{n_{rd}}, \quad (1)$$

где h — постоянная Планка; c — скорость света; R — дистанция до объекта; F — фокусное расстояние линзы; v — относительная скорость объекта; a — коэффициент альbedo; D — диаметр линзы; ρ — коэффициент пропускания объектива; β — средний уровень сигнала в центральном пикселе, Δ — размер пикселя; $P_s(\lambda)$ — спектральная характеристика солнечного излучения; $Q(\lambda)$ — спектральная квантовая эффективность сенсора; n_{rd} — шум считывания фотоприёмника.

При помощи выражения (1) можно анализировать как одну конфигурацию в различных условиях среды и при разных регистрируемых объектах, так и несколько конфигураций системы при одинаковых условиях.

Метод оптимизации оптический параметров показан в работе (Baranov, Siryi, 2023), где осуществляется поиск оптимального угла поля зрения, а уточнение модели взаимной скорости и оценка влияния таких параметров, как пороговое отношение сигнал/шум SNR, коэффициент кружка рассеяния объектива k_{PSF} и времени кадра T_{fr} на количество регистрируемых объектов приводится в работе (Siryi, Baranov, 2023).

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для апробации метода были выбраны две миссии — «Коронас-Ф» и «Коронас-Фотон» — в силу того, что для данных миссий представлена подробная априорная информация о самой системе (Кузин и др., 2012, 2013), а также опубликованы полученные результаты для мониторинга орбитальных объектов.

Кроме упомянутых систем, в эксперименте также рассматривались дополнительные конфигурации ОСКЗ — система из миссии «Сократ» (Панасюк и др., 2019), описанная в работе (Богачёв и др., 2019), которую в дальнейшем обозначим как система «Кубсат-2019», а также две наилучшие из предложенных автором в работе (Baranov et al., 2021) на базе фотоприёмников (ФП) GSENSE400BSI, GSENSE2020BSI и GSENSE4040BSI. Данные конфигурации обозначим как системы «Type-1», «Type-2» и «Type-3» соответственно.

Методика эксперимента представлена на рис. 2, а априорная информация каждой системы представлена в табл. 1.

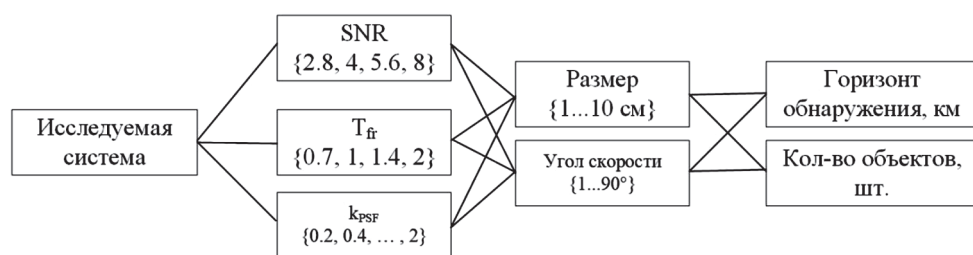


Рис. 2. Методика эксперимента

Для анализа результата каждой итерации рассчитываются горизонты обнаружения и количество объектов КМ. Данные параметры определяются для каждого размера объектов от 1 до 10 см и для каждого угла вектора взаимной скорости КА и КМ от 1 до 90°. В свою очередь, данные итерации рассчитываются для каждого значения параметров SNR, T_{fr} и k_{PSF} . При этом изменяя один параметр, остальные два определяются стандартным значением, представленным в табл. 1.

Таблица 1. Априорная информация о системах, участвующих в расчётах

Система	Высота орбиты, км	Разрешение, пиксель	Размер пикселя, мкм	Шум, e	Квантовый эффект	Оптический формат
«Коронас-Ф»	600	768×288	17×34	30	0,4	MFT
«Коронас-Фотон»		512	13,5	20	0,4	MFT
«Сократ»		4008×2672	90	30	0,4	FF
«Кубсат-2019»		1024	13,5	20	0,4	MFT
«Type-1»		2048	6,5	1,6	0,8	MFT
«Type-2»		2048	11	1.6	0,8	APS-C
«Type-3»		4000×2700	90	2,3	0,8	FF

В табл. 2 представлены объективы, выбранные для расчётов. В данной таблице приведены объективы формата Full Frame, APS и MFT (англ. Micro Four Thirds).

Описанные итерации рассчитываются для каждой пары объектив–ФП с одинаковым оптическим форматом (в том числе с использованием адаптера формата при использовании объектива с большим оптическим форматом по сравнению с ФП).

На рис. 3 (см. с. 146) изображены результаты расчётов для миссий «Коронас-Ф» (слева) и «Коронас-Фотон» (справа). На графиках рис. 3а и б показана доля от общего числа обнаруженных объектов в зависимости от их размера при разных значениях SNR, T_{fi} и k_{PSF} . На графиках рис. 3в и г показана доля от общего числа обнаруженных объектов в зависимости от угла вектора взаимного движения КМ и КА при тех же значениях переменных параметров. На графиках рис. 3д изображена зависимость общего числа обнаруженных объектов в зависимости от угла поля зрения системы.

Таблица 2. Объективы, участвующие в расчётах

Оптимальный формат	Объектив	Фокусное расстояние, мм	Диаметр входного зрачка, мм	Апертура
FF	Canon RF 600mm f/11 IS STM	600	50,5	11
	Tokina SZX 400mm F8	400	50	8
	Canon EF 200mm f/2.8L II USM	200	70	2,8
	Canon EF 135mm f/2L USM	135	60	2
	Canon EF 85mm f/1.4L IS USM	85	60	1,4
	Mitakon Speedmaster 50mm f/0.95 (Leica M)	50	50,5	0,95
	Argus 45mm f/0.95 FF	45	50	0,95
	Laowa Argus 35mm f/0.95 FF	35	30	0,95
	21 mm/1:1.4 Nokton E	21	10,5	1,4
	Canon RF 16mm f/2.8 STM	16	5,5	2,8
	Canon EF 14mm f/2.8L II USM	14	5	2,8
	10 mm/1:5,6 Hyper Wide Heliar E	10	1,5	5,6
MFT	M.ZUIKO DIGITAL ED 300mm F4.0 IS	300	75	4
	LEICA DG ELMARIT 200mm F2.8	200	71	2,8
	Samyang 135mm f/2 ED UMC Micro 4/3	135	60	2
	Samyang 85mm f/1.4 AS IF 4/3	85	60,5	1,4
	60mm / 1:0.95 Nokton MFT	60	63	0,95
	42,5 mm/1:0,95 Nokton MFT	42,5	44,5	0,95
	7artisans Photoelectric 35mm f/0.95	35	36,5	0,95
	SUPER NOKTON 29mm F0.8 Aspherical	29	36	0,8
	25 mm / 1:0,95 Nokton II MFT	25	26	0,95
	Laowa Argus 18mm f/0.95 MFT APO	18	19	0,95
	17,5 mm/1:0,95 Nokton MFT	17,5	18	0,95
	Mitakon Speedmaster 17mm f/0.95	17	17,9	0,95
	10,5 mm/1:0,95 Nokton MFT	10,5	11	0,95
	Laowa 7.5mm f/2 MFT	7,5	3,5	2

Оптический формат	Объектив	Фокусное расстояние, мм	Диаметр входного зрачка, мм	Апертура
APS-C	Sony SAL-500F80	500	60	8
	Minolta V 400mm f/8 Reflex	400	50	8
	Canon EF 135mm f/2L USM	135	67	2
	FE 90 мм F2.8 Macro OSS	90	45	2
	Fujinon XF 56mm F1.2 R	56	46	1,2
	50 мм F0.95 для Sony E	50	52	0,95
	Laowa Argus 33mm f/0.95 CF APO	33	34	0,95
	TTArtisan 23mm F1.4 Sony E	23	19	1,2
	TTArtisan 17 mm f1.4 Sony E	18	12	1,4
	Sigma AF 16mm f/1.4 DC DN	16	11	1,4
	Canon EF 14mm f/2.8L II USM	14	5	2,8
Laowa 9mm f/2.8 Zero-D Sony E	9	3	2,8	

Синий график на рис. 3д относится к объективам с тем же оптическим форматом, что и сенсор, жёлтый — к объективам с большим оптическим форматом с использованием адаптера формата.

По парам графиков рис. 3а и б, а также рис. 3в и г видно, что изменения параметров SNR, T_{fr} и k_{PSF} в заявленном диапазоне значений критически не влияют на распределение зарегистрированных объектов для систем «Коронас-Ф», «Коронас-Фотон» и «Кубсат-2019» при их стандартном объективе по размерам и по взаимному углу скорости КА и КМ.

Таким образом, для других конфигураций будут представлены только графики рис. 3а, в и д.

На рис. 4–6 (см. с. 147, 148, 149) показаны результаты расчётов для пар систем «Сократ», «Кубсат-2019», «Туре-1», «Туре-2» и «Туре-3» соответственно.

Анализируя графики рис. 3–6, можно сделать ряд выводов:

- 95% всех зарегистрированных объектов для систем «Коронас-Ф», «Коронас-Фотон» и «Кубсат-2019» при их стандартном объективе имеют взаимный угол скорости в диапазоне от 0 до 18° (практически соосное движение).

Применение адаптера формата на всех исследуемых системах при использовании наилучшего угла поля зрения увеличивает количество регистрируемых объектов в 3,2 и 2,8 раз (в зависимости от коэффициента преобразования конвертора) по сравнению со стандартным объективом.

Таким образом, изменив только один компонент системы в виде объектива, можно увеличить эффективность, выражаемую в количестве регистрируемых объектов:

- общее количество зарегистрированных объектов для предложенных конфигураций «Туре-1», «Туре-2» и «Туре-3» больше, чем в реально запущенных миссиях, примерно в 10 000 раз при использовании наилучшей пары объектив — ФП;
- такое колоссальное увеличение связано с тем, объём регистрируемого пространства системы экспоненциально увеличивается при увеличении горизонта обнаружения.

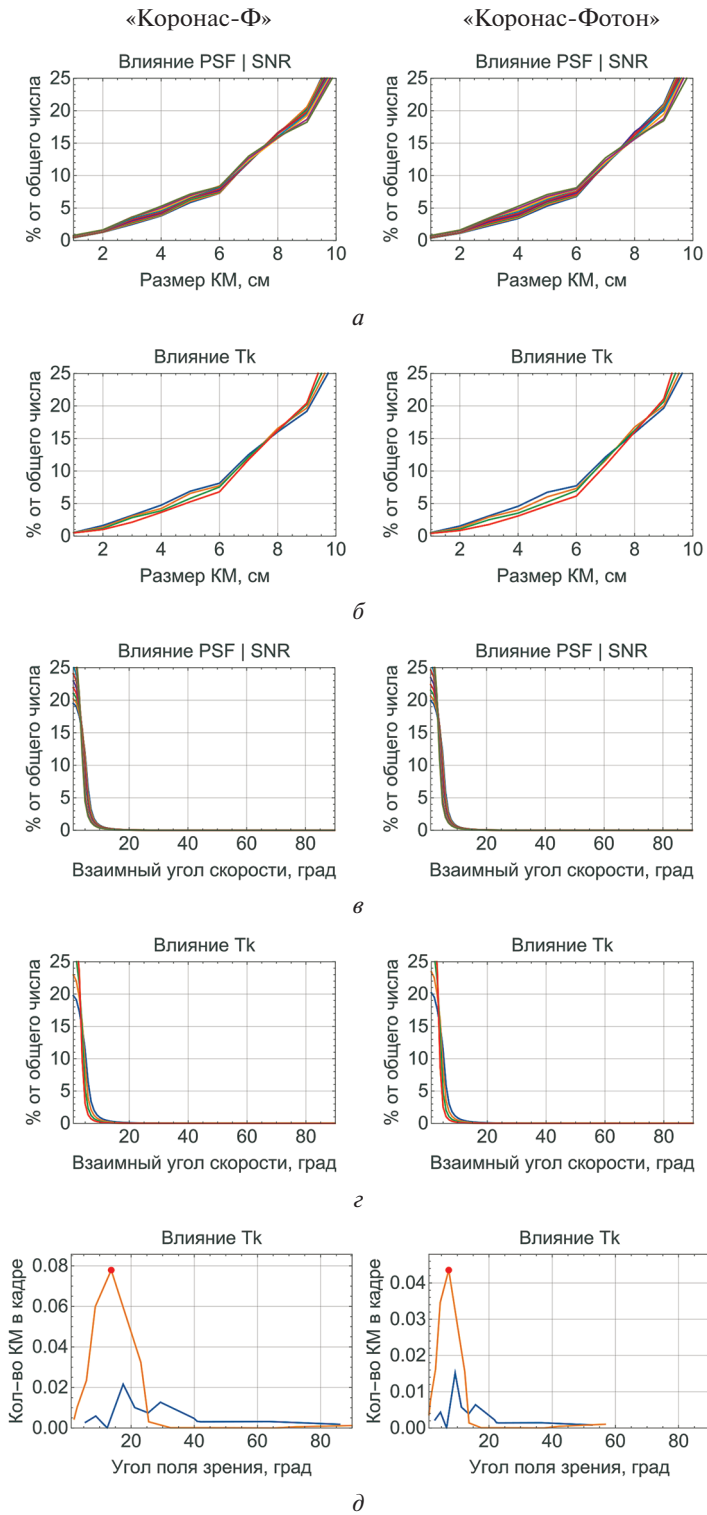


Рис. 3. Результаты вычислений для пар систем «Коронас-Ф» и «Коронас-Фотон»

