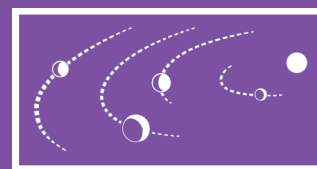




АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК

Исследования Солнечной системы



НАУКА

— 1727 —

СОДЕРЖАНИЕ

Том 58, номер 1, 2024

Комплекс научной аппаратуры посадочной платформы ЭкзоМарс-2022 <i>О. И. Кораблев, Д. С. Родионов, Л. М. Зеленый</i>	3
Особенности проектирования звездных каталогов для датчиков ориентации космических аппаратов <i>Г. А. Аванесов, Я. Д. Эльяшев</i>	32
Ударный кратер со следами тектонических деформаций в южной полярной области Луны <i>А. Т. Базилевский, С. С. Красильников, М. А. Иванова</i>	49
Оценка темпа склоновых процессов и морфологической изменчивости километровых ударных кратеров на Луне <i>К. Кочубей, М. А. Иванов</i>	60
Поведение серы на примере железных шариков из реголита проб АС Луна-24 (Море Кризисов) <i>А. В. Мохов, А. П. Рыбчук, Т. А. Горностаева, П. М. Карташов</i>	72
Короны-источники молодого вулканизма на Венере: топографические особенности и оценки продуктивности <i>Е. Н. Гусева, М. А. Иванов</i>	82
Анализ концентраций водорода в тектонически деформированном ударном кратере в районе южного полюса Луны <i>А. Б. Санин, И. Г. Митрофанов, А. Т. Базилевский, М. Л. Литвак, М. В. Дьячкова</i>	93
Рост Луны за счет тел, выброшенных с Земли <i>С. И. Ипатов</i>	99
Картографирование Гипериона в проекциях трехосного эллипсоида на основе новой опорной сети и цифровой модели рельефа <i>А. И. Соколов, И. Е. Надеждина, М. В. Нырцов, А. Э. Зубарев, М. Э. Флейс, Н. А. Козлова</i>	118
Некоторые аспекты релятивистского вращения тел Солнечной системы на примере Юпитера и его галилеевых спутников <i>В. В. Пашкевич, А. Н. Вершков</i>	129
Памяти Михаила Яковлевича Марова	148

УДК: 520.6; 523.4–1; 523.43; 523.43–1/-8; 523.43–852

КОМПЛЕКС НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ ПОСАДОЧНОЙ ПЛАТФОРМЫ ЭКЗОМАРС-2022

© 2024 г. О. И. Кораблев^{а, *}, Д. С. Родионов^{а, **}, Л. М. Зеленый^{а, ***}

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

* korab@cosmos.ru

** rodionov@cosmos.ru

*** lzelenyi@cosmos.ru

Поступила в редакцию 17.08.2023 г.

После доработки 05.09.2023 г.

Принята к публикации 13.09.2023 г.

Представлены научные задачи, приборы и программа измерений комплекса научной аппаратуры стационарной посадочной платформы “Казачок” проекта Госкорпорации Роскосмос и Европейского космического агентства (ESA) ЭкзоМарс-2022. Научные задачи исследований на посадочной платформе включали долговременный мониторинг климата, исследования состава атмосферы, механизмов подъема пыли и связанных электрических явлений, взаимодействий между атмосферой и поверхностью, распространённости воды в подповерхностном слое, мониторинг радиационной обстановки и изучение внутреннего строения Марса. Для решения этих задач были созданы, испытаны и интегрированы в состав космического комплекса 11 российских и два европейских прибора общей массой 45 кг. В их числе система телевизионных камер, метеоконтакты, комплекс для исследования пыли и связанных с ней электрических явлений, оптические спектрометры и аналитический комплекс для исследования состава атмосферы, микроволновый радиометр, нейтронный и гамма-спектрометры для исследования поверхности, сейсмометр, магнитометры и эксперимент по определению собственного движения Марса для исследования внутреннего строения. Хотя проект ЭкзоМарс-2022 прекращён, научные задачи комплекса не утратили актуальности, а технические решения и разработки, реализованные в научной аппаратуре, представляют интерес и перспективны для дальнейших исследований Марса.

Ключевые слова: Марс, приборы космических исследований, атмосфера, пыль, поверхность, магнитное поле, внутреннее строение, метеорология, дозиметрия

DOI: 10.31857/S0320930X24010011, **EDN:** OIHISN

ВВЕДЕНИЕ

В недавних номерах журнала “Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы” начата публикация серии статей, посвящённых экспериментам, подготовленным для посадочной платформы “Казачок” (Москатиных и др., 2020а; 2020б) проекта Госкорпорации Роскосмос и Европейского космического агентства (ESA) ЭкзоМарс-2022 (Vago и др., 2015а). Запуск автоматической межпланетной станции, состоящей из европейского перелётного модуля, российского десантного модуля с посадочной платформой (ПП) и европейским ровером, планировался в сентябре 2022 г. с космодрома Байконур ракетой-носителем Протон-М с разгонным блоком Бриз-М.

Посадка должна была состояться в 2024 г. в район равнины Оксия (Oxia Planum), которая расположена вблизи экватора в северном полу-

шарии Марса, к востоку от равнины Хриса, на границе высокогорных регионов и низменностей (Vago и др., 2015б; Иванов и др., 2020). Район посадки — эллипс 120×19 км внутри неглубокого кратера. Здесь на поверхность выходят филлосиликаты (глинистые породы), обогащенные железом и магнием. Над ними лежит слой вещества, возможно, вулканического происхождения, который подвергался эрозии на протяжении последних 100 млн лет. Нижний слой, по имеющимся данным, не претерпевал изменений, связанных с температурным режимом или метаморфизмом. Внутри эллипса посадки нет существенных возвышенностей, и он имеет достаточно ровный для посадки рельеф.

По причинам, не связанным с научными или техническими проблемами, весной 2022 г. международная кооперация ЭкзоМарс была разорвана и запуск не состоялся. В то же время научная

аппаратура была полностью подготовлена, испытана и интегрирована на ПП. Научные задачи комплекса не утратили актуальности, а технические решения и разработки, реализованные в научной аппаратуре, представляют интерес и перспективны для дальнейших исследований Марса.

Научные задачи комплекса научной аппаратуры (КНА) и его состав, соответствующий ранней стадии проекта (до 2014 г.), был представлен в публикации (Zelenyi и др., 2015). С тех пор научные задачи и состав КНА претерпели существенные изменения. Прежде всего, было принято решение отказаться от забора образцов грунта при помощи руки-манипулятора и их анализа в бортовой аналитической лаборатории на основе газового хроматографа и масс-спектрометра. Наиболее оптимально было бы решать эту задачу с подвижной платформы — ровера Rosalind Franklin (Vago и др., 2017). Кроме того, состав КНА был дополнен рядом европейских приборов и датчиков, выбранных по результатам международного конкурса, завершившегося в ноябре 2015 г. Были выбраны два европейских прибора — LaRa и HABIT, в состав российских приборов — MAIGRET, MTK и ПК вошли европейские блоки и датчики. Таким образом было сбалансировано взаимное участие

партнеров по международной кооперации в двух сегментах проекта, ровера Rosalind Franklin с преимущественно европейской научной аппаратурой и ПП “Казачок” — с преимущественно российской. Состав научной аппаратуры ровера и ПП представлен на рис. 1. Фотография ПП с установленным ровером в процессе сборки приведена на рис. 2. Приборы КНА в основном размещены на уровне палубы ПП справа и слева от ровера.

Цель серии публикаций и настоящей статьи — представить состояние КНА по итогам завершения разработки и испытаний ПП в 2022 г. В состав КНА входило 13 приборов (36 блоков) общей массой (включая кабельную систему) ≤45 кг.

К моменту написания статьи в “Астрономическом вестнике” (2022–2023 гг.) опубликовано семь статей, посвященных приборам и датчикам КНА ПП. Еще шесть статей с достаточно полным описанием приборов КНА опубликованы в других изданиях (ссылки на соответствующие публикации приведены в табл. 2). К сожалению, современные и подробные описания трех приборов и главного метеоконспекса КНА пока отсутствуют. Мы надеемся, что они появятся в ближайшее время, а данная публикация сможет частично компенсировать недостаток информации.

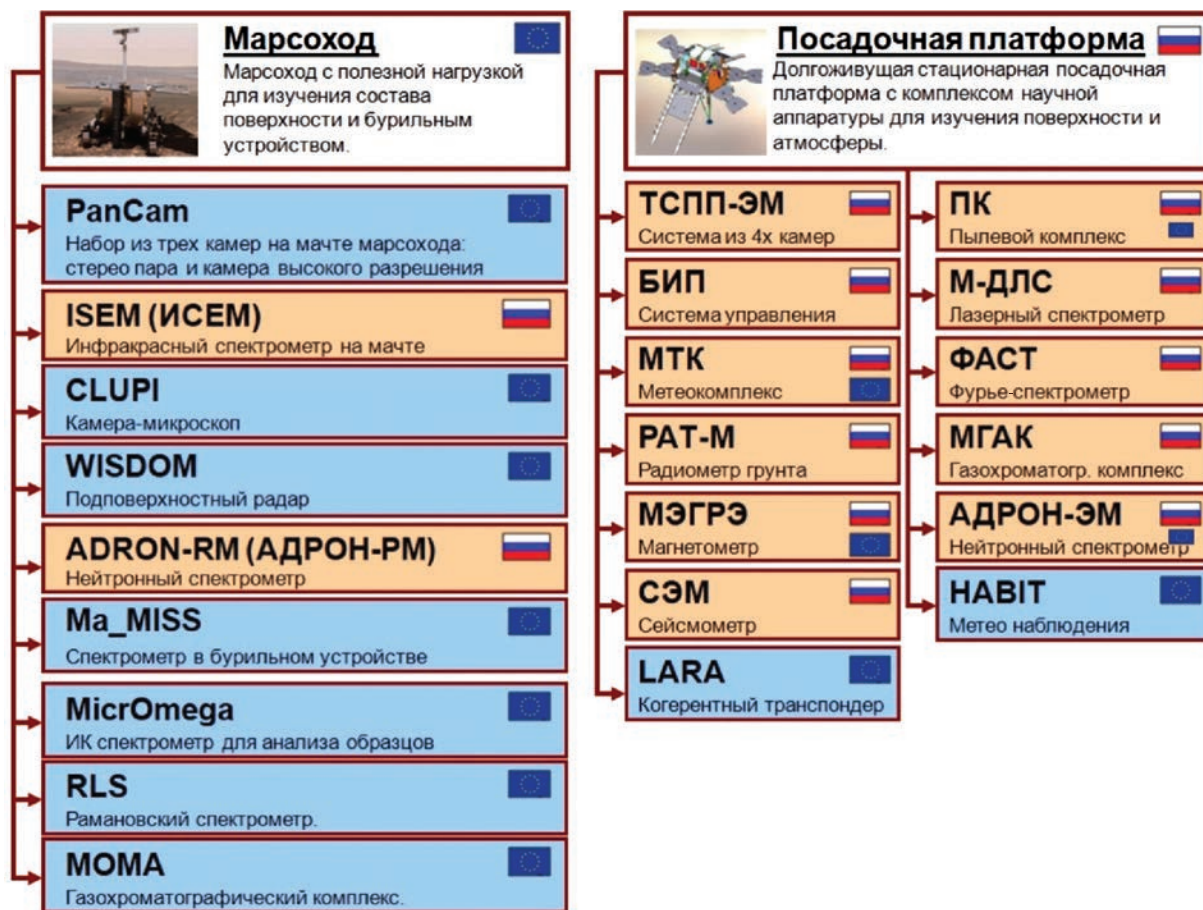


Рис. 1. Научные приборы ровера Rosalind Franklin и посадочной платформы “Казачок”.

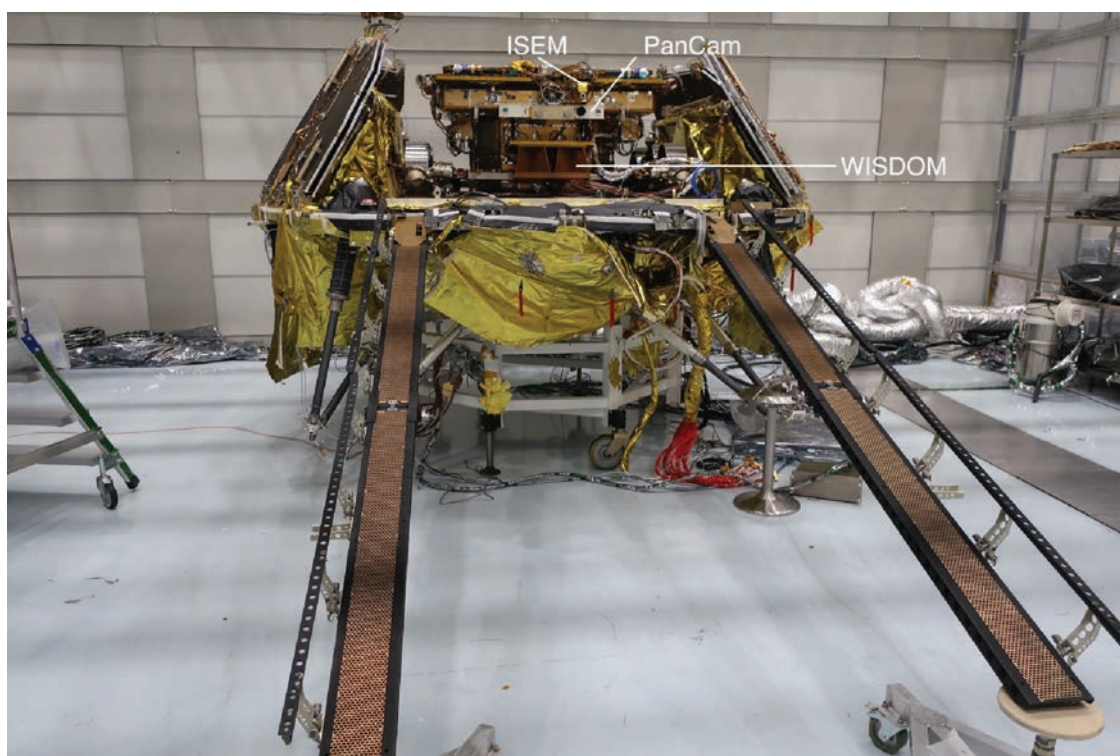


Рис. 2. Посадочная платформа и ровер в процессе сборки на предприятии TAS-I (Турин, Италия). Отмечены оптические блоки приборов ровера PanCam и ISEM и антенна радара WISDOM. Фото ИКИ РАН.

Научные задачи КНА обсуждаются в разделе “Научные задачи”, краткие сведения о приборах комплекса собраны в разделе “Научные эксперименты...”, примеры сценариев измерений комплекса приведены в разделе “План проведения...”.

НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ

Неподвижные посадочные платформы неоднократно и успешно использовались в истории исследований Марса: проекты NASA Viking-1, -2, Pathfinder, Phoenix, InSight. До появления подвижных платформ они выполняли, прежде всего, исследовательские и, в меньшей степени, мониторинговые задачи (Viking, Phoenix). В последние годы акцент смещается в сторону мониторинга (InSight). Неподвижная платформа — несомненно, лучший вариант для проведения метеорологического и геофизического мониторинга. При этом ряд важнейших исследовательских задач, связанных с исследованиями атмосферы и взаимодействий атмосфера—поверхность, также целесообразно решать на неподвижной платформе. Объединение задач исследований поверхности и атмосферы, даже с использованием самой совершенной аппаратуры, приводит к неизбежным компромиссам при планировании экспериментов, снижению приоритета атмосферных исследований. В то же время в исследовании состава

поверхности, обитаемости, поисках признаков жизни, дистанционно или путем забора и анализа образцов грунта, подвижность, возможность выбора места для анализов являются ключевыми преимуществами. Эти соображения принимались во внимание при формулировке научных задач и выборе научной аппаратуры ПП “Казачок” и разделения задач между ПП и ровером Rosalind Franklin.

При планировании миссии (Zelenyi и др., 2015), ставились следующие научные задачи ПП: (1) длительный мониторинг климатических условий на поверхности Марса в месте посадки; (2) изучение состава марсианской атмосферы с поверхности; (3) изучение взаимодействия атмосферы и поверхности; (4) изучение состава поверхности; (5) изучение внутреннего строения Марса; (6) мониторинг радиационной обстановки и других факторов. С учетом упомянутых изменений акцентов, научные задачи исследований на посадочной платформе к моменту ее готовности можно сформулировать следующим образом:

1. Долговременный мониторинг климата.
2. Исследования состава атмосферы.
3. Исследования механизмов подъема пыли и связанных электрических явлений.
4. Исследование взаимодействий между атмосферой и поверхностью.
5. Изучение распространенности воды в подповерхностном слое.

- 6. Мониторинг радиационной обстановки.
 - 7. Изучение внутреннего строения Марса.
- Список научных экспериментов и их соответствие научным задачам приведены в табл. 1. Порядок экспериментов в таблице приблизительно соответствует порядку научных задач.

Таблица 1. Соответствие научных задач ПП ЭкзоМарс и научных экспериментов

Приборы	Научные задачи					
	Мониторинг климата	Состав атмосферы	Пыль и атмосферное электричество	Атмосфера/поверхность	Подповерхностная вода	Радиационная обстановка
ТСПП-ЭМ Телевизионная система	×		×	×		
МТК Метеокомплекс	•	×	×	×		
НАВИТ Метеокомплекс	•	×	×	×		
ПК пылевой комплекс	×		•	×		
ФАСТ Фурье-спектрометр	×	•	×	×		
МГАК газоаналитический комплекс		•		×		
М-ДЛС лазерный спектрометр		×		•		
РАТ-М радиометр	×		×	•	×	
АДРОН-ЕМ Нейтронный и гамма-спектрометр с активацией; дозиметр				×	•	×
MAIGRET, ARM			×		×	•
Магнитометры						•
СЕМ Сейсмометр						•
LARA радиомаяк						•

Примечание: • — основная научная задача, × — дополнительные научные задачи.

Научные задачи, связанные с атмосферой

Долговременный мониторинг климата, изучение состава атмосферы и явлений, связанных с атмосферной пылью, являются ключевыми и тесно связанными научными темами ПП ЭкзоМарс. Они распадаются на следующие основные составляющие: (1) регулярный долговременный почасовой мониторинг основных метеорологических параметров (температура, давление, скорость и направление ветра, запыленность и влажность), создающий основу для настройки и валидации моделей общей циркуля-

ции атмосферы Марса; (2) регулярные измерения атмосферных газов, включая инертные, и их изотопологов для выяснения суточной и сезонной динамики состава атмосферы вблизи поверхности Марса и взаимодействия атмосферы с грунтом, выяснения изотопных соотношений летучих элементов в различных резервуарах; (3) изучение структуры атмосферы и динамики пограничного планетного слоя при спуске десантного модуля и с поверхности при помощи дистанционных методов; исследование динамики приповерхностного слоя атмосферы; (4) исследование механизма подъема и процессов переноса пыли, включая измерения импульса пылевых частиц вблизи поверхности одновременно с их размерами и регистрацией связанных электрических явлений.

В составе аппаратуры многочисленных аппаратов, достигших поверхности Марса, было несколько полноценных метеостанций: Viking Lander (VL) –1, –2 (Chamberlain и др., 1976), Phoenix (Taylor и др., 2008), роверы Curiosity и Perseverance (Gómez-Elvira и др., 2012; Rodriguez-Manfredi и др., 2021) и платформа Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport (InSight) (Spiga и др., 2018). На Mars Pathfinder и ровере Zhurong также присутствовали элементы метеокомплексов (Seiff и др., 1997; Liu и др., 2022). Особую ценность представляют длинные ряды наблюдений, и до недавних пор записи давления с VL-1, -2 (Hess и др., 1980) были главным средством калибровки моделей общей циркуляции атмосферы Марса. Богато оснащенная разнообразными метеодатчиками с большой степенью дублирования, ПП ЭкзоМарс обеспечила бы достойный вклад в исследования марсианской метеорологии.

Регулярные измерения малых и обильных составляющих атмосферы Марса и их изотопологов дают понимание деталей основных климатических циклов Марса – углекислоты, пыли и воды. До 30% основной составляющей атмосферы, CO₂, зимой конденсируется на полярных шапках, вызывая соответствующие колебания давления и изменения относительного содержания неконденсирующихся составляющих (Ar, N₂, CO). Вода, представленная в атмосфере Марса в следовом количестве, играет тем не менее ключевую роль в химических превращениях в атмосфере, предотвращая фотолитическое разрушение CO₂, образует конденсационные облака, регулирующие нагрев атмосферы, и на длительных масштабах времени обеспечивает миграцию ледников по поверхности Марса (Montmessin и др., 2017). Адсорбция и десорбция воды в верхнем слое грунта – слабо изученный процесс, по-видимому, выполняющий в водяном цикле роль трения (Jakosky

и др., 1997; Navarro и др., 2014). Орбитальные аппараты вокруг Марса — Mars Express (MEx), Mars Reconnaissance Orbiter (MRO), ExoMars Trace Gas Orbiter (TGO) — ведут регулярный мониторинг основных и хорошо известных малых составляющих (CO_2 , CO , H_2O , O_3) дистанционными методами (см., например, Smith и др., 2017; 2021; Knutsen и др., 2022; Lefèvre и др., 2021). Измерения на поверхности с помощью спектроскопической и газоаналитической аппаратуры (М-ДЛС, МГАК, датчики озона SIS, HABIT) позволили бы надежно привязать дистанционные измерения к поверхности, оценить временные масштабы суточного и сезонного взаимодействия атмосфера—поверхность.

Измерение изотопных отношений водорода, кислорода и углерода в водяном паре и CO_2 в процессе обмена атмосфера—поверхность позволит, помимо уточнения их значений, известных в основном по результатам дистанционных измерений (например, Alday и др., 2021a; 2021b) и единичным измерениям на поверхности (Webster и др., 2013), выявить различия между атмосферным и поверхностным резервуарами летучих. Наконец, измерения инертных газов и их изотопов имеют очень высокий приоритет: по ним можно судить о далекой истории атмосферы и летучих на Марсе, а измерения на поверхности были проведены только на ровере Curiosity (или Mars Science Laboratory, MSL) (Mahaffy и др., 2013; Wong и др., 2013; Atreya и др., 2013; Conrad и др., 2016).

Исследование атмосферы в процессе спуска десантного модуля — необходимая задача проекта. Она тесно связана с техническими проблемами входа спускаемой капсулы в атмосферу и спуска десантного модуля. Значения плотности верхней атмосферы могут кратно отличаться от моделей, и неудивительно, что более двух третей посадок на Марс закончились неудачей. Нам известно 11 атмосферных профилей, измеренных в процессе спуска: Марс-6 (Авдеевский и др., 1975), VL-1, -2 (Seiff, Kirk, 1977), Mars Pathfinder, (Magalhães, 1999), Mars Exploration Rovers (Opportunity и Spirit; MER; Withers, Smith, 2006), Phoenix (Blanchard, Desai, 2011), MSL (Holstein-Rathlou и др., 2016), ExoMars-2016 Schiaparelli (Aboudan и др., 2018), InSight (Karlgaard и др., 2021) и Perseverance (Karlgaard и др., 2023). Для реконструкции спускаемого профиля в проекте были предусмотрены измерения замедления в процессе торможения спускаемой капсулы с использованием данных инерциального блока космического аппарата, эксперимента AMELIA (Ferri и др., 2019), и при помощи акселерометров МТК. Измеряется плотность атмосферы, из которой можно получить давление и температуру в гидростатическом приближении. Из данных

акселерометра может быть получена также горизонтальная скорость ветра. После раскрытия парашюта измерения температуры и давления планировались при помощи датчиков МТК.

Мониторинг и исследование планетарного пограничного слоя (ППС) также относится к числу задач, имеющих высокую значимость для дальнейшего освоения Марса и перспективных пилотируемых экспедиций (Petrosyan и др., 2011; Read и др., 2017). Динамика атмосферы в приповерхностном слое тесно связана со следующей задачей: измерения ветра и понимание механизмов, определяющих приповерхностные ветра, лежащие в основе исследования механизмов подъема и переноса пыли, инициации крупномасштабных пылевых событий. Состояние ППС в конкретных локациях уже неплохо описываются мезомасштабными динамическими моделями (см., например, Toigo и др., 2002). Для исследований пограничного слоя решающее значение имеют данные МТК и ПК. Эти приборы, а также система камер помогут отслеживать еще один специфический элемент климата Марса — локальные вихри или пылевые дьяволы (см., например, Kurgansky, 2022), участвующие в подъеме пыли (Neakrase и др., 2016), и, вероятно, создающие сильные электрические поля и разряды (Renno и др., 2003). В условиях пыльной бури на Земле возникают электрические поля ~ 100 кВ/м. Аналогичные поля на Марсе превысят напряженность пробоя (~ 20 кВ/м), поэтому следует ожидать разрядов, имеющих, вероятно, сильное влияние на химические превращения в атмосфере и даже на обитаемость поверхности (Atreya и др., 2006; Kok, Renno, 2009). Регистрировать такие разряды могли MAIGRET и ПК. В ходе исследований Марса посадочными аппаратами и роверами детальное описание приповерхностного профиля атмосферы получено лишь однажды при помощи Фурье-спектрометра Mini-TES/Mars Exploration Rovers (MER) (Smith и др., 2006). Эксперимент ФАСТ позволил бы получать такие данные регулярно, дополняя исследования с МТК и ПК.

Как уже упоминалось, пылевой цикл относится к основным атмосферным циклам Марса (Kahre и др., 2017). В отличие от Земли, где тепловой баланс атмосферы и, в конечном итоге, поверхности определяется преимущественно газовым поглощением (водяным паром), в слабой атмосфере Марса эту роль выполняет пыль. Она поглощает приходящее солнечное излучение в видимом диапазоне и задерживает уходящее от планеты тепловое излучение (в полосе поглощения силикатов на 9 мкм). Современная модель оптических свойств пылевых частиц, основанная главным образом на дистанционных наблюдениях, дана в работе (Wolff и др., 2009). Более

жаркое лето в южном полушарии, когда Марс ближе к Солнцу, усиливает циркуляцию и запыленность атмосферы, разогревая ее, что, в свою очередь, усиливает подъем пыли (Daerden и др., 2015). Такая положительная обратная связь периодически, в среднем один раз за три марсианских года, приводит к глобальным пылевым бурям (ГПБ), охватывающим почти все тропические и средние широты (см., например, Guzewich и др., 2020). Исторически модели общей циркуляции, описывающие климат Марса, использовали доступные измерения содержания пыли в атмосфере (Forget и др., 1999; Hartogh и др., 2005; Wilson, Hamilton, 1996). При наличии регулярных наблюдений с орбитальных и посадочных аппаратов полной оптической толщины пыли и вертикальных профилей пыли (Montabone и др., 2015), Martian Climate Database (MCD) неплохо воспроизводит состояние атмосферы в течение конкретного марсианского года или для ряда типовых сценариев. Другой класс моделей пытается параметризовать процессы подъема пыли с поверхности и описать ее транспорт циркуляционными потоками (Kahre и др., 2023; Neary, Daerden, 2018; Newman, Richardson, 2015). Параметризации опираются в основном на теоретические представления и натурные измерения в аэродинамических трубах, имитирующие условия на Марсе (см., например, Martin, Kok, 2017; Sagan, Bagnold, 1975), в том числе даже гравитацию (Musiolik и др., 2018). Хотя этому вопросу уделяется колоссальное внимание, прямые данные о сальтации, переносе, электризации пыли и разрядах в реальных условиях Марса практически отсутствуют. Недостаточное понимание процессов подъема пыли и ее переноса у поверхности приводит к тому, что самосогласованные модели пока не в состоянии воспроизвести условия возникновения ГПБ. Совместная работа ПК и МТК впервые позволила бы детально и комплексно изучить процессы подъема пыли с поверхности Марса. Дополнительно информацию о пылевых явлениях и свойствах пыли можно получить по наблюдениям с камерами ТСПП, из мониторинга электромагнитных полей MAIGRET и комбинируя данные ФАСТ в ИК-диапазоне с орбитальными измерениями (Wolff и др., 2006).

Исследования взаимодействия атмосфера–поверхность

Исследование взаимодействий между атмосферой и поверхностью тесно связано с атмосферной группой задач и примыкает к исследованиям поверхности. К таким взаимодействиям относятся уже упомянутые механизмы подъема пыли, ее обратное воздействие на поверхность и исследо-

вание пограничного слоя атмосферы. В таких исследованиях главную роль будут играть эксперименты МТК, ПК, ТСПП.

Другое направление основано на мониторинге циклов обмена летучих компонентов между атмосферой и поверхностью. В частности, измеряя содержание H_2O и отношений изотопов D/H , $^{18}O/^{17}O/^{16}O$, $^{13}C/^{12}C$ в H_2O и CO_2 вблизи поверхности в разное время суток в течение сезонного цикла можно не только уточнить физические и химические процессы, идущие между поверхностью и атмосферой, но и сделать выводы об обитаемости Марса в прошлом и настоящем (см., например, Franz и др., 2020). Ведущая роль в этих исследованиях отводилась лазерному спектрометру М-ДЛС и аналитическому комплексу МГАК. Влажность атмосферы и гидратация верхнего слоя грунта могла быть оценена датчиком влажности МТК и прибором АДРОН-ЕМ, соответственно. Вспомогательная информация о физических условиях в атмосфере, на поверхности и в верхнем слое грунта могла быть получена датчиками МТК и НАВИТ, ИК-спектрометром ФАСТ и микроволновым радиометром РАТ-М.

Изучение распространенности воды в приповерхностном слое

Вода в приповерхностном слое марсианского грунта может находиться в виде льда, в адсорбированной форме между гранулами реголита или в связанной форме в составе минералов. Наличие воды вблизи места посадки может свидетельствовать как о перспективности локации с точки зрения обитаемости и дальнейшего освоения космическими средствами, так и о геологическом прошлом планеты: гидратированные минералы могли сформироваться в водоемах раннего Марса. Информация о распределении воды может быть получена из данных радарного зондирования, однако за пределами полярных шапок, в низких и средних широтах, основным источником служат данные нейтронного мониторинга. Длительные орбитальные измерения нейтронного потока от Марса, индуцированного космическим излучением, показали наличие ядер водорода в верхних (1–2 м) слоях реголита, соответствующие массовой доле воды от единицы до 20–40% (см., например, Malakhov и др., 2022). Обнаружение льда в экваториальных широтах вероятно лишь в глубоких каньонах (Mitrofanov и др., 2022a). По данным нейтронного каротажа с активацией при помощи генератора нейтронных импульсов на MSL, массовая доля воды вдоль трассы марсохода составляла от ≤ 0.5 до $\geq 6\%$ (Mitrofanov и др., 2022b).

В проекте планировались измерения гидратации поверхности Марса на глубину 1–2 м при

помощи нейтронного детектора АДРОН-ЕМ. В первые дни после посадки прибор должен был работать совместно с ADRON-RM на ровере Rosalind Franklin (Mitrofanov и др., 2017). По мере удаления ровера от платформы и в сочетании с данными геофизического радара ровера (Ciarletti и др., 2017) такие измерения позволили бы получить приоритетную информацию о вертикальном распределении воды во всех ее формах. Влияние изменений температуры на вертикальное распределение воды предполагалось выяснить, используя оценки суточного и сезонного хода температуры на трех уровнях (до ~1 м) под поверхностью при помощи радиометра РАТ-М.

Прибор АДРОН-ЕМ также должен был дать информацию об элементном составе основных породообразующих и радиогенных элементов в ближайшей окрестности места посадки. Параллельно измеряется плотность грунта. Таким образом, эксперимент АДРОН-ЕМ мог бы выполнить научную задачу, сформулированную для первоначальной конфигурации КНА: изучение состава поверхности. Дополнительные данные о характере пород вблизи посадочного модуля можно получить из оценок электропроводности грунта магнитометрами MAIGRET и AMR.

Мониторинг радиационной обстановки

Радиационная обстановка на поверхности Марса, как современная, так и в прошлом, имеет решающее значение для обитаемости и возможности сохранения жизни на планете. Она влияет на любые потенциальные формы жизни, которые могли выжить под землей (см., например, Pavlov и др., 2010). Излучения высоких энергий и связанные с ними риски для здоровья человека во многом определяют планирование будущих пилотируемых полетов на Марс.

Марс, его верхняя атмосфера, взаимодействует с двумя видами излучения высоких энергий: галактическими космическими лучами (ГКЛ) и энергичными частицами солнечного ветра. Мониторинг этих излучений на орбите вокруг Марса ведет дозиметр Liulin-MO в составе прибора FRED/TGO (Mitrofanov и др., 2018; Semkova и др., 2021). Из-за слабости атмосферы ГКЛ и частицы солнечного ветра достигают поверхности, где производят вторичные частицы, в том числе нейтроны и гамма-кванты. Вторичные частицы образуются и в результате взаимодействия с атмосферой. Таким образом, радиационная обстановка на поверхности существенно отличается от обстановки на орбите. Первые и единственные прямые измерения радиации на поверхности Марса проведены с помощью прибора RAD на Curiosity (Hassler и др., 2012; 2014; Ehresmann

и др., 2023). На посадочной платформе ЭкзоМарс мониторинг радиационной обстановки планировался с помощью дозиметрического канала Lulin-MO прибора АДРОН-ЕМ и детекторов нейтронов и гамма-квантов самого прибора АДРОН-ЕМ.

Изучение внутреннего строения Марса

Исследование внутреннего строения Марса имеет прямое отношение к фундаментальной проблеме формирования и ранней эволюции планет Солнечной системы. Уточнение моделей внутреннего строения позволяет оценить долю летучих компонентов, собранных планетой на ранних этапах аккреции и интенсивной бомбардировки (Zharkov, 1996). С точки зрения аналогий между Землей и Марсом, не менее важны процессы дифференциации и дальнейшая эволюция недр. Марс — единственная планета, похожая на Землю, которую можно длительно изучать геофизическими методами, и неподвижные станции на его поверхности, лучше несколько, являются оптимальной платформой для таких исследований (см., например, Lognonné и др., 2000).

Основным методом исследования внутреннего строения служит сейсмометрия. Проведение таких измерений на поверхности другой планеты — сложная техническая задача. Помимо высокой чувствительности и широкой полосы частот, сейсмометр на Марсе должен быть защищен от ветра, колебаний температуры и давления, изолирован от влияния самой платформы. После неоднозначных результатов сейсмического эксперимента Viking Landers (1976–1982) (Anderson и др., 1976) и попытки на Марс-96 (Linkin и др., 1998; Lognonné и др., 1998) потребовалось более 20 лет для реализации специализированной платформы InSight (2018–2022). Вакуумированный сейсмометр SEIS, размещенный на поверхности отдельно от посадочного аппарата InSight под серьезной защитой от атмосферных влияний (Lognonné и др., 2019), зарегистрировал несколько значительных сейсмических событий и множество мелких (см., например, Giardini и др., 2020; Kawamura и др., 2023). Получен богатый материал о мощности и свойствах коры (Knapmeyer-Endrun и др., 2021), свойствах мантии (Huang и др., 2022), получен отклик от ядра (Stähler и др., 2021).

Исследования недр Марса можно было бы расширить, используя еще одну геофизическую станцию (см., например, Gudkova и др., 2014). Регистрация сейсмических событий одновременно с двух точек поверхности позволило бы получить важную информацию о неоднородности коры и мантии, перейти от профилей к 3D-структуре, восстановить которую можно в области, сравнимой с расстоянием между станциями. При этом

допустимо применение прибора даже с более скромными параметрами, нежели SEIS/InSight. Именно такая задача ставилась перед сейсмометром СЭМ ПП ЭкзоМарс, запуск которого изначально планировался на 2018 г. одновременно с InSight.

Анализ доплеровского сдвига при двусторонней радиосвязи между посадочным модулем на Марсе и наземными станциями позволяет определить параметры ориентации и вращения Марса, что дает возможность уточнить информацию о внутренней структуре, в частности, о ядре. Целевыми параметрами являются вариации скорости вращения (или продолжительности суток) и ориентации оси вращения (прецессия и нутация). Ранее такие эксперименты проводились на посадочных модулях КА Viking (Yoder, Standish, 1997) и Mars Pathfinder (Folkner и др., 1997). Попытки ограничить орбитальные параметры делались также по доплеровскому отслеживанию орбитальных аппаратов и роверов (Kuchynka и др., 2014; Konopliv и др., 2016; 2020). Эксперимент LaRa, когерентный транспондер X-диапазона, предназначался для отслеживания положения посадочного модуля с высокой точностью (Dehant и др., 2020; Le Maistre и др., 2020; Péters и др., 2020).

Магнитное поле связано с внутренней структурой планеты и с эволюцией ее атмосферы. Остаточная намагниченность коры Марса, свидетельство древнего магнитного поля, была впервые картирована MGS с 400-километровой орбиты (Асуфа и др., 1999) и дополнена измерениями с эллиптической орбиты MAVEN

(Connerney и др., 2015). Модели позволяют экстраполировать величину магнитного поля до поверхности (см., например, Langlais и др., 2019). К настоящему времени измерения магнитного поля на поверхности проведены на посадочных аппаратах InSight (Johnson и др., 2020) и ровере Zhurong (Liu и др., 2022). Поле, измеренное на месте посадки InSight, оказалось на порядок сильнее, чем предсказывала спутниковая модель (Johnson и др., 2020). Магнитные поля коры взаимодействуют с солнечным ветром, создавая переходные поля и токи в верхних слоях атмосферы Марса. На поверхности наблюдались суточные вариации, результат влияния ионосферных токов, и более высокочастотные изменения, происхождение которых пока не выяснено (Mittelholz и др., 2020). Для объяснения природы этих эффектов и древнего динамо необходимо больше данных о поверхностном магнитном поле. Кроме того, переменные поля, в сочетании с геоморфологическими и сейсмическими данными, можно использовать для исследования электропроводности марсианских недр. Измерения напряженности и направления магнитного поля на месте посадки ЭкзоМарс планировалось при помощи магнитометров MAIGRET и AMR.

НАУЧНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ
ПОСАДОЧНОЙ ПЛАТФОРМЫ

Список научных приборов ПП ЭкзоМарс приведен в табл. 2. Их порядок соответствует табл. 1.

Таблица 2. Научные приборы КНА ПП ЭкзоМарс-2022

Прибор/ Подсистема	Принцип действия	Основные измерения	Руководитель, изготовитель	Масса/ габариты/ потребление/ информативность	Ссылка
ТСПП-ЭМ (TSPP)	Четыре цветные камеры, поле зрения каждой 115°×115°	Панорама поверхности, переменные явления	И.В. Полянский ИКИ РАН	Четыре камеры и блок электроники 5.3 кг, 12.5 Вт	Абрамов и др. (2023)
МТК (METEO)	Метеорологические датчики, датчики оптической плотности, акселерометр, лидар	Мониторинг основных параметров атмосферы, измерения на спуске (см. табл. 3)	О.И. Кораблев ИКИ РАН, Финляндия, Испания	Семь блоков 5.2 кг	См. табл. 3
НАВИТ	Датчики температуры атмосферы, поверхности, УФ-излучения	Оценка возможности образования жидких рассолов, обитаемости поверхности	J. Martín-Torres Швеция	Два блока 0.8 кг	Martín-Torres и др. (2020)
ПК	Ударные датчики пыли, нефелометр, датчики электрического поля	Свойства пыли у поверхности, подъем пыли, ее электризация	А.В. Захаров ИКИ РАН, Италия, Франция	Два блока 0.8 и 0.5 кг; штанга 0.3 кг 10 Вт 4 Мб/сол	Захаров и др. (2022)

Таблица 2. Окончание

Прибор/ Подсистема	Принцип действия	Основные измерения	Руководитель, изготовитель	Масса/ габариты/ потребление/ информативность	Ссылка
ФАСТ (FAST)	Фурье-спектрометр, анализ собственного излучения атмосферы и спектра Солнца через атмосферу (1.7–17 мкм)	Состав атмосферы, планетный пограничный слой	А.В. Шакур ИКИ РАН	3.4 кг	Shakun и др. (2017)
МГАК (MGAK)	Анализ атмосферных проб газовым хроматографом и масс-спектрометром	Состав атмосферы, включая инертные газы	М.В. Герасимов ИКИ РАН	Два блока 6.9 кг	Gerasimov и др. (2014)
М-ДЛС (M-DLS)	Анализ атмосферных проб лазерным спектрометром	Суточный и сезонный цикл водяного пара, CO ₂ , их изотопов	А.В. Родин МФТИ, ИКИ РАН	3 кг 35×19×11 см ³ 10–12 Вт 0.5 Мб/сол	Rodin и др. (2020)
RAT-M (RAT-M)	Микроволновый радиометр в трех полосах (6–15 ГГц)	Температура грунта до глубины 1 м	Д.П. Скулачев ИКИ РАН	0.6 кг 9.5×9.5×3 см ³ +антенны 2.5 Вт 0.01 Мб/сол	—
АДРОН-ЕМ (ADRON-EM)	Нейтронный и гамма-спектрометр с активацией нейронными импульсами, дозиметр	Мониторинг гидратации поверхности. Содержание породообразующих и радиогенных элементов. Мониторинг накопленной дозы	И.Г. Митрофанов ИКИ РАН, Болгария	Три блока 5.9 кг	Mokrousov и др. (2022)
МЭГРЭ (MAIGRET)	Феррозондовый магнитометр (100 Гц–20 кГц)	Напряженность и направление магнитного поля	А.В. Скальский ИКИ РАН, Чехия	Три блока 2.9 кг	Kolmasova и др. (2017)
AMR	Магниторезистивный датчик на выносной штанге	Напряженность и направление магнитного поля	М. Díaz Michelena, Испания	0.35 кг	Díaz Michelena и др. (2023)
СЭМ (SEM)	Трехосный сейсмометр	Поперечные и продольные колебания поверхности	А.Б. Манукин, ИФЗ РАН, ИКИ РАН	6 кг 25×25×35 см ³ 3.5 Вт 1 Мб/сол	Манукин и др. (2021)
LaRa	Когерентный транспондер X-диапазона	Прецессия и нутация Марса	V. Dehant, Бельгия	2.15 кг 25×8×8 см ³ +антенны 42 Вт 0 Мб/сол	Dehant и др. (2020)
БИП (BIP)	Блок интерфейсов и памяти	Управление приборами и сбор научной информации	К.В. Ануфрейчик ИКИ РАН	2.5 кг 22×19×6.6 см ³ 9 Вт <80 Мб/сол	—

Телевизионная система посадочной платформы Экзомарс ТСПП-ЭМ

Система камер ТСПП-ЭМ (TSPP) включает пять блоков, четыре камеры КАМ-О/ЭМ и устройство сбора, хранения и обработки информации БСД/ЭМ (Абрамов и др., 2023). Аппарату-

ра изготовлена в ИКИ РАН. Камеры установлены по углам посадочной платформы на высоте около 1 м. В азимутальной плоскости их оптические оси разнесены на 90°, а поля зрения (115°×115°) перекрываются, что позволяет обеспечить полный обзор линии горизонта. Начиная с удаления

в несколько метров формируется полная круговая панорама места посадки вокруг ПП. Было предусмотрено построение видеоряда изображений, в частности, съемка в процессе посадки, съемка съезда ровера с ПП или регистрация быстропротекающих явлений, таких как пылевые вихри.

Максимальное разрешение фотодетекторов камер 2048×2048 элементов изображения с возможностью кадрирования (2048×512) и бинирования (2×2) для уменьшения объема передаваемой информации. Разрядность получаемых изображений — 14 или 12 бит. Изображения могут быть получены в цвете на трех длинах волн: 450, 550 и 650 мкм (RGB) или в панхроматическом режиме. Глубина резкости — от 1 м до бесконечности. Камеры имеют измерительное качество как в отношении фотометрических, так и угловых характеристик.

Основные научные задачи, решаемые ТСПП-ЭМ, могут быть сформулированы следующим образом: в отношении поверхности Марса — геоморфологический анализ участка местности вокруг места посадки ПП с использованием панорам, полученных на поверхности и на заключительных участках спуска десантного модуля. Минералогический анализ участков поверхности через измерение спектральной яркости (цветности). В отношении атмосферы Марса — анализ свойств атмосферного аэрозоля, по наблюдениям углового распределения яркости неба, с возможностью разделить пылевую и конденсационную составляющие. Наблюдения переноса пыли по поверхности для понимания процессов сальтации. Регистрация пылевых вихрей и оценка их характеристик, размеров, скорости передвижения. Атмосферные наблюдения ТСПП-ЭМ позволили бы дополнить и расширить исследование в экспериментах МТК и ПК.

Важнейшей задачей ТСПП-ЭМ является информационная и техническая поддержка всего

проекта. Трудно представить посадку на поверхность Марса без возможности получения визуальных изображений.

Метеорологические комплексы МТК и НАВИТ

Основной метеокомплекс посадочной платформы, МТК (или МЕТЕО), состоит из двух частей: комплекса датчиков для измерений преимущественно в процессе спуска десантного модуля (МТК-Л) и, собственно, метеокомплекса с датчиками температуры, давления, ветра, влажности, пыли, освещенности для измерений на поверхности, многие из которых размещены на метеостанге (МЕТЕО Boom). Каждая часть имеет собственную систему управления и сбора информации. Кроме того, для оптимизации управления небольшими блоками в состав МТК были включены элементы, напрямую не связанные с метеорологией, — микрофон для записи звуков Марса и датчик магнитного поля AMR. В итоге МТК представляет собой сложный комплекс из многих датчиков и подсистем — в общей сложности 12 блоков — с международным участием. За интеграцию и испытания комплекса отвечал ИКИ РАН.

Прибор НАВИТ (HabitAbility: Brine Irradiation and Temperature) являлся частью европейской полезной нагрузки ПП. Состоящий из трех блоков, он был разработан и изготовлен шведской компанией Omnisys и Технологическим университетом г. Люлеа (Luleå University of Technology). Хотя главная цель эксперимента была сформулирована как оценка современной обитаемости места посадки (Martín-Torres и др., 2020), основой прибора являются датчики, частично пересекающиеся с МТК. Состав датчиков блоков МТК и НАВИТ детализирован в табл. 3.

Таблица 3. Датчики и подсистемы приборов МТК и НАВИТ

Подсистема	Принцип действия	Назначение	Изготовитель	Ссылка
МТК-Л	Три блока	Измерения на спуске и на поверхности	ИКИ РАН	
БД	Трехосный акселерометр	Измерение замедления и угловой скорости ДМ. Восстановление плотности атмосферы до сброса аэродинамического экрана	ИКИ РАН	Липатов и др. (2023а)
БД	Мембранный датчик давления	Измерение давления (10^{-4} –12 мбар) во время спуска и на поверхности	ИКИ РАН	Липатов и др. (2023б)
	Датчик температуры, термосопротивление	Измерение температуры ($\pm 0.1^\circ\text{C}$, отн. точность 0.01°C) во время спуска и на поверхности	ИКИ РАН	Липатов и др. (2023б)
БДА	Лидар	Измерение профиля аэрозоля с поверхности (0–5 км)	ИКИ РАН	Липатов и др. (2023в)

Таблица 3. Окончание

Подсистема	Принцип действия	Назначение	Изготовитель	Ссылка
БДВА		Блок управления и сбора информации МТК-Л	ИКИ РАН	
Метеоштанга МТК		Развертывание метеодатчиков на высоте до 1 м над ПП. Измерения на поверхности	ИКИ РАН	—
Три датчика температуры	Термосопротивления и термопары на трех уровнях (125, 150, 175 см от поверхности)	Мониторинг температуры атмосферы ($\pm 0.2^\circ\text{C}$, отн. точность 0.01°C)	ИКИ РАН	Липатов и др. (2023б)
Датчик ветра	Ионизационный анемометр на метеоштанге	Измерение скорости и направления ветра	ИКИ РАН	Евланов и др. (2015)
Датчик освещенности SIS'2022	Измерение интенсивности солнечного излучения в диапазоне 0.2–1 мкм (на метеоштанге)	Оценка УФ-излучения, содержания озона, оптической плотности атмосферы	INTA (Испания)	Jimenez-Martín и др. (2023)
Датчик влажности МЕТЕО-Н	Датчик Humicap® (на метеоштанге)	Измерение влажности	FMI (Финляндия)	—
Датчик давления МЕТЕО-Р	Датчик Barosap® (в блоке БУ МТК)	Мониторинг давления	FMI (Финляндия)	—
Датчик пыли ODS	Измерение освещенности в течение дня на двух длинах волн (маскированные фотодиоды)	Измерение оптической плотности атмосферы	ИКИ РАН	Хоркин и др. (2023)
Датчик пыли DS'20	Нефелометр ИК-диапазона (2.3 мкм)	Оценка концентрации крупных частиц пыли у поверхности	INTA (Испания)	—
Микрофон*		Запись звуков Марса	ИКИ РАН	—
Магнитометр AMR*	Магниторезистивный датчик на расстоянии 2 м от ПП	Измерения магнитного поля, в том числе на этапе спуска	INTA (Испания)	Díaz Michelena и др. (2023)
БУ МТК		Блок управления и сбора информации	ИКИ РАН	
HABIT EnvPack		Измерения параметров окружающей среды	Omnysys (Швеция)	Martín-Torres и др. (2020)
Датчики температуры ATS	Датчики Pt 1000, по 3 на штангу (3.6 см), 3 штанги на каждом из 3 блоков	Измерение температуры атмосферы ($\pm 0.2^\circ\text{C}$), оценка скорости и направления ветра (± 0.3 м/с)	Omnysys (Швеция)	Gómez-Elvira и др. (2012)
Датчик температуры поверхности GTS	Дистанционное измерение. Термопара (8–14 мкм)	Измерение яркостной температуры поверхности ($\pm 0.8^\circ\text{C}$)	Omnysys (Швеция)	Gómez-Elvira и др. (2012)
УФ-датчики	Шесть фотодиодов с фильтрами (250–350 нм)	Оценка УФ-излучения, содержания озона, оптической плотности атмосферы в УФ-диапазоне	Omnysys (Швеция)	
HABIT BOTTLE	Четыре контейнера с солями CaCl_2 , $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$, NaClO_4 и контроль — минеральная пыль	Регистрация перехода солей в жидкое состояние	Omnysys (Швеция)	Martín-Torres и др. (2020)

Примечание: * — дополнительные блоки МТК, не связанные с метеорологией.

Во время спуска посадочного модуля вначале работают акселерометры, измеряя замедление спускаемой капсулы (Липатов и др., 2023а). Замедление напрямую связано с плотностью атмосферы, из которой затем могут быть вычислены давление и температура в гидростатическом приближении. В нижней атмосфере, начиная с высоты ~5 км и ниже (после отделения аэродинамического экрана от посадочного аппарата), должны были работать датчики температуры и давления.

Основой МТК послужили разработки для малых станций и пенетраторов проекта Марс-96 (Harri и др., 1998). Основные датчики метеопакета, температуры, давления, влажности изготовлены ИКИ РАН и Финским метеорологическим институтом (FMI). Датчики температуры расположены на метеостанге попарно (один терморезистор и термопара) на высотах 125, 150, 175 см от поверхности Марса. Для уменьшения теплового следа штанги датчики установлены на 5-сантиметровых кронштейнах под разными углами. Датчик, измеряющий температуру на спуске, после посадки располагался на высоте 85 см от поверхности (Липатов и др., 2023б).

Важнейший датчик давления дублирован, использованы мембранный датчик собственного изготовления ИКИ РАН и изделие Barosap® фирмы Vaisala. Сенсорная головка Barosap® представляет собой микроэлектромеханическое устройство (MEMS) из монокристаллического кремния и обладает высокой стабильностью. Оба типа датчиков используют изменение емкости между электродами под действием давления. Датчики были размещены в блоках управления (БД и БУ МТК) в разных частях ПП. Влияние температуры контролируется специальными термодатчиками; поправки вносятся при обработке данных.

В качестве датчика скорости и направления ветра использован ионизационный анемометр разработки и изготовления ИКИ РАН (Evlanov и др., 2001; Евланов и др., 2015). В разреженной атмосфере этот тип анемометра должен обеспечить существенно большую чувствительность по сравнению с обычно применяемыми датчиками на принципе измерения сопротивления нагреваемой фольги или проволоки (см., например, Gómez-Elvira и др., 2012). Для малых станций был разработан и датчик оптической плотности Optical Dust Sensor (ODS). Как подтверждено многочисленными натурными наблюдениями, ход освещенности в течение дня, измеренный фотометрами с известным полем зрения на двух длинах волн (красный и синий каналы), позволяет с высокой точностью оценить среднюю за день оптическую толщину атмосферы и обнаруживать облака (Toledo и др., 2016). Изначально разработанный и валидированный во Франции,

для МТК этот датчик был изготовлен ИКИ РАН (Хоркин и др., 2023).

Часть датчиков малых станций Марс-96 планировалась также для установки на малые посадочные модули MetNet, разработанные НПО им. Лавочкина и ИКИ РАН по заказу FMI (Harri и др., 2017). В этом проекте принимали участие также испанские коллеги (Univ. Complutense; INTA, Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial) с датчиком SIS, таким образом определяя круг основных участников эксперимента МТК. Датчик SIS входил в состав аппаратуры DREAMS (Esposito и др., 2018) посадочного модуля Скиапарелли ЭкзоМарс-2016 (Argüero и др., 2017; Toledo и др., 2017). В состав МТК ПП вошли еще два испанских модуля, инфракрасный нефелометр DS'20 (Dust Sensor) для определения локальной концентрации частиц пыли, разработанный в Univ. Carlos III и изготовленный INTA, и магнитометр AMR (см. далее).

Прототипом лидара послужило устройство, разработанное в ИКИ РАН для неудавшегося проекта NASA Mars Polar Lander (Arumov и др., 1998). Направленный вверх, лидар должен был восстановить профиль аэрозоля в атмосфере Марса до высоты ~5 км (Липатов и др., 2023в), дополняя измерения аэрозоля пассивными оптическими датчиками ODS и SIS. Наконец, в состав МТК вошел микрофон для регистрации звуков Марса и активности ПП и ровера, разработанный ЦНИИМаш и изготовленный ИКИ РАН.

Блок SIS, датчики ветра, температуры и влажности были размещены на методологической штанге — металлической конструкции высотой 1 м, приводимой в вертикальное положение после схода ровера с ПП (рис. 3). Наверху штанги (на высоте ~2.2 м над поверхностью) располагался SIS, под ним датчики ветра и влажности. Датчики температуры располагались на трех уровнях (27, 51 и 75 см от основания штанги) на небольших кронштейнах. У основания метеостанги был размещен блок DS'20. Блок ODS был установлен на противоположной стороне палубы ПП.

Основной модуль HABIT EnvPack содержит набор датчиков температуры (три миништанги длиной 3.6 см на каждом из трех блоков HABIT; три датчика на штангу), датчик яркостной температуры поверхности и шесть фотодиодов, измеряющих УФ-излучение. Максимумы пропускания УФ-фильтров соответствовали 265, 280, 295, 315 и 330 нм, перекрывая диапазоны UV-A, UV-B и UV-C, для которых стандартизована стерилизующая способность УФ-излучения. Датчики EnvPack основаны на разработках для роверов Curiosity и Perseverance (Gómez-Elvira и др., 2012) и его наблюдения за окружающей средой были бы напрямую сопоставимы с их данными.

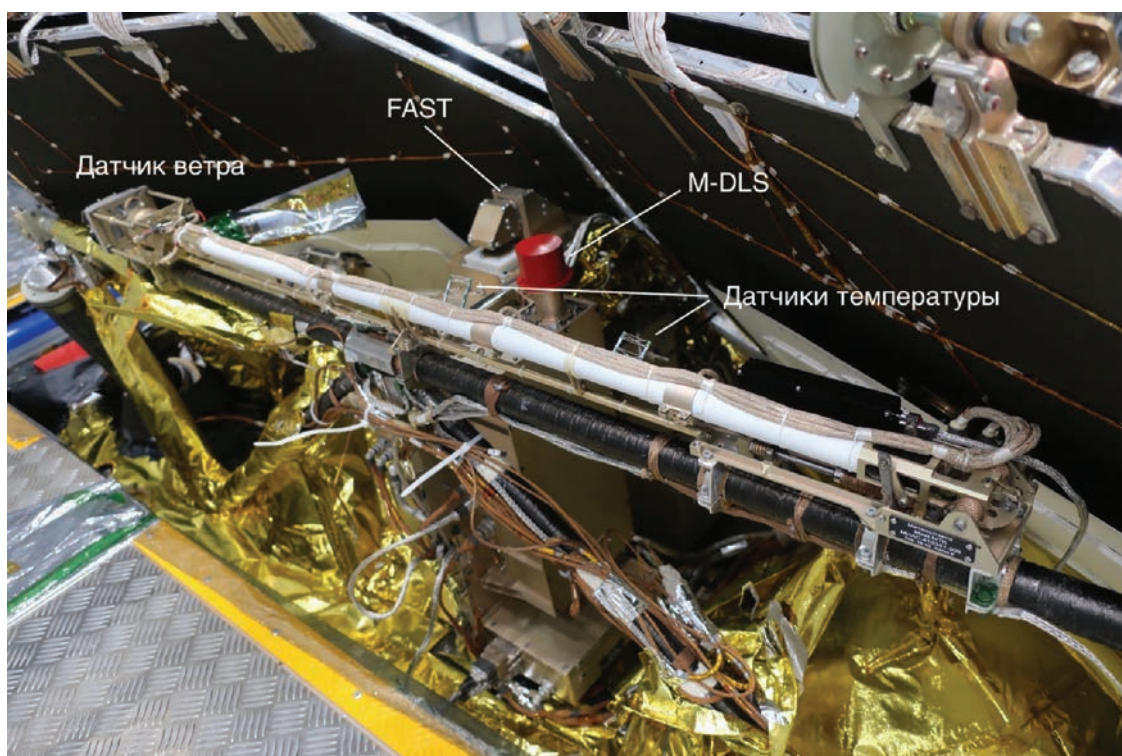


Рис. 3. Штанга МТК в сложенном виде в составе платформы. Основание штанги и механизм раскрытия находятся справа, верх штанги — слева. Показаны датчики температуры (видны два из трех) и ветра. На фотографии также видны закрытый защитной крышкой воздухозаборник М-ДЛС и сканер ФАСТ в парковочном положении (направлен на калибровочное черное тело). Фото ИКИ РАН.

Так, для оценки скорости и направления ветра предполагалось использовать методику обработки данных температурных датчиков атмосферы, разработанную Soria-Salinas и др. (2020) для данных Curiosity.

Блок BOTTLE предназначался для регистрации перехода солей в жидкое состояние в естественных условиях на поверхности Марса (температура, давление, влажность) и, при повышенной температуре, для оценки, могут ли жидкие рассолы существовать на поверхности Марса. Использовались четыре известные на Марсе соли (хлорид кальция, сульфат железа, перхлорат магния и перхлорат натрия) в смеси с абсорбентом и контрольная ячейка с аналогом марсианской пыли. Регистрация растворения проводилась путем измерения проводимости. Нагреватели позволяли использовать ячейки многократно. Также BOTTLE позиционировался как эксперимент по получению жидкой воды, проверка возможности использования местных ресурсов пилотируемыми экспедициями.

Пылевой комплекс ПК

Пылевой комплекс предназначен для контактного изучения свойств пылевых частиц и связанных с переносом пыли атмосферных электриче-

ских явлений (Захаров и др., 2022). ПК разработан и изготовлен ИКИ РАН при участии лаборатории LATMOS, CNRS (Франция). Прототипом основных датчиков прибора был комплекс для исследования лунной пыли ПмЛ (Захаров и др., 2021). Итальянские партнеры (INAF-Osservatorio Astronomico di Capodimonte, Неаполь) поставили нефелометрический блок MicroMED, упрощенный вариант одной из подсистем ранее разработанной аппаратуры MEDUSA (Esposito и др., 2011). Пылевой комплекс состоял из основного блока IS-1, двух датчиков и штанги ПК. Датчики ПК расположены выше и ниже палубы ПП и на штанге ПК, ближе от поверхности. Список датчиков ПК приведен в табл. 4.

На блоке IS-1 располагаются пьезоэлектрические (PS) и зарядочувствительные (QS) датчики, а также оптический датчик запыленности (OS). Пьезоэлектрические датчики блока IS-1 расположены на пяти плоскостях усеченной пирамиды. На каждой плоскости содержатся три датчика разных диаметров 4, 15 и 30 мм. Импульс пылевой частицы преобразуется в электрический сигнал. Чувствительность датчиков составляет ~ 10 Н с, что эквивалентно, например, импульсу 4-микронной частицы, летящей со скоростью ~ 2 м·с⁻¹. Датчики QS представляют собой сетки, расположенные над каждой из пяти плоскостей

Таблица 4. Датчики и подсистемы Пылевого комплекса ПК

Подсистема	Принцип действия	Назначение	Основные параметры
БУС (IS-1)		Блок ударных сенсоров	Включает PS, QS, OS
Ударные датчики (PS)	Пьезоэлектрические датчики (15 шт.)	Измерение импульса пылевых частиц	Чувствительность 10 Н с
Пролетные датчики (QS)	Зарядочувствительные пролетные датчики (пять сеток)	Измерение заряда и скорости (для заряженных частиц)	Чувствительность 1000 Кл
Датчик запыленности (OS)	Оптический датчик, измеряющий накопление пыли	Оценка запыленности поверхности ПП	Измерения на трех длинах волн 525, 670, 885 нм
ECS	Измерение утечки в открытом конденсаторе	Электропроводность атмосферы	$10^{11} - 10^{13}$ Ом
MicroMED	Лазерный нефелометр с прокачкой	Концентрация, распределение частиц по размерам	Частицы 0.4–20 мкм
Штанга ПК	Раскрывающаяся выносная штанга	Размещение IS-2 ближе к поверхности и ECS на удалении от ПП	Датчики IS-2 на высоте 10 см от поверхности; EF-1, –2 на высоте 35 и 70 см от поверхности
IS-2	Восемь пьезодатчиков за общей пролетной сеткой	Измерение импульса частиц и заряда и скорости заряженных частиц	То же, что PS, QS
EF-1, –2	Два электрода, разнесенные по высоте	Измерение электрического поля	± 1 кВ, чувствительность 60 мВ 0–370 Гц
ЕМА	Антенна	Измерение шумов при столкновениях заряженных пылинок	0.12–1.5 МГц

IS-1 с пьезопластинами. При пролете заряженной частицы на них возникает зеркальный наведенный заряд, который можно измерить. Кроме того, по задержке между сигналами QS и пьезодатчиков IS-1 определяется скорость и, при известном импульсе, масса частицы. Аналогично устроен блок IS-2, в котором по два 15- и 30-миллиметровых датчика направлены в четыре стороны и размещены вблизи поверхности. Наверху блока IS-1 установлено прозрачное 20-миллиметровое стекло, под которым находятся три светодиода разных цветов и фотоприемники датчика OS. Степень запыленности стекла определяется по уменьшению интенсивности отраженного света. Датчик электропроводности воздуха ECS представляет собой цилиндрический конденсатор, расположенный с нижней стороны палубы ПП, недалеко от блока IS-1. Сопротивление измеряется по времени разряда.

Штанга ПК расположена рядом с трапами для съезда ровера и позволяет разместить блок датчиков IS-2 ближе к поверхности, а датчики EF-1, –2 подальше от ПП, на высоте 35 и 70 см от поверхности. Анализатор электромагнитной активности (ЕМА) регистрирует электромагнитные разряды, сопровождающие движение и столкновения за-

ряженных пылевых частиц. Антенна ЕМА длиной 0.9 м расположена в штанге ПК. Датчик записывает амплитуду шумового сигнала в диапазоне частот от 0.12 до 1.5 МГц.

Итальянский блок MicroMED представляет собой лазерный нефелометр – счетчик частиц в закрытом объеме с прокачкой. Исследуемый объем (~0.3 мм³) освещается коллимированным лучом лазера (0.8 мкм) и рассеянный частицами свет регистрируется детектором, расположенным под углом 90°. Интенсивность и число сигналов за время измерения 520 с позволяют определить концентрацию (~1–100 см⁻³) и распределение частиц по размерам (0.4–20 мкм).

Фурье-спектрометр ФАСТ

Прибор ФАСТ (FAST, Fourier for Atmosphere and Surface Temperature) предназначен для исследования атмосферы и мониторинга климата Марса методом спектрального анализа солнечного излучения, прошедшего через атмосферу планеты, и собственного излучения атмосферы. Также, наблюдая тепловое излучение поверхности можно измерить ее температуру и оценить минералогический состав пород в доступной для наблюдения

окрестности ПП. Прибор разработан и изготовлен в ИКИ РАН, частично на основе схемных решений Фурье-спектрометра TIRVIM, одного из каналов спектроскопического комплекса ACS на орбитальном аппарате ЭкзоМарс-2016 (Korablev и др., 2018; Shakun и др., 2018). К сожалению, обобщающей публикации по прибору ФАСТ пока нет, часть информации может быть найдена в (Shakun и др., 2017; 2019a; 2019b).

ФАСТ представляет собой моноблок, установленный сверху на краю палубы ПП так, чтобы его оптический вход, снабженный двухкоординатным сканером (рис. 3), мог быть ориентирован в любую точку неба или на поверхность. Спектральный диапазон измерений 1.7–17 мкм, регистрируемый пироэлектрическим детектором без охлаждения. Коротковолновая часть диапазона (1.7–10 мкм) использовалась в режиме наблюдения прямого солнечного излучения прежде всего для детектирования малых составляющих атмосферы, например, метана. Интерферометр был собран по схеме с линейным перемещением одного из зеркал с помощью шарико-винтовой пары. Для обнаружения малых составляющих атмосферы было выбрано максимальное спектральное разрешение 0.05 см^{-1} (без аподизации), для чего требовалась оптическая разность хода интерферометра 12.6 см (при снятии односторонней интерферограммы); время одного измерения составляло 20 мин. Для проведения таких измерений требовалось обеспечить одновременную работу двух прецизионных оптико-механических систем. Одна поддерживала слежение за солнечным диском в течение длительного наблюдения (Shakun и др., 2019a), вторая — плавное движение каретки с зеркалом интерферометра (Shakun и др., 2019b). В лабораторных наблюдениях Солнца при максимальном спектральном разрешении было получено относительно невысокое отношение сигнал/шум ~ 30 , впрочем, достаточное для измерения известных малых составляющих атмосферы (H_2O , CO , O_3) или крупных выбросов метана. Для детектирования метана при содержании 1 ppbv требуется отношение сигнал/шум ≥ 500 . Причиной повышенного шума явились, судя по всему, искажения интерферограммы, связанные с механическими возмущениями при работе системы слежения за Солнцем.

Для наблюдений собственного излучения атмосферы спектральное разрешение составляло 2 см^{-1} , наблюдения были короче и система слежения не использовалась. В этом режиме шум прибора был немногим выше, чем у Mini-TES/Mars Exploration Rovers при спектральном разрешении 10 см^{-1} . Из атмосферных спектров ФАСТ можно восстановить температурный профиль приповерхностных слоев атмосферы, разрешая высо-

ты от десятков метров до 0.5 км, а также измерить оптическую плотность пылевого и ледяного аэрозоля.

Газоаналитический комплекс МГАК

Марсианский газоаналитический комплекс МГАК (MGAP) предназначен для исследования состава атмосферных проб методом газовой хроматографии и последующей масс-спектрометрии. Прибор разработан и изготовлен в ИКИ РАН на основе элементов комплекса для анализа грунта методом пиролиза КНА на КА Фобос-Грунт. Параллельно с ЭкзоМарс шла разработка аналогичного комплекса для проекта Луна-27. К сожалению, публикации, описывающие какую-либо версию прибора, практически отсутствуют. В докладе (Gerasimov и др., 2014) приведена концепция МГАК на этапе предложения, когда планировался анализ и грунта, и атмосферных проб. Узлы, предназначенные для подготовки образцов грунта и пиролиза, были исключены. Также швейцарские партнеры не смогли поставить планировавшийся вначале, как для Луны-27, время-пролетный масс-спектрометр (Hofer и др., 2015). МГАК версии 2022 состоит из двух блоков: газового хроматографа (ГХМ) с двумя хроматографическими колонками и масс-спектрометра на принципе ионной ловушки. Лазерный спектрометр М-ДЛС (см. ниже) был выделен в самостоятельный прибор, но М-ДЛС и МГАК имеют общую систему подготовки атмосферной пробы.

Воздух поступает в МГАК через систему пробоподготовки М-ДЛС, включающую фильтры грубой и тонкой очистки и ряд клапанов. Всасывающий насос находится в блоке МГАК, с которым М-ДЛС соединен капилляром, т. е. МГАК забирает атмосферную пробу через М-ДЛС. ГХМ разделяет смесь газов на молекулярные компоненты, выход которых регистрируется детекторами теплопроводности. МГАК — сложная система, включающая, помимо основных измерительных систем, множество вспомогательных — насосы, резервуар для газа-носителя (He_2), капилляры с подогревом, микроклапанные блоки и др. Использовались две капиллярные колонки с молекулярными ситами 5A и PoraPlot Q, разделяющими постоянные и благородные газы. Перед анализом газы могут проходить через ловушки обогащения, повышающие концентрацию малых газовых составляющих за счет их накопления на адсорбентах и последующего выделения для анализа. Для каждой колонки имела своя инжекторная ловушка. После каждого измерения производился прогрев всей системы. Длительность типичного цикла измерения МГАК составляла около 1 ч.

Масс-спектрометр нейтральных газов был изготовлен в ИКИ РАН по образцу аналогичного устройства в составе прибора Ptolemy/Rosetta (Todd и др., 2007). Этот тип масс-спектрометра компактен и допускает работу при невысоком вакууме. Он позволяет работать в диапазоне масса/заряд 12–50 (от воды до ксенона) и измерять отношения изотопов. Масс-спектрометр откачивался специальным насосом до $\leq 10^{-4}$ торр.

Лазерный спектрометр М-ДЛС

Многоканальный спектрометр на диодных лазерах М-ДЛС (M-DLS) предназначен для исследования состава атмосферных проб методом спектроскопии сверхвысокого разрешения. Прибор разработан и изготовлен в ИКИ РАН в тесном сотрудничестве с МФТИ (Rodin и др., 2020). Прототипом прибора является аналогичное устройство, входившее в состав газоаналитического комплекса КНА на КА Фобос-Грунт (Durry и др., 2010).

М-ДЛС — моноблок с головкой для забора атмосферных проб (рис. 3), соединенный капилляром с блоком ГХМ МГАК. Прибор анализирует атмосферную пробу в многопроходной оптической кювете, регистрируя поглощение в отдельных спектральных линиях атмосферных газов в ближнем ИК-диапазоне. Линии детектируются при перестройке длины волны полупроводникового лазерного диода. Диапазон такой перестройки (путем модуляции тока накачки лазера) обычно не более 1 см^{-1} , и, как правило, на каждый газ требуется свой лазер. Спектральное разрешение $\sim 0.002\text{ см}^{-1}$. В приборе реализован принцип спектроскопии с интегрированным резонатором. Основной элемент — ячейка ICOS (Integrated Cavity Optical Spectroscopy) — представляет собой пару сферических зеркал, разнесенных на расстояние (22 см), немного меньше их фокуса. Внеосевой ввод луча в ячейку дает множество поперечных мод, плотно заполняющих резонатор и, в зависимости от коэффициентов отражения зеркал, эффективный оптический путь от лазера до детектора до 110 м. Используются два лазера 2.656 и 2.808 мкм для регистрации линий поглощения CO_2 , H_2O и их изотопологов. В диапазон попадают семь линий основного изотополога CO_2 и по одной $^{16}\text{O}^{12}\text{C}^{18}\text{O}$, $^{16}\text{O}^{12}\text{C}^{17}\text{O}$, $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$, а также три — основного изотополога H_2O и по одной HD^{16}O , H_2^{18}O .

Перед измерением ячейка откачивалась; при необходимости увеличить чувствительность можно поднять давление от атмосферного (5–10 мбар) до ~ 30 мбар. Одно измерение занимало 6 мин.; с накоплением длительность измерения доходила до 90 мин. В лабораторных испытаниях была

продемонстрирована точность измерения отношений изотопов, приближающаяся к точности спектроскопических параметров линий в базе HITRAN.

Радиометр РАТ-М

Микроволновый радиометр РАТ-М (РАдио-Термометр для Марса или PIAnck Thermometer for Mars) предназначен для измерения яркостной температуры поверхности в трех диапазонах (6, 8 и 15 ГГц). Прибор разработан и изготовлен в ИКИ РАН под руководством Д.П. Скулачева; публикации по прибору отсутствуют.

РАТ-М представляет собой моноблок с двумя рупорными антеннами, одна из которых направлена на поверхность, а другая — в зенит. Диаграмма направленности антенн широкая — $\sim 45^\circ$. Излучение от поверхности в полосе ~ 1 ГГц сравнивается с сигналом от атмосферы, практически прозрачной в микроволновом диапазоне при малом содержании пыли. Ожидаемая толщина скин-слоя марсианского реголита для длин волн от 1.7 до 3 см составит от 5 до 50 см, что может позволить оценить профиль температуры грунта вплоть до глубины 1 м и зарегистрировать его суточные и сезонные изменения. Чувствительность прибора $\sim 0.25\text{ К}$.

РАТ-М предоставляет также возможность оценки оптической толщины атмосферы в условиях сильной запыленности во время глобальных или региональных пылевых бурь. Сигнал сравнения в данном случае становится основным. Ослабление микроволнового излучения пылевыми частицами в атмосфере определяется рэлеевским рассеянием, и яркостная температура неба во время пылевой бури (5–50 К) является измеримой величиной, даже учитывая неопределенности температуры грунта. Таким образом, РАТ-М смог бы оценить содержание пыли в атмосфере, когда оптическая толщина становится слишком большой, чтобы быть измеренной в видимом (датчики МТК) или ИК-(ФАСТ) диапазонах.

Активный нейтронный и гамма-спектрометр с блоком дозиметрии АДРОН-ЭМ

Комплекс приборов АДРОН-ЭМ (ADRON-EM) предназначен для определения элементного состава приповерхностного слоя грунта (до глубины 1–2 м) методом активного импульсного нейтронного зондирования и измерения вторичного нейтронного и гамма-излучения (Mokrousov и др., 2022). АДРОН-ЭМ объединяет пять функциональных узлов: импульсный нейтронный

генератор (ИНГ), детекторы нейтронов (ДН), детектор гамма-излучения (ГД), модуль дозиметров (ДМ) и модуль электроники (МЭ). Модули ДН, ГД и МЭ объединены в общий блок детекторов и электроники, ИНГ и дозиметр представляют собой отдельные блоки. АДРОН-ЭМ разработан и изготовлен в ИКИ РАН на основе ранее разработанных DAN/Curiosity (Mitrofanov и др., 2012) и MGNS/Beipi Colombo (Mitrofanov и др., 2021) и параллельно с созданием приборов ADRON-RM для ровера Rosalind Franklin (Mitrofanov и др., 2017) и АДРОН-ЛР (Головин и др., 2021). Блок ИНГ (PNG), генератор нейтронных импульсов для облучения вещества поверхности, разработан и изготовлен во ВНИИА им Н.Л. Духова. Такое устройство было впервые использовано в космосе в приборе DAN/Curiosity.