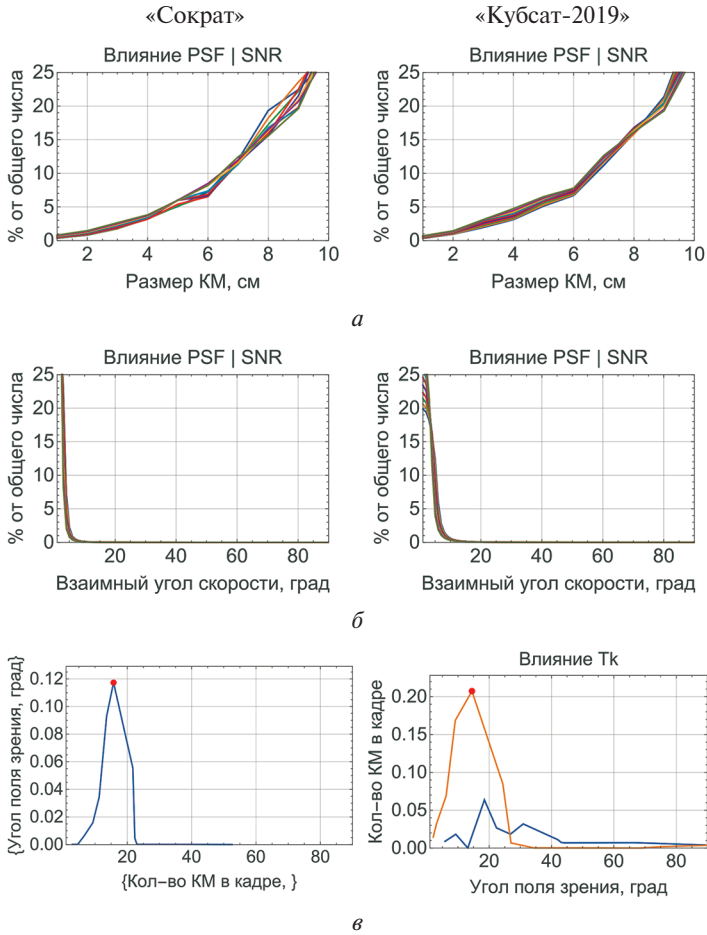


Рис. 4. Результаты вычислений для пар систем «Сократ» «Кубсат-2019»

Для предложенных автором конфигураций «Туре-1», «Туре-2» и «Туре-3» горизонты обнаружения в десятки раз больше для каждого размера объектов КМ, по сравнению с запущенными миссиями;

- на графиках рис. 5а и 6а можно заметить, что доля объектов с размерами менее 5 см составляет около 50 % от общего числа обнаруженных;
- аналогичный вывод можно сделать из графиков рис. 5б и 6б: для данных конфигураций доля объектов с углом более 10° на 40 % больше, чем у показателей реально запущенных миссий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в данной работе можно сделать следующие выводы:

- Разработан метод определения оптимальных значений основных параметров орбитальной системы компьютерного зрения при заданных ограничениях по критерию общего количества КМ размерами от 1 до 10 см в одном кадре изображения, который учитывает взаимную модель движения КА и КМ в пространстве, пространственное распределение КМ,

- Предложены конфигурации орбитальной системы компьютерного зрения на основе более современной компонентной базы (фотоприёмники GSENSE с шумом считывания менее $2,5\epsilon$ и квантовой эффективностью более 70 %), для которых количество обнаруживаемых объектов в 10 000 раз больше по сравнению конфигурациями миссий «Коронас-Ф» и «Коронас-Фотон». При этом доля объектов с размерами <3 см увеличивается с 6 до 18 %.
- Определено, что доля одинопиксельных смазов среди всех зарегистрированных объектов составляет от 70 до 95 % в зависимости от аппаратной конфигурации, что существенно влияет на требования, предъявляемые к алгоритмам обработки изображений КМ.

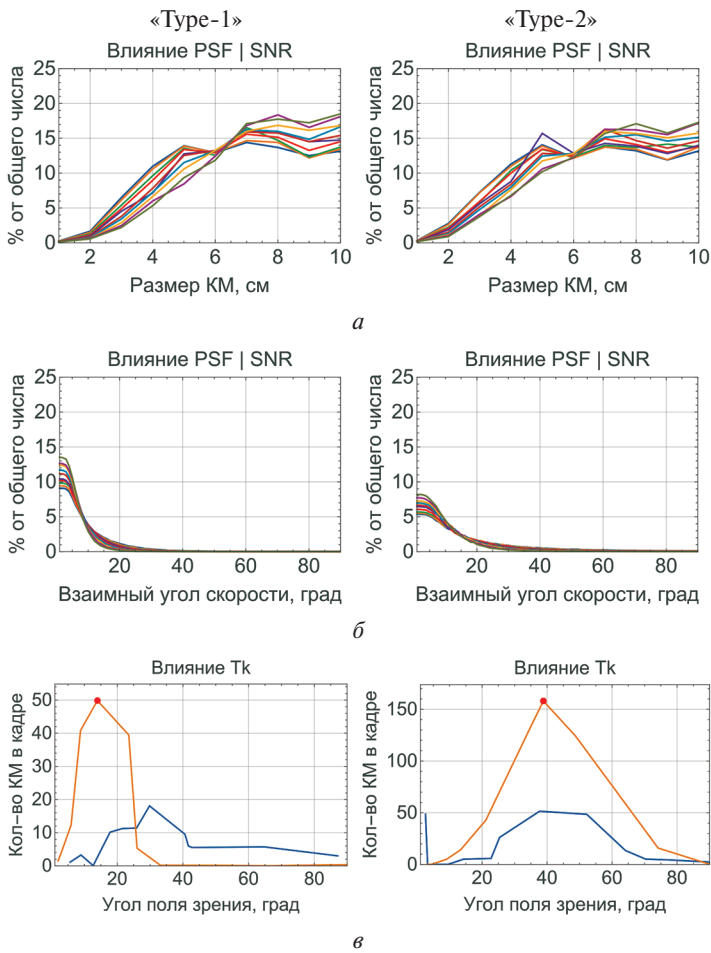


Рис. 5. Результаты вычислений для пары «Type-1» и «Type-2»

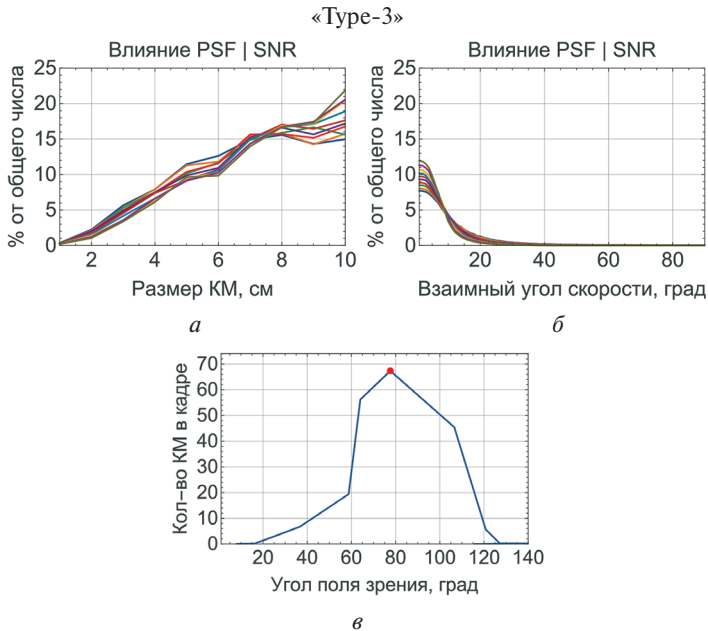


Рис. 6. Результаты вычислений для «Туре-3»

ЛИТЕРАТУРА

- Богачёв С. А., Ерхова Н. Ф., Ульянов А. С., Холодилов А. А., Перцов А. А., Кузин С. В. Возможности по регистрации космического мусора оптическими камерами, размещаемыми на спутниках типа кубсат // Космический мусор: фундаментальные и практические аспекты угрозы. М.: ИКИ РАН, 2019. С. 63–69.
- Зверев П. С., Довгаль В. М. Метод и алгоритм распознавания искусственных околоземных орбитальных объектов и «мусора» для обеспечения безопасности космических полетов // Вестн. Воронежского гос. техн. ун-та. Воронеж, 2010. № 4. С. 105–109.
- Кузин С. В., Ульянов А. С., Шестов С. В., Богачёв С. А., Карабаджак Г. Ф. Наблюдение космических объектов с помощью оптических датчиков в экспериментах СПИРИТ/Коронас-Ф и ТЕСИС/«Коронас-Фотон» // 3-я Всероссийская научно-техн. конф. «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов 2013». М.: ИКИ РАН, 2013. С. 58–68.
- Кузин С. В., Шестов С. В., Богачев С. А., Перцов А. А., Ульянов А. С., Рева А. А. Регистрация и обработка изображений в эксперименте ТЕСИС на спутнике «Коронас-Фотон» // Результаты косм. эксперимента «Коронас-Фотон»: Предложения по продолжению программы «КОРОНАС»: Научные задачи и аппаратура. М.: ИКИ РАН, 2012. С. 61–74.
- Медведев А. А. Особенности жизненного цикла наукоемкой космической техники // Российская энцикл. CALS. Авиационно-космическое машиностроение / гл. ред. Братухин А. Г. М.: ОАО «НИЦ АСК», 2008. С. 91–106.
- Панасюк М. И., Лиунов В. М., Свертилов С. И., Горбовской Е. С., Корнилов В. Г., Петров В. Л., Чазов В. В., Яшин И. В. Мониторинг космического мусора в околоземном пространстве: опыт миссии «Ломоносов» и проект «Универсат-СОКРАТ» // Космический мусор: фундаментальные и практические аспекты угрозы. М.: ИКИ РАН, 2019. С. 103–109.

- Сирый Р. С., Баранов П. С. Метод оценки эффективности орбитальных систем мониторинга космического мусора // Вопросы Радиоэлектроники. Сер.: Техника телевидения. 2023. С. 111–120.
- Шустов Б. М., Рыхлова Л. В. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра М.: Физматлит, 2013. 384 с.
- Baranov P. S., Siryi R. S. A Method for Optimizing the Optical Parameters of an Orbital Computer Vision System to Increase the Efficiency of Space Debris Monitoring // IEEE Conf. Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). 2023 (in print).
- Baranov P. S., Siryi R. S., Sahnyuk A. S. A wide-field optical system for detecting space debris based on a cubesat-type spacecraft // IEEE Conf. Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). 2021. P. 94–97. DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396409.
- Johnson N. L. Monitoring and controlling debris in space // Scientific American. 1998. V. 279. No. 2. P. 62–67. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0898-62>.
- Koshkin N., Shakun L., Korobeinikova E. et al. Monitoring of space debris rotation based on photometry // Odessa Astronomical Publications. 2018. V. 31. P. 179–185. DOI: 10.18524/1810-4215.2018.31.147807.
- Mehrholz D., Leushacke F. W., Jehn R., Klinkrad H., Landgraf M.. Detecting, tracking and imaging space debris // ESA Bulletin. 2002. No. 109. P. 128–134.
- Rossi A. The earth orbiting space debris // Serbian Astronomical J. 2005. V. 170. P. 1–12. <https://doi.org/10.2298/SAJ0570001R>.
- Siryi R. S., Baranov P. S. Method for Improving the Accuracy of the Theoretical Evaluation of the Effectiveness of Space Debris Monitoring by an Orbital Television System // 25th Intern. Conf. Digital Signal Processing and its Applications (DSPA). 2023. P. 1–5. DOI: 10.1109/DSPA57594.2023.10113391.

POSSIBILITIES OF USING ORBITAL COMPUTER VISION SYSTEMS FOR SPACE DEBRIS MONITORING

R. S. Siryi, P. S. Baranov

Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI” (SPb ETU “LETI”), Saint Petersburg, Russia

The purpose of this work is to form options for constructing orbital EMSs with a unified method for assessing detection for monitoring SD, developed earlier by the authors. On the basis of the proposed method, an assessment was made of the possibility of registering CM by launched spacecraft. The theoretical assessment showed a small discrepancy with practical data, which indicates the correctness of the method. In this work, several configurations of systems based on a modern component base were proposed, which made it possible to increase the number of registered objects in the frame by more than 100 times compared to systems in launched missions.

Keywords: Computer vision system, space debris, signal-to-noise ratio, object detection, spacecraft

Siryi Ruslan Sergeevich — assistant professor, RuslanSiryi@yandex.ru

Baranov Pavel Sergeevich — associate professor, candidate of engineering sciences

РАССМОТРЕНИЕ ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА КАК ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА ДЛЯ ЛУННЫХ МИССИЙ НА ОСНОВЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ

А. В. Уварова

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

Лаборатория геохимии Луны и планет ГЕОХИ РАН предлагает рассмотреть полуостров Камчатка как возможный природный полигон для отработки лунных миссий. Выбор был сделан в пользу этого региона, так как он богат вулканическим пеплом, который не подвергся выветриванию и имеет преимущественно основной состав. Подтверждение такого полигона требует всестороннего изучения территории. Однако основная цель данного исследования — сопоставление физических и механических свойств нескольких видов пеплов с вулканов Толбачик, Горелый и Мутновский, а также пляжа Халактырский и сравнение их с лунным реголитом. Для этой цели были проведены испытания на одноплоскостной срез и трёхосное сжатие при рыхлом и плотном сложении. Результаты исследования показали, что образцы с вулканов Горелый и Толбачик могут быть использованы для имитации верхнего слоя лунного грунта с минимальной плотностью. Образцы с вулкана Толбачик и Халактырского пляжа имеют слишком крупнозернистый состав. Измельчённый пепел с вулкана Толбачик обладает физико-механическими свойствами наиболее близкими к лунному реголиту.

Ключевые слова: лунный реголит, грунт-аналог, механические свойства, научный полигон

ВВЕДЕНИЕ

Оценка работоспособности космических аппаратов, созданных для исследования планет и спутников, проводится в том числе и на специальных площадках, имитирующих предполагаемые условия ландшафта. В настоящее время грунты-аналоги используются для российских миссий в крытых ангарах. Тем не менее, по мере увеличения объёмов и сложности изготовления грунтов-аналогов создание площадок большого размера может стать экономически нецелесообразным. Многие страны используют естественные полигоны для испытаний космического оборудования и самоходных аппаратов, которые напоминают ландшафт Луны или Марса. Раньше в Советском Союзе были такие полигоны, где испытывали советские луноходы, но сейчас такого полигона в России нет.

МЕТОДЫ

Основные физические и механические свойства были определены стандартизированными методами. Плотность в рыхлом сложении определяли методом свободного насыпания в ёмкость известного объёма, а плотность в плотном сложении методом послыонного трамбования. Прочностные характеристики, угол внутреннего трения φ и сцепление c , определяли одноплоскостным срезом. Нормальное напряжение задавалось в зависимости от плотности образцов в пределах от 10 до 50 кПа для рыхлых и от 50 до 200 кПа для плотных образцов. Касательная нагрузка определялась как максимальное напряжение, при котором разрушался образец. Скорость разрушения составляла 2 мм/мин.