Гидратация поверхности оценивалась путем измерения потока нейтронов, образующихся на глубине 1–2 м в результате взаимодействия высокоэнергетичных заряженных частиц галактических космических лучей (ГКЛ), или активированных генератором нейтронных импульсов нейтронов, ИНГ. Ядра легких элементов, особенно водорода, эффективно тормозят быстрые нейтроны благодаря их близким массам.

Детекторы нейтронов (модуль ДН), два пропорциональных ^3He -счетчика, регистрируют нейтроны с энергиями от 0.05 эВ до 1 кэВ. Один из счетчиков окружен кадмиевым экраном, непрозрачным для тепловых нейтронов (≤ 0.4 эВ). Таким образом, разница в скорости счета детекторов соответствует вкладу тепловых нейтронов.

Блок ИНГ генерирует импульсы нейтронов с энергией 14.4 МэВ при столкновении ускоренных ионов дейтерия с тритиевой мишенью. Длительность импульсов составляет ~ 2 мкс, частота повторения — до 10 Гц. Импульсы продолжительностью ~ 2 мкс проникают в грунт Марса на глубину около 1 м. Реакции неупругого рассеяния идут в течение десятков микросекунд после нейтронного импульса, и регистрация задержки вторичного нейтронного излучения позволяет восстановить профиль гидратации грунта до глубины ~ 0.5 м с шагом 0.1 м.

Гамма-спектрометр (блок ГД) регистрирует гамма-кванты в диапазоне от 200 кэВ до 7 МэВ. Использован сцинтилляционный детектор на основе CeBr_3 , имеющий спектральное разрешение лучше 4.5% на 662 кэВ. Нейтроны взаимодействуют с ядрами вещества в реакциях неупругого рассеяния и захвата, сопровождающихся испусканием гамма-квантов. Кроме этого, при облучении образуются короткоживущие изотопы, распад которых также сопровождается гамма-излучением. Измерение гамма-спектра

позволяет получить информацию о содержании основных породообразующих (O, Si, Al, Fe, Mg, Na, Ca) и радиогенных элементов (K, U, Th) в составе минералов в ближайшей (≤ 3 м) окрестности места посадки. Параллельно измеряется плотность грунта.

Модуль АДРОН-ДМ (Lulin-ML) предназначен для мониторинга радиационной обстановки (определение радиационной дозы по заряженным частицам). Узел разработан и создан в Институте космических исследований и технологий Болгарской академии наук, София, на основе семейства приборов Lulin (см., например, Semkova и др., 1994; Mitrofanov и др., 2018). В приборе два перпендикулярно расположенных дозиметрических телескопа, каждый из которых состоит из двух кремниевых PIN-фотодиодов толщиной 0.3 мм и площадью 2 см², разнесенных на расстояние 21 мм. Прибор измерял мощность поглощенной дозы в диапазоне 10^{-6} –1 грей/ч и спектр передачи энергии от 60 кэВ до 180 МэВ. Время накопления спектров составляло 1 ч.

Магнитометры MAIGRET и AMR

Аппаратура МЕГРЭ (MAIGRET, Martian ground electromagnetic tool) состоит из трех блоков: штанги LEMI SEM, датчика UF-M и блока электроники. Функционально он включает индукционный (search coil) и феррозондовый (fluxgate) магнитометры, антенну электрического поля и анализатор спектра. Прибор создан в ИКИ РАН под руководством А.В. Скальского с ключевым вкладом Института атмосферной физики (Чехия), поставившим индукционный магнитометр и блок анализа волн WAM (Wave Analyzer Module) — часть блока электроники MAIGRET (Kolmasova и др., 2017). Других публикаций по прибору, к сожалению, нет. Предшественником MAIGRET был комплекс для плазменно-волновых измерений ФПМС на космическом аппарате Фобос-Грунт. На рис. 4 показан блок LEMI SEM в составе ПП.

MAIGRET измеряет квазипостоянное (± 30000 нТ, частоты до 32 Гц) магнитное и переменное (0.1–40 кГц) электромагнитное поля. Он предназначен для регистрации намагниченности коры и ее вариаций, электромагнитного излучения, приходящего из космоса, и атмосферных электрических разрядов, возникающих во время пылевых явлений.

Магнитометр Anisotropic MagnetoResistance, AMR (Díaz Michelena и др., 2023), представляет собой двухвекторный магниторезистивный датчик с устройством разворачивания, выбрасывающим его на расстояние 2 м от ПП. При-

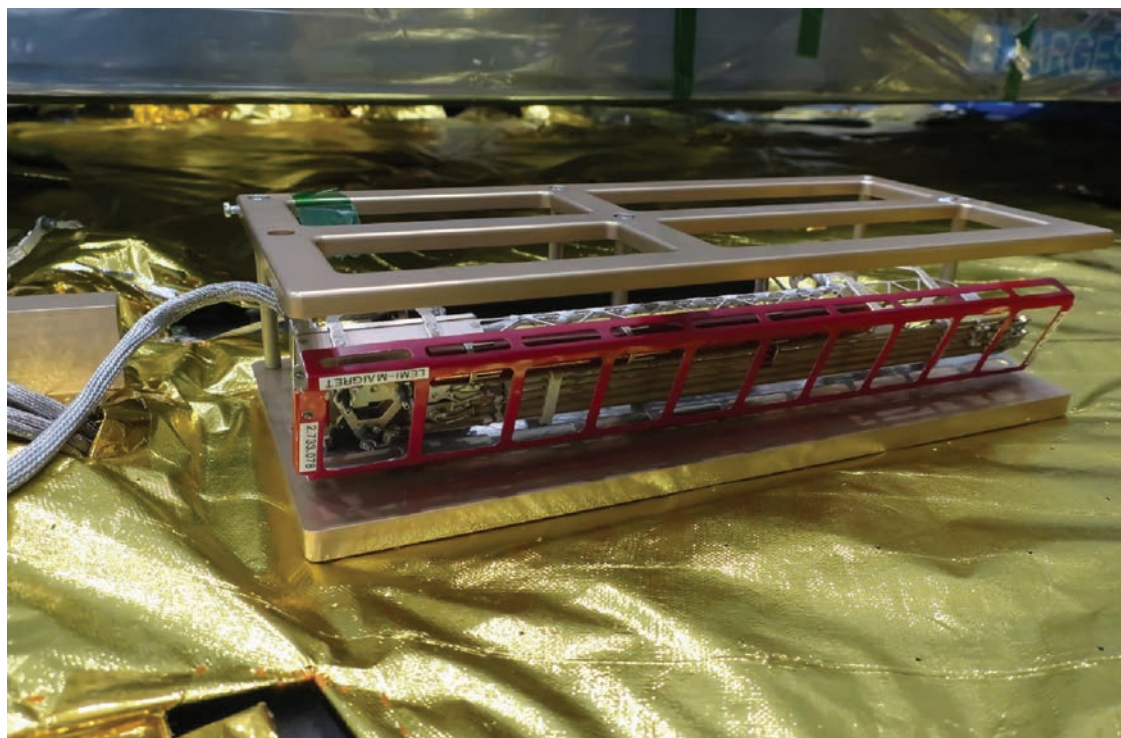


Рис. 4. Блок LEMI SEM. Фото ИКИ РАН.

бор разработан и создан на предприятии INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial) в Испании. Диапазон измерений составляет ± 150 мкТл с разрешением 1 нТл и шумом ~ 0.5 нТл Гц $^{-1/2}$. Прибор вошел в состав аппаратуры МТК и управлялся блоком МТК-Л, который предусматривал включение AMR и во время спуска (с высоты ~ 125 км) и на поверхности. Это позволило бы проверить точность моделей, экстраполирующих измерения магнитного поля Марса с орбиты к поверхности. Также, за счет удаления от не обеспечивающей магнитной чистоты платформы, AMR позволил бы уточнить измерения квазипостоянного магнитного поля MAIGRET.

Сейсмометр SEM (СЭМ)

SEM (Seismometer for ExoMars) предназначен для измерения микровибраций поверхности Марса, его квазистатических движений и вариаций гравитационного поля (Манукин и др., 2021). Это новая разработка ИКИ РАН при участии Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. Дальним прототипом прибора можно считать микрогравиметр ГРАС-Ф проекта Фобос-Грунт (Манукин и др., 2010). Прибор представляет собой моноблок, основной объем которого определяет система развертывания. Она должна обеспечить контакт датчиков с поверхностью и их изоляцию от вибраций ПП и ветра.

Датчиковая часть состоит из трех одинаковых одноосных акселерометров, установленных под углом 90° , симметрично относительно гравитационной вертикали. В каждом канале цилиндрическая пробная масса (50 г) была подвешена на шести упругих элементах из бериллиевой бронзы, так что она могла двигаться лишь вдоль одной координаты. Линейное перемещение регистрировалось по изменению емкости. SEM измеряет медленные наклоны в диапазоне $\pm 3 \times 10^{-3}$ град с чувствительностью 3×10^{-9} для периодов от 100 с до месяцев и вариации гравитационного ускорения до 1.7×10^{-2} м с $^{-2}$ с чувствительностью $\sim 10^{-9}$ м с $^{-2}$. Колебания поверхности по трем осям измеряются в диапазоне частот 0.1–10 Гц с чувствительностью по амплитуде $\sim 4 \times 10^{-11}$ м на 1 Гц.

Система развертывания должна была установить SEM под корпусом ПП. Защитный кожух с прибором опускался на поверхность при помощи пантографа (рис. 5), и затем прибор свободно выпадал с высоты 5–10 мм. Для установки по вертикали система ориентации подвешивала блок датчиков на карданном подвесе вдоль местной гравитационной вертикали с помощью электромагнита; затем, после снятия напряжения с электромагнита, опускала на опору. При необходимости эту операцию можно было повторять многократно. Для обеспечения работы прибора в режиме постоянного мониторинга он был испытан в диапазоне температур от -130 до $+60^\circ\text{C}$.

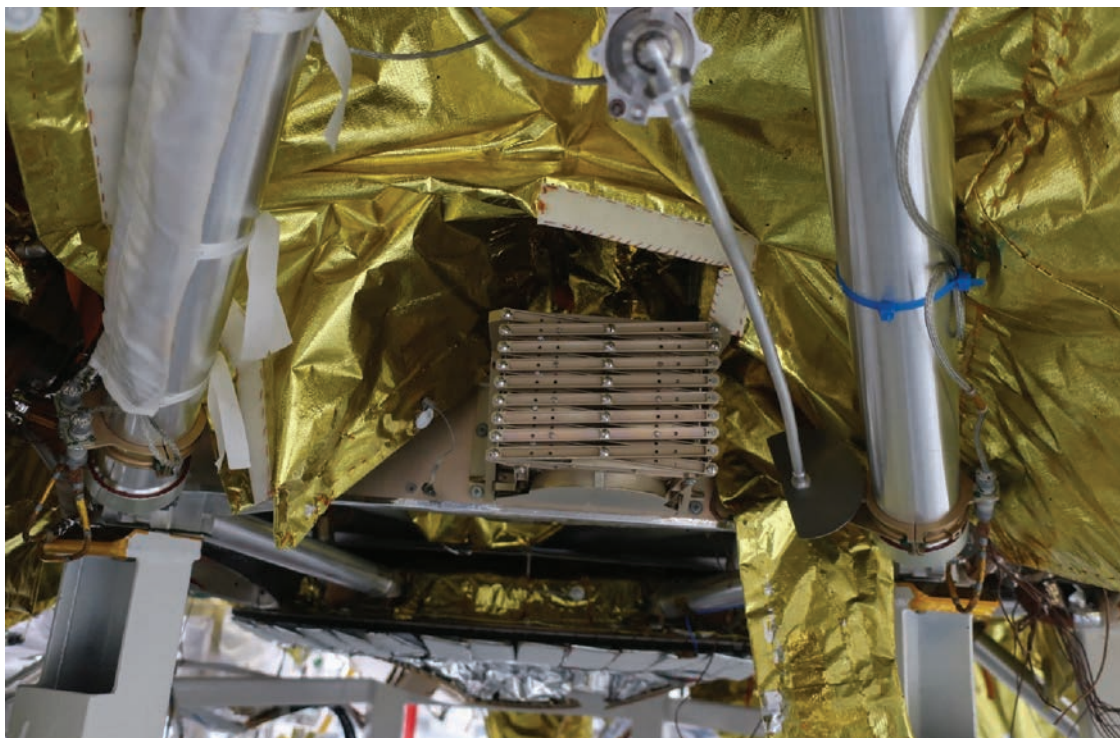


Рис. 5. Нижняя часть ПП. Виден пантограф системы развертывания СЭМ. Фото ИКИ РАН.

Когерентный транспондер LaRa

Прибор LaRa (Lander Radioscience) предназначен для высокоточного определения параметров движения и вращения Марса. Используется доплеровский сдвиг при передаче радиосигнала между ПП на поверхности Марса и наземными станциями (Dehant и др., 2020). Прибор разработан в Бельгии под руководством Королевской обсерватории в Брюсселе (Royal Observatory of Belgium) и изготовлен бельгийской компанией OHV Antwerp Space. Прибор состоит из транспондера и трех дисковых антенн, две передающие и одна приемная. Эксперимент по измерению взаимного положения Марса и Земли включает наземный сегмент, в качестве которого планировались сегменты DSN NASA и ESTRACK ESA. Также рассматривалось применение российской станции в Калязине.

LaRa представляет собой приемопередатчик X-диапазона, сохраняющий фазу принятого сигнала. С Земли направлялся высокостабильный сигнал частоты 7.2 ГГц, и обратно передавалась частота 8.4 ГГц. Выходная мощность передатчика 5 Вт при потреблении 42 Вт.

Блок интерфейсов и памяти, БИП

БИП предназначен для управления приборами КНА, а также для приема, хранения и передачи научной информации приборов. С одной

стороны к БИП подключены приборы, с другой — бортовой вычислитель ПП ОВС (On-Board Computer). БИП соединен с ОВС по интерфейсу MIL 1553. БИП отвечает за выдачу цифровых команд приборам в соответствии с циклограммой, сбор данных со всех приборов, отработку нештатных ситуаций при работе КНА, хранение данных в энергонезависимой памяти и передачу данных в радиоканал ПП (через ОВС). Электропитание на приборы подавалось непосредственно от ПП. БИП создан в ИКИ РАН на основе многочисленных разработок для других проектов. Краткое описание и схему аналогичного блока электроники прибора ACS/ЭкзоМарс-2016 можно найти в (Korablev и др., 2018).

ПЛАН ПРОВЕДЕНИЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основным фактором, ограничивающим работу КНА на поверхности, был доступный для передачи на Землю объем данных. Он должен был идти через орбитальные аппараты вокруг Марса (номинально — КА TGO). Тот же канал связи используется ровером. Для ПП был согласован средний доступный объем 150 Мбит в сол (марсианский день) при условии равного деления канала между ПП и ровером. В реальности при делении этого объема предусматривалась определенная гибкость для получения максимальной

научной отдачи от проекта. Кроме того, БИП мог сохранять значительный объем информации, позволяя накопить данные и передать их на Землю, когда появится возможность.

Энергопотребление всех приборов КНА на этапе спуска и посадки (EDL) не должно превышать 30 Вт. Во время работы на поверхности энергопотребление не должно превышать 120 Вт днем и 25 Вт ночью. Длительность дня принимается в 10 локальных часов.

Основные этапы проекта делятся на фазу перелета к Марсу (Cruise), спуска в атмосфере и посадки (EDL — entry, descent, landing), после посадки и до съезда ровера и фазу рутинных операций на поверхности.

На этапе перелета к Марсу планировалось проведение проверочных включений приборов, за исключением антенн прибора LaRa, и работа прибора АДРОН-ЭМ, включая дозиметрический модуль в пассивном режиме в течение максимально возможного времени.

Фаза EDL (спуск в атмосфере и посадка)

Десантный модуль входит в атмосферу со скоростью ~5.5 км/с. С высоты ~120 км начинается его торможение за счет сопротивления атмосферы в течение ~3 мин. На высоте 8–10 км раскрывается первый сверхзвуковой парашют диаметром 16 м (скорость 2 М, 470 м/с). Через 20 с на высоте 4–6 км раскрывается второй дозвуковой парашют диаметром 35 м (скорость 0.6 М, ~150 м/с). Через 10 с на высоте 3–5 км (скорость 64 м/с) сбрасывается тормозной экран, выдвигаются ноги ПП, компенсируется закрутка. С высоты 2 км радиовысотомер начинает отслеживать высоту и вектор скорости. По этим данным на высоте ~1 км над поверхностью (скорость 36 м/с) задний кожух и парашют отделяются и ПП уходит в свободное падение примерно на 1 с. Это делается для увеличения вертикального разделения по отношению к задней обшивке и парашюту. Затем посадочный модуль выполняет боковой маневр ухода от столкновения (10 с) и переходит к интенсивному торможению в течение 7 с — последние 500 м — до касания на скорости ≤ 2 м/с.

В течение EDL должны были работать часть метеоконфлекс (МТК-Л, в том числе магнитометр AMR) и камеры ТСПП-ЭМ. Оба прибора имели собственную управляющую электронику с энергонезависимой памятью, что обеспечивало их автономную работу без участия БИП. Включение БИП не предусматривалось, чтобы полностью исключить его влияние на ОВС во время управления критически-важными процессами при спуске.

МТК-Л включается через 3 мин. после разделения десантного и перелетного модулей и авто-

номно работает до посадки. Потребляемая мощность ~2 Вт. До отделения аэродинамического щита опрашиваются акселерометр и AMR (до посадки), затем датчики давления и температуры (до посадки). После отделения парашютной системы включается лидар (до посадки).

ТСПП-ЭМ приводится в готовность за 200 с до посадки и с этого момента всеми четырьмя камерами снимает видео форматом 512×512 , 10 кадров в секунду. Видео объемом 11 Гбит может быть уменьшено выбором частоты кадров и передано на Землю, когда будет возможность для передачи значительного объема данных без ущерба для других научных приборов. После посадки включается БИП и по его команде снимается панорама максимальной четкости. Полная панорама занимает 90 Мбит.

После посадки и до съезда ровера также с помощью камер ТСПП-ЭМ и по командам БИП осуществляется поддержка съезда марсохода. Приоритет на это время отдавался операциям, связанным с ровером. Чтобы продлить ряд метеонаблюдений, было предусмотрено включение МТК-Л (датчики давления и температуры) в автономном режиме.

Фаза операций на поверхности

После съезда ровера посадочная платформа начинает свою номинальную научную деятельность. Проводятся необходимые подготовительные процедуры: раскрытие штанг МТК и ПК, установка прибора СЭМ на поверхность, раскрытие системы забора проб М-ДЛС, установка магнитометра AMR на поверхность, калибровка приборов КНА.

Приборы КНА могут быть разделены на две группы: требующие постоянной работы в режиме мониторинга (МТК, МЭГРЭ, РАТ-М, НАВИТ, ПК, СЭМ, АДРОН-ЭМ в пассивном режиме с дозиметром) и не требующие постоянной работы (ФАСТ, МГАК, М-ДЛС, ТСПП-ЭМ, LaRa, АДРОН-ЭМ в активном режиме). Ночью работа мониторинговых приборов ограничена общим энергопотреблением ≤ 25 Вт. Приоритет давался приборам, которые могут работать без БИП, накапливая данные для передачи в БИП днем. Такая возможность была у всех мониторинговых приборов, кроме АДРОН-ЭМ.

Для планирования был разработан ряд стандартных последовательностей на один сол. Они могут быть поделены на три основные категории: мониторинговые солы (основное различие в ночной работе), мониторинговые солы и дневная работа других приборов, и сценарии, экономящие энергию, например, в случае нештатных ситуаций или когда требуется подзарядка аккумуляторных

	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
BIP									+	+	+	+	+	+	+	+	+	+						
PK	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
MTK	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
MAIGRET									+	+	+	+	+	+	+	+	+	+						
SEM	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
RAT-M										+		+		+		+		+						
Habit	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
ADRON-EM Pass/Dos									+	+	+	+	+	+	+	+	+	+						

	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
BIP									+	+	+	+	+	+	+	+	+	+						
PK	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
MTK	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
MAIGRET									+	+	+	+	+	+	+	+	+	+						
SEM	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
RAT-M			+			+				+		+		+		+		+				+		
Habit									+	+	+	+	+	+	+	+	+	+						
ADRON-EM Pass/Dos									+	+	+	+	+	+	+	+	+	+						
MGAK												+	+											
M-DLS														+										

Рис. 6. Примеры сценариев работы КНА на поверхности: (а) — мониторинговый сол 1. Ночью работают МТК, НАВИТ, ПК, СЭМ. БИП отключен. Днем работают все мониторинговые приборы. Объем данных ~6.3 Мбайт; максимальное энергопотребление 25 Вт (ночь), 49 Вт (день); (б) — сценарий работы для приборов МГАК и М-ДЛС: любой мониторинговый сол и дневная работа приборов МГАК и М-ДЛС. В качестве примера приведен мониторинговый сол № 3. Объем данных ~13.0 Мбайт; максимальное энергопотребление: 21 Вт (ночь), 84 Вт (день).

батарей ПП. Для получения желаемой циклограммы различные сценарии могли комбинироваться. Кроме того, предусматривалась разработка сценариев по запросам, которые будут выполняться один раз за все время работы на поверхности. Примеры сценариев приведены на рис. 6.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В проекте ЭкзоМарс дистанционные исследования Марса с орбитального аппарата вокруг Марса — Trace Gas Orbiter (ЭкзоМарс-2016) — должен был дополнить комплекс научной аппаратуры посадочной платформы и ровера ЭкзоМарс-2022 на поверхности. Планировался широкий круг исследований, включая мониторинг климата, состав атмосферы, механизмов подъема пыли, взаимодействий между атмосферой и поверхностью, распространенности воды под поверхностью, мониторинг радиации и изучение внутреннего строения.

Многие задачи имели высокоприоритетный характер, соответствующие исследования планировались впервые или конкурировали бы

с единичными аналогами. К таким можно отнести исследования механизмов подъема пыли и возникновения пылевых бурь, двухточечную сейсмометрию совместно с InSight, измерения профиля магнитного поля при спуске, комплексные исследования взаимодействия атмосфера—поверхность и др. Одновременные измерения с InSight не могли состояться: проект дважды откладывался по объективным причинам (задержка разработки в 2018 г. и пандемия в 2020 г.). Также два прибора, первоначально ставившие своей целью приоритетные измерения биогенных газов (метана) с поверхности, в процессе разработки по разным причинам утратили соответствующий функционал. Возможности остальных экспериментов были в полной мере подтверждены в ходе испытаний и калибровок летных образцов приборов КНА.

После прекращения работ по проекту остался полностью готовый и испытанный космический комплекс. Мы надеемся на продолжение исследований и проведение части запланированных экспериментов, вероятно, в кооперации с новыми партнерами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абрамов Н.Ф., Полянский И.В., Прохорова С.А., Эляшев Я.Д. Результаты наземных испытаний телевизионной системы посадочной платформы КА ЭкзоМарс-2022 // Астрон. вестн. 2023. Т. 57. № 5. С. 393–402.
- Авдудевский В.С., Аким Э.Л., Алешин В.И., Бородин Н.Ф., Кержанович В.В., Мальков Я.В., Маров М.Я., Морозов С.Ф., Рождественский М.К., Рябов О.Л., Субботин М.И., Суслов В.М. Черемухина З.П., Шкирина В.И. Атмосфера Марса в районе посадки спускаемого аппарата “Марс-6” (предварительные результаты) // Космич. исслед. 1975. Т. 13. С. 21–32.
- Головин Д.В., Мокроусов М.И., Митрофанов И.Г., Козырев А.С., Литвак М.Л., Малахов А.В., Никифоров С.Ю., Санин А.В., Бармаков Ю.Н., Боголюбов Е.П., Шоленинов С.Э., Юрков Д.И. Прибор АДРОН-ЛР для активного нейтронного зондирования состава лунного вещества // Астрон. вестн. 2021. Т. 55. № 6. С. 542–549. (Golovin D.V., Mokrousov M.I., Mitrofanov I.G., Kozurev A.S., Litvak M.L., Malakhov A.V., Nikiforov S. Yu., Sanin, A.B., Barmakov Y.N., Bogolubov E.P., Sholeninov S.E., Yurkov D.I. ADRON-LR instrument for active neutron sensing of the lunar matter composition // Sol. Syst. Res. 2021. V. 55. P. 529–536). <https://doi.org/10.1134/S0038094621060046>
- Евланов Е.Н., Завьялов М.А., Подколзин С.Н., Родионов Д.С., Торюканов П.М., Липатов А.Н., Экономов А.П. Газоразрядный анемометр // Датчики и системы. 2015. Т. 190. № 3. С. 47–50.
- Захаров А.В., Дольников Г.Г., Кузнецов И.А., Ляш А.Н., Esposito F., Molfese C., Arruego Rodríguez I., Seran E., Godefroy, M. и 38 соавторов. Пылевой комплекс для исследований динамики пылевых частиц в приповерхностной атмосфере Марса // Астрон. вестн. 2022. Т. 56. № 6. С. 371–388. (Zakharov A.V., Dolnikov G.G., Kuznetsov I.A., Lyash A.N., Esposito F., Molfese C., Arruego Rodríguez I., Seran E., Godefroy, M., and 38 co-authors. Dust complex for studying the dust particle dynamics in the near-surface atmosphere of Mars // Sol. Syst. Res. 2022. V. 56. № 6. P. 351–368). <https://doi.org/10.1134/S0038094622060065>
- Захаров А.В., Дольников Г.Г., Кузнецов И.А., Ляш А.Н., Дубов А.Е., Афонин В.В., Бедняков С.А., Бычкова А.С., Грушин В.А., Докучаев И.В. и 10 соавторов. Прибор ПМЛ на посадочном аппарате Луна-25: плазменно-пылевые измерения в приповерхностной экзосфере // Астрон. вестн. 2021. Т. 55. № 6. С. 589–600. (Zakharov A.V., Dolnikov G.G., Kuznetsov I.A., Lyash A.N., Dubov A.E., Afonin V.V., Bednyakov S.A., Bychkova A.S., Grushin V.A., Dokuchaev I.V., and 10 co-authors. PmL instrument onboard Luna-25 Lander: Plasma–dust measurements in the surface exosphere // Sol. Syst. Res. 2021. V. 55. № 6. P. 576–587). <https://doi.org/10.1134/S0038094621060125>
- Иванов М.А., Слюта Е.Н., Гришакина Е.А., Дмитриевский А.А. Геоморфологический анализ потенциального места посадки КА “ЭкзоМарс” Oxia Planum // Астрон. вестн. 2020. Т. 54. № 1. С. 3–17. (Ivanov M.A., Slyuta E.N., Grishakina E.A., Dmitrovsii A.A. Geomorphological analysis of ExoMars candidate landing site Oxia Planum // Sol. Syst. Res. 2020. V. 54. № 1. P. 1–14). <https://doi.org/10.1134/S0038094620010050>
- Липатов А.Н., Экономов А.П., Макаров В.С., Лесных В.А., Горетов В.А., Захаркин Г.В., Зайцев М.А., Хлюстова Л.И., Антоненко С.А. Акселерометры метеоконтекста для исследования верхней атмосферы Марса // Астрон. вестн. 2023а. Т. 57. № 4. С. 333–341. (Lipatov A.N., Ekonomov A.P., Makarov V.S., Lesnykh V.A., Goretov V.A., Zakharkin G.V., Zaitsev M.A., Khlyustova L.I., Antonenko S.A. Accelerometers of the meteorological complex for the study of the upper atmosphere of Mars // Sol. Syst. Res. 2023a. V. 57. № 4. P. 349–357). <https://doi.org/10.1134/S0038094623040081>
- Липатов А.Н., Экономов А.П., Макаров В.С., Лесных В.А., Горетов В.А., Захаркин Г.В., Зайцев М.А., Хлюстова Л.И., Антоненко С.А. Датчики температуры и давления метеоконтекста для исследования атмосферы Марса // Астрон. вестн. 2023б. Т. 57. № 4. С. 319–332. (Lipatov A.N., Ekonomov A.P., Makarov V.S., Lesnykh V.A., Goretov V.A., Zakharkin G.V., Zaitsev M.A., Khlyustova L.I., Antonenko S.A. Temperature and pressure sensors of the meteorological complex for the study of the Mars’s atmosphere // Sol. Syst. Res. 2023b. V. 57. № 4. P. 336–348). <https://doi.org/10.1134/S003809462304007X>
- Липатов А.Н., Ляш А.Н., Экономов А.П., Макаров В.С., Лесных В.А., Горетов В.А., Захаркин Г.В., Зайцев М.А., Хлюстова Л.И., Антоненко С.А., Родионов Д.С., Кораблев О.И. Лидар для исследования атмосферы Марса с поверхности // Астрон. вестн. 2023в. Т. 57. № 4. С. 342–356. (Lipatov A.N., Lyash A.N., Ekonomov A.P., Makarov V.S., Lesnykh V.A., Goretov V.A., Zakharkin G.V., Khlyustova L.I., Antonenko S.A., Rodionov D.S., Korablev O.I. LIDAR for investigation of the Martian atmosphere from the surface // Sol. Syst. Res. 2023c. V. 57. № 4. P. 358–372). <https://doi.org/10.1134/S0038094623040093>
- Манукин А.Б., Казанцева О.С., Калинин И.И., Матюнин В.П., Саякина Н.Ф., Тоньшев А.К., Черногорова Н.А. Сейсмометр для наблюдений на Марсе // Космич. исслед. 2021. Т. 59. № 5. С. 418–427. (Manukin, A.B., Kazantseva, O.S., Kalinnikov, I.I., Matyunin V.P., Sayakina N.F., Ton’shev A.K., Chernogorova N.A. A Seismometer for Observations on Mars // Cosmic Res. 2021. V. 59. P. 366–375). <https://doi.org/10.1134/S0010952521050087>
- Москатиныйев И.В., Иванов А.С., Алексахин С.Н., Острешко Б.А. Космический аппарат “ЭкзоМарс-2022” // Российский сегмент международной космической экспедиции “ЭкзоМарс-2022” / Ред.: Ефанов В.В., Карчаев Х.Ж. Химки: Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина, 2020а. Т. 1. С. 52–56.
- Москатиныйев И.В., Иванов А.С., Алексахин С.Н., Острешко Б.А. Посадочный Модуль “ЭкзоМарс-2022” // Российский сегмент международной

- космической экспедиции “ЭкзоМарс- 2022” / Ред.: Ефанов В.В., Карчаев Х.Ж. Химки: Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина, 2020б. Т. 1. С. 100–111.
- Хоркин В.С., Федорова А.А., Доброленский Ю.С., Кorablev О.И., Вязоветский Н.А., Дзюбан И.А., Сапгир А.Г., Титов А.Ю., Толедо Д., Помро Ж.-П., Ранну П. Прибор ODS миссии ЭкзоМарс-2022: моделирование и наземные полевые измерения // Астрон. вестн. 2023. Т. 57. № 4. С. 307–318. (Khorkin V.S., Fedorova A.A., Dobrolenskiy Y.S., Korablev O.I., Vyazovetskiy N.A., Dzhyuban I.A., Sapgir A.G., Titov A. Yu., Toledo D., Pommereau J.-P., Rannou P. ExoMars-2022 mission ODS instrument: Modeling and ground field measurements // Sol. Syst. Res. 2023. V. 57. P. 324–335). <https://doi.org/10.1134/S0038094623040056>
- Aboudan A., Colombatti G., Bettanini C., Ferri F., Lewis S., Van Hove B., Karatekin O., Debei S. ExoMars 2016 Schiaparelli Module trajectory and atmospheric profiles reconstruction. Analysis of the on-board inertial and radar measurements // Space Sci. Rev. 2018. V. 214. id. 97. <https://doi.org/10.1007/s11214-018-0532-3>
- Acuna M.H., Connerney J.E.P., Ness N.F., Lin R.P., Mitchell D., Carlson C.W., McFadden J., Anderson K.A., Rème H., Mazelle C., Vignes D., Wasilewski P., Cloutier P. Global distribution of crustal magnetization discovered by the Mars Global Surveyor MAG/ER experiment // Science. 1999. V. 284. id. 790. <https://doi.org/10.1126/science.284.5415.790>.
- Alday J., Trokhimovskiy A., Irwin P.G.J., Wilson C.F., Montmessin F., Lefèvre F., Fedorova A.A., Belyaev D.A., Olsen K.S., Korablev O., and 6 co-authors. Isotopic fractionation of water and its photolytic products in the atmosphere of Mars // Nature Astron. 2021a. V. 5. P. 943–950. <https://doi.org/10.1038/s41550-021-01389-x>
- Alday J., Wilson C.F., Irwin P.G.J., Trokhimovskiy A., Montmessin F., Fedorova A.A., Belyaev D.A., Olsen K.S., Korablev O., Lefèvre F., and 4 co-authors. Isotopic composition of CO₂ in the atmosphere of Mars: Fractionation by diffusive separation observed by the ExoMars Trace Gas Orbiter // J. Geophys. Res.: Planets. 2021b. V. 126. id. e06992. <https://doi.org/10.1029/2021JE006992>
- Anderson D.L., Miller W.F., Duennebie F.K., Toksöz M.F., Kovach R.L., Knight T.C.D., Lazarewicz A.R., Miller W.F., Nakamura Y., Sutto G. The Viking seismic experiment // Science. 1976. V. 194. № 4721. P. 1318–1321. <https://doi.org/10.1126/science.194.4721.1318>
- Arruego I., Apéstigue V., Jiménez-Martín J., Martínez-Oter J., Álvarez-Ríos F.J., González-Guerrero M., Rivas J., Azcue J., Martín I., Toledo D., and 3 co-authors. DREAMS-SIS: The Solar Irradiance Sensor on-board the ExoMars 2016 lander // Adv. Space Res. 2017. V. 60. P. 103–120. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.04.002>
- Arumov G.P., Bukharin A.V., Linkin V.M., Lipatov A.N., Lyash A.N., Makarov V.S., Pershin S.M., Tiurin A.V. Compact aerosol lidar for Martian atmosphere monitoring according to the NASA Mars Surveyor Program // ‘98 Proc. SPIE. 1999. V. 3688. P. 494. <https://doi.org/10.1117/12.337558>
- Atreya S.K., Wong A.-S., Renno N.O., Farrell W.M., Delory G.T., Sentman D.D., Cummer S.A., Marshall J.R., Rafkin S.C.R., Catling D.C. Oxidant enhancement in Martian dust devils and storms: Implications for life and habitability // Astrobiology. 2006. V. 6. P. 439–450. <https://doi.org/10.1089/ast.2006.6.439>
- Atreya S.K., Trainer M.G., Franz H.B., Wong M.H., Manning H.L.K., Malespin C.A., Mahaffy P.R., Conrad P.G., Brunner A.E., Leshin L.A., and 5 co-authors. Primordial argon isotope fractionation in the atmosphere of Mars measured by the SAM instrument on Curiosity and implications for atmospheric loss // Geophys. Res. Lett. 2013. V. 40. P. 5605–5609. <https://doi.org/10.1002/2013GL057763>
- Blanchard R.C., Desai P.N. Mars Phoenix entry, descent, and landing trajectory and atmosphere reconstruction // J. Spacecraft and Rockets. 2011. V. 48. P. 809–821. <https://doi.org/10.2514/1.46274>
- Chamberlain T.E., Cole H.L., Dutton R.G., Greene G.C., Tillman J.E. Atmospheric measurements on Mars: the Viking Meteorology Experiment // Am. Meteorol. Soc. Bull. 1976. V. 57. P. 1094. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1976\)057<1094:AMOMTV>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1976)057<1094:AMOMTV>2.0.CO;2)
- Ciarletti V., Clifford S., Plettemeier D., Le Gall A., Hervé Y., Dorizon S., Quantin-Nataf C., Benedix W.-S., Schwenzer S., Pettinelli E., and 7 co-authors. The WISDOM radar: Unveiling the subsurface beneath the ExoMars Rover and identifying the best locations for drilling // Astrobiology. 2017. V. 17. P. 565–584. <https://doi.org/10.1089/ast.2016.1532>
- Connerney J.E.P., Espley J.R., DiBraccio G.A., Gruesbeck J.R., Oliverson R.J., Mitchell D.L., Halekas J., Mazelle C., Brain D., Jakosky B.M. First results of the MAVEN magnetic field investigation // Geophys. Res. Lett. 2015. V. 42. P. 8819–8827. <https://doi.org/10.1002/2015GL065366>
- Conrad P.G., Malespin C.A., Franz H.B., Pepin R.O., Trainer M.G., Schwenzer S.P., Atreya S.K., Freissinet C., Jones J.H., Manning H., and 5 co-authors. In situ measurement of atmospheric krypton and xenon on Mars with Mars Science Laboratory // Earth and Planet. Sci. Lett. 2016. V. 454. P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.08.028>
- Daerden F., Whiteway J.A., Neary L., Komguem L., Lemon M.T., Heavens N.G., Cantor B.A., Hébrard E., Smith M.D. A solar escalator on Mars: Self-lifting of dust layers by radiative heating // Geophys. Res. Lett. 2015. V. 42. P. 7319–7326. <https://doi.org/10.1002/2015GL064892>
- Dehant V., Le Maistre S., Baland R.-M., Bergeot N., Karatekin Ö., Péters M.-J., Rivoldini A., Lozano L.R., Temel O., Van Hoolst T., and 11 co-authors. The radio-science LaRa instrument onboard ExoMars 2020 to investigate the rotation and interior of Mars // Planet. and Space Sci. 2020. V. 180. id. 104776. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2019.104776>

- Díaz Michelena M., Rivero M.Á., Romero S.F., Adeli S., Oliveira J.S., Henrich C., Aspás A., Parrondo M. Anisotropic MagnetoResistance (AMR) instrument to study the Martian magnetic environment from the surface: Expected scientific return // *Sol. Syst. Res.* 2023. V. 57. P. 307–323.
<https://doi.org/10.1134/S003809462304010X>
- Durry G., Li J.S., Vinogradov I., Titov A., Joly L., Cousin J., Decarpenterie T., Amarouche N., Liu X., Parvite B., Korablev O., Gerasimov M., Zéninari V. Near infrared diode laser spectroscopy of C₂H₂, H₂O, CO₂ and their isotopologues and the application to TDLAS, a tunable diode laser spectrometer for the Martian PHOBOS-GRUNT space mission // *Appl. Phys. B.* 2010. V. 99. P. 339–351.
<https://doi.org/10.1007/s00340-010-3924-y>
- Ehresmann B., Zeitlin C., Hassler D.M., Guo J., Wimmer-Schweingruber R.F., Berger T., Matthiä D., Reitz G. The Martian surface radiation environment at solar minimum measured with MSL/RAD // *Icarus.* 2023. V. 393. id. 115035.
<https://doi.org/10.1016/j.Icarus.2022.115035>
- Esposito F., Colangeli L., Della Corte V., Molfese C., Palumbo P., Ventura S., Merrison J., Nørnberg P., Rodriguez-Gomez J.F., Lopez-Moreno J.J., and 7 co-authors. MEDUSA: Observation of atmospheric dust and water vapor close to the surface of Mars // *Int. J. Mars Sci. Expl.* 2011. V. 6. P. 1–12.
- Esposito F., Debei S., Bettanini C., Molfese C., Arruego Rodríguez I., Colombatti G., Harri A.-M., Montmessin F., Wilson C., Aboudan A., and 58 co-authors. The DREAMS experiment onboard the Schiaparelli Module of the ExoMars 2016 mission: Design, performances and expected results // *Space Sci. Rev.* 2018. V. 214. id. 103.
<https://doi.org/10.1007/s11214-018-0535-0>
- Evlanov E.N., Zubkov B.V., Nenarokov D.F., Linkin V.M., Zavyalov M.A., Tyuryukanov P.M. Gas-discharge anemometer for the investigation of flow dynamics in rarefied gas media // *Cosmic Res.* 2001. V. 39. № 5. P. 453–458.
- Ferri F., Karatekin Ö., Lewis S.R., Forget F., Aboudan A., Colombatti G., Bettanini C., Debei S., Van Hove B., Dehant V., and 18 co-authors. ExoMars Atmospheric Mars Entry and Landing Investigations and Analysis (AMELIA) // *Space Sci. Rev.* 2019. V. 215. id. 8.
<https://doi.org/10.1007/s11214-019-0578-x>
- Folkner W.M., Yoder C.F., Yuan D.N., Standish E.M., Preston R.A. Interior structure and seasonal mass redistribution of Mars from radio tracking of Mars Pathfinder // *Science.* 1997. V. 278. P. 1749–1752.
<https://doi.org/10.1126/science.278.5344.1749>
- Forget F., Hourdin F., Fournier R., Hourdin C., Talagrand O., Collins M., Lewis S.R., Read P.L., Huot J.-P. Improved general circulation models of the Martian atmosphere from the surface to above 80 km // *J. Geophys. Res.: Planets.* 1999. V. 104. P. 24155–24175.
<https://doi.org/10.1029/1999JE001025>
- Franz H.B., Mahaffy P.R., Webster C.R., Flesch G.J., Raaen E., Freissinet C., Atreya S.K., House C.H., McAdam A.C., Knudson C.A., and 12 co-authors. Indigenous and exogenous organics and surface-atmosphere cycling inferred from carbon and oxygen isotopes at Gale crater // *Nature Astron.* 2020. V. 4. P. 526–532.
<https://doi.org/10.1038/s41550-019-0990-x>
- Gerasimov M.V., Sapgir A.G., Zaitsev M.A., Aseev S.A., Vinogradov I.I., Szopa C., Coll P., Cabane M., Coscia D., Goesmann F., Würz P., Lasi D., Tulej M. The Martian gas-analytic package for the landing platform experiments of the ExoMars 2018 // *Proc. LPI.* 2014. id. 1242.
<https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2014/pdf/1242.pdf>
- Giardini D., Lognonné P., Banerdt W.B., Pike W.T., Christensen U., Ceylan S., Clinton J.F., van Driel M., Stähler S.C., Böse M., and 53 co-authors. The seismicity of Mars // *Nature Geosci.* 2020 V. 13. P. 205–212.
<https://doi.org/10.1038/s41561-020-0539-8>
- Gómez-Elvira J., Armiens C., Castañer L., Domínguez M., Genzer M., Gómez F., Haberle R., Harri A.-M., Jiménez V., Kahanpää H., and 29 co-authors. REMS: The environmental sensor suite for the Mars Science Laboratory rover // *Space Sci. Rev.* 2012. V. 170. P. 583–640.
<https://doi.org/10.1007/s11214-012-9921-1>
- Gudkova T.V., Lognonné P., Zharkov V.N., Raevsky S.N. On the scientific aims of the MISS seismic experiment // *Sol. Syst. Res.* 2014. V. 48. P. 11–12.
<https://doi.org/10.1134/S0038094614010043>
- Guzewich S.D., Fedorova A.A., Kahre M.A., Toigo A.D. Studies of the 2018/Mars Year 34 planet-encircling dust storm // *J. Geophys. Res.: Planets.* 2020. V. 125 id. e06700.
<https://doi.org/10.1029/2020JE006700>
- Harri A.-M., Linkin V., Polkko J., Marov M., Pommereau J.-P., Lipatov A., Siili T., Manuilov K., Lebedev V., Lehto A., and 10 co-authors. Meteorological observations on Martian surface: Met-packages of Mars-96 small stations and penetrators planet // *Space. Sci.* 1998. V. 46. P. 779–793.
[https://doi.org/10.1016/S0032-0633\(98\)00012-9](https://doi.org/10.1016/S0032-0633(98)00012-9)
- Harri A.-M., Pichkadze K., Zeleny L., Vazquez L., Schmidt W., Alexashkin S., Korablev O., Guerrero H., Heilimo J., Uspensky M., and 22 co-authors. The MetNet vehicle: a lander to deploy environmental stations for local and global investigations of Mars // *Geophys. Instr., Method and Data Syst.* 2017. V. 6. P. 103–124.
<https://doi.org/10.5194/gi-6-103-2017>
- Hartogh P., Medvedev A.S., Kuroda T., Saito R., Villanueva G., Feofilov A.G., Kutepov A.A., Berger U. Description and climatology of a new general circulation model of the Martian atmosphere // *J. Geophys. Res.: Planets.* 2005. V. 110. id. E11008.
<https://doi.org/10.1029/2005JE002498>
- Hassler D.M., Zeitlin C., Wimmer-Schweingruber R.F., Böttcher S., Martin C., Andrews J., Böhm E., Brinza D.E., Bullock M.A., Burmeister S., and 15 co-authors. The Radiation Assessment Detector (RAD) investigation // *Space Sci. Rev.* 2012. V. 170. P. 503–558.
<https://doi.org/10.1007/s11214-012-9913-1>
- Hassler D.M., Zeitlin C., Wimmer-Schweingruber R.F., Ehresmann B., Rafkin S., Eigenbrode J.L., Brinza D.E.,

- Weigle G., Böttcher S., Böhm E., and 438 co-authors. Mars' surface radiation environment measured with the Mars Science Laboratory's Curiosity Rover // *Science*. 2014. V. 343. № 6169. id. 1244797.
<https://doi.org/10.1126/science.1244797>
- Hess S.L., Ryan J.A., Tillman J.E., Henry R.M., Leovy C.B. The annual cycle of pressure on Mars measured by Viking Landers 1 and 2 // *Geophys. Res. Lett.* 1980. V. 7. P. 197–200.
<https://doi.org/10.1029/GL007i003p00197>
- Hofer L., Wurz P., Buch A., Cabane M., Coll P., Coscia D., Gerasimov M., Lasi D., Sapgir A., Szopa C., Tulej M. Prototype of the gas chromatograph-mass spectrometer to investigate volatile species in the lunar soil for the Luna-Resurs mission // *Planet. and Space Sci.* 2015. V. 111. P. 126–133.
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2015.03.027>
- Holstein-Rathlou C., Maue A., Withers P. Atmospheric studies from the Mars Science Laboratory entry, descent and landing atmospheric structure reconstruction // *Planet. and Space Sci.* 2016. V. 120. P. 15–23.
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2015.10.015>
- Huang Q., Schmerr N.C., King S.D., Banerdt W.B. Seismic detection of a deep mantle discontinuity within Mars by InSight // *Proc. Nat. Acad. Sci.* 2022. V. 119. id. e2204474119.
<https://doi.org/10.1073/pnas.2204474119>
- Jakosky B.M., Zent A.P., Zurek R.W. The Mars water cycle: Determining the role of exchange with the regolith // *Icarus*. 1997. V. 130. P. 87–95.
<https://doi.org/10.1006/Icarus.1997.5799>
- Jimenez-Martín J., García Menéndez E., Gonzalez-Guerrero Bartolomé M., Martínez-Oter J., Apéstigue-Palacio V., de Mingo J.R., Rivas J., Serrano F., Montalvo S., García-Llases A., Arruego I. Solar Irradiance Sensor of RDM ExoMars 2022 calibration // *Proc. SPIE*. 2023. V. 12777. id. 1277774.
<https://doi.org/10.1117/12.2691378>
- Johnson C.L., Mittelholz A., Langlais B., Russell C.T., Ansan V., Banfield D., Chi P.J., Fillingim M.O., Forget F., Haviland H.F., and 14 co-authors. Crustal and time-varying magnetic fields at the InSight landing site on Mars // *Nature Geosci.* 2020. V. 13. P. 199–204.
<https://doi.org/10.1038/s41561-020-0537-x>
- Kahre M., Murphy J., Newman C., Wilson R., Cantor B., Lemmon M., Wolff M. The Mars dust cycle // *The Atmosphere and Climate of Mars* / Eds: Haberle R., Clancy R., Forget F., Smith M., Zurek R. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2017. P. 295–337.
<https://doi.org/10.1017/9781139060172.010>
- Kahre M.A., Haberle R.M., Wilson R.J., Urata R.A., Steakley K.E., Brecht A.S., Bertrand T., Kling A., Battersson C.M., Hartwick V., Harman C.E., Gkouvelis L. The NASA Ames legacy Mars global climate model: Radiation code error correction and new baseline water cycle simulation // *Icarus*. 2023. V. 400. id. 115561.
<https://doi.org/10.1016/j.Icarus.2023.115561>
- Karlgård C.D., Korzun A.M., Schoenenberger M., Bonfiglio E.P., Kass D.M., Grover M.R. Mars InSight entry, descent, and landing trajectory and atmosphere reconstruction // *J. Spacecraft and Rockets*. 2021. V. 58. P. 865–878.
<https://doi.org/10.2514/1.A34913>
- Karlgård C.D., Schoenenberger M., Dutta S., Way D.W. Mars entry, descent, and landing instrumentation 2 trajectory, aerodynamics, and atmosphere reconstruction // *J. Spacecraft and Rockets*. 2023. V. 60. P. 199–214.
<https://doi.org/10.2514/1.A35440>
- Kawamura T., Clinton J.F., Zenhäusern G., Ceylan S., Horleston A.C., Dahmen N.L., Duran C., Kim D., Plasman M., Stähler S.C., and 8 co-authors. S1222a – the largest Marsquake detected by InSight // *Geophys. Res. Lett.* 2023. V. 50. id. e2022GL101543.
<https://doi.org/10.1029/2022GL101543>
- Knapmeyer-Endrun B., Panning M.P., Bissig F., Rakshit J., Khan A., Kim D., Lekić V., Tauzin B., Tharimena S., Plasman M., and 29 co-authors. Thickness and structure of the Martian crust from InSight seismic data // *Science*. 2021. V. 373. № 6553. P. 438–443.
<https://doi.org/10.1126/science.abf8966>
- Knutsen E.W., Montmessin F., Verdier L., Lacombe G., Lefèvre F., Ferron S., Giuranna M., Wolkenberg P., Fedorova A., Trokhimovskiy A., Korablev O. Water vapor on Mars: A refined climatology and constraints on the near-surface concentration enabled by synergistic retrievals // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2022. V. 127. id. e07252.
<https://doi.org/10.1029/2022JE007252>
- Kok J.F., Renno N.O. Electrification of wind-blown sand on Mars and its implications for atmospheric chemistry // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. № 5. id. L05202.
<https://doi.org/10.1029/2008GL036691>
- Kolmasova I., Santolik O., Skalsky A. Anticipated plasma wave measurement onboard ExoMars 2020 surface platform // *Proc. 8th Int. Workshop on planets, solar and heliospheric radio emissions*, Graz, Austria, October 25–27, 2016. 2017. P. 487.
<https://doi.org/10.1553/PRE8s487>
- Konopliv A.S., Park R.S., Folkner W.M. An improved JPL Mars gravity field and orientation from Mars orbiter and lander tracking data // *Icarus*. 2016. V. 274. P. 253–260.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.02.052>
- Konopliv A.S., Park R.S., Rivoldini A., Baland R.-M., Le Maistre S., Van Hoolst T., Yseboodt M., Dehant V. Detection of the Chandler wobble of Mars from orbiting spacecraft // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47. id. e90568.
<https://doi.org/10.1029/2020GL090568>
- Korablev O., Montmessin F., Trokhimovskiy A., Fedorova A.A., Shakun A.V., Grigoriev A.V., Moshkin B.E., Ignatiev N.I., Forget F., Lefèvre F., and 64 co-authors. The Atmospheric Chemistry Suite (ACS) of three spectrometers for the ExoMars 2016 Trace Gas Orbiter // *Space Sci. Rev.* 2018. V. 214. id. 7.
<https://doi.org/10.1007/s11214-017-0437-6>
- Kuchynka P., Folkner W.M., Konopliv A.S., Parker T.J., Park R.S., Le Maistre S., Dehant V. New constraints on Mars rotation determined from radiometric tracking of the Opportunity Mars Exploration Rover // *Icarus*. 2014. V. 229. P. 340–347.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.11.015>

- Kurgansky M.V.* Statistical distribution of atmospheric dust devils on Earth and Mars // *Boundary-Layer Meteorol.* 2022. V. 184. P. 381–400.
<https://doi.org/10.1007/s10546-022-00713-w>
- Langlais B., Thébaud E., Houliéz A., Purucker M.E.* A new model of the crustal magnetic field of Mars using MGS and MAVEN // *J. Geophys. Res.: Planets.* 2019. V. 124. P. 1542–1569.
- Le Maistre S., Péters M.-J., Marty J.-C., Dehant V.* On the impact of the operational and technical characteristics of the LaRa experiment on the determination of Mars' nutation // *Planet and Space Sci.* 2020. V. 180. id. 104766
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2019.104766>
- Lefèvre F., Trokhimovskiy A., Fedorova A., Baggio L., Lacombe G., Määtänen A., Bertaux J.-L., Forget F., Millour E., Venot O., Bénilan Y., Korabiev O., Montmessin F.* Relationship between the ozone and water vapor columns on Mars as observed by SPICAM and calculated by a Global Climate Model // *J. Geophys. Res.: Planets.* 2021. V. 126. id. e06838.
<https://doi.org/10.1029/2021JE006838>
- Linkin V., Harri A.-M., Lipatov A., Belostotskaja K., Derbunovich B., Ekonomov A., Khloustova L., Kremnev R., Makarov V., Martinov B., and 11 co-authors.* A sophisticated lander for scientific exploration of Mars: Scientific objectives and implementation of the Mars-96 small station // *Planet. and Space Sci.* 1998. V. 46. P. 717–737.
[https://doi.org/10.1016/S0032-0633\(98\)00008-7](https://doi.org/10.1016/S0032-0633(98)00008-7)
- Liu J., Li C., Zhang R., Rao W., Cui X., Geng Y., Jia Y., Huang H., Ren X., Yan W., and 13 co-authors.* Geomorphic contexts and science focus of the Zhurong landing site on Mars // *Nat. Astron.* 2022. V. 6. P. 65–71.
<https://doi.org/10.1038/s41550-021-01519-5>
- Lognonné P., Zharkov V.N., Karczewski J.F., Romanowicz B., Menvielle M., Poupinet G., Brient B., Cavoit C., Desauter A., Dole B., et al.* The seismic OPTIMISM experiment // *Planet. and Space Sci.* 1998. V. 46. P. 739–747.
[https://doi.org/10.1016/S0032-0633\(98\)00009-9](https://doi.org/10.1016/S0032-0633(98)00009-9)
- Lognonné P., Giardini D., Banerdt B., Gagnepain-Beyneix J., Mocquet A., Spohn T., Karczewski J.F., Schibler P., Cacho S., Pike W.T., and 5 co-authors.* The NetLander very broad band seismometer // *Planet. and Space Sci.* 2000. V. 48. P. 1289–1302.
[https://doi.org/10.1016/S0032-0633\(00\)00110-0](https://doi.org/10.1016/S0032-0633(00)00110-0)
- Lognonné P., Banerdt W.B., Giardini D., Pike W.T., Christensen U., Laudet P., de Raucourt S., Zweifel P., Calcutt S., Bierwirth M., and 161 co-authors.* SEIS: InSight's seismic experiment for internal structure of Mars // *Space Sci. Rev.* 2019. V. 215. id. 12.
<https://doi.org/10.1007/s11214-018-0574-6>
- Magalhães J.A., Schofield J.T., Seiff A.* Results of the Mars Pathfinder atmospheric structure investigation // *J. Geophys. Res.: Planets.* 1999. V. 104. P. 8943–8955.
<https://doi.org/10.1029/1998JE900041>
- Mahaffy P.R., Webster C.R., Atreya S.K., Franz H., Wong M., Conrad P.G., Harpold D., Jones J.J., Leshin L.A., Manning H., and 439 co-authors.* Abundance and isotopic composition of gases in the Martian atmosphere from the Curiosity rover // *Science.* 2013. V. 341. № 6143. P. 263–266.
<https://doi.org/10.1126/science.1237966>
- Malakhov A.V., Mitrofanov I.G., Golovin D.V., Litvak M.L., Sanin A.B., Djachkova M.V., Lukyanov N.V.* High resolution map of water in the Martian regolith observed by FRENDE neutron telescope onboard ExoMars TGO // *J. Geophys. Res.: Planets.* 2022. V. 127. id. e07258.
<https://doi.org/10.1029/2022JE007258>
- Manukin A.B., Gorshkov A.N., Shlyk A.F.* GRAS-F seismogravimeter for measuring gravity-inertial fields on the surface of Phobos // *Sol. Syst. Res.* 2010. V. 44. P. 417–422.
<https://doi.org/10.1134/S0038094610050096>
- Martin R.L., Kok J.F.* Wind-invariant saltation heights imply linear scaling of aeolian saltation flux with shear stress // *Science Adv.* 2017. V. 3. id. e1602569.
<https://doi.org/10.1126/sciadv.1602569>
- Martín-Torres J., Zorzano M.-P., Soria-Salinas Á., Nazari-Mous M.I., Konatham S., Mathanlal T., Ramachandran A.V., Ramírez-Luque J.-A., Mantas-Nakhai R.* The HABIT (HabitAbility: Brine Irradiation and Temperature) environmental instrument for the ExoMars 2022 Surface Platform // *Planet. and Space Sci.* 2020. V. 190. id. 104968.
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2020.104968>
- Mitrofanov I.G., Kozyrev A.S., Lisov D.I., Litvak M.L., Malakhov A.A., Mokrousov M.I., Benkhoff J., Owens A., Schulz R., Quarati F.* The Mercury Gamma-Ray and Neutron Spectrometer (MGNS) onboard the Mercury Planetary Orbiter of the BepiColombo mission: Design updates and first measurements in space // *Space Sci. Rev.* 2021. V. 217. id. 67.
<https://doi.org/10.1007/s11214-021-00842-7>
- Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Nikiforov S.Y., Jun I., Bobrovitsky Y.I., Golovin D.V., Grebennikov A.S., Fedosov F.S., Kozyrev A.S., Lisov D.I., and 8 co-authors.* The ADRON-RM instrument onboard the ExoMars rover // *Astrobiology.* 2017. V. 17. P. 585–594.
<https://doi.org/10.1089/ast.2016.1566>
- Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Varenikov A.B., Barma-kov Y.N., Behar A., Bobrovitsky Y.I., Bogolubov E.P., Boynton W.V., Harshman K., Kan E., and 13 co-authors.* Dynamic Albedo of Neutrons (DAN) experiment onboard NASA's Mars Science Laboratory // *Space Sci. Rev.* 2012. V. 170. P. 559–582.
<https://doi.org/10.1007/s11214-012-9924-y>
- Mitrofanov I., Malakhov A., Djachkova M., Golovin D., Litvak M., Mokrousov M., Sanin A., Svedhem H., Zelenyi L.* The evidence for unusually high hydrogen abundances in the central part of Valles Marineris on Mars // *Icarus.* 2022a. V. 374. id. 114805.
<https://doi.org/10.1016/j.Icarus.2021.114805>
- Mitrofanov I.G., Nikiforov S.Y., Djachkova M.V., Lisov D.I., Litvak M.L., Sanin A.B., Vasavada A.R.* Water and chlorine in the Martian subsurface along the traverse of NASA's Curiosity rover: 1. DAN measurement profiles along the traverse // *J. Geophys. Res.: Planets.* 2022b. V. 127. id. e2022JE007327.
<https://doi.org/10.1029/2022JE007327>

- Mitrofanov I., Malakhov A., Bakhtin B., Golovin D., Kozyrev A., Litvak M., Mokrousov M., A. Sanin, Tretyakov V., Vostrukhin A., and 16 co-authors. Fine Resolution Epithermal Neutron Detector (FRIEND) onboard the ExoMars Trace Gas Orbiter // *Space Sci. Rev.* 2018. V. 214. id. 86.
<https://doi.org/10.1007/s11214-018-0522-5>
- Mittelholz A., Johnson C.L., Thorne S.N., Joy S., Barrett E., Fillingim M.O., Forget F., Langlais B., Russell C.T., Spiga A., Smrekar S., Banerdt W.B. The origin of observed magnetic variability for a sol on Mars from In-Sight // *J. Geophys. Res.: Planets.* 2020. V. 125. № 9. id. e2020JE006505.
<https://doi.org/10.1029/2020JE006505>
- Mokrousov M.I., Golovin D.V., Mitrofanov I.G., Anikin A.A., Kozyrev A.S., Litvak M.L., Malakhov A.V., Nikiforov S.Y., Pekov A.N., Sanin A.B., Tretyakov V.I. ADRON: Active Spectrometer of Neutron and Gamma Radiation of the Moon and Mars // *Phys. Particles Nuclei Lett.* 2022. V. 19. P. 744–764.
<https://doi.org/10.1134/S1547477122060164>
- Montabone L., Forget F., Millour E., Wilson R.J., Lewis S.R., Cantor B., Kass D., Kleinböhl A., Lemmon M.T., Smith M.D., Wolff M.J. Eight-year climatology of dust optical depth on Mars // *Icarus.* 2015. V. 251. P. 65–95.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.12.034>
- Montmessin F., Smith M., Langevin Y., Mellon M., Fedorova A. The water cycle // *The Atmosphere and Climate of Mars* / Eds: Haberle R., Clancy R., Forget F., Smith M., Zurek R. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2017. P. 338–373.
<https://doi.org/10.1017/9781139060172.011>
- Musiolik G., Kruss M., Demirci T., Schirnski B., Teiser J., Daerden F., Smith M.D., Neary L., Wurm G. Saltation under Martian gravity and its influence on the global dust distribution // *Icarus.* 2018. V. 306. P. 25–31.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2018.01.007>
- Navarro T., Madeleine J.-B., Forget F., Spiga A., Millour E., Montmessin F., Määttänen A. Global climate modeling of the Martian water cycle with improved microphysics and radiatively active water ice clouds // *J. Geophys. Res.: Planets.* 2014. V. 119. P. 1479–1495.
<https://doi.org/10.1002/2013JE004550>
- Neakrase L.D.V., Balme M.R., Esposito F., Kelling T., Klose M., Kok J.F., Marticorena B., Merrison J., Patel M., Wurm G. Particle lifting processes in dust devils // *Space Sci. Rev.* 2016. V. 203. P. 347–376.
<https://doi.org/10.1007/s11214-016-0296-6>
- Neary L., Daerden F. The GEM–Mars general circulation model for Mars: Description and evaluation // *Icarus.* 2018. V. 300. P. 458–476.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.09.028>
- Newman C.E., Richardson M.I. The impact of surface dust source exhaustion on the Martian dust cycle, dust storms and interannual variability, as simulated by the MarsWRF General Circulation Model // *Icarus.* 2015. V. 257. 47–87.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.03.030>
- Pavlov A.K., Shelegedin V.N., Vdovina M.A., Pavlov A.A. Growth of microorganisms in Martian-like shallow subsurface conditions: Laboratory modelling // *Int. J. Astrobiol.* 2010. V. 9. P. 51–58.
<https://doi.org/10.1017/S1473550409990371>
- Péters M.-J., Le Maistre S., Yseboodt M., Marty J.-C., Rivoldini A., Van Hoolst T., Dehant V. LaRa after RISE: Expected improvement in the Mars rotation and interior models // *Planet. and Space Sci.* 2020. V. 180. № 4. id. 104745.
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2019.104745>
- Petrosyan A., Galperin B., Larsen S.E., Lewis S.R., Määttänen A., Read P.L., Renno N., Rogberg L.P.H.T., Savijärvi H., Siili T., Spiga A., Toigo A., Vázquez L. The Martian atmospheric boundary layer // *Rev. Geophys.* 2011. V. 49. № 3. id. RG3005.
<https://doi.org/10.1029/2010RG000351>
- Read P., Galperin B., Larsen S., Lewis S.R., Määttänen A., Petrosyan A., Renno N., Savijärvi H., Siili T., Spiga A. The Martian planetary boundary layer // *The Atmosphere and Climate of Mars* / Eds: Haberle R., Clancy R., Forget F., Smith M., Zurek R. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2017. P. 172–202.
<https://doi.org/10.1017/9781139060172.007>
- Renno N.O., Wong A.-S., Atreya S.K., de Pater I., Roos-Serote M. Electrical discharges and broadband radio emission by Martian dust devils and dust storms // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. id. 2140.
<https://doi.org/10.1029/2003GL018789>
- Rodin A., Vinogradov I., Zenevich S., Spiridonov M., Gazizov I., Kazakov V., Meshcherinov V., Golovin I., Kozlova T., Lebedev Y., and 11 co-authors. Martian Multi-channel Diode Laser Spectrometer (M-DLS) for in-situ atmospheric composition measurements on Mars onboard ExoMars-2022 Landing Platform // *Applied Sci.* 2020. V. 10. № 24. id. 8805.
<https://doi.org/10.3390/app10248805>
- Rodriguez-Manfredi J.A., de la Torre Juárez M., Alonso A., Apéstigue V., Arruego I., Atienza T., Banfield D., Bolland J., Carrera M.A., Castañer L., and 76 co-authors. The Mars Environmental Dynamics Analyzer, MEDA. A suite of environmental sensors for the Mars 2020 mission // *Space Sci. Rev.* 2021. V. 217. id. 48.
<https://doi.org/10.1007/s11214-021-00816-9>
- Sagan C., Bagnold R.A. Fluid transport on Earth and Aeolian transport on Mars // *Icarus.* 1975. V. 26. 209–218.
[https://doi.org/10.1016/0019-1035\(75\)90080-9](https://doi.org/10.1016/0019-1035(75)90080-9)
- Seiff A., Kirk D.B. Structure of the atmosphere of Mars in summer at mid-latitudes // *J. Geophys. Res.* 1977. V. 82. P. 4364–4378.
<https://doi.org/10.1029/JS082i028p04364>
- Seiff A., Tillman J.E., Murphy J.R., Schofield J.T., Crisp D., Jeffrey R.B., LaBaw C., Mahoney C., Mihalov J.D., Wilson G.R., Haberle R. The atmosphere structure and meteorology instrument on the Mars Pathfinder lander // *J. Geophys. Res.: Planets.* 1997. V. 102. P. 4045–4056.
<https://doi.org/10.1029/96JE03320>
- Semkova J., Dachev T., Matviichuk Y., Koleva R., Tomov B., Baynov P., Petrov V., Nguyen V., Siegrist M., Chene J., d'Uston C., Cotin F. Dosimetric investigations on Mars-96 mission // *Adv. Space Res.* 1994. V. 14. P. 707–710.
[https://doi.org/10.1016/0273-1177\(94\)90530-4](https://doi.org/10.1016/0273-1177(94)90530-4)

- Semkova J., Koleva R., Benghin V., Dachev T., Matviichuk Y., Tomov B., Krastev K., Maltchev S., Dimitrov P., Bankov N., and 10 co-authors.* Results from radiation environment measurements aboard ExoMars Trace Gas Orbiter in Mars science orbit in May 2018–December 2019 // *Icarus*. 2021. V. 361. id. 114264.
<https://doi.org/10.1016/j.Icarus.2020.114264>
- Shakun A., Korablev O., Moshkin B., Grigoriev A., Ignatiev N., Maslov I., Sazonov O., Patsaev D., Kungurov A., Santos-Skripko A., and 7 co-authors.* Fourier transform spectrometers for remote sensing of planetary atmospheres and surfaces // *CEAS Space J.* 2017. V. 9. P. 399–409.
<https://doi.org/10.1007/s12567-017-0176-2>
- Shakun A., Ignatiev N., Luginin M., Grigoriev A., Moshkin B., Grassi D., Arnold G., Maturilli A., Kungurov A., Makarov V., and 11 co-authors.* ACS/TIRVIM: Calibration and first results // *Proc. SPIE*. 2018. V. 10765. id. 107650E.
<https://doi.org/10.1117/12.2322163>
- Shakun A., Kungurov A., Sazonov O., Stupin I., Arnold G., Grigoriev A., Korablev O.* Two-coordinate pointing and tracking system for an infrared Fourier-transform spectrometer // *Proc. SPIE*. 2019a. V. 11128. id. 111280H.
<https://doi.org/10.1117/12.2535444>
- Shakun A., Santos-Skripko A., Sazonov O., Maslov I., Ignatiev N., Stupin I., Arnold G., Grigoriev A., Korablev O.* Interferometer with single-axis robot: design, alignment and performance // *Proc. SPIE*. 2019b. V. 11128. id. 111280G.
<https://doi.org/10.1117/12.2535436>
- Smith M.D., Wolff M.J., Spanovich N., Ghosh A., Banfield D., Christensen P.R., Landis G.A., Squyres S.W.* One Martian year of atmospheric observations using MER Mini-TES // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2006. V. 111. id. E12S13.
<https://doi.org/10.1029/2006JE002770>
- Smith M., Bougher S., Encrenaz T., Forget F., Kleinböhl A.* Thermal structure and composition // *The Atmosphere and Climate of Mars* / Eds: Haberle R., Clancy R., Forget F., Smith M., Zurek R. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2017. P. 42–75.
<https://doi.org/10.1017/9781139060172.004>
- Smith M.D., Daerden F., Neary L., Khayat A.S.J., Holmes J.A., Patel M.R., Villanueva G., Liuzzi G., Thomas I.R., Ristic B., Bellucci G., Lopez-Moreno J.J., Vandaee A.C.* The climatology of carbon monoxide on Mars as observed by NOMAD nadir-geometry observations // *Icarus*. 2021. V. 362. id. 114404.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2021.114404>
- Soria-Salinas Á., Zorzano M.-P., Mantas-Nakhai R., Martín-Torres J.* Wind retrieval from temperature measurements from the Rover Environmental Monitoring Station/Mars Science Laboratory // *Icarus*. 2020. V. 346. id. 113785.
<https://doi.org/10.1016/j.Icarus.2020.113785>
- Spiga A., Banfield D., Teanby N.A., Forget F., Lucas A., Kenda B., Rodriguez Manfredi J.A., Widmer-Schnidrig R., Murdoch N., Lemmon M.T., and 27 co-authors.* Atmospheric science with InSight // *Space Sci. Rev.* 2018. V. 214. id. 109.
<https://doi.org/10.1007/s11214-018-0543-0>
- Stähler S.C., Khan A., Banerdt W.B., Lognonné P., Giardini D., Ceylan S., Drilleau M., Duran A.C., Garcia R.F., Huang Q., and 31 co-authors.* Seismic detection of the Martian core // *Science*. 2021. V. 373. P. 443–448.
<https://doi.org/10.1126/science.abi7730>
- Taylor P.A., Catling D.C., Daly M., Dickinson C.S., Gunnlaugsson H.P., Harri A.-M., Lange C.F.* Temperature, pressure, and wind instrumentation in the Phoenix meteorological package // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. id. E00A10.
<https://doi.org/10.1029/2007JE003015>
- Todd J.F.J., Barber S.J., Wright I.P., Morgan G.H., Morse A.D., Sheridan S., Leese M.R., Maynard J., Evans S.T., Pillinger C.T., and 7 co-authors.* Ion trap mass spectrometry on a comet nucleus: The Ptolemy instrument and the Rosetta space mission // *J. Mass Spectrometry*. 2007. V. 42. P. 1–10.
<https://doi.org/10.1002/jms.1147>
- Toigo A.D., Richardson M.I., Wilson R.J., Wang H., Ingersoll A.P.* A first look at dust lifting and dust storms near the south pole of Mars with a mesoscale model // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2002. V. 107. id. 5050.
<https://doi.org/10.1029/2001JE001592>
- Toledo D., Rannou P., Pommereau J.-P., Sarkissian A., Foujols T.* Measurement of aerosol optical depth and sub-visual cloud detection using the optical depth sensor (ODS) // *Atmos. Measurements Techniq.* 2016. V. 9. P. 455–467.
<https://doi.org/10.5194/amt-9-455-2016>
- Toledo D., Arruego I., Apéstigue V., Jiménez J.J., Gómez L., Yela M., Rannou P., Pommereau J.-P.* Measurement of dust optical depth using the solar irradiance sensor (SIS) onboard the ExoMars 2016 EDM // *Planet. and Space Sci.* 2017. V. 138. P. 33–43.
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2017.01.015>
- Vago J., Witasse O., Svedhem H., Baglioni P., Haldemann A., Gianfiglio G., Blancquaert T., McCoy D., de Groot R.* ESA ExoMars program: The next step in exploring Mars // *Sol. Syst. Res.* 2015a. V. 49. P. 518–528.
<https://doi.org/10.1134/S0038094615070199>
- Vago J.L., Lorenzoni L., Calantropio F., Zashchirinskiy A.M.* Selecting a landing site for the ExoMars 2018 mission // *Sol. Syst. Res.* 2015b. V. 49. P. 538–542.
<https://doi.org/10.1134/S0038094615070205>
- Vago J.L., Westall F., Pasteur Instrument Teams, Landing Site Selection Working Group, Other Contributors, Coates A.J., Jaumann R., Korablev O., Ciarletti V., Mitrofanov I., and 66 co-authors.* Habitability on early Mars and the search for biosignatures with the ExoMars rover // *Astrobiology*. 2017. V. 17. P. 471–510.
<https://doi.org/10.1089/ast.2016.1533>
- Webster C.R., Mahaffy P.R., Flesch G.J., Niles P.B., Jones J.H., Leshin L.A., Atreya S.K., Stern J.C., Christensen L.E., Owen T., and 4 co-authors.* Isotope ratios of H, C, and O in CO₂ and H₂O of the Martian atmosphere // *Science*. 2013. V. 341. № 6143. P. 260–263.
<https://doi.org/10.1126/science.1237961>

- Wilson R.J., Hamilton K.* Comprehensive model simulation of thermal tides in the Martian atmosphere // *J. Atmos. Sci.* 1996. V. 53. № 9. P. 1290–1326.
doi:10.1175/1520-0469(1996)053<1290CMSOTT>2.0.CO;2
- Withers P., Smith M.D.* Atmospheric entry profiles from the Mars exploration rovers Spirit and Opportunity // *Icarus*. 2006. V. 185. P. 133–142.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2006.06.013>
- Wolff M.J., Smith M.D., Clancy R., Spanovich N., Whitney B., Lemmon M.T., Bandfield J.L., Banfield D., Ghosh A., Landis G., Christensen P.R., Bell III J.F., Squyres S.W.* Constraints on dust aerosols from the Mars Exploration Rovers using MGS overflights and Mini-TES. *J. Geophys. Res.: Planets*. 2006. V. 111. id. E12S17.
<https://doi.org/10.1029/2006je002786>
- Wolff M.J., Smith M.D., Clancy R.T., Arvidson R., Kahre M., Seelos IV F., Murchie S., Savijärvi H.* Wavelength dependence of dust aerosol single scattering albedo as observed by the Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2009. V. 114. id. E00D04.
<https://doi.org/10.1029/2009JE003350>
- Wong M.H., Atreya S.K., Mahaffy P.N., Franz H.B., Malespin C., Trainer M.G., Stern J.C., Conrad P.G., Manning H.L.K., Pepin R.O., and 7 co-authors.* Isotopes of nitrogen on Mars: Atmospheric measurements by Curiosity's mass spectrometer // *Geophys. Res. Lett.* 2013. V. 40. P. 6033–6037.
<https://doi.org/10.1002/2013GL057840>
- Yoder C.F., Standish E.M.* Martian precession and rotation from Viking lander range data // *J. Geophys. Res.: Planets*. 1997. V. 102. P. 4065–4080.
<https://doi.org/10.1029/96JE03642>
- Zelenyi L.M., Korablev O.I., Rodionov D.S., Novikov B.S., Marchenkov K.I., Andreev O.N., Larionov E.V.* Scientific objectives of the scientific equipment of the landing platform of the ExoMars-2018 mission // *Sol. Syst. Res.* 2015. V. 49. P. 509–517.
<https://doi.org/10.1134/S0038094615070229>
- Zharkov V.N.* The internal structure of Mars: A key to understanding the origin of terrestrial planets // *Sol. Syst. Res.* 1996. V. 30. P. 456–465.