Уварова Александра Владимировна — младший научный сотрудник, uvarova@geokhi.ru

Модуль деформации E и коэффициент Пуассона ν определяли с помощью трёхосного сжатия со скоростью приложения нагрузки 0,15 мм/мин. Начальное всестороннее давление задавали 0,1 МПа.

ОПИСАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛУННОГО РЕГОЛИТА

По гранулометрическим характеристикам типичный лунный реголит морских районов 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 (Sluyta, 2014). Большинство же образцов лунного реголита материковых районов 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 (Sluyta, 2014). Естественная плотность лунного реголита на поверхности до глубины 15 см согласно данным с миссий КА «Луна-16», «Луна-20», изменяется от 1,12 до 1,7 г/см³ со средним значением около 1,5 г/см³. Среднее значение плотности реголита на поверхности, согласно данным с миссий Аполлонов, также 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 (Carrier, 1973; Carrier et al., 1991). Плотность твёрдых частиц агглютинатов и частиц реголита из стекла изменяется в пределах от 1,0 до >3,32 г/см³, плотность частиц минералов и пород, как правило, не превышает 3,32 г/см³, а плотность брекчиевых частиц реголита изменяется в узком диапазоне от 2,9 до 3,1 г/см³ (Sluyta, 2014). В качестве рекомендуемого среднего значения удельной плотности лунного реголита обычно принимается 3,01 г/см³.

Оценка учёными (Mitchell et al., 1972) устойчивости скважин от осыпания миссий «Аполлон-16» и «Аполлон-17» показала, что удельное сцепление в местах посадок равно 1,1–1,8 кПа и угол внутреннего трения равен 46,5°. «Луноходом-2» в кратере Лемонье у восточного побережья Моря Ясности также были измерены параметры: удельное сцепление — 0,40 кПа, угол внутреннего трения — 40° (Sluyta, 2014). Экспериментальные исследования лунного грунта, доставленного с мест посадок пилотируемых экспедиций, также показали сильную зависимость сцепления и угла внутреннего трения от плотности грунта и, соответственно, от глубины залегания. При изменении плотности с 0,99 до 1,87 г/см³ сцепление изменялось в пределах 0,3–3,0 кПа и угол внутреннего трения — 13–56° (Sluyta, 2014).

Модуль общей деформации также оценивали на привезённых образцах. Рыхлые образцы, которые соответствуют верхнему слою реголита до глубины 15 см, даже при небольшой нагрузке сильно деформируются и имеют малый модуль деформации: около 24 кПа. Более плотные образцы, соответствующие реголиту с глубины 30 см и далее, имеют модуль деформации значительно больше: около 420 кПа. Коэффициент Пуассона при исследованиях был рассчитан через коэффициент бокового расширения, он составил 0,2 д.е. (Леонович и др., 1975).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Всего было рассмотрено пять образцов: Горелый (нижняя часть склона), Горелый (1390 м) (верхняя часть склона), Характырский пляж, Мутновский, Толбачик. Образцы камчатского пепла представляли собой песчаные грунты

с примесью пыли и грубозернистой фракции в разных соотношениях, что близко по описанию к лунным породам. Тефра с вулкана Толбачик была слишком грубозернистой, её предварительно измельчили. Ближе всего по гранулометрическому составу к лунному реголиту пепел с верхней части вулкана Горелый и измельчённый пепел Толбачика (Agar'kin, 2022). Образцы имели разный диапазон плотности и, следовательно, прочностные характеристики, как демонстрирует таблица.

Физические и механические свойства пеплов Камчатки

Грунт	Мутновский	Горелый (1390 м)	Горелый (подножье)	Толбачик (<0,1 мм)	Халактырский пляж	Лунный реголит
ρ , г/см ³	1,34–1,65	1,27–1,57	1,36–1,66	1,18–1,54	1,68–1,87	1,30–1,90
ρ_s^* , г/см ³	2,72	2,60	2,72	2,94	3,00	3,01
ϕ , град	43,7–50,8	33,8–36,1	34,8–33,1	10–34,5	29,9–40,3	46,5–25,0
c , кПа	3,1–18,1	1,7–12,8	3,9–16,9	11,9–23,6	4,2–14,6	0–1,8
E , МПа	14,6–23,4	12,1–49,7	10,9–36,9	4,2–21,5	31,9–52,7	$(13–420) \cdot 10^{-3}$
ν , д.е.	0,12–0,19	0,11–0,21	0,19–0,15	0,15–0,09	0,23–0,31	0,20

* Данные взяты из работы (Agar'kin, 2022).

Диапазон плотности у всех образцов не соответствует полностью лунному, они близки по свойствам к приповерхностному слою лунного реголита. Плотность твёрдых частиц ближе всего к средней плотности частиц лунного грунта у пробы измельчённого пепла Толбачика и Халактырского пляжа. Кривые гранулометрического состава также ближе всего у измельчённого Толбачика и образцов со склона Горелого (Agar'kin, 2022).

Механические свойства пеплов несколько отличаются. Все образцы имеют угол внутреннего трения, сопоставимый с лунным грунтом, однако удельное сцепление у всех образцов намного превышает сцепление реголита при плотном сложении.

Модуль деформации пеплов намного выше характерных значений лунного реголита. Подобная разница может быть связана с условиями эксперимента, пробы пеплов были испытаны со значительно большим размером образцов, чем лунный реголит, и большим диапазоном нагрузок. Сами значения механических свойств пеплов коррелируют с прошлыми исследованиями свойств пеплов (Гирина, 1998).

ВЫВОДЫ

На данном этапе исследований результаты показывают, что пеплы с вулканов могут быть использованы для отработки приземления посадочных аппаратов, что было реализовано ранее для луноходов. Верхняя часть вулкана Горелый и вулкан Толбачик лучше всего подходят для данных целей по физическим и механическим свойствам. Однако проба с вулкана Толбачик слишком крупная. Требуются дальнейшие исследования этого вулкана с целью поиска подходящей площадки с более мелкозернистым грунтом.

ЛИТЕРАТУРА

- Гирина О. А. Пирокластические отложения современных извержений андезитовых вулканов Камчатки и их инженерно-геологические особенности / Ин-т вулкан. геологии и геохимии ДВО РАН. Владивосток: Дальнаука. 1998. 174 с.
- Леонович А. К., Громов В. В., Дмитриев А. Д., Пенетригов В. Н., Семенов П. С., Шварев В. В. Основные особенности процессов деформации и разрушения лунного грунта // Космохимия Луны и планет / ред. Виноградов А. П. М.: Наука. 1975. С. 585–592.
- Agapkin I. A. Comparison of grain size composition of Kamchatka volcanic ashes with Lunar regolith // 53rd Lunar and Planetary Science Conf. Houston, USA. 2022. Abst. No. 1992.
- Carrier W. D. Lunar soil grain size distribution // The Moon. 1973. V. 6. P. 250–263.
- Carrier W. D. III, Olhoeft G. R., Mendell W. Physical properties of the lunar surface // Lunar Sourcebook: a user's guide to the Moon / eds. Heiken G. Vaniman D., French B. M. Cambridge: Cambridge Univ. Press. 1991. Ch. 9. 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 Science Conf. 1972. 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. <https://doi.org/10.1134/S0038094614050050>.

CONSIDERATION OF THE KAMCHATKA PENINSULA AS A TEST SITE FOR LUNAR MISSIONS BASED ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF SOILS

A. V. Uvarova

Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, Moscow, Russia

The Laboratory of Geochemistry of the Moon and Planets proposes to consider the Kamchatka Peninsula as a possible natural test site for large-scale field experiments of lunar missions. The choice was made in favor of this region, as it is rich in volcanic ash, which has not been weathered and has a predominantly basalt composition. Confirmation of such a test site requires a comprehensive study of the territory. However, the main goal of this study is to compare the physical and mechanical properties of several types of ash from the Tolbachik, Gorely, and Mutnovsky volcanoes, as well as Khalaktyrsky beach, and compare them with lunar regolith. For this purpose, tests were carried out for strength shear test and triaxial compression with loose and compact state. The results of the study showed that samples from Gorely and Tolbachik volcanoes can be used to simulate the upper layer of the lunar soil with a minimum density. Samples from the Tolbachik volcano and Khalaktyrsky beach are too coarse-grained. Crushed ash from the Tolbachik volcano has physical and mechanical properties that are closest to those of the lunar regolith.

Keywords: lunar regolith, soil-analogue, mechanical properties, scientific test site

Uvarova Alexandra Vladimirovna — junior researcher, uvarova@geokhi.ru

О ДЕФОРМАЦИИ ФАЗОВОГО СПЕКТРА СВЕРХКОРОТКИХ РАДИОИМПУЛЬСОВ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ПО МЕЖПЛАНЕТНОЙ ТРАССЕ

Ю. С. Худышев

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН (ФИРЭ РАН), Фрязино, Россия

Приведены результаты анализа характера и особенностей искажений фазового спектра сверхкоротких радиоимпульсов с различными начальными характеристиками при распространении по межпланетной трассе. Показано, что в бесстолкновительной межпланетной плазме деформация радиоимпульсов с возрастанием интегральной электронной концентрации трассы (ТЕС) обусловлена только изменением их фазового спектра под воздействием среды, проявляющимся в возникновении фазового набега частотных гармоник, формирующих импульс, при неизменном амплитудном спектре из-за отсутствия поглощения в среде. Также показано, что при достаточно больших величинах ТЕС фазовые спектры импульсов трансформируются к виду кривой с отрицательным частотным градиентом, для рассмотренных импульсов варьирующей незначительно. С использованием полученных значений набега фазы проведён расчёт напряжённости поля импульсов при различных ТЕС с применением обратного преобразования Фурье. Результаты сопоставлены с аналогичными данными, полученными во временной области.

Ключевые слова: сверхкороткий радиоимпульс, фазовый спектр, фазовый набег, дисперсионные искажения, межпланетная плазма

ВВЕДЕНИЕ

При распространении в межпланетной плазме электромагнитные импульсы претерпевают дисперсионные искажения, уровень и особенности которых определяются их начальными характеристиками и протяжённостью трассы. Влияние среды может приводить к значительным различиям временного хода напряжённости поля излучаемого импульса и напряжённости поля, регистрируемой на приёмном конце трассы.

Ранее в публикациях по распространению радиоимпульсов в межпланетной плазме (см, напр. (Худышев, 2021, 2022)) рассматривался только амплитудный спектр деформированных импульсов, однако фазовый спектр, наряду с амплитудным, относится к составляющим комплексного спектра и также представляет интерес для анализа. В бесстолкновительной межпланетной плазме искажения импульса полностью обусловлены изменением его фазового спектра, поэтому возникла необходимость анализа характера и особенностей его искажений для различных изучаемых импульсов.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧАЕМЫХ ИМПУЛЬСОВ

Рассмотрим радиоимпульсы трёх видов: синусоидальный импульс E_1

$$E_1(0;t) = E_{01} \sin(\omega't); \quad (1)$$

импульс с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) E_2

$$E_2(0;t) = E_{02} \sin\left(\omega't + \Delta\omega\left(t^2 - tt_n\right)/t_n\right) \quad (2)$$

и хаотический импульс, описываемый дифференциальным уравнением зашумлённого квазигармонического осциллятора Ван-дер-Поля E_3 (Анищенко, Вадивасова, 2011)

Худышев Юрий Сергеевич — младший научный сотрудник, xantaresx@yandex.ru

$$\ddot{E}_3 + (\omega')^2 E_3 = (\omega')(\varepsilon - E_3^2) \dot{E}_3 + (\omega')^2 \sqrt{2D} \cdot \xi(t). \quad (3)$$

Здесь t — время; $t_{\text{и}}$ — длительность импульса; $\omega' = 2\pi f'$, $\Delta\omega = 2\pi\Delta f$, f' — несущая частота; Δf — максимальное отклонение от несущей (девиация частоты); E_{01} и E_{02} — «высота» синусоидального импульса и импульса с линейной частотной модуляцией соответственно; $\xi(t/t_{\text{и}})$ — нормированный гауссовский белый шум; D — интенсивность гауссовского белого шума; ε — параметр, характеризующий уровень квазигармоничности колебаний.

На рис. 1 приведены примеры временного изменения напряжённости поля $E(0; t)$, амплитудные и фазовые спектры излучаемых импульсов равной энергии $E_{\text{и}}$.