УДК 520; 528.8.04; 681.7

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗВЕЗДНЫХ КАТАЛОГОВ ДЛЯ ДАТЧИКОВ ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

© 2024 г. Г. А. Аванесов^а, *, Я. Д. Эльяшев^а

^а Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

* E-mail: genrikh-avanesov@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.08.2023 г.

После доработки 30.08.2023 г.

Принята к публикации 09.09.2023 г.

Представлена краткая история создания звездных датчиков ориентации в Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) и каталогов звезд для них. Описан проведенный в начале 1970-х годов эксперимент по синхронной съемке звезд и земной поверхности с борта пилотируемых станций Салют-2, -3. Показаны трудности ввода фотоснимков в электронно-вычислительные машины (ЭВМ) того времени. На основе каталогов звезд SAO, Hipparcos и Gaia составлено около 11000 микрокаталогов вокруг наиболее ярких звезд небесной сферы. Каждый из них содержит в центре одну звезду с магнитудой до 7.8 m и все звезды окружения до 13 m в радиусе 15'. Микрокаталоги объединены в “Базовый каталог звезд”, который в ближайшей перспективе будет использоваться для составления бортовых каталогов звезд для датчиков ориентации космических аппаратов семейства БОКЗ. Для работы с базовым каталогом разработаны и используются в тестовом режиме две программы: Catalog Guide и Star Manager. Первая программа предназначена для просмотра базового каталога, визуализации его фрагментов и составления списков звезд с заданными параметрами. Вторая программа носит расчетно-аналитический характер. В ней собраны математические модели звездных датчиков ориентации семейства БОКЗ, а также математический аппарат, позволяющий детально моделировать наиболее тонкие элементы бортовой обработки данных. Обе программы могут работать в ручном и автоматическом режимах. Отработанная на нескольких звездах в ручном режиме последовательность действий затем может выполняться автоматически для больших списков звезд. В статье описываются структура и содержание базового каталога, а также иллюстрируется работа с ним с помощью специально разработанных для этой цели программ.

Ключевые слова: звездные величины, каталоги, микрокаталоги, датчики ориентации, моделирование, фотометрия, астрометрия, навигация, геопривязка, космическая съемка

DOI: 10.31857/S0320930X24010021, **EDN:** OIFHKM

ВВЕДЕНИЕ

Заимствованные из авиации приборы для определения направления на звезды появились на борту космических аппаратов (КА) в самом начале космической эры и эксплуатировались на протяжении нескольких десятилетий. За то время они достигли высокой степени совершенства, но сохранили при этом свой главный недостаток: чтобы измерить направление на звезду, прибор надо было сначала навести на нее с некоторой точностью. Каталоги этих приборов содержали около 20 наиболее ярких звезд, которые стали называться навигационными. Соответственно, угловые расстояния между ними были большие, а перенацеливание приборов требовало времени. В результате астрокоррекция гироскопов КА становилась сложной и продолжительной процедурой. Космической технике требовался звездный датчик, способный

за доли секунды зафиксировать изображение произвольного участка небесной сферы, распознать на нем звезды и, зная их небесные координаты, рассчитать текущие значения трехосной ориентации КА в инерциальном пространстве.

Именно такие приборы, содержащие в себе съемочную камеру на основе матричного приемника излучения и микропроцессор, в памяти которого размещен достаточно большой звездный каталог всего неба, были созданы в ИКИ РАН и внедрены в отечественную космическую технику в промышленном масштабе. На это ушло чуть более 50 лет. Из них десять лет ушло на предварительные исследования и эксперименты, еще десять ушло на отработку прототипов в космосе. Внедрение приборов пришлось на 1990-е годы прошлого века. Их эксплуатация началась на КА РКК “Энергия”: на спутниках связи Ямал-100 в 1999 г., на Международной космической станции в 2000 г. и на КА

Ямал-200 в 2003 г. В РКК “Энергия” звездным датчикам ИКИ РАН было присвоено название: “Блок определения координат звезд”, сокращенно БОКЗ. Эксплуатация приборов на этих КА оказалась успешной и не закончилась до сих пор, в связи с чем эту не слишком благозвучную аббревиатуру не стали менять. Сегодня разрабатываемые и изготавливаемые ИКИ РАН приборы успешно эксплуатируются на многих отечественных КА. В состав каждого прибора из многочисленного теперь семейства приборов БОКЗ всегда входит звездный каталог, особенности которого соответствуют их основным параметрам.

ИСТОРИЯ ВОПРОСА

Регулярные работы по наблюдению звезд небесной сферы в интересах решения навигационных задач начались в ИКИ РАН с момента его создания в 1965 г. Инициировались они руководителями большой и высококвалифицированной группы специалистов во главе с д. т. н. Б.Н. Родионовым¹ и к. т. н. Я.Л. Зиманом², перешедшими в ИКИ РАН из Московского института геодезии, аэрофотосъемки и картографии.

Большую роль в постановке и развитии этих работ в ИКИ РАН сыграла статья Я.Л. Зимана “Определение ориентации космических аппаратов по снимкам звезд”, вышедшая в журнале Космические исследования в 1969 г. (Зиман, Томилова, 1969). В ней ничего не говорилось о звездных датчиках ориентации, но заложенные в ней принципы распознавания звезд и определения по ним параметров ориентации КА в инерциальном пространстве указывали на целесообразность поиска приборных решений задачи.

Следует иметь в виду, что в то время для съемки звезд и земной поверхности использовалась исключительно фотографическая техника. При этом очень актуальной считалась задача автоматизации процесса геопривязки космических снимков. Для решения этой и ряда сопутствующих задач по предложению ИКИ РАН на пилотируемых станциях Салют-2, -3 в 1970–1973 гг. был поставлен эксперимент по синхронной съемке звезд небесной сферы и объектов земной поверхности. Для этого в ИКИ РАН была выполнена доработка аэрофотоаппаратов АФА БА (рис. 1). На каждой станции устанавливалось по два аппара-

та: для съемки звезд — в жилом отсеке, для съемки земной поверхности — в переходном отсеке. Одновременность съемки обеспечивалась специальным синхронизирующим устройством.

В фотоаппаратах подсвечивались часы и координатные метки, что затем использовалось при обработке данных.

К моменту проведения эксперимента в ИКИ РАН были подготовлены средства обработки данных. Впервые для этой цели должна была использоваться ЭВМ БЭСМ-4, оборудованная устройством ввода изображений на основе фототелеграфного аппарата (рис. 2).

ЭВМ того времени не были приспособлены для работы с изображениями. Проблемой было и подключение фототелеграфного аппарата к ней. Машина не могла воспринимать непрерывный

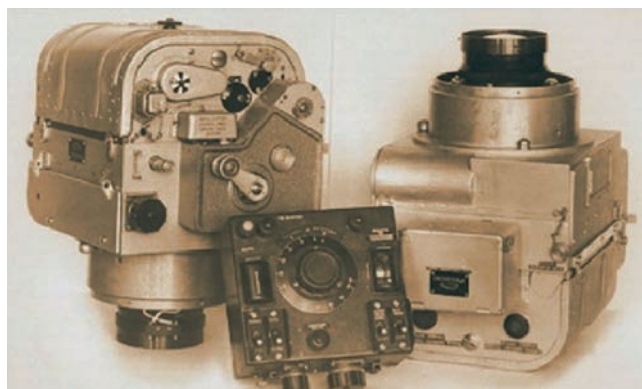


Рис. 1. Аэрофотоаппараты АФА БА-210, адаптированные для установки на станцию Салют.



Рис. 2. Фототелевизионное устройство ввода изображений в ЭВМ БЭСМ-4 на базе фототелеграфного аппарата “Нева”.

¹ Родионов Борис Николаевич, 1921–2015 гг., доктор технических наук, профессор. С 1957 по 1966 гг. заведовал кафедрой аэрофотосъемки МИИГАиК. В 1967 г. создал в ИКИ РАН и возглавлял до 1973 г. отдел иконики и космометрии, затем вернулся к преподавательской работе.

² Зиман Ян Львович, 1922–2009 гг., доктор технических наук, профессор, лауреат Государственной премии СССР, почетный штурман гражданской авиации, заслуженный деятель науки России. Участник ВОВ, штурман бомбардировочной авиации, 400 боевых вылетов и 200 на спецзадания, кавалер четырех орденов и четырнадцати медалей. В 1973 г., после ухода из ИКИ Б.Н. Родионова, возглавил вновь образованный отдел исследования Земли из космоса и руководил им до 1988 г. В дальнейшем, вплоть до кончины в 2009 г., продолжал работать в ИКИ РАН в должности главного научного сотрудника.

поток информации. Ей требовалось время для перекачки данных из оперативной в долговременную память. Структура формируемого фототелеграфным аппаратом сигнала этого не предусматривала. О вводе крупноформатных снимков земной поверхности в такие ЭВМ не могло быть и речи. Но для ввода снимков звезд было найдено очень простое решение. На негативах наиболее яркие звезды отображались светлыми точками на практически черном фоне. Число ярких звезд на снимках практически никогда не превышало 20. С учетом разрешающей способности фототелеграфного аппарата, 5 лин/мм, на каждую звезду приходилось порядка 10 пикселей. При общем числе пикселей на одном снимке звезд порядка одного миллиона устранить смысловую избыточность фототелеграфного сообщения оказалось достаточно просто путем введения в схему сопряжения с ЭВМ порогового устройства, допускающего оцифровку только тех пикселей, которые превышают некоторый заданный уровень.

Таким образом, отработка алгоритмов и программно-математического обеспечения для автоматического распознавания звезд на снимках была начата в ИКИ РАН в 1970-х годах. Интересно и то, что заложенные в то время принципы в значительно усовершенствованном виде используются в современных звездных приборах, эксплуатируемых на многих отечественных КА в наше время (Аванесов и др., 1983; 2000; 2003).

Выполняемые в ИКИ РАН съемки звезд ни в коем случае не преследовали цели создания собственного звездного каталога. В библиотеке института уже в начале 1970-х годов имелось восемнадцать томов бумажной версии каталога SAO (Star Catalog..., 1966).

К середине 1970-х годов в ИКИ РАН было создано несколько образцов телевизионных камер на основе ПЗС-матриц “Калимантан” производства ВНИИ ЭЛП, Ленинград, которые начали активно использоваться для наблюдения звезд. К 1979 г. концепция нового звездного прибора полностью созрела. Сформировались и представления о том, каким набором свойств должен обладать его каталог звезд. В первую очередь каталог должен иметь данные по всему небу для возможности использования датчиков при любой ориентации аппарата. Точность каталога, составляющего метрологическую основу прибора, должна быть значительно выше его собственных измерительных возможностей. Знание параметров собственных движений звезд должно быть достаточным для использования каталогов на борту КА

на протяжении десятков лет. Кроме того, в каталоге должна содержаться информация о яркости и цветности звезд, так как спектральная чувствительность приборов может значительно отличаться от спектральной чувствительности инструментов, использовавшихся для создания каталога, что может привести к значительным расхождениям в оценке интегральной яркости звезд.

В конце 1970-х годов концепция нового звездного датчика ориентации сформировалась полностью. Она неоднократно докладывалась на семинарах и совещаниях с участием специалистов космической промышленности и очень быстро получила поддержку в РКК “Энергия”. Смысл предложения ИКИ РАН без особых разъяснений понял в то время главный в СССР специалист по системам управления КА Борис Евсеевич Черток³. Вслед за ним идею разработки нового звездного прибора поддержал Юрий Павлович Семенов, в то время заместитель Генерального конструктора РКК “Энергия”. Спустя какое-то время в ИКИ РАН стало известно, что для разработки и производства предложенных институтом звездных датчиков ориентации предполагается создать специальное предприятие.

С позиций сегодняшнего дня кажется удивительной скорость принятия управленческих решений и их исполнения, но уже в 1982 г. новое предприятие было создано и начало работать в тесном сотрудничестве со специалистами ИКИ. В соответствии с веяниями того времени, оно было создано в ГДР как подразделение крупного промышленного предприятия “Карл-Цейсс” Йена.

В это же время в Венгрии уже были развернуты работы по созданию съемочной системы для наблюдения кометы Галлея с автоматических межпланетных станций (АМС) проекта Вега. Несколько позже в Болгарии началась разработка съемочной системы для наблюдений спутника Марса Фобоса с борта АМС Фобос. Все эти разработки основывались на ПЗС-матрицах, велись они с участием специалистов ИКИ РАН, внедрявших накопленный к тому времени опыт создания и эксплуатации камер на основе отечественных ПЗС-матриц.

Все эти проекты впоследствии были осуществлены и оказались вполне успешными (Телевизионная..., 1989; Телевизионные..., 1994).

В ходе совместных работ над звездным датчиком ориентации ИКИ РАН передавал НП “Карл-Цейсс” Йена, свои наработки по технологии первичной обработки изображений звезд, их рас-

³ **Борис Евсеевич Черток**, 1912–2011 гг., доктор технических наук, академик РАН, лауреат Ленинской премии, Герой социалистического труда, кавалер многих орденов и медалей, один из основоположников теории и практики создания систем управления ракетами и космическими аппаратами.

познаванию по звездному каталогу и расчету параметров ориентации. Кроме того, специалисты ИКИ РАН передавали свой опыт разработки конструкции — схемотехнические решения по построению камер на основе ПЗС-матриц. Сегодня все это уже стало общеизвестным, но 40 лет тому назад было принципиально новым. Достаточно сказать, что в то время пригодные для создания звездного датчика ПЗС-матрицы существовали только в СССР и США.

В советское время на предприятии “Карл-Цейсс” Йена, при участии специалистов ИКИ РАН, был изготовлен комплект из трех оптических звездных датчиков (ОЗД) “Астро”, который в 1989 г. был установлен на пилотируемой станции Мир. Формируемая приборами информация подвергалась на борту первичной обработке с целью сокращения избыточности. Определение ориентации станции выполнялось наземными средствами. В них использовался составленный в ИКИ РАН каталог на 8500 звезд, основанный на каталоге SAO. На рис. 3 показан комплект из трех приборов, установленных на станцию Мир. Он успешно проработал на борту станции до конца ее жизни. Затопление станции в 2001 г. осуществлялось по показаниям этих приборов...

В дальнейшем, после объединения Германии, это подразделение “Карл-Цейсс” Йена стало самостоятельным предприятием и получило название “Йена-Оптроникс”. Во главе предприятия встали западные немцы, не пожелавшие поддерживать контакты с ИКИ РАН. Со временем оно стало вторым после французской фирмы “Sodern” предприятием в Европе, выпускающим звездные датчики ориентации и другую высоко-

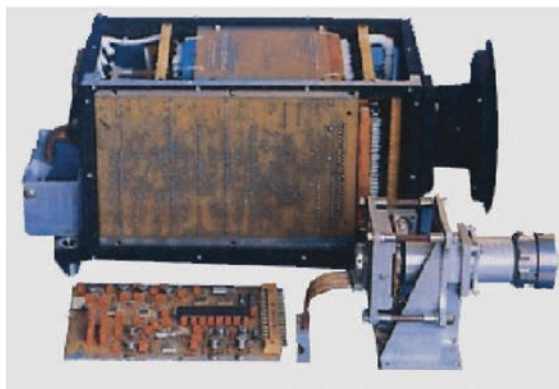


Рис. 3. Система оптических звездных датчиков “Астро”.

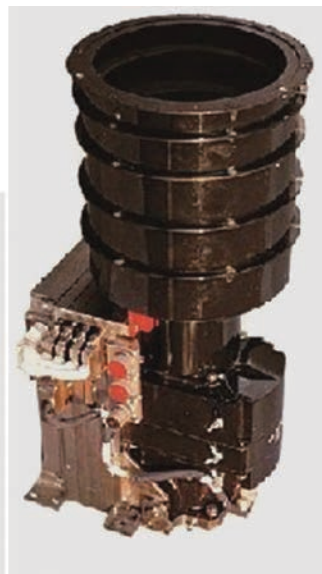
технологичную продукцию, не вспоминая о своем советском прошлом.

Таким образом, сотрудничество с НП “Карл-Цейсс” Йена после 1991 г. ушло в прошлое, а с предприятием “Йена-Оптроникс” оно так и не началось. В связи с этим в том же году в ИКИ РАН было принято решение о разработке многоцелевого, полностью автономного звездного датчика ориентации своими силами с перспективой организации мелкосерийного производства приборов для нужд отечественной космической промышленности.

Разработка звездного датчика началась в рамках проекта Марс-96, где был запланирован прибор “навигационная камера”. В дальнейшем он и стал прототипом приборов БОКЗ для МКС и КА Ямал-100 и Ямал-200. Навигационная камера для проекта Марс-96 и звездный датчик БОКЗ для МКС показаны на рис. 4.



(а)



(б)

Рис. 4. Первые звездные датчики ИКИ РАН: (а) — навигационная камера проекта Марс-96; (б) — прибор БОКЗ для МКС.

В проекте Марс-96 обработка данных от навигационной камеры должна была выполняться в одном из четырех процессоров, входивших в состав многопроцессорной вычислительной системы (МВС), разработанной и изготовленной ИКИ РАН для этого же проекта. В его памяти хранился каталог на 8500 звезд, составленный на основе каталога SAO. До конца 1990-х годов никакой альтернативы каталогу SAO фактически не было.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЗВЕЗДНЫХ КАТАЛОГОВ В ДАТЧИКАХ ОРИЕНТАЦИИ КА

Широко распространенные в настоящее время в отечественной и зарубежной космической технике звездные датчики ориентации используют малогабаритную оптику, параметры которой несравнимы с параметрами астрономических инструментов, с помощью которых составляются звездные каталоги. Огромная разница в угловом разрешении тех и других приборов приводит к тому, что измеренные звездными датчиками ориентации координаты звезд зачастую отличаются от значений, указываемых в звездных каталогах (Аванесов и др., 2018б). Несоответствие измеренных и каталожных значений координат звезд приводит к ошибкам вычисления параметров ориентации, заметность которых растет по мере совершенствования звездных датчиков. Однако отсутствие достаточной статистики измерений, а также недостаток средств и методов обработки данных долгое время не позволяли сформировать надежную доказательную базу для подтверждения наблюдаемого явления и его количественной оценки.

В начале 2000-х годов была сделана попытка провести эксперимент по исследованию работы звездных приборов в реальных условиях эксплуатации. Предполагалось, что на фоне штатной работы приборов БОКЗ-М на борту КА Ямал-200 с них будет считываться и передаваться на Землю “сырая” информация. Такой режим работы приборов на этом аппарате был штатным. Однако проект Ямал-200 был коммерческим. Средств на оплату дополнительных работ не нашлось, пришлось ждать удобного случая.

Случай представился не скоро, в 2016 г. Объектом исследования стали четыре звездных датчика ориентации БОКЗ-М60, разработанные и изготовленные в ИКИ РАН и установленные на КА Ресурс-П № 3. В этом эксперименте предполагалось использовать наземную обработку данных от звездных датчиков для повышения точности геопривязки снимков земной поверхности, получаемых съемочной системой этого КА (Аванесов и др., 2018а). Спустя 40 с лишним лет после полета станций Салют-2, —3 задача геопривязки

снимков по измерениям параметров ориентации КА по звездам не потеряла свою актуальность.

КА Ресурс-П № 3 был выведен на околоорбитальную солнечно-синхронную орбиту со средней высотой 475 км и наклоном 97.276° 13 марта 2016 г. Период обращения КА вокруг Земли составляет около 5600 с.

Звездные приборы БОКЗ-М60 установлены в верхней части корпуса аппарата попарно. Углы между визирными осями приборов в паре (№ 31 и № 32, № 30 и № 33) составляют $\sim 43^\circ$ – 45° . Плоскости, образованные визирными осями парных приборов, взаимно перпендикулярны (Аванесов и др., 2018г).

В качестве фотоприемного устройства в приборах БОКЗ-М60 используется ПЗС-матрица “Лев-3” форматом 512×512 пикселей размером 16×16 мкм. Объектив имеет фокусное расстояние 60 мм и относительное отверстие 1:2. Поле зрения прибора $8^\circ \times 8^\circ$. Угловое разрешение $55''$ /пиксель. Работа приборов синхронизирована внешней секундной меткой, привязанной к бортовому времени с точностью 100 мкс.

Экспериментальные данные формировались всеми приборами БОКЗ-М60 на фоне их штатной работы в составе системы управления движением КА. Формируемая приборами информация поступала в запоминающее устройство и передавалась на наземные пункты приема во время сеансов связи (Аванесов и др., 2018г; 2021а).

В состав “сырых” данных входила информация, используемая в бортовых приборах в каждом цикле измерений:

- дата и точное время выполнения каждого измерения. *Использовались для учета собственного движения звезд, эффекта годичной аберрации, а также явлений прецессии и нутации;*
- значения проекций вектора центра масс и линейной скорости аппарата на оси гринвичской системы координат. *Использовались для последующего расчета проекции линейной угловой скорости на оси инерциальной системы координат (ИСК) и позволяют учесть эффект спутниковой аберрации;*
- штатная информация об ориентации, формируемая приборами БОКЗ-М60. *Использовалась для сравнения результатов наземной обработки со штатной работой приборов на борту КА;*
- измеренные прибором координаты локализованных на ПЗС-матрице объектов;
- интегральные яркости локализованных объектов в единицах младшего разряда (ЕМР) АЦП;
- размеры локализованных объектов в числе пикселей матрицы.

Сбор информации с приборов БОКЗ-М60 продолжался с 19 сентября 2016 г. по 12 февраля 2017 г. За это время от четырех приборов было получе-

но $\sim 52 \times 10^6$ телеметрических кадров, содержащих координаты в среднем 10 звезд на ПЗС-матрицах приборов и сопутствующую информацию. На рис. 5 схематически показана карта покрытия небесной сферы кадрами, полученными четырьмя приборами за время эксперимента.

Бортовой каталог приборов БОКЗ М-60 на КА Ресурс-П № 3 был составлен на основе каталога SAO. В него вошли 8713 звезд до 7.5m. Отбор звезд в бортовой каталог осуществлялся с целью обеспечения наличия как минимум шести из них в произвольном положении кругового поля зрения прибора диаметром 8° на небесной сфере. Позднее для звезд, распознанных в ходе эксперимента, была проведена их идентификация по каталогам SAO, Hipparcos (The Hipparcos and Tycho Catalogues, 1997) и Gaia (Gaia Collaboration, 2018).

По получении “сырых” данных была выполнена их обработка бортовой программой, что выявило следующее:

1. Наземная обработка “сырых” данных бортовой программой не выявила существенных отличий результатов от полученных на борту.

2. Из 8713 звезд бортового каталога в зону эксперимента попало около 6000 звезд. В зону наблюдения всеми четырьмя приборами попало около 1200 звезд. В зоне наблюдения двумя приборами оказалось 3600 звезд.

3. Систематизированы данные о случайных и систематических ошибках измерений координат звезд каждым прибором и парами приборов. По полученным результатам составлены соответствующие списки звезд.

При обработке группы из $\sim 10^6$ телеметрических кадров измерений, выполненных двумя приборами на 176 витках полета, были получены следующие результаты (Аванесов и др., 2018 г). В каждом кадре приборы фиксировали положение 10–12 звезд. При этом координаты каждой из 1184 распознанных на этих витках звезд фиксировались прибором в среднем около 2000 раз. Оказалось, что в обработанном массиве данных число звезд, осредненные небесные координаты которых совпадают с каталожными значениями с точностью до $1''$, не превышает 5.2%. Невелико оказалось и число звезд, координаты которых значительно, на величину от $3''$ до $30''$, отличаются от каталожных значений. Их оказалось 5.7%. Отличие измеренных координат остальных 89.1% звезд от их каталожных значений лежит в пределах от $1''$ до $3''$. Приведем несколько примеров.

На рис. 6 показан фрагмент карты участка небесной сферы с нанесенными красными и синими точками координатами звезды SAO 98456, измеренными в разное время приборами № 31 и № 32 более чем по 1000 раз. Каталогное положение звезды обозначено крестом. Осредненные координаты центра звезды по обоим приборам показаны зеленой точкой. Для каждого отдельного прибора измеренный центр отстоит от каталожного значения на $0.36''$ и на $0.67''$ по приборам № 31 и № 32 соответственно. Для приборов с угловым разрешением $55''/\text{пиксель}$ — это очень неплохой результат. Приведенный справа снимок той же звезды, взятый из Паломарского обзора (The Palomar Digital Sky Survey) (<https://sites>).

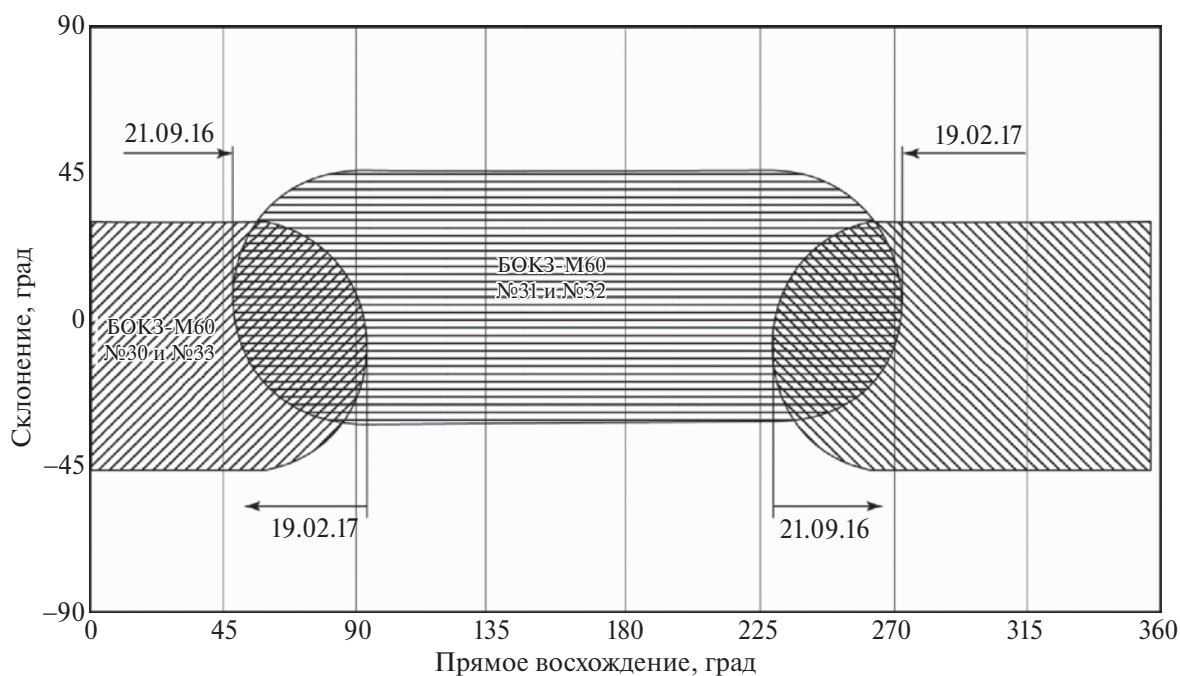


Рис. 5. Карта покрытия небесной сферы кадрами с четырех приборов БОКЗ-М60 КА Ресурс-П № 3 за время эксперимента.

astro.caltech.edu/~george/dposs/dposs_pop.html), показывает отсутствие в ближайших окрестностях звезды ярких возмущающих объектов.

Фрагмент карты выполнен в равнопромежуточной проекции небесной сферы на плоскость. В качестве нулевой точки выбраны координаты рассматриваемой звезды. По осям отложены разности между измеренным и каталожным положе-

нием звезды. Все показанные на рисунке угловые расстояния измерены по правилам сферической геометрии.

Все последующие примеры относятся к звездам, демонстрирующим большие значения систематических ошибок.

На рис. 7, построенном по тем же принципам, показан случай наблюдения двумя приборами

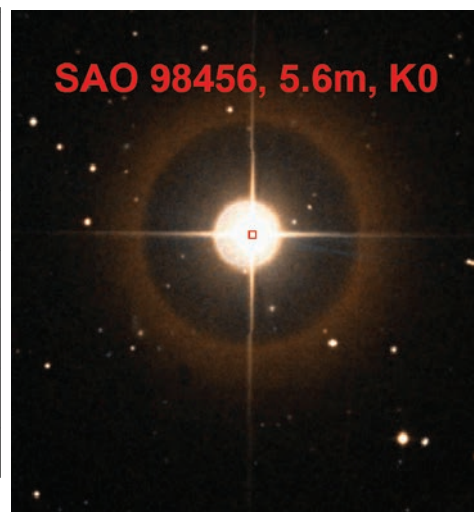
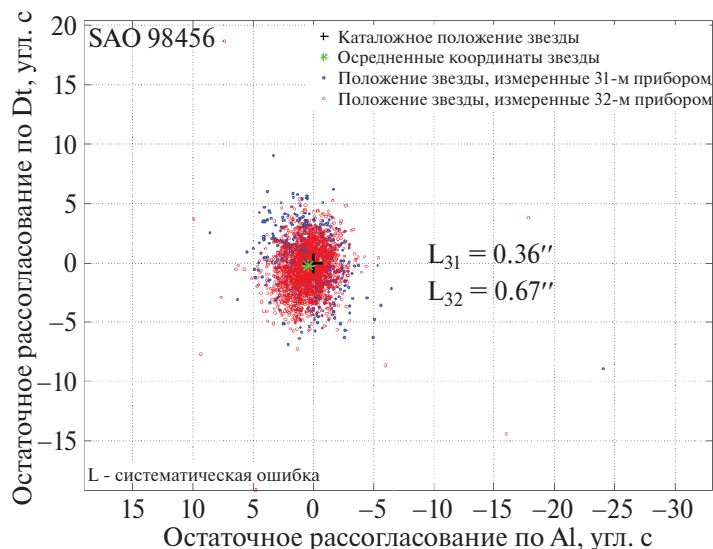


Рис. 6. Фрагмент карты небесной сферы с нанесенными на нее 2500 измерениями координат звезды SAO 98456, сделанными приборами № 31 и № 32. Справа снимок звезды и ближайшей ее окрестности из Паломарского обзора¹.

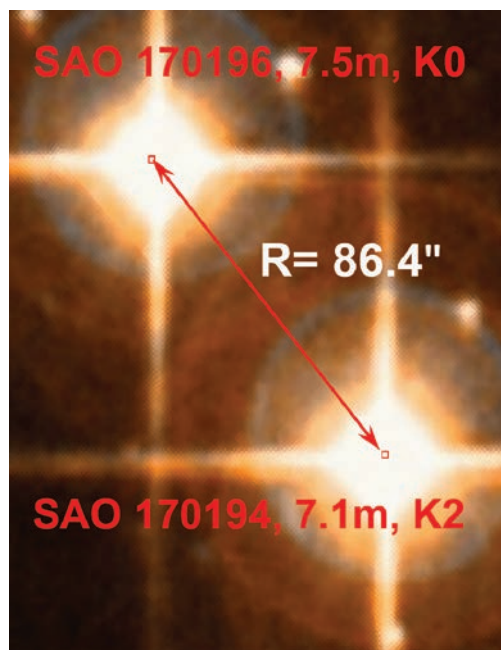
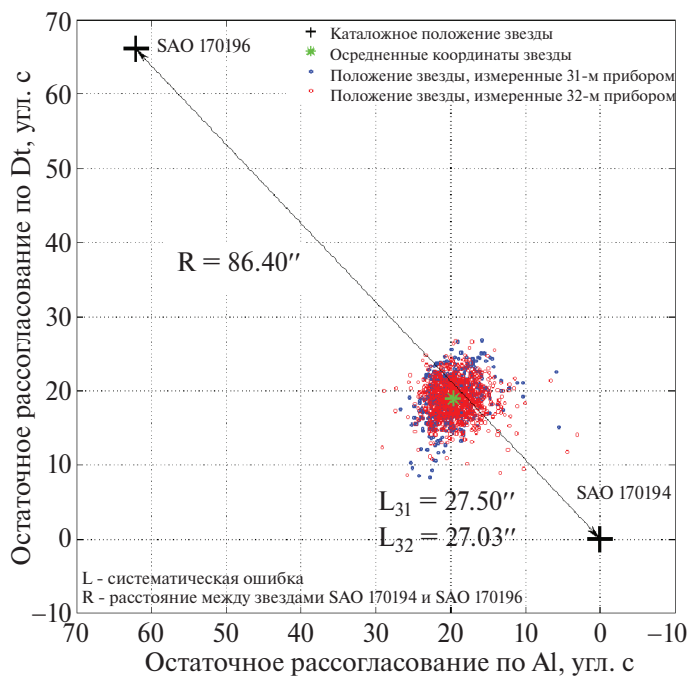


Рис. 7. Фрагмент карты небесной сферы с нанесенными на нее 1500 измерениями координат пары близко расположенных звезд SAO 170196 и SAO 170794, измеренных приборами № 31 и № 32. Справа снимок этой же пары звезд из Паломарского обзора.

¹ До появления каталога Gaia окрестности каталожных звезд изучались по Паломарскому обзору неба (POSS 1949–1958, POSS-II 1980–1990), который был оцифрован в 1994 г. и выпущен в виде Цифрового обзора неба (DSS).

пары близко расположенных звезд SAO 170196 и SAO 170194. Расстояние между ними $86.4''$. Это значит, что при угловом разрешении приборов $55''/\text{пиксель}$ обе звезды всегда будут наблюдаться как один объект. Рисунок это подтверждает. Центры проекции облаков ошибки ~ 1500 измерений координат звезд обоими приборами совпадают с очень хорошей точностью около $0.5''$, как и в предыдущем случае. При этом оба прибора указывают координаты слившейся пары звезд на соединяющей их линии на расстоянии $27.5''$ от звезды SAO 170194. С учетом параметров собственного движения этих звезд и близости их спектральных классов эту пару можно считать устойчивой на достаточно большом отрезке времени. Ее можно включать в бортовые каталоги приборов, имеющих угловую разрешающую способность порядка $1'$, под одним номером и с поправкой координат на $27.5''$. Аналогичным образом можно поступать с подобными парами, расстояние между которыми меньше, чем в данном случае.

Приведенные примеры демонстрируют хорошие измерительные свойства приборов БОКЗ-М60 и позволяют верить получаемым с их помощью результатам.

Еще более интересными оказались результаты измерения координат звезды SAO 57475. Судя по рис. 8, звезда попеременно занимала два положения: одно практически точно совпадает с каталожным значением, а другое отстоит от него на $26.47''$. На нее оказывает влияние звезда SAO 57469, находящаяся на расстоянии $306''$. Причем один прибор всегда видел звезду в смещенном состоянии, а другой сформировал два облака

ошибок: одно — смещенное и почти полностью совпадающее с показаниями первого прибора, а второе — вокруг каталожных координат звезды.

Появление второго облака ошибок объясняется тем, что изображения звезд слипались в один объект на некоторых кадрах, а на других они разделялись и определялись как разные объекты.

На рис. 9 показано влияние этого соседства в увеличенном масштабе.

Во всех приведенных примерах координаты центра звезды на ПЗС-матрице измерялись центроидным методом. Большое достоинство этого метода заключается в том, что он позволяет с высокой точностью измерить координаты центра яркости любой фигуры на матрице с внутрипиксельной точностью. Вместе с тем звезда должна представлять собой бесконечно удаленный точечный объект, свет от которого, пройдя через оптическую систему, должен отображать на матрице ее собственную передаточную функцию, представляющую собой симметричную фигуру — гауссоиду. Однако прибор с угловым разрешением в десятки угловых секунд практически всегда имеет дело с целой группой звезд, среди которых одна звезда, обычно самая яркая, представлена в бортовом каталоге, а другие нет. Но это не мешает им испускать фотоны, а матрице их суммировать.

Экспериментальные данные наглядно показывают, что вклад звезд окружения в отображение каталожной звезды на матрице искажает ее фигуру. Она перестает быть симметричной, что и фиксирует центроидный метод в форме смещения измеренных координат звезд от их каталожного значения. При этом величина ошибки для

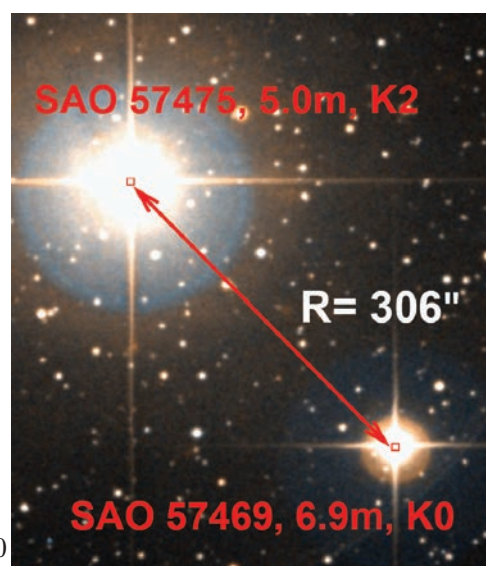
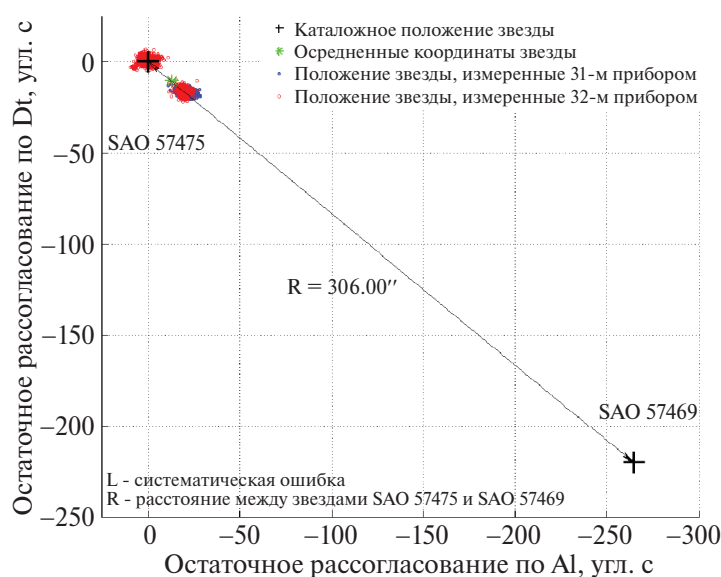


Рис. 8. Влияние звезды SAO 57469 на результаты измерений координат звезды SAO 57475. Справа снимок обеих звезд из Паломарского обзора.