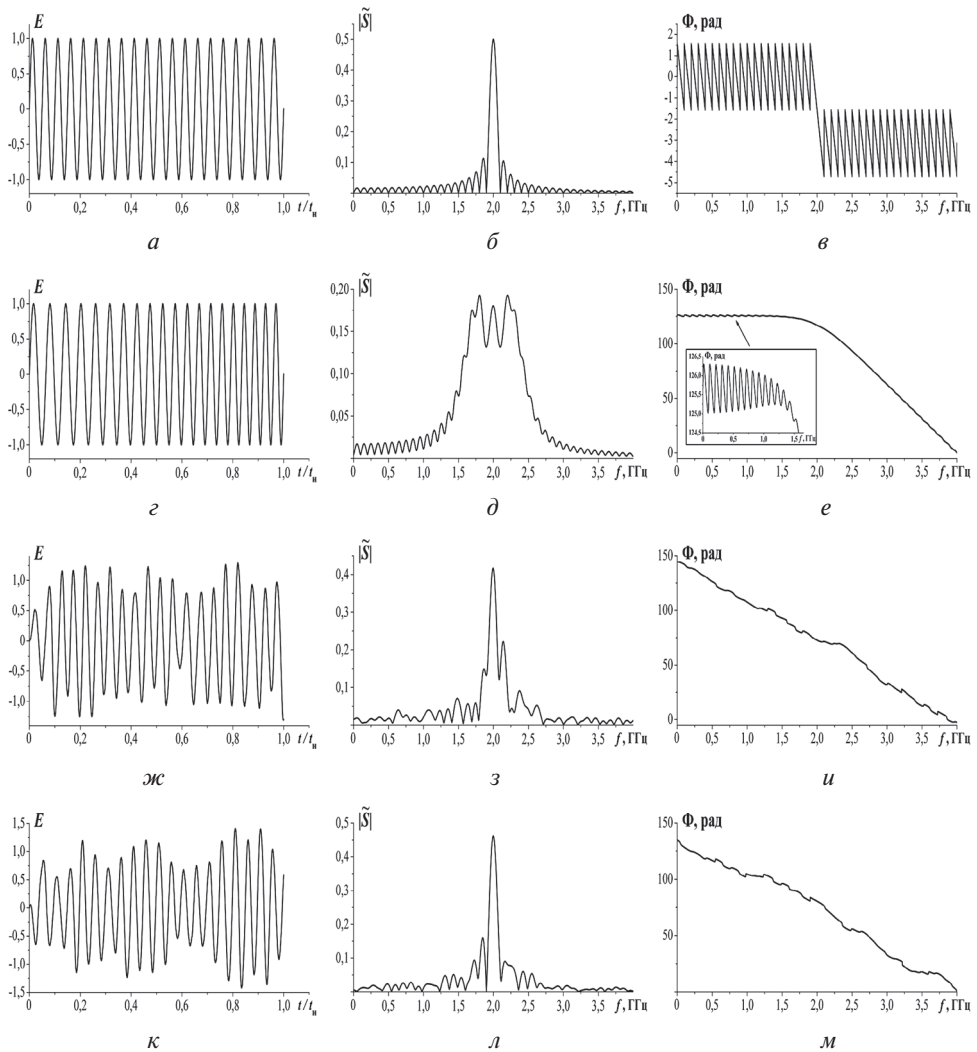


Рис. 1. Напряжённость поля (*а, г, ж, к*), амплитудный спектр (*б, д, з, л*) и фазовый спектр (*в, е, и, м*) синусоидального (*а–в*); ЛЧМ (*г–е*) и хаотических (реализация 1 (*ж–и*) и реализация 2 (*к–м*)) радиоимпульсов при $f' = 2$ ГГц, $t_{\text{и}} = 10$ нс, $\Delta f = 500$ МГц, $D = 0,5$, $\varepsilon = 0,1$, $E_{\text{и}} = 0,5$

РАСЧЁТ ФАЗОВОГО СПЕКТРА ИМПУЛЬСА

Рассмотрим основные моменты методики расчёта фазовых спектров как излучаемых, так и деформированных импульсов. Для этого используем представление о тригонометрической окружности и четырёх квадрантах плоскости (рис. 2). Значения фазы вычисляются по действительной и мнимой частям комплексного спектра и приведены для каждого из квадрантов на n -м шаге по частоте f в пределах одного круга от 0 до 2π .

$$\text{I: } \operatorname{Re} \tilde{S}(f_n) > 0, \operatorname{Im} \tilde{S}(f_n) > 0; \Phi_n = \operatorname{arctg} \left(\frac{\operatorname{Im} \tilde{S}(f_n)}{\operatorname{Re} \tilde{S}(f_n)} \right),$$

$$\text{II: } \operatorname{Re} \tilde{S}(f_n) < 0, \operatorname{Im} \tilde{S}(f_n) > 0; \Phi_n = \pi - \operatorname{arctg} \left(\left| \frac{\operatorname{Im} \tilde{S}(f_n)}{\operatorname{Re} \tilde{S}(f_n)} \right| \right),$$

$$\text{III: } \operatorname{Re} \tilde{S}(f_n) < 0, \operatorname{Im} \tilde{S}(f_n) < 0; \Phi_n = \pi + \operatorname{arctg} \left(\frac{\operatorname{Im} \tilde{S}(f_n)}{\operatorname{Re} \tilde{S}(f_n)} \right),$$

$$\text{IV: } \operatorname{Re} \tilde{S}(f_n) > 0, \operatorname{Im} \tilde{S}(f_n) < 0; \Phi_n = 2\pi - \operatorname{arctg} \left(\left| \frac{\operatorname{Im} \tilde{S}(f_n)}{\operatorname{Re} \tilde{S}(f_n)} \right| \right).$$

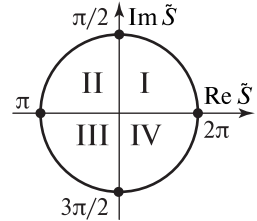


Рис. 2. Тригонометрическая окружность для расчёта фазы Φ

Также могут возникать частные случаи, при которых фаза будет равняться 0, $\pi/2$, π , и $3\pi/2$. При этом фаза не определена, когда действительная и мнимая части комплексного спектра одновременно обращаются в нуль. При переходе фазы из 4-го в 1-й квадрант к её текущему и следующему значениям добавляется величина 2π а при переходе фазы из 1-го в 4-й квадрант из её текущего и последующих значений вычитается величина 2π .

АНАЛИТИЧЕСКИЕ И РАСЧЁТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

При прохождении межпланетной трассы напряжённость поля на приёмном конце трассы описывается выражениями во временной области, являющимися решением волнового уравнения для холодной разреженной плазмы (Стрелков, 2008):

при $0 \leq t' \leq t_n$ —

$$E(\text{ТЕС}; t') = E(0; t') - \int_0^{t'} \sqrt{\frac{\delta}{\theta}} \cdot J_1(2\sqrt{\delta\theta}) \exp(-v_3\theta) E(0; t' - \theta) d\theta \quad (4)$$

и при $t' > t_n$ —

$$E(\text{ТЕС}; t') = - \int_{t'-t_n}^{t'} \sqrt{\frac{\delta}{\theta}} \cdot J_1(2\sqrt{\delta\theta}) \exp(-v_3\theta) E(0; t' - \theta) d\theta. \quad (5)$$

В равенствах (4) и (5) зависимость $E(0; t')$ описывается формулой (1), (2), или (3) в зависимости от используемого импульса; введены обозначения: $t' = t - z/c$, z — длина трассы, c — скорость света; $\delta = \delta(z) = \int \omega_0^2(z) dz / 2c$; $\omega_0^2 = 31,81 \cdot 10^8 N_e$, ω_0 — плазменная частота, N_e — электронная концентрация (в см^{-3}); v_3 — эффективная частота соударений. Нетрудно видеть, что параметр δ

прямо пропорционален интегральному электронному содержанию трассы $TEC = \int_z N_e(z) dz$ (m^{-2}).

Все приводимые ниже результаты по деформации радиоимпульсов во временной области получены с применением формул (4) и (5) в предположении бесстолкновительной плазмы ($v_g = 0$). Последнее означает, в частности, отсутствие поглощения в среде, так что энергия распространяющегося импульса $E_n(TEC) = \int_0^\infty |E(TEC; t')|^2 dt' = E_n(0)$ остаётся неизменной. Это обеспечивает возможность дополнительного контроля результатов вычислений интегралов в уравнениях (4) и (5), а также адекватную оценку пределов интегрирования в формуле (5).

Наряду с описанием напряжённости поля на приёмном конце трассы во временной области, можно записать решение волнового уравнения для холодной разреженной плазмы в частотной области в виде обратного преобразования Фурье (Баскаков, 1992; Харкевич, 2009).

$$E(TEC; t') = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |\tilde{S}_{изл}(\omega)| \exp\{i(\Phi_{изл}(\omega) + \Delta\Phi(\omega))\} \cdot \exp(i\omega t') d\omega, \quad (6)$$

где $\tilde{S}_{изл}(\omega)$ и $\Phi_{изл}(\omega)$ — комплексный и фазовый спектры излучаемого импульса; $\Delta\Phi(\omega)$ — фазовый набег, обусловленный влиянием среды;

$$\Delta\Phi(\omega) = -\frac{\omega}{c}(n(\omega)-1)z = -\frac{\omega}{c}(n(\omega)-1)\frac{TEC}{10 N}; \quad (7)$$

$n(\omega) = \sqrt{1 - \omega_0^2/\omega^2}$ — показатель преломления среды.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИМПУЛЬСОВ, РЕГИСТРИРУЕМЫХ НА ПРИЁМНОМ КОНЦЕ ТРАССЫ

На рис. 3–6 (см. с. 159–162) представлены характеристики импульсов, регистрируемых на приёмном конце трассы. Расчёт производился во временной области. Рисунки аналогичны друг другу и различаются только рассматриваемыми импульсами (см. подписи). Каждый из них содержит три совокупности данных с увеличением электронной концентрации трассы (*англ.* total electron content — TEC), иллюстрирующих характеристики регистрируемого импульса: изменение во времени напряжённости поля $E(TEC; t')$, амплитудные и фазовые спектры деформированных импульсов. Энергия для всех приведённых фрагментов напряжённости поля импульсов составляет более 98 % от начальной энергии соответствующих импульсов.

Временной ход напряжённости поля импульсов с ростом TEC значительно изменяется, при этом их амплитудные спектры остаются неизменными, за исключением близких к нулю областей по частоте из-за отсутствия низкочастотных гармоник в рассчитанной напряжённости поля импульсов.

Расчёт фазовых спектров деформированных импульсов проводился с учётом фазового набега к фазовому спектру излучаемого импульса (см. рис. 3*в*, *е*, *и*, *м*, кривые 1 на рис. 4*в*, *е*, *и*, *м*–6*в*, *е*, *и*, *м*), а также с использованием действительной и мнимой части комплексного спектра деформированного импульса, рассчитанного во временной области (кривые 2 на рис. 4*в*, *е*, *и*, *м*–6*в*, *е*, *и*, *м*) справа налево по частоте от 4,0 до 0,5 ГГц.

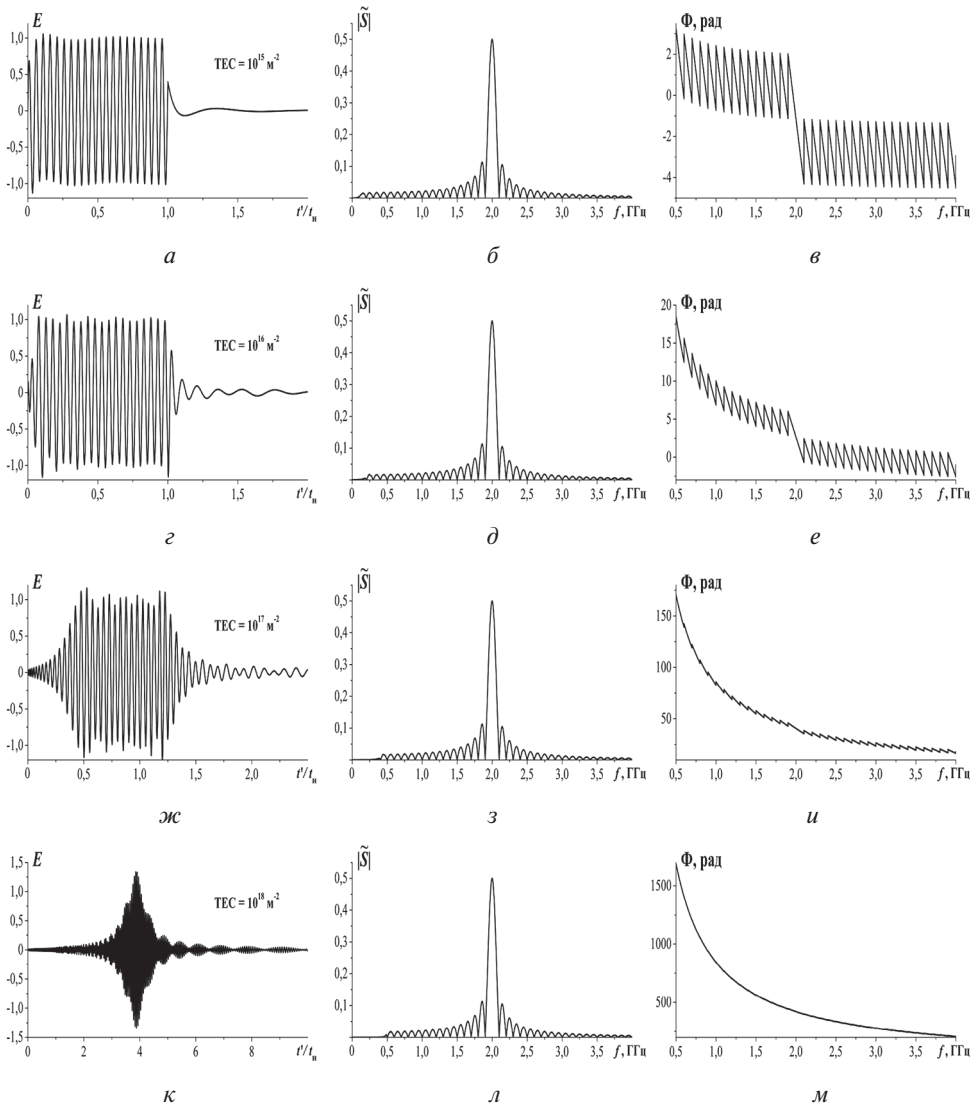


Рис. 3. Напряжённость поля (*a, z, ж, κ*), амплитудный спектр (*б, д, з, л*) и фазовый спектр, полученный по формуле $\Phi = \Phi_{\text{изл}} + \Delta\Phi$ (*в, е, и, м*) синусоидального радиопульса, изображённого на рис. 1*a*, в межпланетной плазме при $\text{TEC} = 10^{15} \text{ м}^{-2}$ (*a–в*), 10^{16} м^{-2} (*z–e*), 10^{17} м^{-2} (*ж–и*) и 10^{18} м^{-2} (*κ–м*)

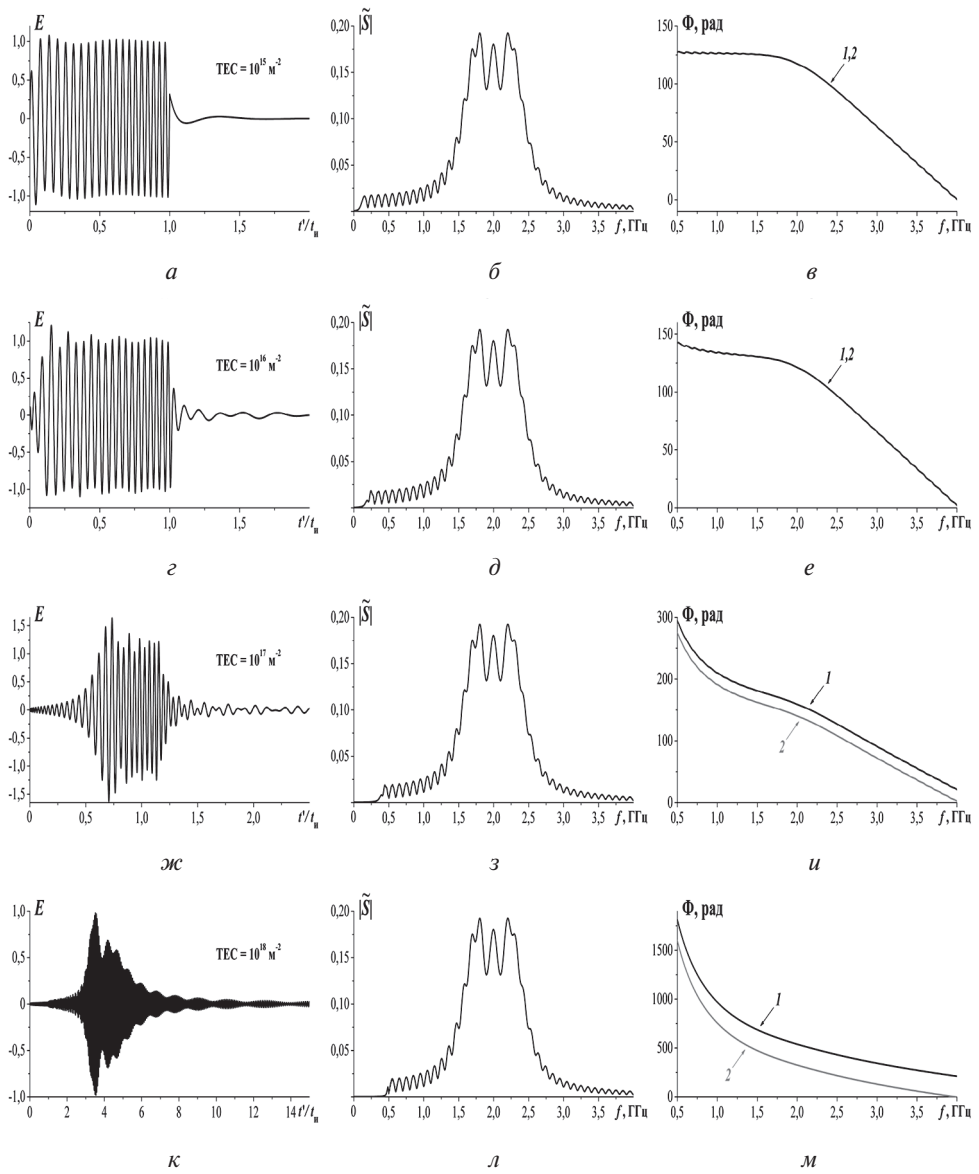


Рис. 4. То же, что и на рис. 3 для ЛЧМ радиоимпульса, изображённого на рис. 1г. $\Phi = \Phi_{\text{изл}} + \Delta\Phi$ (*в, е, и, м* кривые 1); расчёт Φ по деформированному импульсу (*в, е, и, м* кривые 2)

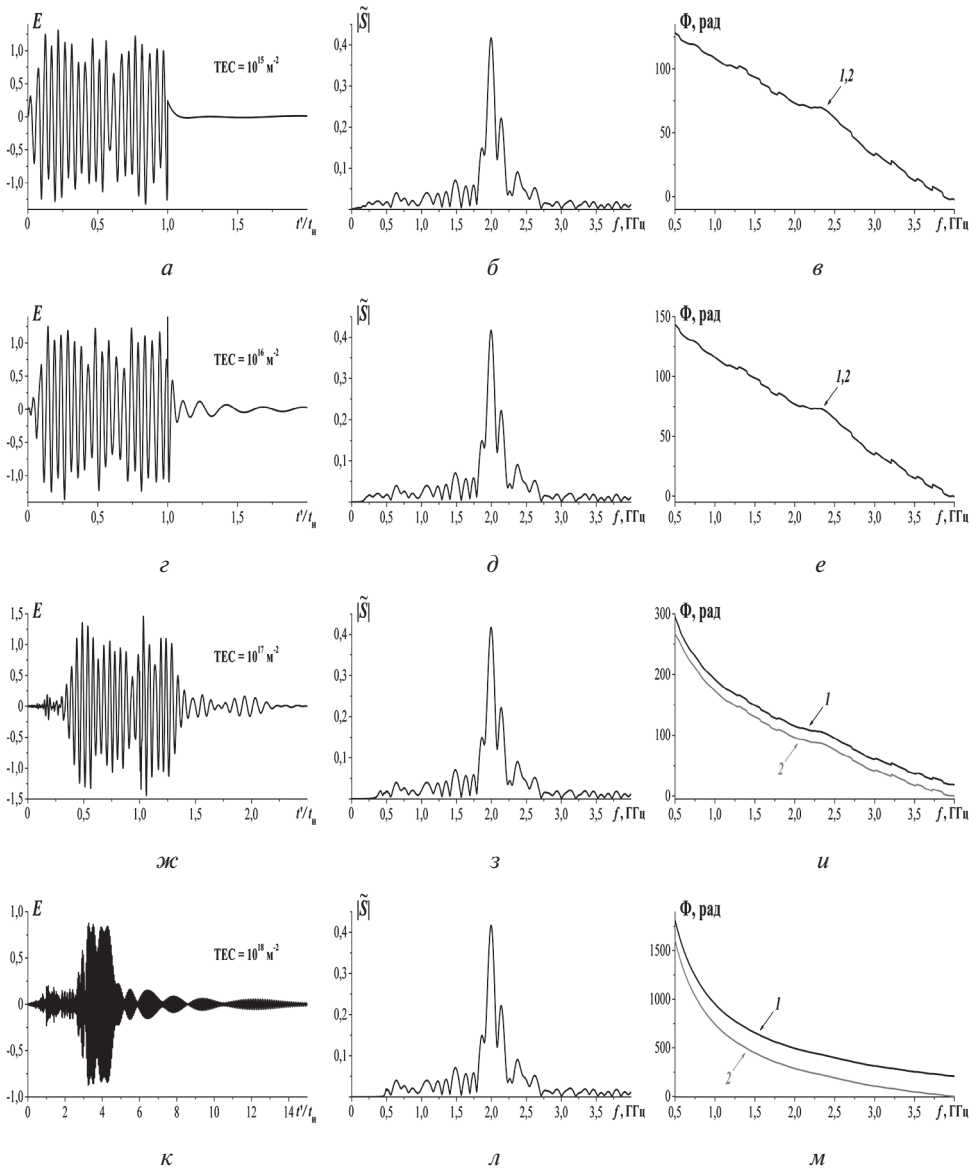


Рис. 5. То же, что и на рис. 3 для хаотического радиоимпульса (реализация 1), изображённого на рис. 1ж. $\Phi = \Phi_{\text{изл}} + \Delta\Phi$ (в, е, и, м кривые 1); расчёт Φ по деформированному импульсу (в, е, и, м кривые 2).

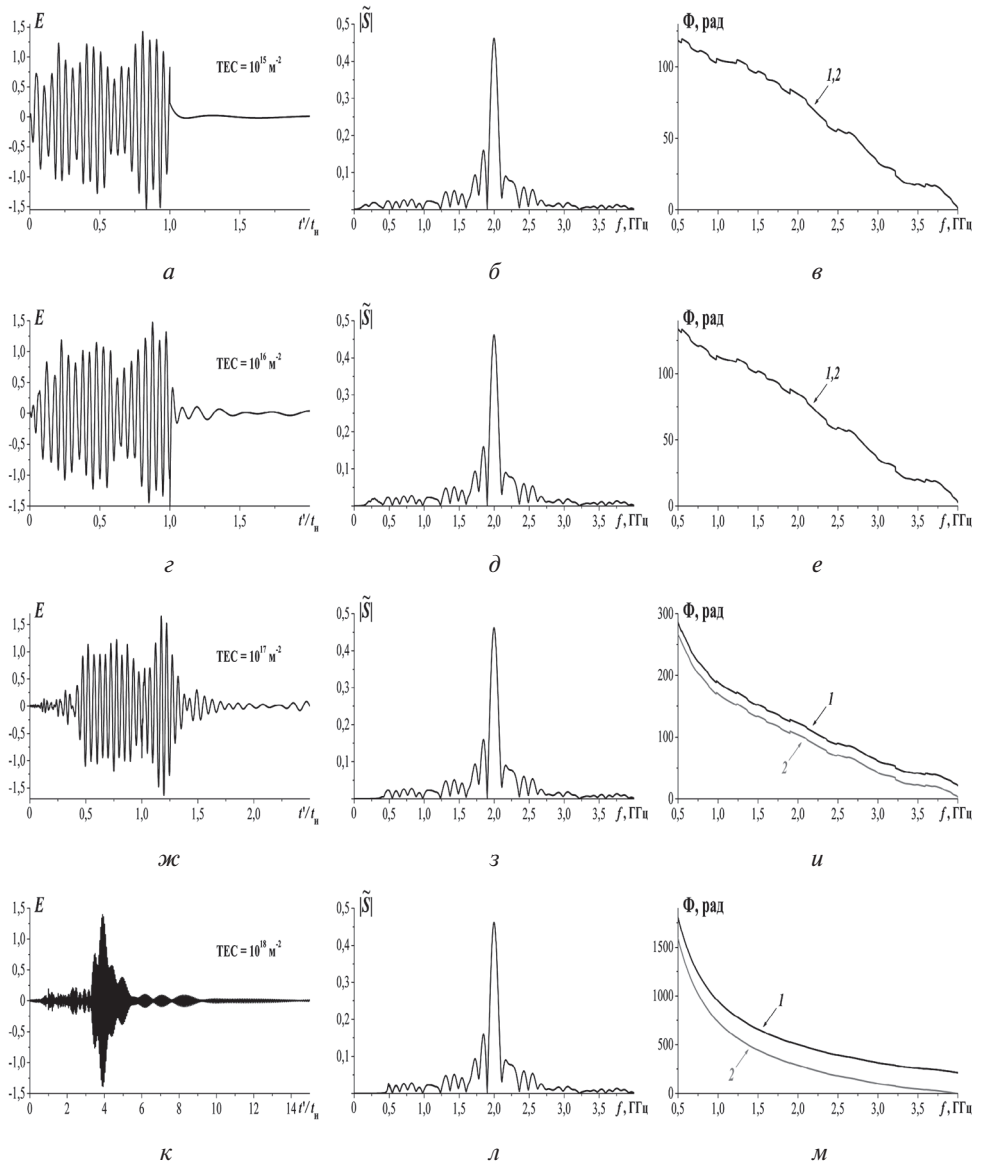


Рис. 6. То же, что и на рис. 3 для хаотического радиоимпульса (реализация 2), изображённого на рис. 1к. $\Phi = \Phi_{\text{изл}} + \Delta\Phi$ (в, е, и, м кривые 1); расчёт Φ по деформированному импульсу (в, е, и, м кривые 2).

По приведённым графикам фазовых спектров импульсов видно, что с увеличением ТЕС они растягиваются по вертикали в сотни и тысячи раз, при этом все детали спектров на соответствующих частотах сохраняются, а сами кривые практически монотонно убывают от низких к высоким частотам. Это означает, что с ростом частоты колебаний влияние среды на них уменьшается. Также видно, что при небольших значениях ТЕС кривые 1 и 2 фазовых спектров практически совпадают, однако с дальнейшим ростом ТЕС разница между кривыми увеличивается, что обусловлено допущением в методике расчёта фазового спектра, при котором на начальной частоте расчёта значение фазы по модулю не превышает π радиан. Это допущение не оказывает заметного влияния на достоверность расчёта фазового спектра, так как разница между кривыми кратна 2π и остаётся постоянной при любой частоте на каждом из графиков.

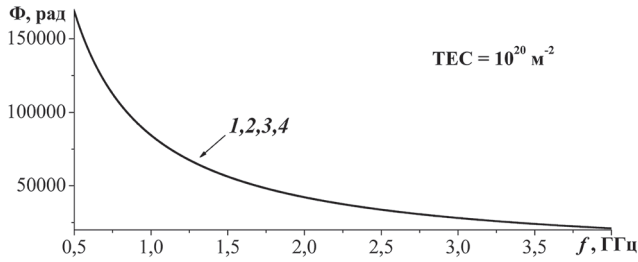


Рис. 7. Фазовые спектры деформированных импульсов, полученные по формуле $\Phi = \Phi_{\text{изл}} + \Delta\Phi$ для синусоидального радиоимпульса (кривая 1), ЛЧМ радиоимпульса (кривая 2), хаотических радиоимпульсов (кривые 3, 4) при $\text{TEC} = 10^{20} \text{ м}^{-2}$

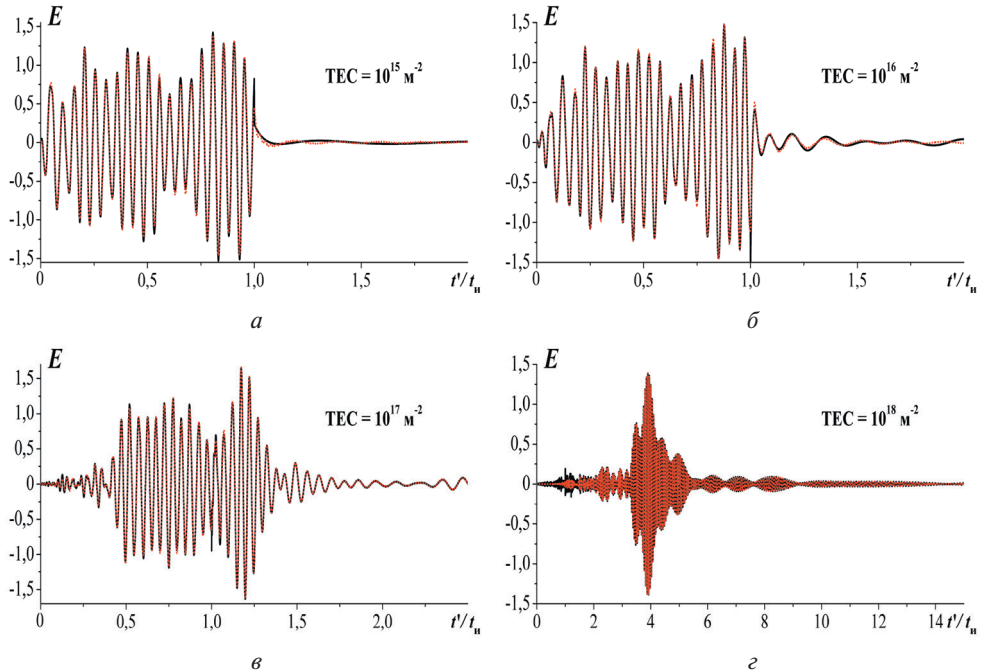


Рис. 8. Напряжённость поля хаотического импульса (реализация 2, см. рис. 1к) с увеличением ТЕС трассы, рассчитанная во временной (чёрные кривые) и в частотной области (красные кривые). $\text{TEC} = 10^{15} \text{ м}^{-2}$ (а), 10^{16} м^{-2} (б), 10^{17} м^{-2} (в) и 10^{18} м^{-2} (г)

Рассмотрим фазовый спектр, полученный с помощью фазового набегга для синусоидального, ЛЧМ и хаотических импульсов при большом значении $TEC = 10^{20} \text{ м}^{-2}$ (рис. 7, см. с. 163). Кривые фазовых спектров всех импульсов практически полностью совпадают. Это обусловлено тем, что величины фазового набегга на соответствующих частотах превышают величины фазовых спектров излучаемых импульсов в десятки и сотни тысяч раз. Так что фазовые спектры деформированных импульсов практически полностью характеризуются величинами фазового набегга.