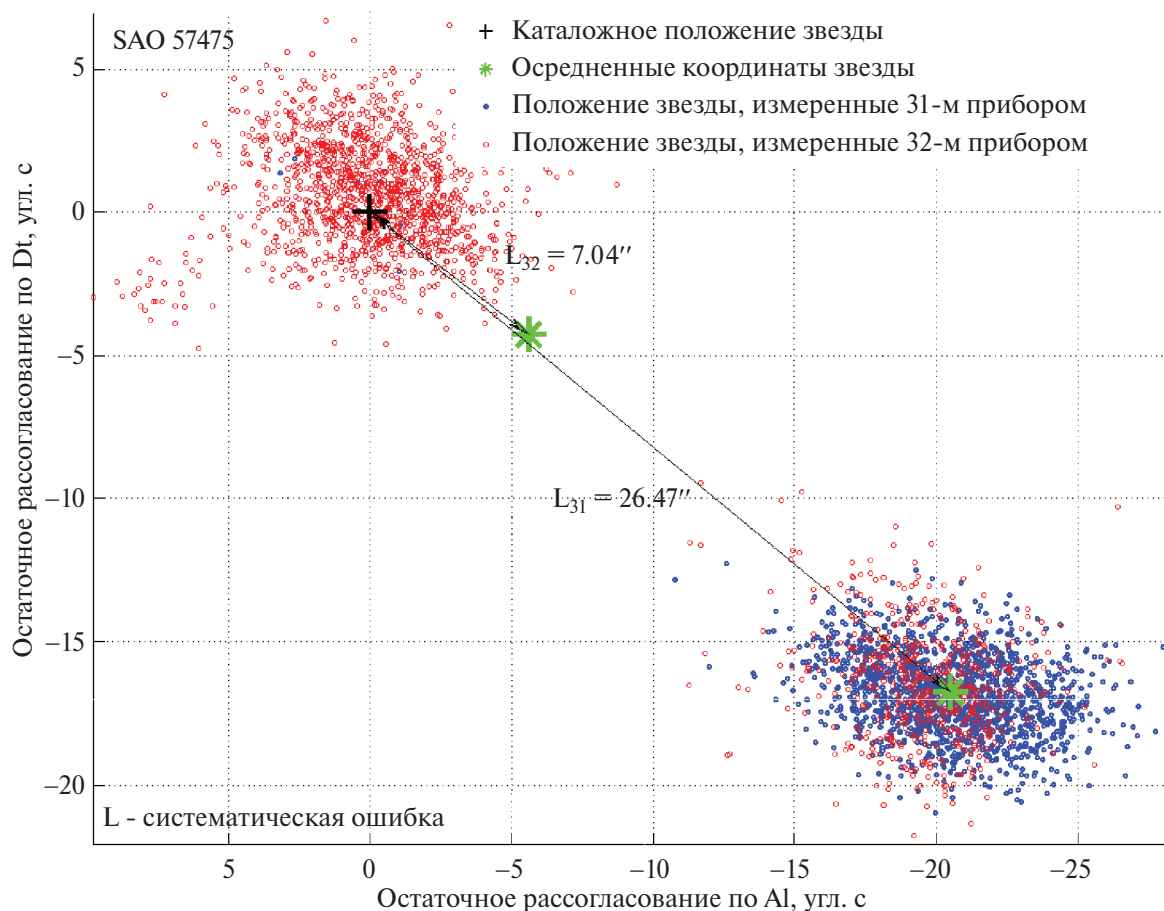


Рис. 9. Увеличенный фрагмент карты неба, демонстрирующий влияние звезды SAO 57469 на результаты измерений координат звезды SAO 57475.

каждой звезды индивидуальна и неизменна на достаточно большом отрезке времени.

Эксперимент показал, что статистическая обработка материалов регулярной съемки звезд позволяет выявить и объяснить причины возникновения различных видов ошибок измерений в звездных датчиках ориентации. Более того, на основании подобных работ можно скорректировать бортовой каталог для данного типа прибора (Аванесов и др., 2018г; 2021а; 2018в). Но как раз в это время стал доступным первый релиз каталога Gaia (Gaia Collaboration, 2016). Знакомство с ним показало, что на его основе может быть создан базовый для большинства звездных приборов каталог звезд (Аванесов и др., 2018д).

БАЗОВЫЙ КАТАЛОГ ЗВЕЗД ДЛЯ ДАТЧИКОВ ОРИЕНТАЦИИ КА

На протяжении нескольких десятилетий, начиная с середины 1960-х годов, в качестве основы для проектирования бортовых каталогов звезд датчиков ориентации КА использовался астрономический каталог SAO (Smithsonian Astrophysical Observatory). Опубликованный в 1966 г. ка-

талог SAO содержит 258997 звезд до 9.5m. В нем впервые с относительно высокой точностью были указаны параметры собственного движения звезд, что замедлило процесс его старения.

Новая эпоха звездных каталогов началась с запуска в 1989 г. астрометрического КА Hipparcos (High Precision Parallax Collecting Satellite). Результатом этой миссии стал каталог Hipparcos, содержащий данные о 118218 звездах с точностью положений и параллакса на уровне 0.001". Впервые в истории астрономии координаты звезд и их спектральные характеристики были измерены с помощью одного инструмента, причем находящегося за пределами земной атмосферы.

Следующим крупным шагом в развитии звездных каталогов, несомненно, станет запущенный в декабре 2013 г. КА Gaia (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics). Главная его задача — составление подробной карты звезд нашей Галактики с точностью в 40 раз выше, чем это было возможно в миссии КА Hipparcos. Каталог, составленный по результатам миссии КА Gaia, стал доступен уже с конца 2016 г. На момент выхода статьи уже выпущена третья версия каталога Gaia, однако уже во втором издании содержалась

практически вся информация, необходимая для составления базового каталога.

Появление каталога Gaia позволило увидеть то, что большинство звезд, угловые расстояния между которыми используются в качестве метрологической основы в датчиках ориентации КА, в действительности находятся в окружении весьма большого числа менее ярких звезд. Возникающий из-за влияния такого соседства (низкая угловая разрешающая способность датчиков ориентации и используемый в них центроидный метод измерения) эффект смещения координат звезд был известен давно, на основе специально проводимых астрономических наблюдений. Однако именно каталог Gaia показал масштабность этого явления и дал возможность оценки его влияния на результат измерений. Краткие сведения о звездных каталогах всего неба, использовавшихся в настоящей работе, приведены в табл. 1.

На основании каталогов Hipparcos и Gaia DR2 в ИКИ РАН был создан “Базовый каталог звезд для датчиков ориентации КА”, версия “0” далее БК-0 (Аванесов и др., 2019а).

Включенные в БК-0 звезды условно разделены на основную группу и группу звезд окружения. В основную группу вошло 10857 звезд из каталога Hipparcos. Большинство из них использовалось в разное время и в разных сочетаниях в звездных каталогах приборов ИКИ РАН начиная с 1967 г. В основной группе выделена подгруппа из 480 наиболее ярких звезд, использование которых в каталогах широкопольных датчиков ориентации всегда проблематично. Значительная часть из них вообще не используется в бортовых каталогах, но в базовом каталоге они необходимы, чтобы учесть их влияние через передаточную

функцию оптической системы прибора на близко расположенные звезды каталога. Остальные 10377 звезд из каталога Hipparcos идентифицированы в каталоге Gaia. Каждая из них помещена в центр микрокаталога вместе с ее окружением, включающим все звезды из каталога Gaia до $13m$ в радиусе $15'$. Общее число звезд окружения составило 364406. Адресная система БК-0 использует номера звезд каталога Hipparcos. По нему из памяти компьютера вызывается микрокаталог звезды.

Радиус микрокаталогов $15'$ выбран с учетом возможного влияния звезд окружения на результат измерения координат центральной звезды из-за наиболее низкого углового разрешения, используемого в приборах семейства БОКЗ. Один из них, БОКЗ-МФ, имеет угловое разрешение около $2'/\text{пиксель}$. Кроме того, выбранный радиус учитывает применяемый в приборах центроидный метод измерения координат звезд, а также установленный для приборов диапазон допустимых для них угловых скоростей.

Выбранная для базового каталога предельная звездная величина звезд окружения учитывает существующую сегодня реальную чувствительность приборов. Вместе с тем уже сейчас видно, что быстрый рост чувствительности приборов в самой ближайшей перспективе потребует дополнить микрокаталоги звездами окружения до $15m$.

В БК-0 основные характеристики для большинства звезд, как основной группы, так и звезд окружения (такие как координаты, спектральные классы, звездные величины и параметры собственного движения), заимствованы из каталога Gaia. В связи с тем, что каталог Gaia не полон со стороны ярких звезд и информация о спектраль-

Таблица 1. Основные звездные каталоги всего неба

Данные	SAO	Hipparcos	Gaia DR1	Gaia DR2
Дата издания	Бумажное издание – 1966 г. Машинная версия – 1979 г.	02.1997	14.09.2016	25.04.2018
Предельная звездная величина, m	9.5	9.5	20	21
Число звезд	258997	118218	1142679769	1692919135
Точность измерения положения звезд, mas ($0.150''$)	150	1	0.3	0.04
Точность измерения собственного движения звезд, угл. мс в год	20	0.9	1	0.06
Информация о цвете звезд	Спектральный класс	B–V, Спектральный класс	Данные из HIP	Цветоразность, эффективная температура

ных классах дана не для всех звезд, отсутствующие для звезд основной группы характеристики заимствуются из каталога *Hipparcos*, а при отсутствии информации о спектральном классе для звезд окружения, их спектральный класс принимается идентичным спектральному классу основной звезды.

Все звезды приведены на эпоху J2000. Нумерация звезд основной группы идет в соответствии с каталогом *Hipparcos*. Принципы формирования БК-0 иллюстрирует рис. 10.

Интересным оказалось распределение звезд окружения в ближайших окрестностях звезд основной группы, приведенное в табл. 2. Так, например, из первой строки таблицы следует, что в радиусе 1' у 7887 звезд основной группы вообще отсутствуют звезды окружения магнитудой менее 13 m . С увеличением радиуса число не имеющих соседей звезд быстро уменьшается. В радиусе 15' лишь две звезды основной группы не имеют соседей.

В последующих строках таблицы показано число звезд основной группы, имеющих в окружении одну, две и более звезд. В зависимости от радиуса их число сначала растет, достигает какого-то максимума, а затем уменьшается.

В полном виде таблица содержит более 400 строк. Из нее следует, что 4985 звезд основ-

ной группы имеют от двух до 21 звезд окружения в радиусе 15'. Еще 4785 звезд имеют в радиусе 15' от 21 до 99 звезд окружения. А еще 605 звезд основной группы на той же площади имеют в своем окружении от 100 до 426 звезд.

Однако наибольший практический интерес представляют первые 10 строк табл. 2.

В зависимости от угловой разрешающей способности, функции рассеяния точки (ФРТ) и способности прибора поддерживать постоянную фокусировку, разработчику его бортового каталога предстоит выбрать один из столбцов табл. 2.

Тонировкой в табл. 2 показана условная граница, ниже которой приведенные в ней данные перестают быть интересными для пользователя. Например, в радиусе 1' у 7887 звезд основной группы вообще отсутствуют звезды окружения. В этом же столбце еще 2080 и 340 звезд основной группы имеют соответственно по 1 и по 2 звезды окружения. Это значит, что если изображение звезды некоторого гипотетического прибора не превышает 1', то все эти звезды основной группы оказываются идеальными кандидатами для включения в бортовой каталог. С увеличением радиуса окрестности число звезд основной группы не имеющих в ней соседей быстро падает. При этом граница, в которой имеет смысл вести отбор звезд, опускается вниз.

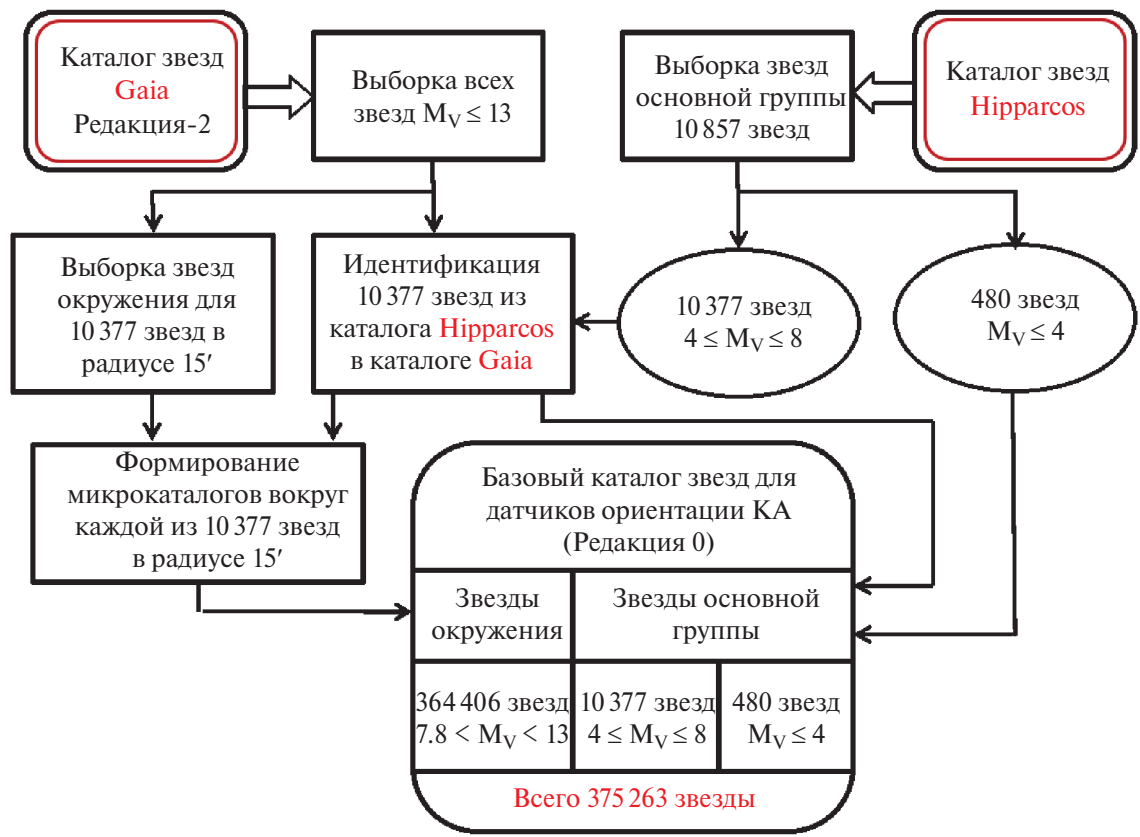


Рис. 10. Иллюстрация принципов формирования “Базового каталога звезд для датчиков ориентации КА”.

Таблица 2. Количество звезд окружения в ближайших окрестностях звезд основной группы

Кол-во звезд окружения	Радиус окрестности звезд основной группы														
	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'	9'	10'	11'	12'	13'	14'	15'
0	7887	5452	3432	2033	1144	610	333	151	79	37	17	7	4	2	2
1	2080	3026	2982	2516	1820	1274	790	490	255	146	75	40	18	7	5
2	340	1172	1795	1927	1845	1531	1194	822	538	287	158	79	40	18	11
3	55	420	886	1228	1421	1382	1196	1018	746	535	333	188	104	57	29
4	9	156	503	805	919	1064	1115	1003	865	668	465	297	185	115	55
5	1	81	286	516	724	845	902	918	855	742	603	449	271	164	94
6	1	32	193	347	499	625	674	730	799	715	651	523	394	244	176
7	0	14	122	251	401	458	557	627	636	700	643	596	480	330	212
8	0	7	54	220	276	390	466	524	590	598	599	540	496	428	294
9	0	5	40	118	272	298	401	429	466	551	537	509	506	448	383
10	2	2	23	110	189	270	294	365	399	433	531	512	427	431	351

Примечание: тонировкой показана условная граница, ниже которой, как правило, нет смысла вести отбор звезд для бортового каталога.

Для работы с БК-0 разработаны и находятся в стадии отработки две специальные программы. Обе программы созданы для выполнения совокупности технологических операций по формированию бортовых каталогов звезд датчиков ориентации, оптимизированных в соответствии с наблюдательными возможностями каждой конкретной группы приборов и специфическими особенностями ближайших окрестностей каждой каталожной звезды.

Одна из этих программ — Catalogue Guide — предназначена для визуализации микрокаталогов и состоящих из них виртуальных кадров, имитирующих наблюдение небесной сферы звездным датчиком ориентации с выбранным оператором полем зрения. Кроме того, в задачу программы Catalogue Guide входит выборка из БК-0 микрокаталогов с заданными параметрами и формирование из них упорядоченных определенным образом списков звезд.

Вторая программа — Star Manager — носит расчетно-аналитический характер. Там каждый микрокаталог анализируется, подбираются оптимальные условия для его обработки, которые затем заносятся в составляемый программой протокол. В нем уточняются небесные координаты звезды основной группы и условия ее локализации. Для этого в программе собраны

фотометрические (Аванесов и др., 2019б) и астрометрические (Аванесов и др., 2020) модели звездных датчиков ориентации семейства БОКЗ, характерные для них модели шумов и помех (Аванесов и др., 2021б), а также математический аппарат проецирования содержащихся в БК-0 звезд на матрицу прибора и обратно на небесную сферу (Аванесов и др., 2021в). Кроме того, программа имеет возможность применять различные способы локализации звезд на матрице, вычислять их координаты и величины случайных и систематических ошибок измерения.

Примеры визуализации микрокаталогов в программах Catalogue Guide и Star Manager приведены на рис. 11 и 12. На рис. 11 показан пример проецирования микрокаталога звезды HIP 59895 и формирования по его данным изображений звезд на матрице прибора. По данным БК-0, в радиусе 5' (обозначен окружностью) у звезды HIP 59895 нет соседей ярче 13^м.

На рис. 11 видно, что звезда HIP 59895 отобразилась на матрице идеально симметричной фигурой распределения Гаусса, чего и следовало ожидать.

На рис. 12 показана построенная по данным микрокаталога звезды HIP 57587 карта звезд в небесной системе координат и изображение ее центральной части после проецирования на матрицу.

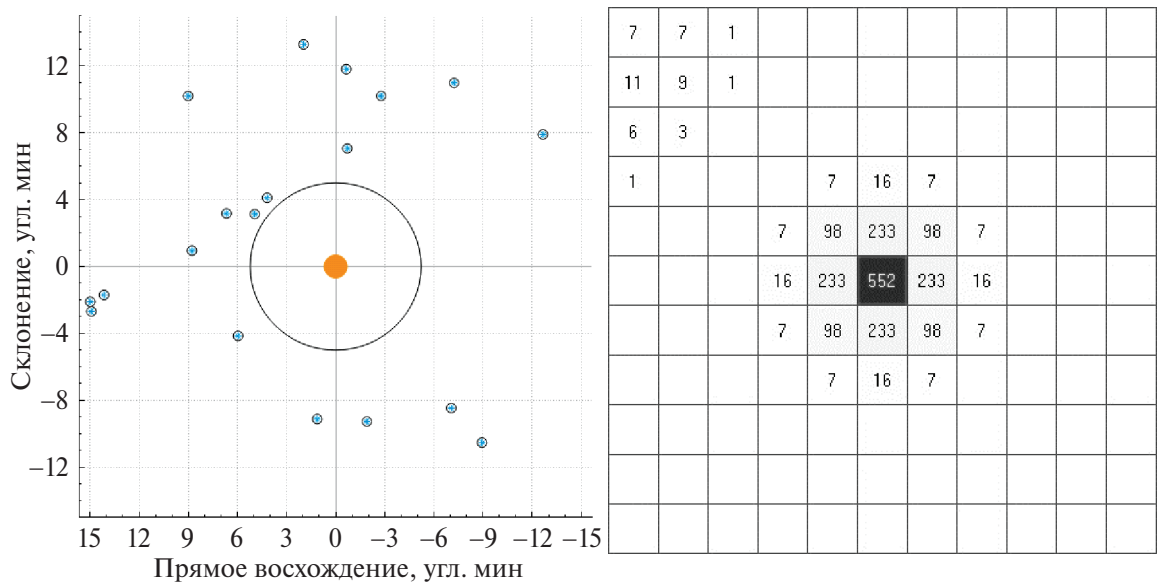


Рис. 11. Пример визуализации и проецирования микрокаталога: (а) – микрокаталог звезды HIP 59895 в небесной системе координат, программа Catalogue Guide; (б) – отображение центральной части микрокаталога звезды HIP 59895 дискретной структурной матрицы, программа Star Manager.

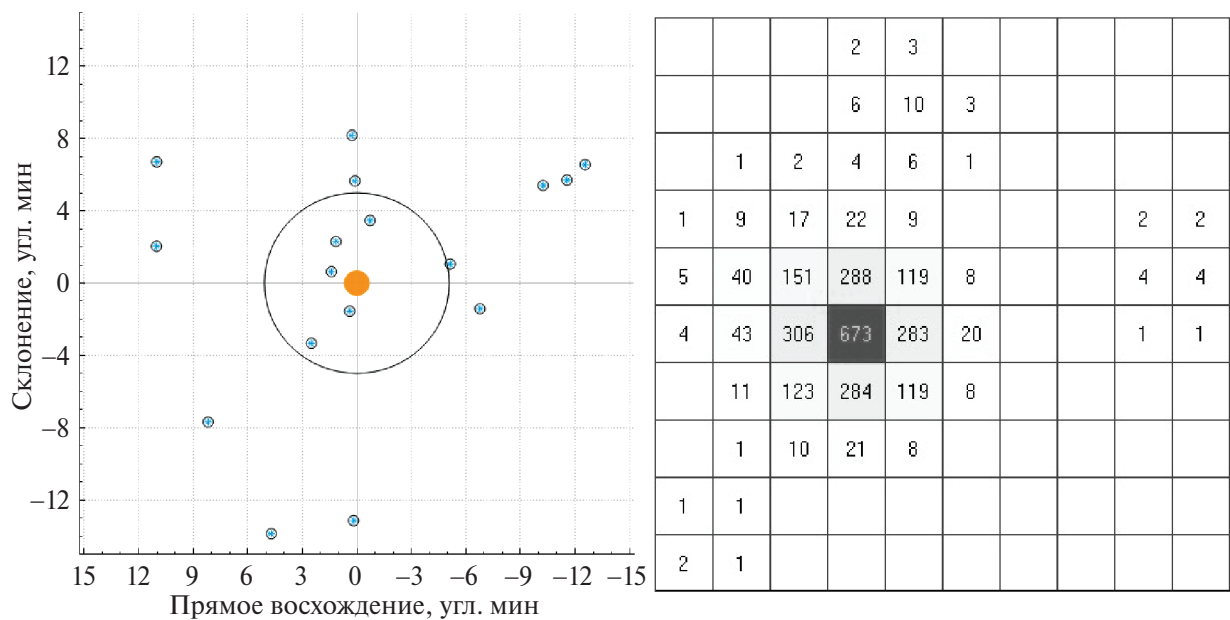


Рис. 12. Пример визуализации и проецирования микрокаталога: (а) – микрокаталог звезды HIP 57587 в небесной системе координат, программа Catalogue Guide; (б) – отображение центральной части микрокаталога дискретной структурной матрицы, программа Star Manager.

Эта звезда, в отличие от предыдущей, имеет пять соседей в радиусе 5', что сильно меняет дело.

Каждая из показанных на рис. 12а звезд отображена на рис. 12б гауссовым распределением яркости с полушириной $\sigma_x = \sigma_y = 0.7$. При этом хорошо видно, что наиболее яркая звезда микрокаталога HIP 57587 дала самое большое распределение яркости, на которое наложились распределения яркости от других звезд. При этом распределение яркости от звезды HIP 57587 утра-

тило симметрию. В данном случае это означает, что в измерениях ее координат в любом случае будет содержаться систематическая ошибка.

В качестве еще одного примера работы программы Catalogue Guide на рис. 13 показана компьютерная реконструкция кадра съемки участка небесной сферы размером $8^\circ \times 8^\circ$, составленная из микрокаталогов БК-0. В центре реконструкции находится показанный на рис. 12а микрокаталог звезды HIP 57587.

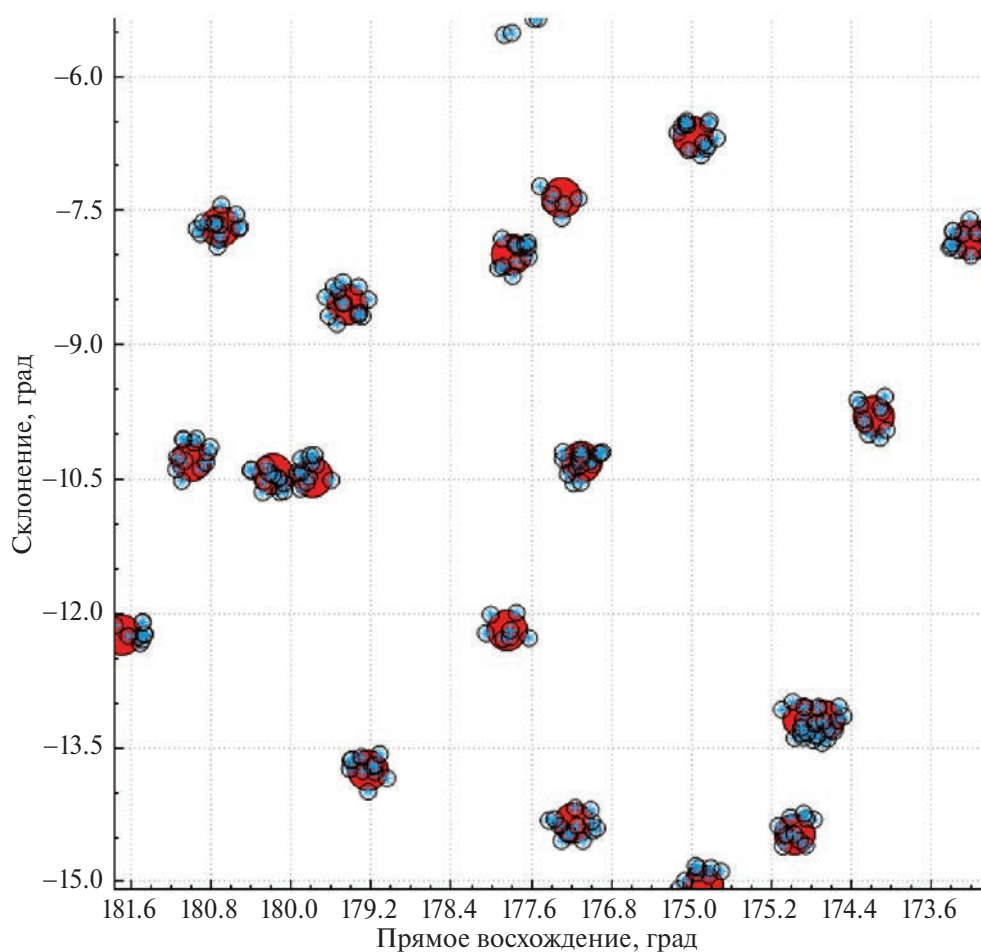


Рис. 13. Компьютерная реконструкция участка небесной сферы размером $8^\circ \times 8^\circ$. В центре участка микрокаталог звезды HIP 57587. Красным кружком обозначена основная звезда микрокаталога, кружками с синим центром — звезды окружения.

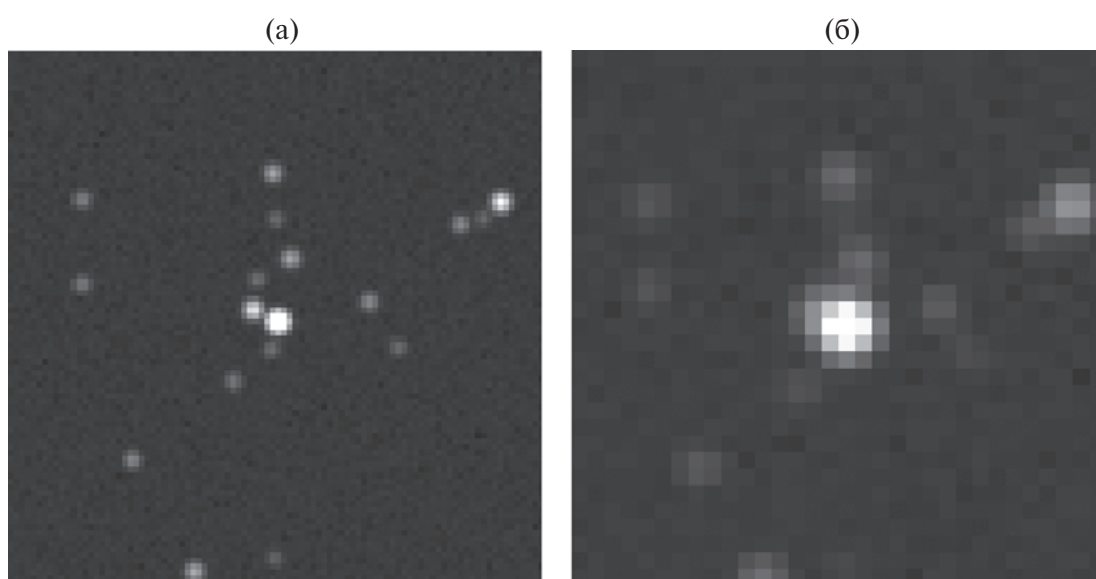


Рис. 14. Пример проецирования микрокаталога звезды HIP 57587 на матрицы приборов с разными размерами пикселей: (а) — с пикселем 5.5 мкм; (б) — с пикселем 16 мкм.

Для демонстрации работы программы Star Manager на рис. 14 показана проекция этого микрокаталога на матрицу двух приборов с разными размерами пикселей матричного приемника излучения.

Программа Star Manager может работать в ручном и автоматическом режимах. В ручном режиме программа позволяет детально анализировать ближайшие окрестности любой звезды основной группы, выбирать уровни отсечки и способы локализации, определять величину систематической и случайной ошибок измерения небесных координат звезды при заданных условиях, вносить поправки в бортовой каталог и убеждаться в их целесообразности. В автоматическом режиме программа позволяет повторять отработанные в ручном режиме действия оператора.

Обработанные в программе Star Manager списки в виде протоколов возвращаются в программу Catalog Guide, объединяются с протоколами, сделанными на основании других списков звезд. Собранные таким образом материалы становятся основой для составления бортового каталога звезд для определенного типа прибора. Функционалы обеих программ и возможности их взаимодействия иллюстрирует рис. 15.

Работа с программами Catalog Guide и Star Manager требует хорошего понимания принципов работы звездных датчиков ориентации и накопления определенных навыков. При наличии того и другого этот программный комплекс позволяет не только составлять звездные каталоги для приборов, но и выполнять разностороннее их моделирование на этапе разработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работы по наблюдению и съемке звезд в интересах решения навигационных задач в космосе начались в ИКИ РАН в 1960-е годы прошлого века. В 1980-е годы они переросли в разработки съемочных систем для наблюдения планет и малых тел Солнечной системы, а также, в создание нового типа звездных датчиков, способных определять ориентацию КА за доли секунды по снимкам произвольных участков небесной сферы. Именно такие приборы в последние десятилетия стали неотъемлемой составляющей систем управления современных КА. Их метрологической основой стали бортовые звездные каталоги, составляемые на основе фундаментальных каталогов: SAO, Gaia и Hipparcos.

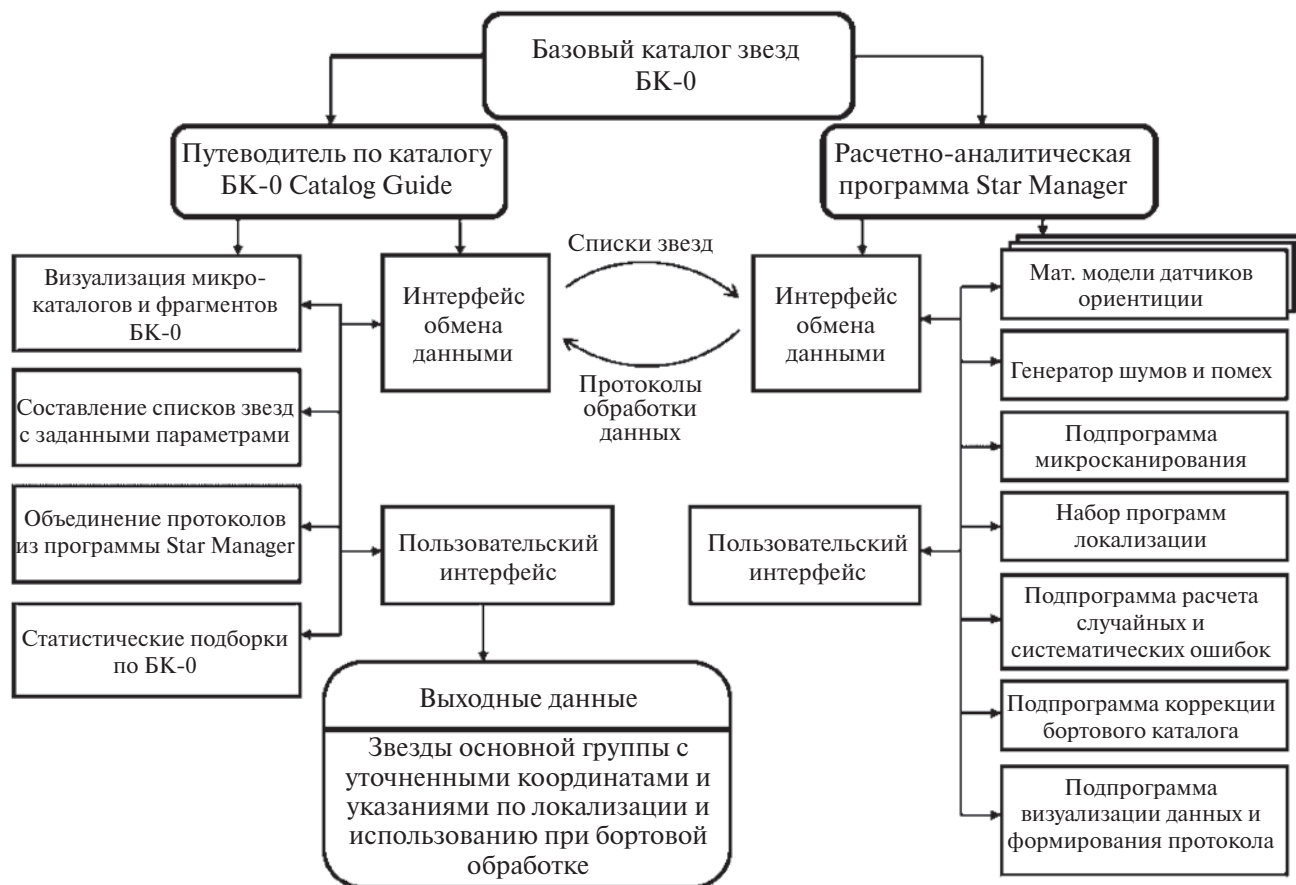


Рис. 15. Иллюстрация функционалов и возможностей взаимодействия программ Catalog Guide и Star Manager.

Работа над базовым звездным каталогом для датчиков ориентации, включая подготовку эксперимента на КА Ресурс-П № 3, его проведение и обработку данных, заняла около десяти лет. Много времени ушло на разработку ПМО для анализа и обработки экспериментальных данных. В это же время уточнялись и создавались заново математические модели звездных датчиков ориентации разных типов, модели их собственных шумов, а также шумов, обусловленных взаимодействием пикселей матричного приемника излучения с падающим на них потоком фотонов от звезд разной магнитуды и спектра излучения.

Затраты сил и времени на разработку и составления базового каталога вполне окупались возможностью полной или почти полной автоматизации процесса составления каталогов звезд для датчиков ориентации с учетом их ключевых параметров.