Для контроля достоверности вычислений фазового спектра рассмотрим результаты расчёта напряжённости поля хаотического импульса с увеличением TEC трассы. На рис. 8 (см. с. 163) приведены графики для $TEC = 10^{15} \text{ м}^{-2}$ (см. рис. 8а), 10^{16} м^{-2} (см. рис. 8б), 10^{17} м^{-2} (см. рис. 8в) и 10^{18} м^{-2} (см. рис. 8г) для напряжённости поля, рассчитанной как во временной области (чёрные кривые), так и в частотной области с помощью обратного преобразования Фурье (красные кривые). Кривые на всех приведённых графиках практически полностью совпадают. Некоторые отличия обусловлены принятым диапазоном расчёта напряжённости поля импульса в частотной области от 0,5 до 4,0 ГГц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведён анализ характера и возможных особенностей искажений фазового спектра сверхкоротких радиоимпульсов с различными начальными характеристиками при распространении по межпланетной трассе. Показано, что в бесстолкновительной межпланетной плазме деформация радиоимпульсов с возрастанием TEC обусловлена только изменением их фазового спектра из-за воздействия среды, а при больших величинах TEC вид фазового спектра практически полностью характеризуется значениями фазового набегга частотных гармоник, формирующих импульс. Рассчитанные значения напряжённости поля импульсов во временной и частотной областях практически полностью совпадают, что подтверждает достоверность вычислений фазового спектра.

Работа выполнена в рамках госзадания ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН.

ЛИТЕРАТУРА

- Анищенко В. С., Вадивасова Т. Е. Лекции по нелинейной динамике: учеб. пособие для вузов. М.; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2011. 516 с.
- Баскаков С. И. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Высш. шк., 1992. 416 с.
- Стрелков Г. М. Сложный радиосигнал в ионосферной плазме // Радиотехника и электроника. 2008. Т. 53. № 9. С. 1094–1103.
- Харкевич А. А. Спектры и анализ. 5-е изд. М.: Кн. дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 240 с.
- Худышев Ю. С. Сверхкороткий радиоимпульс со скачками начальной фазы на межпланетной трассе // 18-я Конф. молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования»: сб. тр. М.: ИКИ РАН, 2021. С. 113–123. DOI: 10.21046/KMU-2021-113-123.
- Худышев Ю. С. Сверхкороткий радиоимпульс с частотной манипуляцией на межпланетной трассе // 19-я Конф. молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования»: сб. тр. М.: ИКИ РАН, 2022. С. 162–176. DOI: 10.21046/KMU-2022-162-176.

ON THE DEFORMATION OF THE PHASE SPECTRUM OF ULTRASHORT RADIO WAVE PULSES DURING PROPAGATION ALONG AN INTERPLANETARY PATH

Yu. S. Khudyshev

Fryazino branch of the Kotel'nikov Institute of Radio-engineering and Electronics of RAS (FIRE RAS), Fryazino, Russia

The report presents the results of an analysis of the nature and features of distortions in the phase spectrum of ultrashort radio wave pulses with different initial characteristics during propagation along an interplanetary path. It is shown that in a collisionless interplanetary plasma, the deformation of radio wave pulses with an increase in the integral electron concentration of the path (TEC) is due only to a change in their phase spectrum under the influence of the medium, which manifests itself in the appearance of a phase incursion of the frequency harmonics that form the pulse, at a constant amplitude spectrum due to the absence of absorption in the medium. It is also shown that at sufficiently large values of TEC, the phase spectra of the pulses are transformed to the form of a curve with a negative frequency gradient, which varies insignificantly for the considered pulses. Using the obtained values of the phase incursion, the calculation of the field strength of pulses at different TEC was carried out using the inverse Fourier transform. The results are compared with similar data obtained in the time domain.

Keywords: ultrashort radio wave pulse, phase spectrum, phase incursion, dispersion distortions, interplanetary plasma

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

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНОЙ ИНВЕРСИИ

О. О. Царева¹, Н. Н. Левашов^{1,2}, В. Ю. Попов^{1,2,3}

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

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

³ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
(НИУ ВШЭ), Москва, Россия

Ключевыми факторами, влияющими на количество космической радиации, попадающей на планету, являются её магнитное поле и плотность атмосферы. Магнитное поле отклоняет заряженные частицы, а атмосфера поглощает и рассеивает их. Кроме того, магнитное поле защищает атмосферу от эрозии солнечным ветром. Однако магнитное поле Земли не постоянно, и время от времени его магнитные полюса меняются местами. Во время этих инверсий геомагнитное поле значительно ослабевает и меняет свою конфигурацию. Предполагается, что множественные инверсии способствуют частичной диссипации атмосферы и, таким образом, ослабляют её «антирадиационный» эффект. Обсуждаются возможные последствия данного явления, его влияние на радиационную обстановку планеты. Рассматриваются два возможных сценария инверсии: в первом сценарии от геомагнитного поля остаётся только квадрупольная составляющая, но атмосфера не меняется по сравнению с сегодняшней; во втором сценарии также рассматривается только квадрупольная составляющая геомагнитного поля, однако уровень кислорода падает до 14 %, а уровень азота уменьшается на 2 %, согласно палеоданным. Рассчитаны дозы радиации галактических космических лучей на высотах 0 и 10 км для обоих случаев. Показано, что в момент геомагнитной инверсии существенно возрастёт на низких широтах.

Ключевые слова: геомагнитная инверсия, радиация, космические лучи, атмосфера

ВВЕДЕНИЕ

Межзвёздное пространство заполнено космическими лучами — высокоэнергетическими частицами, которые представляют естественный радиационный фон в космосе. Они активно бомбардируют Землю, вторгаясь в её атмосферу, и передают свою энергию веществу либо через обычную ионизацию, либо через образование каскадов путём неупругих соударений с ядрами воздуха (Маурчев и др., 2019; Мурзин, 2007).

Магнитное поле и плотная атмосфера защищают нашу планету от космических лучей, отклоняя и поглощая заряженные частицы. К тому же магнитное поле препятствует эрозии атмосферы солнечным ветром. Однако геомагнитное поле не статично и с момента своего возникновения подвержено непрерывным изменениям, самое значительное из которых — это геомагнитная инверсия, т. е. смена полярности. Геомагнитные инверсии происходят хаотически с интервалами от десятков тысяч до миллионов лет и с длительностью от нескольких сотен до сотен тысяч лет. За длительными периодами спокойного магнитного поля могут следовать периоды многократных инверсий с различной длительностью и наоборот.

Царева Ольга Олеговна — научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, olga8.92@mail.ru

Левашов Николай Николаевич — инженер, аспирант, ya@panternu.ru

Попов Виктор Юрьевич — профессор, доктор физико-математических наук

Палеоданные указывают на переменную плотность атмосферы на протяжении всей истории Земли, а также на некоторую корреляцию атмосферных и геомагнитных изменений. Согласно широко распространённой концепции (Dehant et al., 2007), геомагнитные инверсии способствуют потере атмосферы, что вследствие кумулятивного эффекта в течение нескольких миллионов лет множественных инверсий может привести к значительному падению плотности атмосферы (Wei et al., 2014).

Прежде мы исследовали радиационный фон во время инверсии, предполагая атмосферу неизменной, и показали, что даже когда магнитный щит ослабевает, атмосфера продолжает эффективно поглощать излучение (Царева и др. 2018). Такой сценарий соответствовал одиночной инверсии, ожидаемой в будущем.

Цель данного исследования состоит в оценке доз радиации галактических космических лучей при прохождении через современную и разреженную (в результате множественных инверсий) атмосферу в момент геомагнитной инверсии и сравнение с сегодняшним радиационным фоном.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Для моделирования прохождения радиации галактических космических лучей (ГКЛ) через атмосферу, использовался инструментарий GEANT4 (*англ.* GEometry ANd Tracking) — пакет для моделирования прохождения элементарных частиц через вещество с использованием метода Монте-Карло. Основное преимущество GEANT4 по сравнению с другими кодами Монте-Карло и транспортных кодами — гибкость, которая позволяет пользователям контролировать практически каждый аспект вычислений. В настоящей работе взаимодействие частиц и вещества описано с помощью FTFP — списка физических процессов BERT-HP. Эта физическая модель включает в себя модель Fritiof для частиц с энергией выше 10 ГэВ, каскадную модель Бертини для энергии ниже 10 ГэВ и высокоточную нейтронную модель для энергии ниже 20 МэВ.

Для параметризации атмосферы использовалась эмпирическая модель NRLMSISE-00 (Picone et al., 2002), при помощи которой были заданы температура и плотность: компоненты атмосферы от поверхности планеты до космоса.

Для моделирования первичных частиц ГКЛ использовался стандарт ГОСТ 25645.150-90. В нашей модели, мы полагали, что ГКЛ на 92 % состоят из протонов и на 8 % — из ядер гелия. Энергетические спектры первичных частиц ГКЛ представлены на рис. 1: чёрным цветом изображены спектры альфа-частиц, красным — спектры протонов.

Согласно модели геодинамо (Glatzmaier, Roberts, 1995), в процессе инверсии дипольная компонента поля ослабевает, а квадрупольная становится доминирующей.

Поскольку квадрупольное поле также эволюционирует во времени, его величина и конфигурация в момент инверсии, вообще говоря, могут быть случайными (Vogt, Glassmeier, 2000). Предполагаем осесимметричную конфигурацию квадрупольного поля с коэффициентом Гаусса $g_2^0 = 2,5$ мкТл.

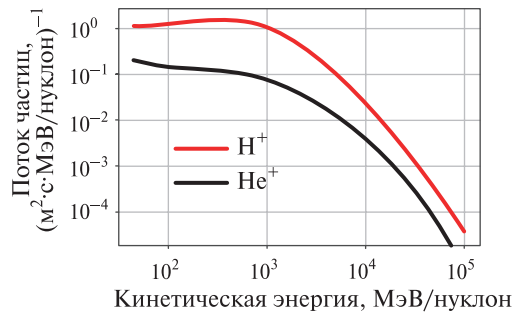


Рис. 1. Энергетические спектры первичных частиц ГКЛ

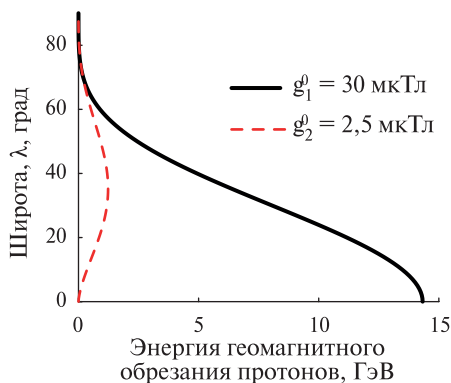


Рис. 2. Порог энергии геомагнитного обрезания в современном магнитном поле (сплошная кривая) и в момент геомагнитной инверсии (пунктирная кривая) в зависимости от широты λ

Такая конфигурация интересна тем, что в подсолнечной области образуется туннелеобразный касп, через который космические лучи (КЛ) могут эффективно проникать внутрь магнитосферы. На сегодняшний день КЛ свободно достигают только магнитных полюсов, дипольная конфигурация поля препятствует

проникновению низкоэнергичных частиц в экваториальную область.

Теория Штермера позволяет найти минимальную энергию обрезания (pc , где p — импульс; c — скорость света) заряженной частицы, необходимую для достижения поверхности Земли (т.е. сферы радиусом $R_E = 6371$ км) вертикально на геомагнитной широте λ :

$$p_{dip}c = cg_1^0 R_E / 4 \cos^4 \lambda \text{ эВ} \text{ и } p_{quad}c = cg_2^0 R_E 1,08 \cos^3 \lambda \sin^{3/2} \lambda \text{ эВ}$$

для дипольного и квадрупольного магнитных полей соответственно (Stadelmann et al., 2010; Tsareva, 2019). На рис. 2 показаны энергии обрезания протонов для диполя с $g_1^0 = 30$ мкТл ($cg_1^0 R_E / 4 = 14,3$ ГэВ) и квадруполья с $g_2^0 = 2,5$ мкТл ($cg_2^0 R_E 1,08 = 5,16$ ГэВ) в зависимости от широты λ .

Мы рассмотрели два сценария инверсии: в первом сценарии атмосфера не меняется, что характерно для однократной инверсии; во втором сценарии количество кислорода O_2 падает с сегодняшних 21 до 14 %, а азота N_2 уменьшается на 2 %. Такое разрежение наблюдалось в прошлом в процессе множественных инверсий, вероятно способствующих диссипации атмосферы. В течение фанерозоя, когда частота инверсий возрастала, уровень O_2 значительно снижался (Wei et al., 2014). За этот геологический период не обнаружено заметных вариаций атмосферного N_2 (Bernier, 2006). Однако спутниковые данные свидетельствуют, что в спокойных солнечных/геомагнитных условиях отток N^+ из ионосферы составляет ~10 % от оттока O^+ , а в возмущённых условиях может даже превышать его (Ilie, Liemohn, 2016).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Радиация, которую несут с собой ГКЛ, даже сегодня при сильном геомагнитном поле способна мешать работе высокотехнологичного оборудования, расположенного в районе полюсов. Для того чтобы оценить уровень радиации в момент инверсии, когда геомагнитное поле ослаблено, мы рассчитали дозы радиации для различных сценариев на ключевых высотах. На рис. 3 (см. с. 169) приведены дозы радиации в микрозиверт в час в зависимости от широты на высоте 10 км, где летают самолёты. Из графиков следует, что существенная разница в радиации на этой высоте для обоих сценариев инверсии будет наблюдаться только на низких широтах.

На рис. 4 (см. с. 169) приведены дозы радиации (в мкЗв/ч) в зависимости от широты на поверхности Земли. Для сценария однократной инверсии повышенный радиационный фон будет только на низких широтах, однако в случае множественных инверсий радиационный фон будет в разы выше по сравнению с сегодняшним на всех широтах.

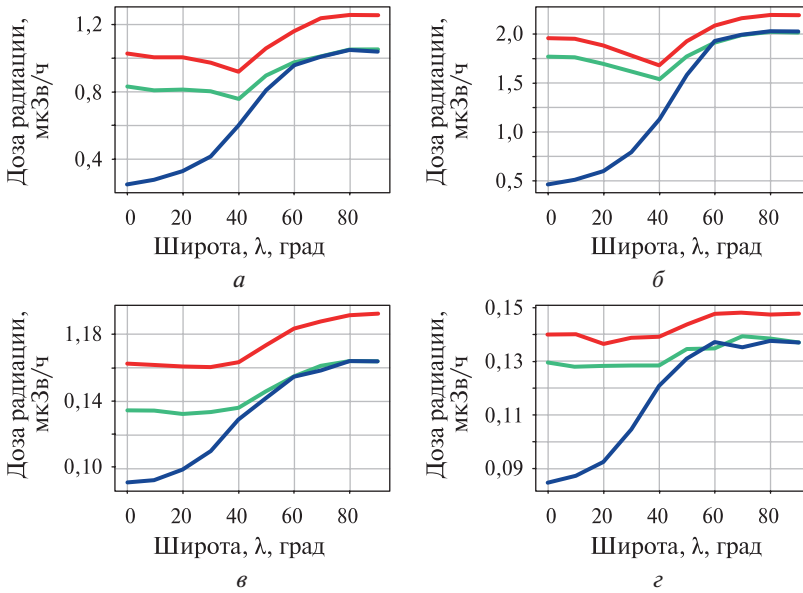


Рис. 3. Дозы радиации протонов (*а*), нейтронов (*б*), электронов (*в*) и мюонов (*г*) в зависимости от широты λ на высоте 10 км: синие кривые — для сегодняшнего случая, зелёные — для одиночной инверсии, красные — для множественных инверсий, когда разрежена атмосфера

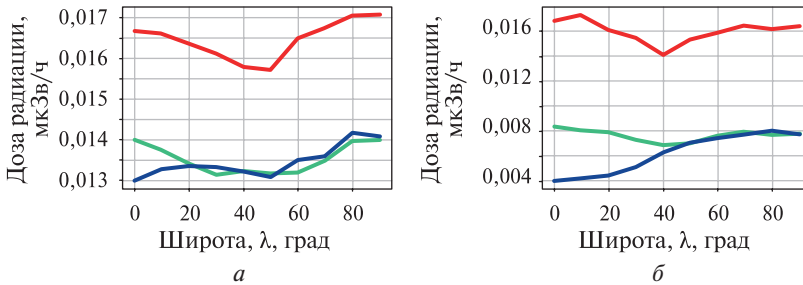


Рис. 4. Дозы радиации мюонов (*а*) и нейтронов (*б*) в зависимости от широты λ на высоте 0 км: синие кривые — для сегодняшнего случая, зелёные — для одиночной инверсии, красные — для множественных инверсий, когда разрежена атмосфера

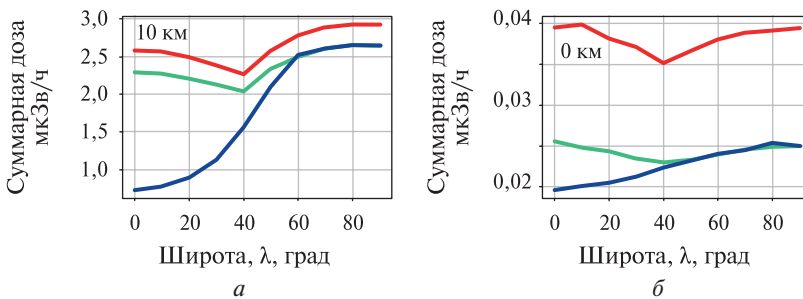


Рис. 5. Суммарные дозы радиации в зависимости от широты λ на высоте 10 км (*а*) и 0 км (*б*): синие кривые — для сегодняшнего случая, зелёные — для одиночной инверсии, красные — для множественных инверсий

На рис. 5 (см. с. 169) приведены суммарные дозы радиации (в мкЗв/ч) в зависимости от широты на высоте 10 км и на поверхности Земли.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе рассчитаны дозы радиации на ключевых высотах современной и разряженной атмосферы в момент геомагнитной инверсии и проведено их сравнение с сегодняшним фоном. Показано, что для случая однократной инверсии, когда атмосфера не успевает измениться, дозы радиации увеличатся только на низких широтах и будут идентичны сегодняшнему радиационному фону у полюсов. Однако в период множественных инверсий, когда атмосфера разрежена, уровень радиации в момент инверсии на поверхности Земли вырастет в среднем в два раза по сравнению с сегодняшним фоном на всех широтах, что может сказаться на биосфере.

Работа Н. Н. Левашова и О. О. Царевой поддержана грантом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № МК-5053.2022.6.

ЛИТЕРАТУРА

- Мурзин В. Астрофизика космических лучей: учеб. пособие для вузов. М.: Университетская кн.; Логос, 2007. 488 с.
- Маурчев Е. А., Балабин Ю. В., Германенко А. В. и др. Влияние протонов космических лучей на образование вторичных частиц и ионизацию в атмосфере Земли // Тр. Кольского науч. центра РАН. 2019. № 8(5). С. 240–249.
- Царева О. О., Зеленый Л. М., Малова Х. В. и др. Что ожидает человечество при инверсии магнитного поля Земли: угрозы мнимые и подлинные // Успехи физ. наук. 2018. № 188. С. 207–220. DOI: 10.3367/UFNr.2017.07.038190.
- Berner R. A. Geological nitrogen cycle and atmospheric N₂ over Phanerozoic time // *Geology*. 2006. V. 34. Iss. 5. P. 413–415. <https://doi.org/10.1130/G22470.1>.
- Dehant V., Lammer H., Kulikov Y. N. et al. Planetary Magnetic Dynamo Effect on Atmospheric Protection of Early Earth and Mars // *Space Science Reviews*. 2007. V. 129. Iss. 1–3. P. 279–300. DOI: 10.1007/s11214-007-9163-9.
- Glatzmaier G. A., Roberts P. H. A three-dimensional convective dynamo solution with rotating and finitely conducting inner core and mantle // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1995. V. 91. Iss. 1–3. P. 63–75. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(95\)03049-3](https://doi.org/10.1016/0031-9201(95)03049-3).
- Ilie R., Liemohn M. W. The outflow of ionospheric nitrogen ions: A possible tracer for the altitude-dependent transport and energization processes of ionospheric plasma // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 2016. V. 121. Iss. 9. P. 9250–9255. <https://doi.org/10.1002/2015JA022162>.
- Picone J., Hedin A. E., Drob D., Aikin A. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparison and scientific issues // *J. Geophysical Research*. 2002. V. 107. Iss. A12. P. SIA 15-1–SIA 15-16. <https://doi.org/10.1029/2002JA009430>.
- Stadelmann A., Vogt J., Glassmeier K. H. et al. Cosmic ray and solar energetic particle flux in paleomagnetospheres // *Earth Planet and Space*. 2010. V. 62. P. 333–345. DOI: 10.5047/eps.2009.10.002.
- Tsareva O. O. Generalization of Störmer theory for an axisymmetric superposition of dipole and quadrupole fields // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 2019. V. 124. Iss. 4. P. 2844–2853. <https://doi.org/10.1029/2018JA026164>.
- Vogt J., Glassmeier K. H. On the location of trapped particle populations in quadrupole magnetospheres // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 2000. V. 105. Iss. A6. P. 13063–13071. <https://doi.org/10.1029/2000JA900006>.

Wei Y., Pu Z., Zong Q.-W. et al. 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.

INVESTIGATION OF THE RADIATION ENVIRONMENT DURING GEOMAGNETIC REVERSAL

O. O. Tsareva¹, N. N. Levashov^{1,2}, V. Y. Popov^{1,2,3}

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

² Space Research Institute RAS (IKI), Moscow, Russia

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

The key factors affecting the amount of cosmic radiation that hits a planet are its magnetic field and atmospheric density. The magnetic field deflects charged particles, while the atmosphere absorbs and scatters them. In addition, the magnetic field protects the atmosphere from erosion by the solar wind. However, the Earth's magnetic field is not constant, and from time to time its magnetic poles change places. During these reversals, the magnetic field significantly weakens and changes its configuration. It is assumed that multiple reversals contribute to the partial dissipation of the atmosphere and, thus, weaken its “anti-radiation” effect. In this article we discuss the possible consequences of this phenomenon, its impact on the planet's radiation environment. Two possible reversal scenarios are considered: in the first scenario, only the quadrupole component remains from the geomagnetic field, but the atmosphere does not change compared to today; in the second scenario, only the quadrupole component of the geomagnetic field is also considered, however, the oxygen level drops to 14 %, and the nitrogen level drops by 2 % according to paleodata. Radiation doses of galactic cosmic rays at altitudes of 0 km and 10 km were calculated for both cases. It is shown that at the moment of geomagnetic reversal it will increase significantly at low latitudes.

Keywords: geomagnetic reversal, radiation, cosmic rays, atmosphere

Tsareva Olga Olegovna — researcher, candidate of physical and mathematical sciences, olga8.92@mail.ru

Levashov Nikolai Nikolaevich — engineer, postgraduate, ya@panterny.ru

Popov Victor Yurievich — professor, doctor of physical and mathematical sciences

КАЛИБРОВКА БОРТОВЫХ МАГНИТОМЕТРОВ НА СТЕНДЕ ПОЛУНАТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ УГЛОВОГО ДВИЖЕНИЯ НАНОСПУТНИКА

А. С. Эспиноза Валлес, П. Н. Николаев

Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С. П. Королева, Самара, Россия

Предложен алгоритм для калибровки магнитометрических средств на стенде полунатурного моделирования движения наноспутников. На основе предложенного алгоритма проведена калибровка бортовых магнитометров системы ориентации и управления движением наноспутника SamSat-ION. Оценено смещение нуля микроэлектромеханических магнитометров MPU-9255 и MMC5883. Данный подход обеспечивает оценку вектора смещения нуля измерений магнитометров с погрешностью порядка 2 нТл.

Ключевые слова: калибровка магнитометров, испытательный стенд, полунатурное моделирование, угловое движение, магнитная ориентация, наноспутник

Отделившись от транспортно-пускового контейнера, наноспутник приобретает значительные составляющие угловой скорости (Лапшова, Баринаева, 2022). Поэтому, прежде чем начать штатную работу всех бортовых систем и перейти к целевой задаче миссии, их необходимо демпфировать. Чаще всего демпфирование проводят с помощью магнитных систем управления (Овчинников и др., 2016). Погашение угловой скорости проходит за счёт формирования управляющих воздействий на магнитные катушки, обеспечивающие наноспутник собственным дипольным моментом. На практике часто применяется алгоритм демпфирования $B \cdot \dot{\theta}$, использующий измерения магнитометров, в связи с его простой реализацией (Leonov, Nikolaev, 2022). Исходя из этого, следует оценить направление и величину напряжённости магнитного поля с высокой точностью.

Основная проблема любого датчика заключается в необходимости его предварительной калибровки, особенно при работе с датчиками, основанными на технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС). Например, большой вклад в погрешность измерений магнитометров вносит смещение нуля, связанное с технологией их изготовления и внешними магнитными возмущениями (Грановский, Скалон, 2006). Для калибровки магнитометры часто калибруются методом вращения, где магнетометр вращается в разных направлениях (Kok et al., 2012). В результате полученные измерения образуют эллипсоид, смещённый в пространстве. В идеальном случае откалиброванные измерения образуют сферу с центром в начале системы отсчёта. Следовательно, калибровка сводится к определению геометрических параметров эллипсоида.

Однако на практике такой подход не всегда возможно применять. Например, вращение собранного наноспутника с комплексными трансформирующими конструкциями при отсутствии специальных приспособлений представляет собой сложную задачу, решить которую можно, используя стенд моделирования магнитного поля Земли.

Для тестирования и отработки датчиков бортовых систем следует проводить не только моделирование, но и наземные испытания (Мещеряков и др., 2022). Для этого разрабатываются многообразные технологические решения, позволяющие испытывать и обрабатывать системы ориентации и стабилизации мало-

Эспиноза Валлес Ангело Сальватор — инженер-программист, магистрант,
esalvator24@gmail.com

Николаев Петр Николаевич — старший научный сотрудник,
кандидат физико-математических наук, nikolaev.pn@ssau.ru

размерных космических аппаратов, опирающиеся на применение магнитной системы ориентации (Карпенко, Овчинников, 2008; Gallina et al., 2015).