Следует отметить, что первые эксперименты по составлению бортовых каталогов в соответствии с изложенной в статье логикой и их внедрению в опытные образцы звездных датчиков ориентации дают позитивные результаты. Вместе с тем в связи с использованием базового каталога, состоящего из множества микрокаталогов, возникают и новые проблемы. Сохранение высокой точности измерений в звездных датчиках ориентации потребует постоянной поддержки базового каталога.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аванесов Г.А., Белинская Е.В., Брысин Н.Н., Филиппова О.В., Шамис В.А., Эльяшев Я.Д. Астрометрическая модель звездного датчика ориентации космического аппарата // Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 1. С. 89–98.
DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-89-98
- Аванесов Г.А., Бессонов Р.В., Куркина А.Н., Сметанин П.С. Технология наземной обработки данных о координатах звезд в целях повышения точности геопривязки снимков Земли из космоса // Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса. 2018а. Т. 15. № 6. С. 31–38.
DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-31-38
- Аванесов Г.А., Бессонов Р.В., Сметанин П.С., Филиппова О.В., Эльяшев Я.Д. Особенности измерения координат звезд оптико-электронными приборами с различным угловым разрешением // Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса. 2018б. Т. 15. № 6. С. 39–47.
DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-39-47
- Аванесов Г.А., Василейская А.Н., Никитин А.В., Филиппова О.В., Юматов Б.А. Исследование фотометрических характеристик изображений звезд в реальных условиях эксплуатации звездных датчиков // Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса. 2021а. Т. 18. № 6. С. 116–126.
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-116-126
- Аванесов Г.А., Зиман Я.Л., Алексахин Е.П. Математическое обеспечение определения ориентации КА по изображениям звездного неба // Оптико-электронные приборы в космических экспериментах. М.: Наука, 1983. С. 124–157.
- Аванесов Г.А., Зиман Я.Л., Красиков В.А., Снеткова Н.И., Собчук В.Г., Форш А.А. Алгоритмы определения ориентации космического аппарата по бортовым астроизмерениям // Изв. вузов. Приборостроение. 2003. Т. 46. № 4. С. 31–37.
- Аванесов Г.А., Зиман Я.Л., Красиков В.А., Снеткова Н.И., Собчук В.Г., Форш А.А. Программное обеспечение определения астроориентации космических аппаратов с помощью звездного координатора (Астро) // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2000610308. Рег. 2000.
- Аванесов Г.А., Куркина А.Н., Филиппова О.В., Эльяшев Я.Д. Эксперимент по коррекции фрагмента бортового каталога прибора БОКЗ-М60 // Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса. 2018в. Т. 15. № 6. С. 60–68.
DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-60-68
- Аванесов Г.А., Снеткова Н.И., Строилов Н.А., Филиппова О.В., Шамис В.А., Эльяшев Я.Д., Юматов Б.А. Базовый каталог звезд для датчиков ориентации КА // Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса. 2019а. Т. 16. № 5. С. 65–74.
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-65-74
- Аванесов Г.А., Снеткова Н.И., Филиппова О.В., Эльяшев Я.Д. Исследования звезд участка небесной сферы двумя датчиками ориентации БОКЗ-М60 // Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса. 2018 г. Т. 15. № 6. С. 48–59.
DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-48-59
- Аванесов Г.А., Строилов Н.А., Филиппова О.В., Шамис В.А., Эльяшев Я.Д. Адаптация звездных каталогов к условиям их применения в звездных датчиках ориентации // Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса. 2018д. Т. 16. № 6. С. 69–81.
DOI: 10.21046/2070-7401-2018-16-6-69-81
- Аванесов Г.А., Строилов Н.А., Филиппова О.В., Шамис В.А., Эльяшев Я.Д. Фотометрическая модель звездного датчика ориентации // Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса. 2019б. Т. 16. № 5. С. 75–84.
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-75-84
- Аванесов Г.А., Филиппова О.В., Шамис В.А., Эльяшев Я.Д. Моделирование влияния шумовых факторов на точность измерения координат звезд // Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса. 2021б. Т. 18. № 1. С. 61–69.
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-61-69

- Аванесов Г.А., Шамис В.А., Эльяшев Я.Д. Моделирование изображений звездного неба в задачах наземной отработки датчиков ориентации // *Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса*. 2021в. Т. 18. № 2. С. 82–94.
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-82-94
- Зиман Я.Л., Томилова А.А. Определение ориентации космических аппаратов по снимкам звезд // *Космич. исслед.* 1969. Т. 7. № 2. С. 291–298.
- Телевизионные исследования Фобоса / Ред.: Аванесов Г.А., Жуков Б.С., Зиман Я.Л. и др. М.: Наука, 1994. 168 с.
- Телевизионная съемка кометы Галлея / Ред. Сагдеев Р.З. М.: Наука, 1989. 295 с.
- Gaia Collaboration*. Gaia Data Release 1. Summary of the astrometric, photometric and survey properties // *Astron. and Astrophys.* 2016. V. 595. id. A2.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201629512>
- Gaia Collaboration*. Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties // *Astron. and Astrophys.* 2018. V. 616. id. A1.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833051>
- Star Catalog: Positions and Proper Motions of 258,997 Stars for the Epoch and Equinox of 1950.0 // *Smithsonian Astrophys. Observatory Staff, Publ. Smithsonian Inst. Washington, D.C.* 1966. V. 4. № 4652. (репринт 1971)
- The Hipparcos and Tycho Catalogues // *ESA*. 1997. ESA SP-1200.
- The Palomar Digital Sky Survey; VizieR, CDS.
https://sites.astro.caltech.edu/~george/dposs/dposs_pop.html

УДК523–83

УДАРНЫЙ КРАТЕР СО СЛЕДАМИ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ В ЮЖНОЙ ПОЛЯРНОЙ ОБЛАСТИ ЛУНЫ

© 2024 г. А. Т. Базилевский^а, *, С. С. Красильников^б, М. А. Иванов^а

^а Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

^б Лаборатория дистанционного зондирования планет, Отдел землеведения и геоинформатики, Гонконгский политехнический университет, Гонконг, Китай

* e-mail: atbas@geokhi.ru

Поступила в редакцию 23.05.2023 г.

После доработки 15.06.2023 г.

Принята к публикации 18.08.2023 г.

В работе рассмотрено строение кратера диаметром 34 км, расположенного в материковой местности в краевой зоне южной полярной области Луны в пределах ударного бассейна Южный полюс – Эйткен. Этот кратер относится к морфологическому типу Дауэс, для которого характерна в целом уплощенная, а в деталях неровная, холмисто-грядовая поверхность дна. Изучаемый кратер обладает трещиноватым дном, что считается признаком внедрения магмы в подкратерное пространство. Трещины в материале дна представлены ложбинами от 2 до 10 км длиной, 0.3–1 км шириной и 50–150 м глубиной. На снимках LROC NAC видно, что на холмисто-грядовых участках дна поверхность реголита имеет “морщинистую” текстуру, а на субгоризонтальных – гладкую. На одном из участков дна находится 700-метровый кратер, вал которого касается одной из ложбин. Судя по морфологии этого кратера и отсутствию на его валу камней метрового размера, он образовался в интервале (200–300) млн – 1 млрд лет назад, тогда как возраст изучаемого 34-километрового кратера, оценен по плотности наложенных на его вал малых кратеров как 3.83(+0.025; –0.031) млрд лет. Возраст материала поверхности деформированного дна изучаемого кратера находится в пределах (200–300) млн – 1 млрд лет. Вероятно, трещиноватость дна (образование ложбин) была вызвана внедрением в подкратерное пространство интрузивного тела или тел в течение коперниковского или начале эратосфенского периодов геологической истории Луны. Рассматриваемый 34-километровый кратер, несомненно, заслуживает дальнейшего изучения.

Ключевые слова: кратер, трещиноватое дно, ложбины, текстура реголита, возраст кратера, возраст материала дна, магматическая активность

DOI: 10.31857/S0320930X24010036, EDN: OIBYJZ

ВВЕДЕНИЕ

Космические агентства ряда стран планируют на ближайшие годы исследования в южной полярной области, что связано с присутствием там в реголите замерзших летучих (что характерно и для северной полярной области) и с тем, что там проходит вал ударного бассейна Южный полюс – Эйткен, самого крупного и самого древнего из известных на Луне. 11 августа 2023 г. Роскосмос запустил КА Луна-25, который должен был совершить посадку в окрестностях Южного полюса и провести изучение реголита и окружающей среды (Дьячкова и др., 2021; Митрофанов и др., 2021). Но 19 августа Луна-25 перешла на нерасчетную орбиту и прекратила свое существование в результате столкновения с поверхностью Луны. Вероятно, это как-то изменит наши планы изучения Луны. А пока считается, что примерно через пять лет будет запуск КА Луна-27, ко-

торый тоже должен совершить посадку в районе Южного полюса и провести более детальные исследования. А затем аппарат Луна-28 должен доставить на Землю образцы полярного реголита (Ефанов, Долгополов, 2016). Изучение Южного полюса Луны также планирует Китай – миссии Chang’e-6, -7, -8 (Ху и др., 2020). На это же частично нацелена и американская программа Artemis (NASA, 2020. https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/a_sustained_lunar_presence_nspc_report4220final.pdf). В частности, в конце 2024 г. планируется запуск лунохода VIPER (Volatiles Investigating Polar Exploration Rover), который должен заниматься поисками льда, воды и других возможных ресурсов в южно-полярном районе Луны (<https://www.nasa.gov/viper/overview>). Европейское космическое агентство (ESA) тоже прорабатывает возможность исследований в полярных областях Луны (Carpenter, Fisackerly, 2017).

Южная полярная область — это материковая местность, где преобладающие формы рельефа — ударные кратеры. Среди них изредка встречаются кратеры с трещинами на днище. Такие же кратеры с трещинами встречаются и в других областях Луны и трещиноватость днища считается вызванной магматической активностью в недрах под данным кратером (см., например, Schultz, 1976; Jozwiak и др., 2012). Такое сочетание ударного и магматического процессов весьма интересно, и в данной работе мы изучаем один из таких кратеров, расположенных в южной полярной области. Координаты его центра 126.59° з. д., 64.32° ю. ш. и диаметр 34 км. Расположение этого кратера показано на рис. 1 и 2. Основа нашего исследования — фототермологический анализ снимков, полученных с Wide Angle Camera (WAC) и Narrow Angle Camera (NAC) на аппарате Lunar Reconnaissance Orbiter (NASA).

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Общее описание изучаемого кратера и его окрестностей

В ближайших окрестностях изучаемого кратера, кроме многочисленных кратеров диаметром до нескольких десятков километров, осложня-

ющих равнины материкового типа, по-видимому, родственные равнинам места посадки КК Apollo-16 (Geology of the Apollo 16 Area, 1981), видны цепочки вторичных ударных кратеров и на днищах двух кратеров (один из которых — изучаемый) — ложбины, очевидно, трещины растяжения (рис. 3). Важно отметить, что цепочки вторичных кратеров накладываются на северную и южную части вала изучаемого кратера, но на днище кратера они, как будто, не продолжают (см. также рис. 4 и 5).

На рис. 4 видно, что в плане кратер несколько вытянут с запада на восток. В этом направлении его поперечник 36 км, а в направлении север—юг 32 км. Средний диаметр кратера 34 км. Кратер асимметричен и по высоте вала. Возвышение западной части вала над днищем около 1 км, а восточной части — около 2 км. Поверхность днища кратера неровная с невысокими холмами и ложбинами. По данным лазерного высотомера LOLA его средняя высота примерно —4800 м от среднего радиуса Луны, равного 1737.4 км.

Ниже приведена мозаика NAC (Narrow Angle Camera) снимков на изучаемый кратер (рис. 5).

На рис. 4 и 5 видно, что основные элементы рельефа поверхности днища изучаемого кратера (а именно его морфология специфична для

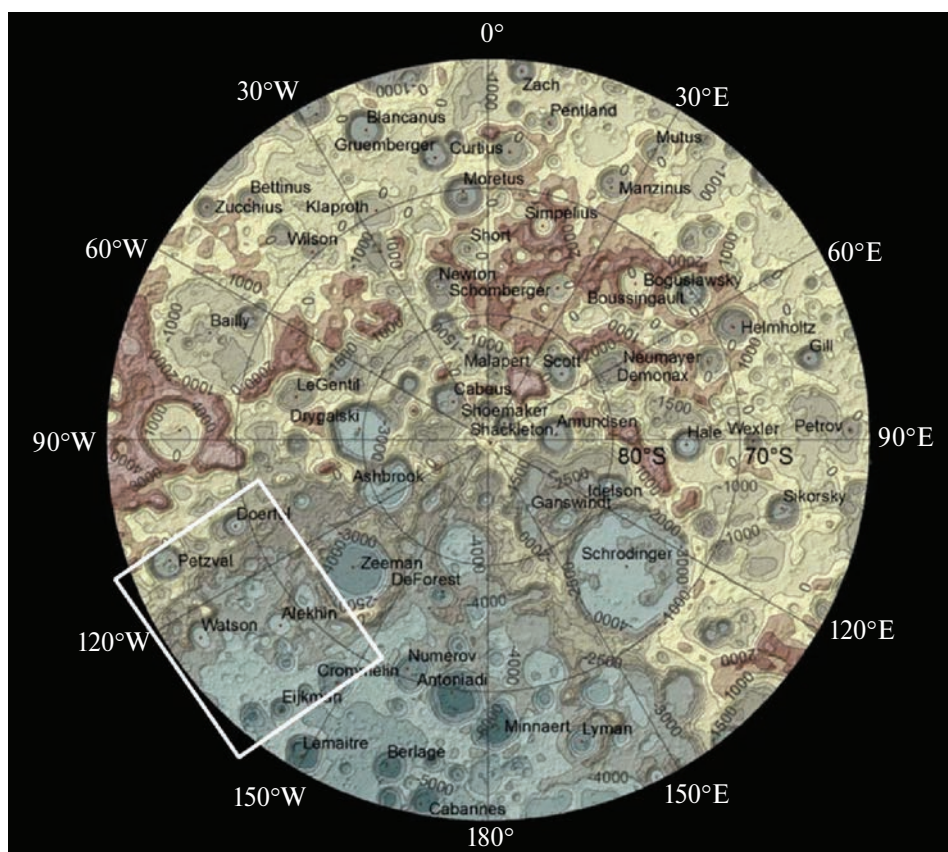


Рис. 1. Фрагмент гипсометрической карты Луны (Гришакина, 2014) — южная полярная область. Белый прямоугольник показывает расположение участка поверхности, представленного на рис. 2.

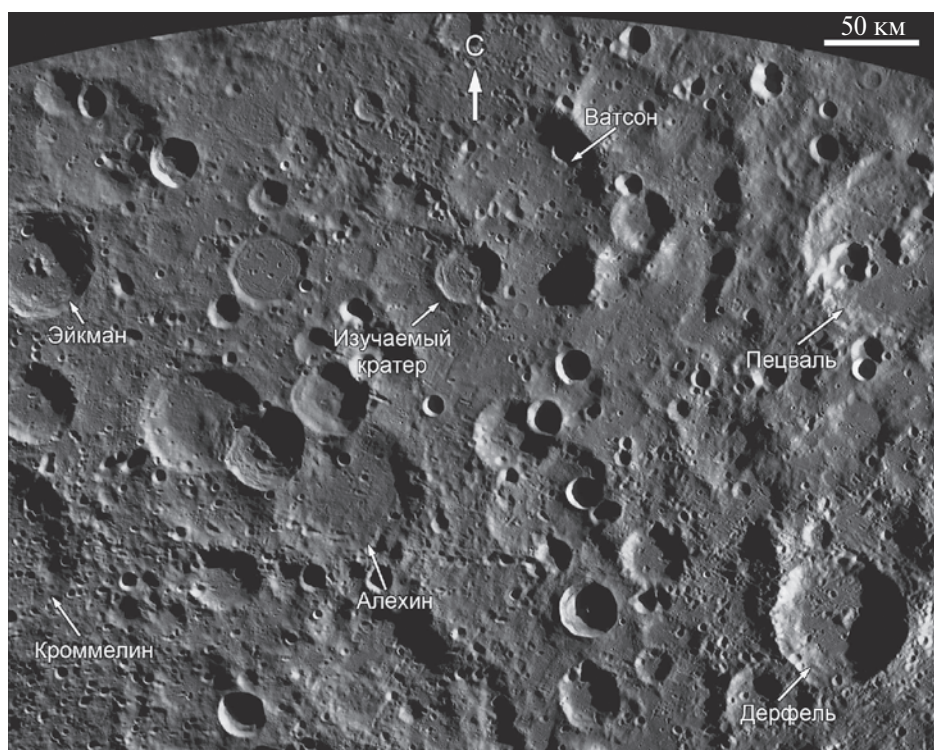


Рис. 2. Окрестности изучаемого кратера, местоположение см. на рис. 1. Фрагмент мозаики WAC_GLOBAL_P900S0000_100M. Источник: NASA.

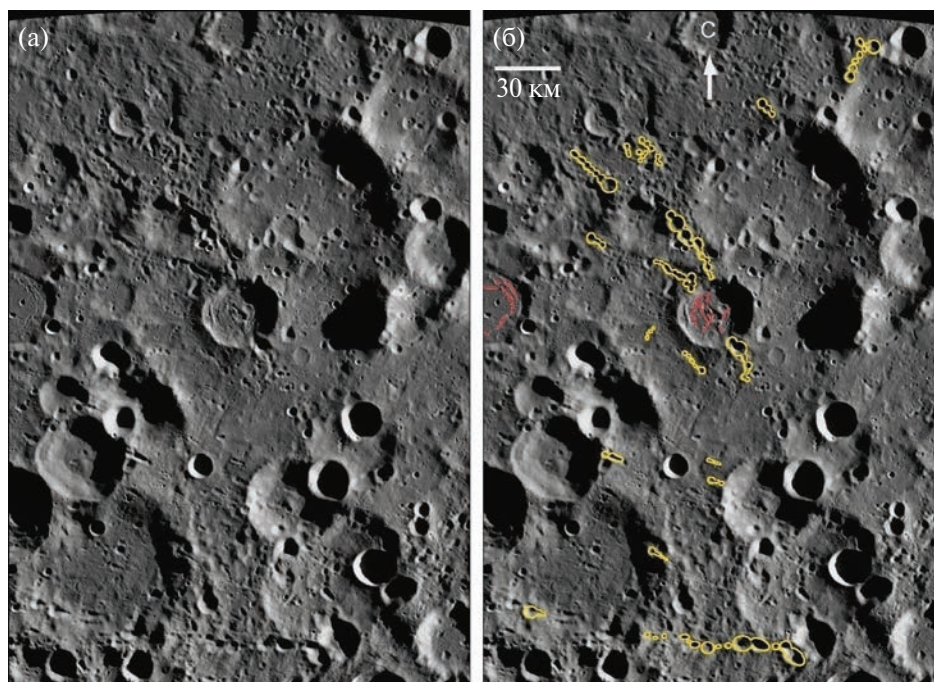


Рис. 3. Район исследуемого кратера: (а) — фрагмент мозаики WAC снимков (NASA); (б) — скопления вторичных кратеров (желтые) и ложбины, вероятно, трещины растяжения (красные) в окрестностях изучаемого кратера.

данной разновидности кратеров) — холмы и ложбины, иногда уступы. Выраженной центральной горки у этого кратера нет. Холмы, ложбины и уступы — пологосклонные с крутизной склонов не более 10° – 15° , в редких случаях до 20° , не да-

ющие теней на использованных для этой мозаики NAC снимках. Тени видны лишь в нескольких кратерах диаметром 300–500 м и меньше. В ряде мест внутренний склон изучаемого кратера переходит в дугообразные в плане (параллельные

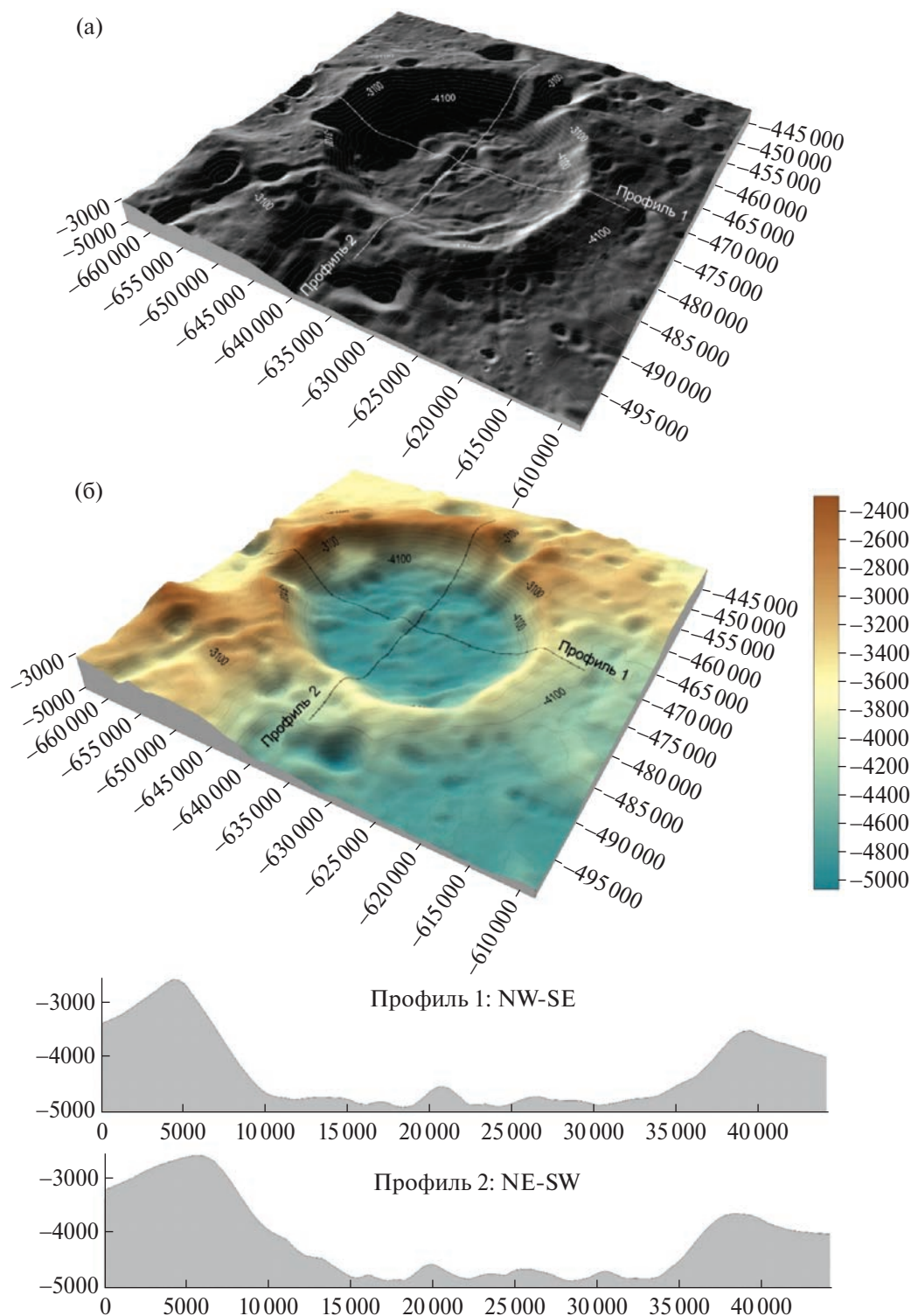


Рис. 4. Изображения изучаемого кратера: (а) – WAC снимок; (б) – гипсометрическая карта этого кратера, составленная по данным лазерного высотомера LOLA. Высоты и расстояния в метрах.

очертаниям вала кратера) ложбины глубиной 50–150 м от среднего уровня поверхности дна. Эта особенность части кратеров с трещиноватыми днищами отмечалась в упомянутых выше работах Schultz (1976) и Jozwiak и др. (2012) – V-shaped moat, кратеры их классов 4а, 4b и 4с.

Ложбин на днище кратера больше в его западной части, но они есть и в восточной. Они от 2 до 10 км в длину, 0,3–1 км в ширину и глубиной 50–150 м. Расположение ложбин в плане полигональное с элементами дугообразного. Уступы наблюдаются в околосклоновых частях дна

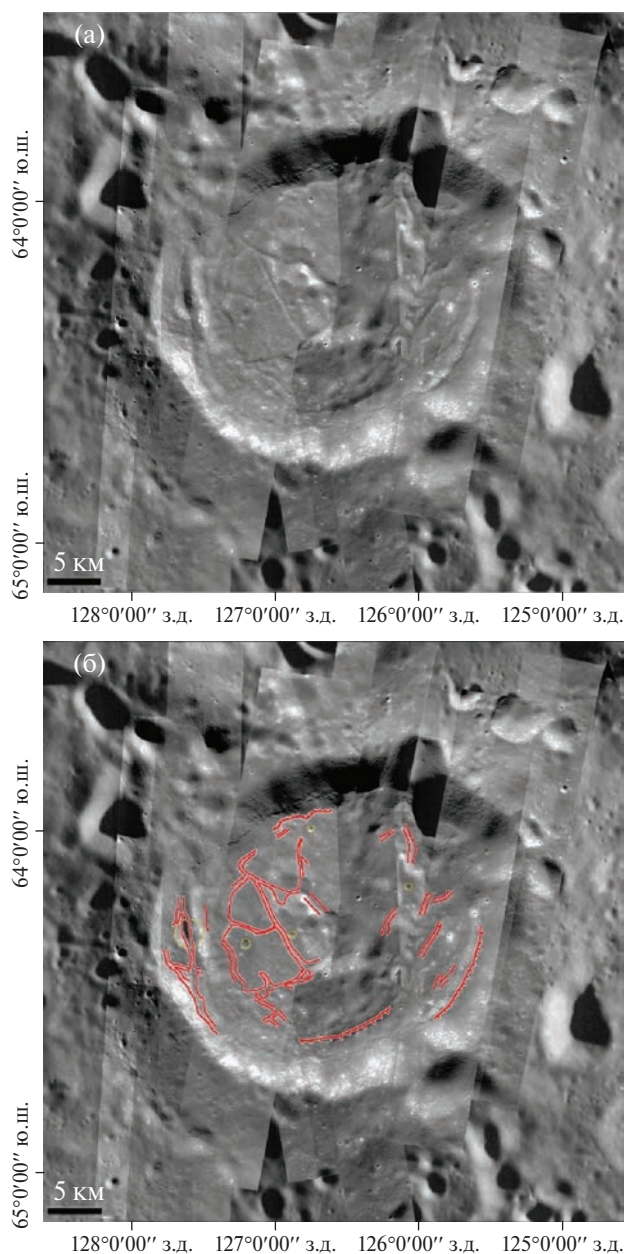


Рис. 5. Изображения изучаемого кратера: (а) — мозаика NAC снимков на изучаемый кратер; (б) — то же с показанными красными линиями ложбинами (трещинами).

на севере, юге и юго-востоке. Их длина 6–10 км и высота 50–150 м.

Морфология поверхности дна на снимках LROC NAC

Ниже будет рассмотрена морфология поверхности на двух участках дна изучаемого кратера (рис. 6а) с использованием NAC снимков с разрешением около 1 м, полученных при высотах Солнца над горизонтом 14.3° и 24.1° (рис. 6б и 6в). На первом участке находится разветвление

одной из упоминавшихся выше ложбин и, соответственно, прилегающая местность. На втором участке находится другая ложбина, а на прилегающей к ней с востока местности расположен кратер диаметром около 700 м.

На рис. 6б видно, что на краях ложбин нет резких уступов. Крутизна их внутренних склонов сверху вниз постепенно увеличивается, а потом уменьшается. В нижней части северного склона ложбины, около ее разветвления, видна россыпь каменных блоков поперечником несколько метров. Возможно, это результат экскавации из расположенных немного выше по склону кратеров диаметром 100–150 м. Текстура поверхности реголита “морщинистая”. Такая текстура характерна для наклонных поверхностей и образуется за счет движения реголита вниз по склону, провоцируемого близкими ударами метеоритов и эндогенными лунотрясениями (см., например, Basilevsky и др., 2019, а также снимки NAC M113934743LC на место посадки Apollo-15 и M131447374LC на место посадки Apollo-17). Также видны кратеры диаметром от нескольких метров до 100–150 м. Но их пространственная плотность невелика, что, очевидно, связано с их ускоренным разрушением при движении реголита вниз по склонам (см., например, Базилевский, Попович, 1976; Basilevsky, 1976).

На рис. 6в видна протягивающаяся с северо-запада на юго-восток ложбина. Как и на участке 1, на краях ложбины нет резких уступов. Крутизна их внутренних склонов сверху вниз постепенно увеличивается, а потом уменьшается. На бортах ложбины и на большей части местности к северо-востоку от нее текстура поверхности реголита “морщинистая”. К юго-западу от ложбины текстура поверхности сравнительно гладкая. И поверхность здесь субгоризонтальная. Повсеместно видны кратеры диаметром от нескольких метров до 150–250 м.

Около северо-восточного края ложбины этого участка находится сравнительно крупный кратер. Его диаметр около 700 м. На изображении, полученном при высоте Солнца 14.3°, восточная часть кратера затенена, т. е. крутизна верхней части его внутреннего склона больше 14.3°. Конец тени находится примерно на центре кратерной депрессии. Отсюда следует, что отношение глубины этого кратера к его диаметру примерно 0.25. Судя по крутизне внутреннего склона рассматриваемого кратера, он относится к морфологическому классу В, но с необычно большим отношением глубины к диаметру. Судя по этим характеристикам, абсолютный возраст этого кратера не более 1 млрд лет (Basilevsky, 1976; Базилевский, 2015). Такой большой кратер в момент образования должен был проникнуть на глубину 150–200 м через

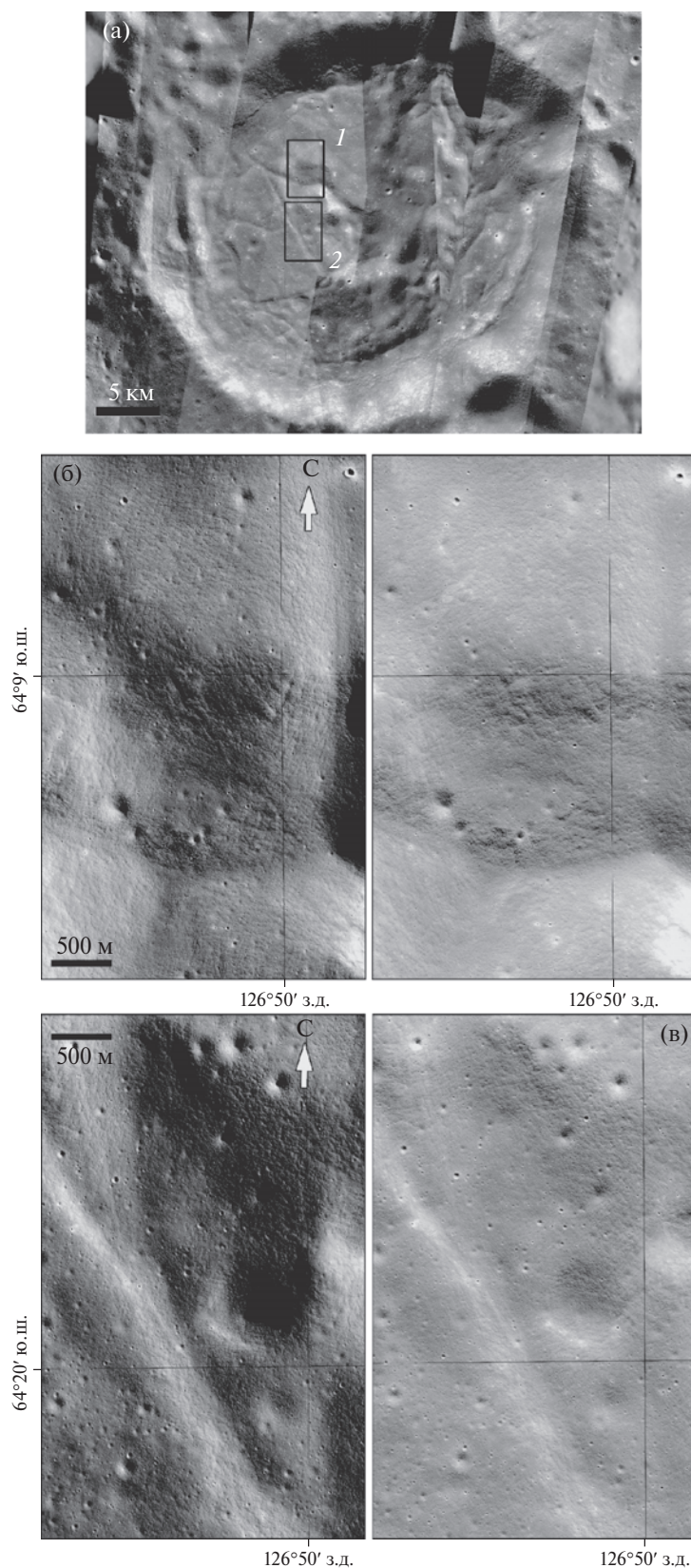


Рис. 6. Морфология поверхности дна изучаемого кратера на снимках LROC NAC: (а) — положение двух участков (1 и 2) на дне изучаемого кратера, координаты центра кратера 126.59° з. д., 64.32° ю. ш.; (б) — фрагменты снимков NAC M1122039053LE и RE (слева) и M135960042LE (справа) с разрешением 0.88 м и высотой Солнца над горизонтом 14.3° и 24.1° соответственно для участка 1; (в) — фрагменты снимков NAC M1122039053LE и RE (слева) и M1359600424LE (справа) с разрешением 0.88 м и высотой Солнца над горизонтом 14.3° и 24.1° соответственно для участка 2.

слой реголита в скальное основание. Но на его валу не видно камней. Очевидно, они разрушились, находясь на поверхности, под воздействием ударов метеоритов и микрометеоритов и суточных колебаний температуры поверхности. Судя по оценкам Basilevsky и др. (2013; 2015) и Li и др. (2018), время, необходимое для практически полного разрушения камней метрового диапазона размеров на поверхности Луны, составляет 200–300 млн лет. Таким образом, абсолютный возраст обсуждаемого 700-метрового кратера, вероятно, находится в пределах (200–300) млн – 1 млрд лет.

Западная часть вала этого кратера соприкасается с восточным краем расположенной здесь ложбины. Вал как бы “открывается” в ложбину. Это может быть как в случае, если кратер образовался раньше, чем ложбина, так и в случае, если кратер образовался позже нее. Но во втором случае материал “открытой” части вала должен был свалиться в ложбину. На представленных на рис. 6в изображениях на дне ложбины какого-то “избыточного” материала не видно. По-видимому, ложбина образовалась после образования обсуждаемого 700-метрового кратера. А отсюда следует, что она образовалась позже возрастного интервала (200–300) млн – 1 млрд лет.

Оценка абсолютного возраста изучаемого кратера и материала поверхности его днища

Для оценки возраста изучаемого кратера проведены идентификация и подсчет малых кратеров на внешнем склоне его вала. Участок подсчета и график пространственной плотности малых кратеров показаны на рис. 7.

Из информации, представленной на рис. 7, видно, что изучаемый кратер образовался ~3.85 млрд лет назад, что близко к началу имбрийского периода геологической истории Луны (Wilhelms, 1987). Следует однако отметить, что в окрестностях этого кратера и на его валу (см., рис 3 и 7а) много вторичных кратеров, и какая-то часть малых кратеров, использованных нами для оценки возраста, могут быть вторичными. А это значит, что наша оценка в какой-то степени может быть завышена.

Для оценки возраста материала днища изучаемого кратера с использованием топографической карты, приведенной на рис. 4б, на днище были выделены два участка с уклонами менее 5° (рис. 8а) и на них выполнены идентификация и подсчет кратеров с диаметром более 50 м. График пространственной плотности этих малых кратеров приведен на рис. 8б.

Как видно из рис. 8б, график пространственной плотности малых кратеров может соответствовать двум возрастам: ~1 млрд лет и ~3.5 млрд лет. Первый, возможно, соответствует возрасту переработки поверхности при внедрении под кратер магмы и, соответственно, образования трещин растяжения (ложбин, см. предыдущий раздел статьи). А второй – возрасту изучаемого кратера (см., также рис. 7б). Вероятно, внедрение магмы в подкратерное пространство произошло гораздо позже образования изучаемого кратера.

Информация о химическом и минералогическом составе

Изучаемый кратер расположен на днище бассейна Южный полюс – Эйткен, которое очер-

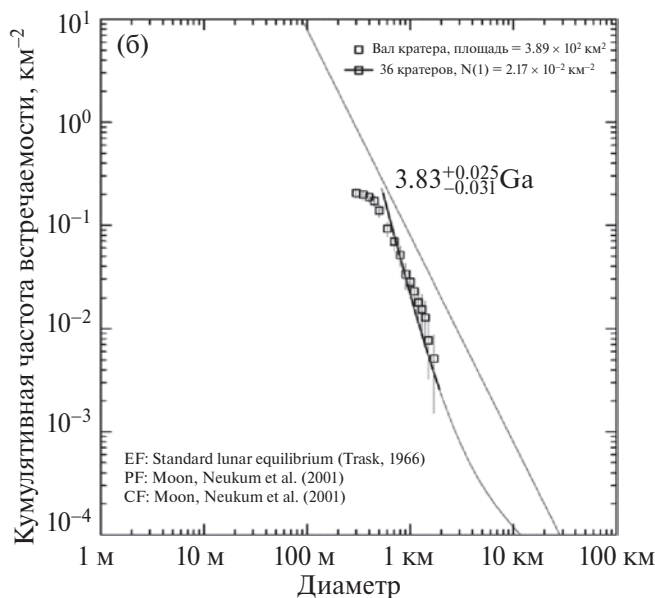
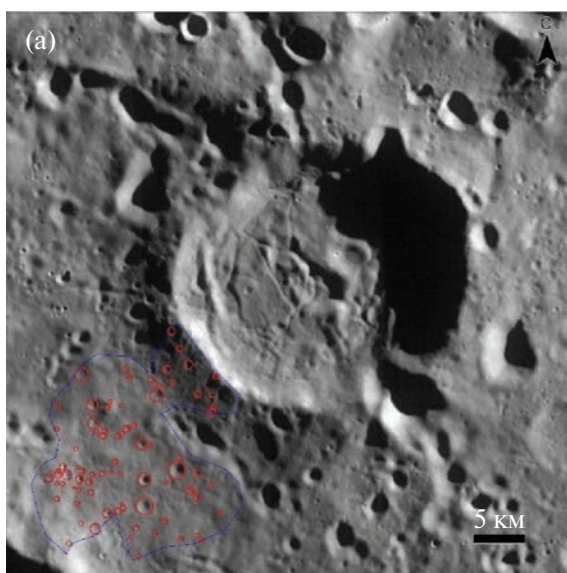


Рис. 7. Результаты подсчета малых кратеров на внешнем склоне изучаемого кратера: (а) — участок подсчета кратеров (красные точки и кружки); (б) — график пространственной плотности кратеров на этом участке.