В Самарском университете разработан наноспутник SamSat-ION, предназначенный для исследования ионосферы Земли контактными и дистанционными методами. Измерительные средства SamSat-ION включают в себя МЭМС-датчики MPU-9255, состоящие из трёхосевых гироскопов, трёхосевых акселерометров, трёхосевых магнитометров, и высокоточных трёхосевых магнитометров ММС5883. В рамках настоящей работы было необходимо провести калибровку магнитометрических средств SamSat-ION.

На базе межвузовской кафедры космических исследований Самарского университета имеется стенд полунатурного моделирования движения наноспутников производства «Спутникс», включающий следующие элементы: комплекс имитации магнитного поля (КИМП) Земли, воздушный подвес, имитатор звёздного неба и имитатор Солнца. В состав КИМП входят три пары магнитных катушек, расположенных во взаимно перпендикулярных направлениях. Катушки способны создавать однородное магнитное поле в центральной части стенда в любом направлении.

Для задания профиля магнитного поля было разработано программное обеспечение для дистанционного управления стендом КИМП по протоколу TCP/IP (*англ.* Transmission Control Protocol/Internet Protocol). Программа позволяет как формировать векторы магнитного поля вдоль траектории полёта наноспутника в соответствии с моделью IGRF-13 (*англ.* International Geomagnetic Reference Field) в связанной системе координат, так и генерировать заданный пользователем профиль магнитного поля. В первом случае на входе алгоритма задаются координаты траектории наноспутника в километрах, а во втором — профиль магнитного поля в нанотеслах. Разработанная программа позволяет воспроизвести магнитное поле с погрешностью, не превышающей 2 нТл.

Величина и направление создаваемого поля в однородной области изменяется управлением током, подаваемым на катушки. В соответствии с заданным профилем магнитного поля программа определяет профиль тока, который необходимо сообщить на устройства программно-управляемого источников тока (ПУИТ). Для задания определённого значения магнитной индукции оценивается калибровочная матрица, связывающая вектор магнитной индукции с величиной тока, подаваемого на каждую катушку. Направление протекающего тока переключается за счёт программно-управляемого реле APC-1104. При этом пользовательские команды взаимодействия с реле, магнитометром и устройствами ПУИТ осуществляется по протоколу TCP/IP. Для контроля создаваемого магнитного поля стенд оснащается магнитометром.

Были проведены стендовые испытания, при которых SamSat-ION располагался в центральной части КИМП, так чтобы измерительные оси датчиков были параллельны основным осям стенда (рис. 1). Чтобы не брать в расчёт влияние опоры аэродинамического подвеса на измерения магнитометров, поле генерировалось только по горизонтальной плоскости, в плоскости XU наноспутника (рис. 2а, см. с. 174). Затем наноспутник переворачивался, и эксперимент повторялся в плоскости XZ . В этом случае смещение нуля магнитометров по каждой из осей представляет собой отклонение наибольшего значения заданного профиля от наименьшего (рис. 2б).

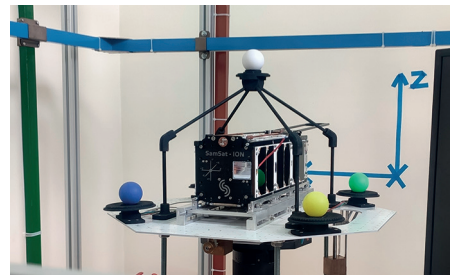


Рис. 1. Экспериментальная установка

Другими словами, смещение нуля представляют собой координаты центра аппроксимируемой окружности. В ходе испытаний был получен набор измерений магнитного поля с привязкой ко времени, по которым оценены смещения нуля компонент магнитного поля.

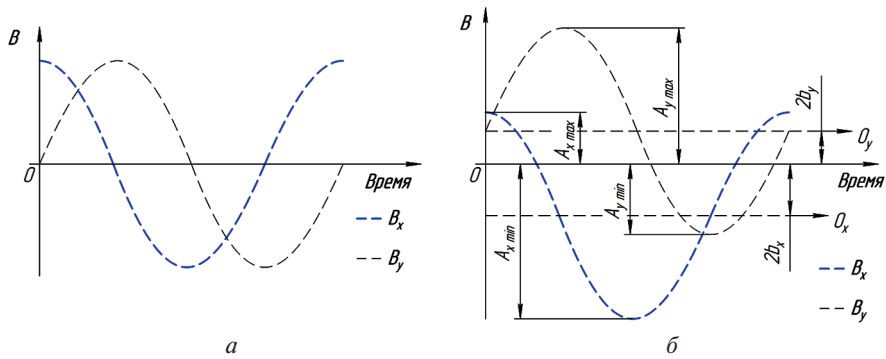


Рис. 2. К экспериментальному определению смещений нуля

Полученные составляющие смещения нуля для всех бортовых магнитометров приведены в табл. 1. Оценены математическое ожидание M_x и среднее квадратическое отклонение σ до и после калибровочной процедуры. В табл. 2 собраны статистические результаты проведенной калибровки.

Таблица 1. Найденные составляющие вектора смещения нуля бортовых магнитометров

Составляющие, нТл	ММС1	ММС2	МПУ1	МПУ2	МПУ3
b_x	15013,05	-7281,47	-27753,89	30139,47	-20480,50
b_y	-1867,09	3670,85	-54809,79	15866,45	33944,58
b_z	22384,72	-7996,15	15078,99	-6491,70	-10542,60

Таблица 2. Статические результаты модуля вектора измерений

Оценка, нТл	ММС1	ММС2	МПУ1	МПУ2	МПУ3	
M_x	до	84819,48	83632,39	88257,24	74690,11	76190,41
	после	83706,12	83604,05	66983,75	67666,92	66003,52
σ	до	17412,36	6838,14	21696,17	21069,87	22048,72
	после	3645,57	1640,30	3423,93	2773,05	2230,15

На основе предложенного подхода к калибровке магнитометров на стенде полунатурного моделирования динамики углового движения наноспутника оценено смещение нуля МЭМС-магнитометров МПУ-9255 и ММС5883 наноспутника SamSat-ION. Данный подход обеспечивает оценку вектора смещения нуля измерений магнитометров с погрешностью порядка 2 нТл. Разработанное программное обеспечение может использоваться для калибровки магнитометров систем определения ориентации и управления движением научно-образовательных наноспутников.

Работа выполнена в рамках проекта № 0777-2020-0018, финансируемого из средств государственного задания победителям конкурса научных лабораторий образовательных организаций высшего образования, подведомственных Минобрнауки России.

ЛИТЕРАТУРА

- Грановский В. А., Скалон А. И.* Метрологическая проблема микроэлектромеханических систем и методологические основы ее решения // Гироскопия и навигация. 2006. № 4(55). С. 117–118.
- Карпенко С. О., Овчинников М. Ю.* Лабораторный стенд для полунатурной отработки систем ориентации микро- и наноспутников: препринт. М.: ИПМ им. М. В. Келдыша. 2008. № 38. 32 с.
- Лапинова Е. А., Баринаева Е. В.* Исследование процесса выхода наноспутника из транспортно-пускового контейнера // 15-й Всероссийский семинар по управлению движением и навигации летательных аппаратов. 15–17.06.2022, Самара. 2022. С. 230–233 с.
- Мещеряков В. Д., Николаев П. Н., Хусаинов А. А.* Определение ориентации платформы стенда полунатурного моделирования динамики относительного движения наноспутника // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65. № 6. С. 430–442 с. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-6-430-442.
- Овчинников М. Ю., Пеньков В. И., Ролдугин Д. С., Иванов Д. С.* Магнитные системы ориентации малых спутников. М.: ИПМ им. М. В. Келдыша, 2016. 366 с.
- Gallina A., Zagórski P., Rachucki J.* Test Bed for the Simulation of Magnetic Field Measurements of Low Earth Orbit Satellites // Mechanics and Control. 2015. V. 34. No. 3. P. 47. DOI:10.7494/mech.2015.34.3.47
- Kok M., Hol J., Schön Th. et al.* Calibration of a magnetometer in combination with inertial sensors // Proc. 15th Intern. Conf. Information Fusion (FUSION). 9–12 July 2012, Singapore. 2012. P. 787–793.
- Leonov A. I., Nikolaev P. N.* Providing Nanosatellite Triaxial Gravitational Orientation Using Magnetic Actuators // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. Intern. Workshop Navigation and Motion Control (NMC 2021). 20–24 Sept. 2021, Saint-Petersburg, Russia. 2022. V. 1215. No. 1. Art.No. 012005. DOI 10.1088/1757-899X/1215/1/012005.

CALIBRATION OF ON-BOARD MAGNETOMETERS IN THE STAND OF SEMI-NATURAL MODELING OF NANOSATELLITE ANGULAR MOTION DYNAMICS

A. S. Espinoza Valles, P. N. Nikolaev

Samara National Research University, Samara, Russia

In this paper, an approach is proposed for calibration of magnetometric devices in the stand of semi-natural modeling of nanosatellites motion. Based on the proposed approach, the on-board magnetometers of the attitude dynamics and control system of the SamSat-ION nanosatellite were calibrated. The zero displacements of microelectromechanical magnetometers MPU-9255 and MMC5883 are estimated. This approach provides an estimate of the bias vector of magnetometer measurements with an error of about 2 nT.

Keywords: magnetometer calibration, experimental stand, semi-natural modeling, angular motion, magnetic orientation, nanosatellite

Espinoza Valles Angelo Salvator — software engineer, master's student, esalvator24@gmail.com
Nikolaev Petr Nikolaevich — senior researcher, candidate of physical and mathematical sciences, nikolaev.pn@ssau.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
<i>Агапкин И. А., Уварова А. В.</i> Экспериментальное исследование лунного грунта-аналога VI-75 при отрицательной температуре	5
<i>Аморим Д. О., Гудкова Т. В.</i> Землеподобные модели внутреннего строения Венеры	8
<i>Аникин А. А., Мокроусов М. И., Митрофанов И. Г., Головин Д. В., Козырев А. С., Литвак М. Л., Никифоров С. Ю., Санин А. Б., Тимошенко Г. Н., Швецов В. Н., Павлик Е. Е.</i> Испытания детектора из высокочистого германия в составе лабораторного макета космического гамма-спектрометра с мечеными заряженными частицами на протонном пучке фазотрона ОИЯИ	16
<i>Балута А. Ю., Пружинская М. В.</i> Влияние эффектов окружения на стандартизацию сверхновых типа Ia и космологический анализ	25
<i>Батов А. В., Сальников А. М.</i> Обработка данных спутниковых миссий для построения модели магнитного поля Марса	33
<i>Беляков Н. В.</i> Проблема подхода transfer learning в задаче сегментации облачных и снежных покровов по данным со спутника ДЗЗ «Электро-Л1»	37
<i>Бойматов Ю. Ш., Плотников Д. Е.</i> Исследование эффективности использования разносезонной информации для спутникового картографирования озимых культур в весенне-летний период вегетации	47
<i>Боронин И. А., Гудкова Т. В.</i> Апробация метода Монте-Карло для решения обратных задач планетарной геофизики	52
<i>Виноградова Е. В., Богачев А. М.</i> Существующие модели процессов накопления радиационно-индуцированных поверхностных состояний	59
<i>Дементьев В. Ю.</i> Конструктивные особенности звёздного датчика ориентации повышенной точности и методы формирования его звёздного каталога	62
<i>Дементьев В. Ю.</i> Методика и результаты наземной отработки программно-математического обеспечения звёздного датчика ориентации повышенной точности	70

<i>Дементьев В. Ю.</i>	
Разработка программных средств обработки и анализа телеметрической информации со звёздного датчика ориентации повышенной точности	79
<i>Дьячкова М. В., Никифоров С. Ю., Лисов Д. И., Митрофанов И. Г., Литвак М. Л.</i>	
Распространённость воды и хлора в геологических районах кратера Гейл на Марсе по данным эксперимента ДАН	86
<i>Коптяева Е. А.</i>	
Аналитические приближения углового распределения нейтрино в сверхновой с коллапсом центральной части	92
<i>Кулик Е. А., Гудкова Т. В.</i>	
Построение моделей внутреннего строения Марса по геодезическим данным	100
<i>Мкртчян А. А., Позаненко А. С., Минаев П. Ю.</i>	
Моделирование сегментированного детектора для регистрации гамма-излучения	108
<i>Назарова А. В., Евдокимова Д. Г., Федорова А. А., Кораблев О. И.</i>	
Исследование теплового излучения поверхности Венеры в окне прозрачности 1 мкм	115
<i>Никифоров С. Ю., Дьячкова М. В., Митрофанов И. Г., Литвак М. Л., Лисов Д. И., Санин А. Б.</i>	
Каталогизация данных эксперимента ДАН по оценке содержания воды и хлора вдоль пути следования марсохода «Кьюриосити» в кратере Гейл	123
<i>Санникова Т. Н.</i>	
О влиянии различных возмущающих факторов на наблюдаемое положение объекта космического мусора	129
<i>Сирый Р. С., Баранов П. С.</i>	
Возможности применения орбитальных систем компьютерного зрения для мониторинга космического мусора	139
<i>Уварова А. В.</i>	
Рассмотрение полуострова Камчатка как испытательного полигона для лунных миссий на основе физико-механических свойств грунтов	151
<i>Худышев Ю. С.</i>	
О деформации фазового спектра сверхкоротких радиоимпульсов при распространении по межпланетной трассе	155
<i>Царева О. О., Левашов Н. Н., Попов В. Ю.</i>	
Исследование радиационной обстановки во время геомагнитной инверсии	166
<i>Эспиноза Валлес А. С., Николаев П. Н.</i>	
Калибровка бортовых магнитометров на стенде полунатурного моделирования динамики углового движения наноспутника	172

20-я Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования». ИКИ РАН, Москва, 12–14 апр. 2023: сб. тр. / под ред. А. М. Садовского. М.: ИКИ РАН, 2023. 178 с.

20th Young Scientists Conference “Fundamental and Applied Space Researches”. IKI, Moscow, 12–14 Apr. 2023: proc. / ed. A. M. Sadovski. M.: IKI, 2023. 178 p.

Серия «Механика, управление, информатика»

Дизайн обложки: *Давыдов В.М.*
Компьютерная верстка: *Комарова Н. Ю.*

Подписано в печать 24.11.2023
Формат 70×100/16
Усл. печ.-л. 10,35
Тираж 150
Заказ 4206