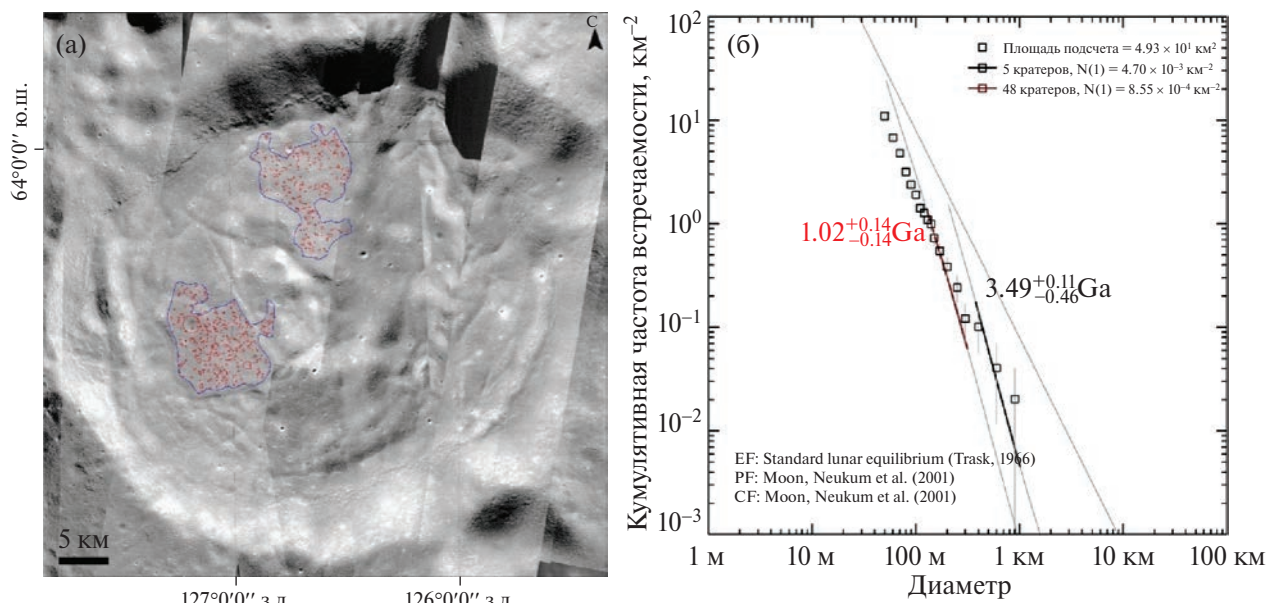


Рис. 8. Результаты подсчета малых кратеров на днище изучаемого кратера: (а) — участки подсчета кратеров (красные точки и кружки); (б) — график пространственной плотности кратеров.

чивается по топографическим данным (Garrick-Bethell, Zuber, 2009). Днище бассейна представляет собой крупную аномалию повышенных содержаний железа в реголите, установленную по данным гамма-съемки в экспедиции Lunar Prospector (Lawrence и др., 2002). Природа этой аномалии до сих пор не установлена, хотя было высказано предположение, что она может отражать дифференцированность лунной коры в отношении железа до ударного события, образовавшего бассейн Южный полюс — Эйткен (Ivanov и др., 2018). Использование спектральных оптических методов, традиционно применяемых для выявления химических и минералогических вариаций реголита (Pieters и др., 1994; Lucey, 2004; Moriarty, Pieters, 2018), до последнего времени в высоких полярных широтах было существенно затруднено из-за неизбежно косого освещения (большого фазового угла) и преимущественного влияния рельефа поверхности на величину альбедо. В опубликованной недавно работе был предложен метод совместной обработки оптических и топографических данных, позволяющий адекватно оценивать ряд оптических, химических и минералогических свойств поверхности, таких как индекс оптической зрелости реголита, содержания FeO, плагиоклаза, пироксенов (низко- и высококальциевого) и оливина (Lemelin и др., 2022).

Минералогические карты, опубликованные в работе (Lemelin и др., 2022), показывают, что практически все днище бассейна Южный полюс — Эйткен, которое в южной полярной области характеризуется повышенными содержаниями низкокальциевого пироксена (на уровне

более 35–40 мас.%) и относительно пониженными содержаниями высококальциевого пироксена (на уровне менее 15 мас.%). При этом повышенные содержания обоих пироксенов точно соответствуют кратерам, днище которых перекрыто вулканическим (базальтовым) материалом в областях за пределами вала бассейна SPA и в восточной части днища бассейна. Эти же кратеры характеризуются повышенными концентрациями FeO в реголите (на уровне 15–20 мас.%). Таким образом, повышенные значения содержания этих компонентов свидетельствуют о вулканической активности, связанной с извержением базальтовой магмы.

В западной части днища бассейна, где расположен изучаемый кратер, отсутствуют четкие морфологические признаки базальтового вулканизма, а содержания высококальциевого пироксена характеризуются значительно меньшей контрастностью. Повышенные содержания низкокальциевого пироксена и FeO связаны главным образом с двумя ударными кратерами, Dawson (135.08° з. д., 67.01° ю. ш., диаметр 45 км) и Eijkman D (136.94° з. д., 62.06° ю. ш., диаметр 25 км). Оба кратера имеют резко выраженный вал, но кратер Dawson лишен выбросов, что характерно для кратеров эратосфенского периода геологической истории Луны, а кратер Eijkman D окружен зоной сплошных выбросов, что характерно для кратеров коперниковского периода (Wilhelms, 1987). На днищах обоих кратеров нет признаков вулканической активности, что в сочетании с повышенными содержаниями пироксена и FeO означает, что эти кратеры выбросили базальтоподобное

вещество при своем формировании из-под поверхности с глубины, которая оценивается, как 1/10 диаметра кратера (Melosh, 1989).

Такое вещество могло бы представлять собой компонент криптоморя (обширной лавовой равнины, полностью перекрытой выбросами более поздних кратеров (Schultz, Spudis, 1979)), располагавшегося на значительной (более 1 км) глубине. Эта гипотеза, однако, может быть отвергнута на том основании, что близлежащие кратеры с диаметром 50 км и более не характеризуются аномальными значениями содержаний пироксенов и железа. Вероятно, материал, выброшенный кратерами Dawson и Eijkman D, представляет собой компонент ограниченного по площади интрузивного тела, а не протяженной базальтовой равнины. Трещиноватые днища изучаемого кратера, а также безымянного кратера (134.03° з. д., 64.03° ю. ш., диаметр 40 км), таким образом, могут представлять дополнительные свидетельства существования локализованных интрузивных тел (например, дайковых комплексов) под поверхностью в южной полярной области Луны.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как следует из приведенных выше характеристик изучаемого кратера, он относится к морфологическому типу кратеров с трещиноватым дном (см., например, Schultz, 1976; Jozwiak и др., 2012). Среди кратеров этого типа, изученных в работе Jozwiak и др. (2012), его нет. Это, по-видимому, связано с тем, что во время работы над этой статьей съемка поверхности Луны камерой WAC Lu-

nar Reconnaissance Orbiter (Robinson и др., 2010) находилась еще на ранней стадии и он мог просто не попасть на имеющиеся изображения поверхности.

Если отвлечься от проблемы трещиноватости днища изучаемого кратера, то он относится к морфологическому типу Дауэс. У кратеров этого типа в целом уплощенная, а в деталях неровная, холмисто-грядовая поверхность, обладающая в плане характерным “вихревым” рисунком (Florensky и др., 1976; Базилевский и др., 1983). Этот тип характерен для кратеров диаметром от 15 до 30 км с небольшими выходами за эти пределы. Кратеры меньшего диаметра обычно чашеобразные. Кратеры большего диаметра — с центральной горкой.

Среди изученных Jozwiak и др. (2012) кратеров есть по крайней мере один, очень похожий на изучаемый нами. Это кратер Годибер (Gaudibert) — ударный кратер диаметром 33 км на северо-восточной границе Моря Нектара на видимой стороне Луны (рис. 9). Координаты центра кратера 10.93° ю. ш. 37.82° в. д.; Jozwiak и др. (2012) относят его к классу 4b.

Для кратеров этого класса характерна относительно небольшая глубина, измеряемая от гребня вала. При этом высота гребня вала над окружающей кратер поверхностью такая же, как у сравнительно молодых неизмененных кратеров соответствующего размера. Кроме того, между подножиями внутренних склонов этих кратеров на значительной части периметра днища присутствует V-образная ложбина. Эти особенности строения таких кратеров позволили Schultz (1976) и Jozwiak и др. (2012) заключить, что тре-

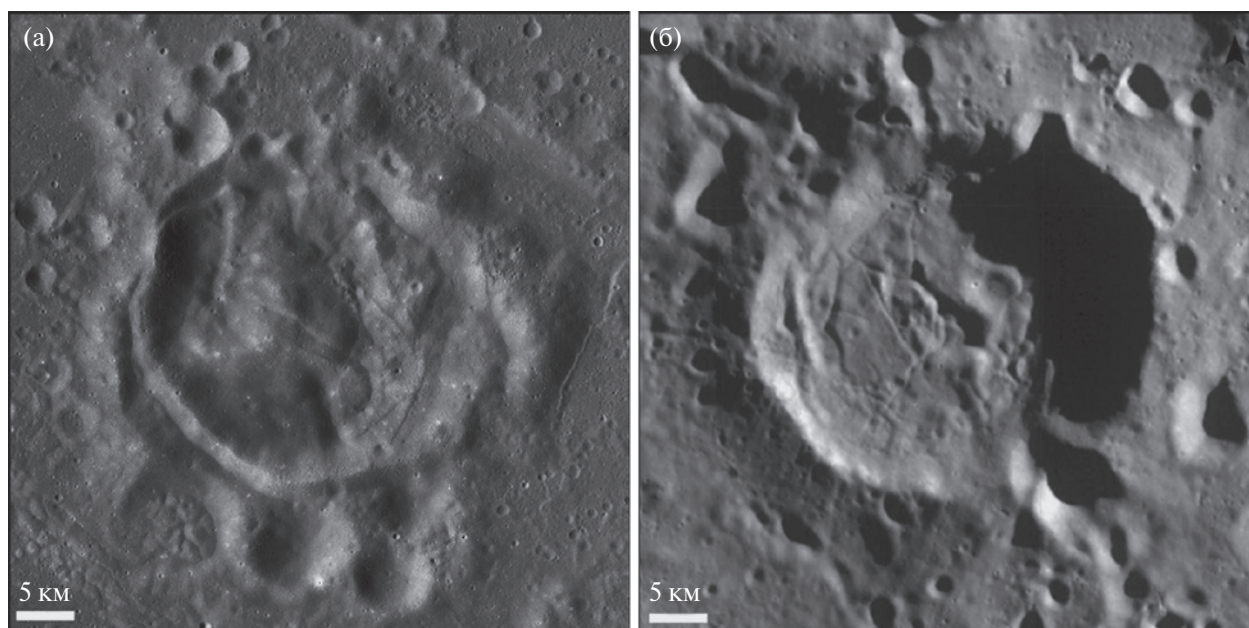


Рис. 9. Изображение кратеров Годибер и изучаемого кратера: (а) — кратер Годибер, координаты центра кратера 10.93° ю. ш., 37.82°; (б) — изучаемый кратер, координаты центра 126.59° з. д., 64.32° ю. ш., снимки LROC WAC.

щиноватость (ложбины) дна этих кратеров вызвана внедрением магматической интрузии. Ее направленное вверх давление вызвало “поршневидный” подъем материала под кратером, что привело к поднятию днища, его изгибанию и образованию трещин растяжения. Вероятно, трещиноватость днища изучаемого кратера (образование ложбин) могла быть тоже вызвана внедрением интрузивного тела в подкратерное пространство. Судя по приведенным выше оценкам времени образования одной из ложбин и оценкам возраста материала поверхности днища, это, вероятно, произошло в течение коперниковского или начале эратосфенского периодов геологической истории Луны. Такие молодые (по лунным меркам) проявления магматической активности до недавнего времени не были выявлены. Однако анализ современных снимков лунной поверхности, полученных с камерами LROC WAC и NAC, показал, что проявления магматической деятельности на Луне могут быть очень молодыми, почти современными (см., например, Braden и др., 2014).

Рассматриваемый 34-километровый кратер, несомненно, заслуживает дальнейшего изучения. В частности, интересно посмотреть, не оказалась ли как-то возможная молодая магматическая активность на деталях минерального состава и концентрации льда или химически связанной воды в реголите дна кратера. Мы планируем обратиться в Международный астрономический союз с предложением присвоить этому кратеру название “Галимов”, в честь покойного геохимика и планетолога академика Эрика Михайловича Галимова, длительное время бывшего директором Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН. Уверены, что по рассматриваемому кратеру будет много публикаций и имя Галимова будет в них упоминаться. 4 июня 2024 г. Международный Астрономический Союз присвоил описанному в данной статье кратеру название Галимов / Galimov: <https://planetarynames.wr.usgs.gov/Feature/16287>.

Авторы признательны В.В. Шевченко за помощь в этой работе.

Работа была финансово поддержана грантом Российского научного фонда № 21–17–00035: Оценка темпов экзогенного обновления поверхности Луны (для А.Т. Базилевского и М.А. Иванова).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Базилевский А.Т. Оценка абсолютного возраста ударных кратеров Луны, Меркурия и Марса по степени их морфологической выраженности // Исследования Солнечной системы: Космические

вехи. Материалы научной сессии, посвященной 80-летию академика М.Я. Марова. Четвертый Международный симпозиум по исследованию Солнечной системы. ИКИ РАН, Москва, 14–18 октября 2013. Сер. “Механика, управление и информатика” / Ред. Захаров А.В. Москва, 2015. С. 213–228.

Базилевский А.Т., Грановский Л.Б., Иванов Б.А., Фельдман В.И., Флоренский К.П., Яковлев О.И. Ударные кратеры на Луне и планетах. М.: Наука, 1983. 232 с.

Базилевский А.Т., Попович В.Д. Эволюция малых кратеров на склонах лунного рельефа. Изв. АН СССР. Сер. геол. № 6. 1976. 76–80.

Гришакина Е.А. Гипсометрическая карта Луны / Hypsometric map of the Moon. Государственный астрономический институт им. Штернберга, Московский государственный университет геодезии и картографии, 2014.

Дьячкова М.В., Митрофанов И.Г., Санин А.Б., Литвак М.Л., Третьяков В.И. Характеристика мест посадки космического аппарата Луна-25 // Астрон. вестн. 2021. Т. 55. № 6. С. 522–541. (Djachkova M.V., Mitrofanov I.G., Sanin A.B., Litvak M.L., Tretyakov V.I. Characterization of the Luna-25 landing sites // Sol. Syst. Res. 2021. V. 55. Iss. 6. P. 509–528).

Ефанов В.В., Долгополов В.П. Луна. От исследования к освоению (к 50-летию космических аппаратов “Луна-9” и “Луна-10”) // Вестн. НПО им. С.А. Лавочкина. 2016. Т. 4. № 34. С. 3–8.

Митрофанов И.Г., Зеленый Л.М., Третьяков В.И., Калашников Д.В. Луна-25: первая полярная миссия на Луну // Астрон. вестн. 2021. Т. 55. № 6. С. 497–508. (Mitrofanov I.G., Zelenyi L.M., Kalashnikov D.V. Luna-25: The first polar mission to the Moon // Sol. Syst. Res. 2021. V. 55. Iss. 6. P. 485–495).

Basilevsky A.T. On the evolution rate of small lunar craters // Proc. 7th Lunar Sci. Conf. 1976. P. 1005–1020.

Basilevsky A.T., Head J.W., Horz F. Survival times of meter-sized boulders on the surface of the Moon // Planet. and Space Sci. 2013. V. 89. P. 118–126.

Basilevsky A.T., Head J.W., Horz F., Rumsley K. Survival times of meter-sized rock boulders on the surface of airless bodies // Planet. and Space Sci. 2015. V. 117. P. 312–328.

Basilevsky A.T., Krasilnikov S.S., Ivanov M.A., Malenkov M.I., Michael G.G., Liu T., Head J.W., Scott D.R., Lark L. Potential lunar base on Mons Malapert: Topographic, geologic and trafficability considerations // Sol. Syst. Res. 2019. V. 53. № 5. P. 383–398.

Braden S.E., Stopar J.D., Robinson M.S., Lawrence S.J., van der Bogert C.H., Hiesinger H. Evidence for basaltic volcanism on the Moon within the past 100 million years // Nature Geosci. 2014. V. 7. P. 787–791.

Carpenter J.D., Fisackerly R. PROSPECT: ESA’s package for resource observation and in situ prospecting for exploration, commercial exploitation and transportation // 48th Lunar and Planet. Sci. Conf. 2017. V. XLVIII. id. 2514.

- Florensky C.P., Basilevsky A.T., Grebennik N.N.* The relationship between lunar crater morphology and crater size // *Moon*. 1976. V. 16. P. 59–760.
- Garrick-Bethell I., Zuber M.T.* Elliptical structure of the lunar South Pole-Aitken basin // *Icarus*. 2009. V. 204. P. 399–408.
- Central Geology of the Apollo 16 Area Lunar Highlands* // US Geolog. Surv. Prof. Paper 1048 / Eds: Ulrich G.E., Hodges C.A., Muehlberger W.R. 1981. 133 p.
- Ivanov M.A., Hiesinger H., van der Bogert C.H., Orgel C., Pasckert J.H., Head J.W.* Geologic history of the northern portion of the South Pole-Aitken basin on the Moon // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2018. V. 123. P. 2585–2612. <https://doi.org/10.1029/2018JE005590>
- Jozwiak L.M., Head J.W., Zuber M.T., Smith D.E., Neumann G.A.* Lunar floor-fractured craters: Classification, distribution, origin and implications for magmatism and shallow crustal structure // *J. Geophys. Res.: Atmosphere*. 2012. V. 117. id. E11005. [doi:10.1029/2012JE004134](https://doi.org/10.1029/2012JE004134)
- Lawrence D.J., Feldman W.C., Elphic R.C., Little R.C., Prettyman T.H., Maurice S., Lucey P.G., Binder A.B.* Iron abundances on the lunar surface as measured by the gamma-ray and neutron spectrometers // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2002. V. 107. № 12. P. 13–1–13–26. [doi:10.1029/2001JE001530](https://doi.org/10.1029/2001JE001530)
- Lemelin M., Lucey P.G., Camon A.* Compositional maps of the lunar polar regions derived from the Kaguya spectral profiler and the Lunar Orbiter Laser Altimeter data // *Planet. Sci. J.* 2022. V. 3. P. 63.
- Li Yuan, Basilevsky A.T., Xie Minggang, Ip Wing-Huen.* Correlations between ejecta boulder spatial density of small lunar craters and the crater age // *Planet. and Space Sci.* 2018. V. 162. P. 52–61.
- Lucey P.G.* Mineral maps of the Moon // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. id. L08701. [doi:10.1029/2003GL019406](https://doi.org/10.1029/2003GL019406)
- Melosh H.J.* Impact Cratering: A Geologic Process. New York: Oxford Univ. Press, 1989. 253 p.
- Moriarty D.P., Pieters C.M.* The character of South Pole-Aitken Basin: Patterns of surface and subsurface composition // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2018. V. 123. P. 729–747. <https://doi.org/10.1002/2017JE005364>
- NASA's Plan for Sustained Lunar Exploration and Development*. 2020 https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/a_sustained_lunar_presence_nspc_report4220final.pdf
- Pieters C.M., Staid M.I., Fischer E.M., Tompkins S., He G.* A sharper view of impact craters from Clementine data // *Science*. 1994. V. 266. № 5192. P. 1844–1848.
- Robinson M.S., Brylow S.M., Tschimmel M., Humm D., Lawrence S.J., Thomas P.C., Denevi B.W., Bowman-Cisneros E., Zerr J., Ravine M.A., Caplinger M.A., and 12 co-authors.* Lunar Reconnaissance Orbiter Camera (LROC) instrument overview // *Space Sci. Rev.* 2010. V. 150. P. 81–124.
- Schultz P.H.* Floor-fractured lunar craters // *Moon*. 1976. V. 15. 241–273.
- Schultz P.H., Spudis P.D.* Evidence for ancient mare volcanism // *Proc. 10th Lunar and Planet. Sci. Conf.* 1979. V. 3. P. 2899–2918.
- Wilhelms D.E.* The geologic history of the Moon // *US Geolog. Surv. Special Paper* 1348. 1987. 302 p.
- Xu Lin, Pei Zhaoyu, Zou Yongliao, Wang Chi.* China's lunar and deep space exploration program for the next decade (2020–2030) // *Chinese J. Space Sci.* 2020. V. 40. Iss. 5. P. 615–617.

УДК 523.3:52–468

ОЦЕНКА ТЕМПА СКЛОНОВЫХ ПРОЦЕССОВ И МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ КИЛОМЕТРОВЫХ УДАРНЫХ КРАТЕРОВ НА ЛУНЕ

© 2024 г. К. Кочубей^{a, *}, М. А. Иванов^b

^a Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

^b Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

* E-mail: kochubey.ksenia@yandex.kz

Поступила в редакцию 08.08.2023 г. После доработки 29.08.2023 г. Принята к публикации 17.09.2023 г.

Для того чтобы оценить темп склоновых процессов на Луне, мы изучили морфологию и топографическую конфигурацию 24-х кратеров в интервале диаметров 5–15 км, располагающихся в Морях Ясности, Кризисов и Изобилия, а также в материковой местности гор Апеннины. Изученные кратеры формировались в трех типах мишеней: (1) двуслойная (материк, перекрытый морем), (2) однослойная морская и (3) однослойная материковая. Для каждого кратера была установлена его топографическая конфигурация и определено частотно-размерное распределение наложенных кратеров на стенках и в зоне сплошных выбросов. По плотности кратеров в зоне выбросов был оценен возраст изученных кратеров (от 0.31 до 3.83 млрд лет), а сравнение этой плотности с плотностью на стенках позволило оценить темп склоновых процессов. Темп склоновых процессов (E , мм/млн лет) на Луне нелинейный и описывается степенной функцией $E = 4.39A^{-1.03}$, где A — возраст (млрд лет). Оценки темпа склоновых процессов, полученные в нашем исследовании, меняются от ~17 мм/млн лет для наиболее молодого кратера до ~0.8 мм/млн лет для наиболее древнего кратера. Изученные кратеры представляют собой стабильные формы рельефа и практически не меняют своей конфигурации на протяжении миллиардов лет. Тип мишени не оказывает существенного влияния ни на темп склоновых процессов, ни на изменения формы кратеров с течением времени.

Ключевые слова: Луна, ударные кратеры, склоновые процессы, темп склоновых процессов, форма кратеров

DOI: 10.31857/S0320930X24010041, **EDN:** OHVVKX

ВВЕДЕНИЕ

Темп денудации форм рельефа и, в частности, деградации ударных кратеров на Луне представляет собой актуальную и нерешенную проблему. Ее научная важность имеет, по крайней мере, два аспекта. Во-первых, это проблема оценки эффективности массопереноса на безатмосферных телах, т. е. массопереноса, происходящего без участия главных земных эрозионных агентов — ветра и воды. Во-вторых, это проблема оценки длительности существования на поверхности морфологически различных ударных кратеров, что играет ключевую роль в определениях абсолютного модельного возраста геологических образований.

Очевидно, что главную роль в процессах эволюции ландшафтов на поверхности Луны играют метеоритная бомбардировка и склоновые процессы. После окончания поздней метеоритной бомбардировки морской поток ударников, которые могли производить различные изменения на

поверхности, практически постоянен и мал, а их частотно-размерное распределение (ЧРР) смещено в сторону малых тел (см., например, Neukum и др., 2001). Напротив, на Луне есть неисчислимое количество склонов разной крутизны и протяженности. В подавляющем большинстве случаев они представляют собой стенки кратеров.

Хотя склоновые и метеоритные факторы деградации рельефа на Луне в большинстве случаев действуют совместно, наблюдаемый результат эрозионных процессов, связанных с метеоритной бомбардировкой и склоновыми (гравитационными) процессами, должен быть разным. Например, склоновые процессы оказываются более эффективны в местном массопереносе на Луне, связанном с обрушением стенок кратеров и оползанием реголитового слоя (Mahanti и др., 2018; Wang и др., 2020).

Как влияют эти процессы на изменение (выполаживание) наклона стенок кратеров и, соответственно, на их деградацию и переход от более

выразительных морфологических категорий (кратеры класса А) к более зрелым (кратеры класса С)? Каков возможный темп денудации на Луне за счет склоновых процессов? Менялся ли темп денудации с течением времени по мере старения кратеров? Влияет ли тип мишени, морской или материковой, на темп склоновых процессов? Под темпом денудации здесь и далее подразумевается скорость сноса материала с наклонной поверхности, которая выражается как толщина сносимого слоя в единицу времени.

Для того чтобы оценить темп склоновых процессов необходимы точные данные о рельефе поверхности и возрасте изучаемых кратеров. В одной из первых работ, посвященных деградации субкилометровых кратеров (Basilevsky, 1976), кратеры были разделены на морфологические классы, А, АВ, В, ВС, С, а характерные уклоны стенок этих кратеров были оценены по величине отношения глубина/диаметр, определенного по распределению теней. Возраст кратеров разных морфологических категорий был оценен по данным о морфологической выраженности кратеров с известным возрастом. В результате была получена оценка темпа деградации лунных субкилометровых кратеров, которая, вероятно, на три порядка величины ниже скорости деградации земных ударных кратеров.

В работе (Craddock, Howard, 2000) была предпринята попытка оценить темп склоновых процессов на Луне с помощью данных, полученных в экспедиции КА Clementine (Nozette и др., 1994). Авторы работы реконструировали рельеф кратеров с помощью методов фотоклинометрии и калибровали полученные топографические профили по кратерам известного возраста с мест посадки КА Apollo. В результате была получена оценка скорости денудации для кратеров в регионе бассейна Аполлон на днище бассейна Южный полюс — Эйткен, равная 0.2 мм/млн лет (Craddock, Howard, 2000).

В другом исследовании (Fassett, Thomson, 2014) использовалась цифровая модель рельефа, составленная по данным ТС (Terrain Camera, КА Kaguya) с пространственным разрешением 10 м/пиксель (Nagayama и др., 2012). С помощью этих данных авторы моделировали топографический профиль свежего (лучевого) кратера, используя полином третьей степени. Вид полинома был определен по топографическим замерам свежих кратеров лазерным альтиметром LOLA (Lunar Orbiter Laser Altimeter) на борту КА LRO (Lunar Reconnaissance Orbiter) (Werner, Medvedev, 2010). На основе этой модели моделировалась дальнейшая эволюция кратеров за счет диффузной деградации. Оценки возраста моделируемых кратеров не проводились. В результате была по-

лучена оценка темпа денудации 0.4 мм/млн лет, хотя авторы работы отмечают, что реальная скорость денудации может быть как значительно выше, так и значительно ниже этой оценки (Fassett, Thomson, 2014).

В нашем исследовании мы применили другой подход и в попытке ответить на сформулированные выше вопросы предприняли изучение случайной выборки кратеров диаметром более 5 км, которые характеризуют разные типы мишеней: двуслойную (материк, перекрытый морскими отложениями) и однослойную, морскую и материковую. Для того чтобы максимально возможным способом оценить вклад склоновых процессов в деградацию поверхности, мы рассматривали две контрастные ситуации, представленные стенками кратеров и зоной сплошных выбросов. Субгоризонтальные поверхности закратерных выбросов находятся под доминирующим воздействием метеоритной бомбардировки. Внутренние склоны кратеров, наряду с метеоритной бомбардировкой, дополнительно модифицируются склоновыми процессами.

Мы ограничили свой выбор объектов исследования сравнительно крупными кратерами, которые, однако, имеют простую чашеобразную форму и гладкие, не террасированные склоны. Отсутствие террас позволяет исключить из рассмотрения смещения крупных блоков и оценить изменения формы кратеров за счет перемещения реголитового слоя. Протяженные склоны кратеров, которые мы изучали, позволяют определить плотность наложенных кратеров и сравнить ее с плотностью на субгоризонтальных поверхностях в зоне сплошных выбросов. Сравнение этих плотностей позволяет оценить вклад склоновых процессов в комплексную денудацию.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Для изучения вариаций плотности наложенных кратеров на внутренних склонах и закратерных выбросов нами были выбраны 24 кратера диаметром 5–14 км (табл. 1, рис. 1).

Подавляющее большинство из них (83%) расположено на поверхности морей Изобилия (13 кратеров), Ясности (3 кратера), Кризисов (4 кратера). Четыре кратера расположены на поверхности сплошных выбросов из бассейна Моря Дождей.

В нашем исследовании мы использовали традиционный метод фотогеологического анализа, который позволяет надежно идентифицировать объекты изучения (в данном случае — более крупные ударные кратеры и малые кратеры, наложенные на их стенки и зону сплошных выбросов). Основой для проведения этого анализа послужи-

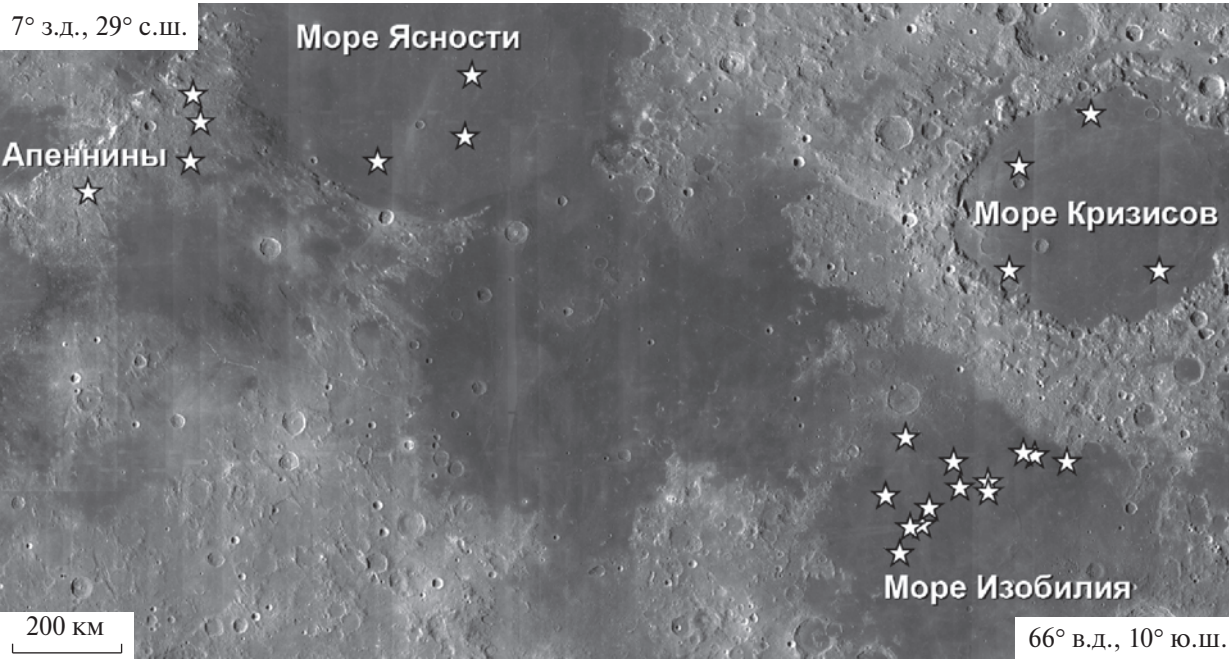


Рис. 1. Расположение и изученных кратеров (звездочки).

Таблица 1. Изученные кратеры

Кратер	Долгота, град	Широта, град	Диам., км	Регион	Мишень
Сарабхай	21.01	24.75	6.9	М. Ясности	1 сл., море
Дезейини	20.59	21.12	5.8	М. Ясности	1 сл., море
Бобилье	15.44	19.62	5.7	М. Ясности	1 сл., море
Клеомед Н	57.64	22.42	6.3	М. Кризисов	1 сл., море
Свифт	53.45	19.62	9.9	М. Кризисов	1 сл., море
Гривз	52.79	13.17	14.4	М. Кризисов	2 сл., море/материк
Фаренгейт	61.7	13.11	6.1	М. Кризисов	1 сл., море
Тарунций Б	46.67	3.27	7.1	М. Изобилия	2 сл., море/материк
Смитсон	53.65	2.36	6.1	М. Изобилия	2 сл., море/материк
Тарунций О	54.33	2.22	6.2	М. Изобилия	2 сл., море/материк
Уэбб У	56.23	1.85	5.7	М. Изобилия	2 сл., море/материк
Анвиль	49.51	1.84	10.4	М. Изобилия	2 сл., море/материк
Тарунций К	51.57	0.62	5.9	М. Изобилия	2 сл., море/материк
Тарунций Н	49.87	0.34	8.6	М. Изобилия	2 сл., море/материк
Тарунций Р	51.57	0.06	6.8	М. Изобилия	2 сл., море/материк
Секки К	45.49	−0.17	6	М. Изобилия	2 сл., море/материк
Мессье В	48.06	−0.9	6.7	М. Изобилия	2 сл., море/материк
Мессье	47.7	−1.92	11.1	М. Изобилия	2 сл., море/материк
Мессье А	46.96	−2	10.3	М. Изобилия	2 сл., море/материк
Мессье Д	46.32	−3.6	7.8	М. Изобилия	2 сл., море/материк
Арат	4.52	23.57	9.8	Апеннины	1 сл., материк
Гален	4.98	21.95	8.7	Апеннины	1 сл., материк
Конон А	4.39	19.69	6.2	Апеннины	1 сл., материк
Марко Поло Н	−1.69	17.8	5.5	Апеннины	1 сл., материк

ли мозаики утренних и вечерних изображений с КА Kaguya (Japan Aerospace Exploration Agency) с пространственным разрешением 7.4 м/пкс. Для определения топографической конфигурации исследуемых кратеров мы использовали топографическую карту, построенную по данным лазерного альтиметра LOLA (Lunar Orbiter Laser Altimeter) с пространственным разрешением 60 м/пиксель (Smith и др., 2010). Такое разрешение карты позволяет адекватно оценить топографические характеристики кратеров диаметром несколько километров.

Для оценки абсолютного модельного возраста (АМВ) кратеров мы применяли многократно проверенный метод, в основе которого лежит определение ЧРР первичных кратеров (Neukum и др., 2001; Michael, Neukum, 2010), наложенных на зону выбросов тех кратеров, возраст которых мы оценивали. Мы рассматривали в качестве зоны выбросов кольцевую область, внутренний диаметр которой совпадал с диаметром самого кратера (по валу), а внешний был равен двум диаметрам. Такой способ оценки возраста успешно применялся для кратеров как на Марсе (Lagain и др., 2020), так и на Луне (Williams и др., 2022), хотя к оценкам АМВ, сделанным на основе подсчета кратеров в зоне выбросов, надо относиться с осторожностью из-за специфических свойств этой мишени (van der Bogert и др., 2017).

В пределах этой кольцевой зоны наложенные кратеры подсчитывались в четырех сегментах к северу, востоку, югу и западу от картера (рис. 2). Оценки ЧРР на внутренних склонах кратера проводились в двух областях на его северной и южной стенках, для которых во всех случаях освещенность позволяла достоверно идентифицировать наложенные кратеры (рис. 2). Очевидные облас-

ти вторичных кратеров исключались из области определения ЧРР. Диаметр наложенных кратеров меняется в интервале от 15 до 1200 м. Суммарная площадь, на которой определялась плотность наложенных кратеров, составляла от 8 до 40 км² на стенках и от 26 до 90 км² в зоне сплошных выбросов крупных кратеров. Размеры этих площадей подсчета кратеров позволяют проводить надежные определения АМВ (van der Bogert и др., 2015).

Во всех случаях для подсчета кратеров использовалось приложение Crater Tools для среды ArcGIS (Kneissl и др., 2011). Определение АМВ осуществлялось при помощи программного обеспечения CraterStat 2 (Michael и др., 2012; Michael, 2013).

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ КРУПНЫХ КРАТЕРОВ

Мы изучали кратеры в пределах трех морских районов (Море Изобилия, Море Ясности, Море Кризисов) и в зоне сплошных выбросов из бассейна Дождей (горы Апеннины (рис. 1, табл. 1).

Море Изобилия (Mare Fecunditatis) представляет собой плоскую базальтовую равнину площадью около 310 тыс. кв. км (Zhao и др., 2022). Бассейн Моря Изобилия относится к сильно измененным многокольцевым бассейнам (McCauley, Scott, 1972; Флоренский и др., 1974), сформированным в донектарианский период (более 3.92 млрд лет назад). Бассейн частично заполнен выбросами из более молодых соседних бассейнов Нектара и Кризисов и перекрыт морскими базальтовыми покровами (McCauley, Scott, 1972). Пик излияний морских базальтов пришелся на имбрийский период, 3.2–3.85 млрд лет назад (Wilhelms, McCauley, 1971; Wilhelms и др., 1987; Hiesinger и др., 2006; Иванов и др., 2023). Мощность базальтовых покровов в Море Изобилия весьма изменчива и колеблется от первых сотен метров до нескольких километров (Rajmon, Spudis, 2004; Du и др., 2019; Ivanov и др., 2023), но в основном составляет примерно 500 м (De Hon, 1979; De Hon, Waskom, 1976). Оценки содержания FeO в реголите Моря Изобилия, полученные по данным экспедиций КА Clementine (Lucey и др., 2000) и Kaguya (Lemelin и др., 2016), показывают, однако, что внутри изученных нами кратеров практически всегда присутствует материал с низким содержанием железа. Это свидетельствует о наличии неморского реголита на глубинах экскавации и, следовательно, изученные кратеры формировались в двуслойной мишени, состоящей из более глубокого слоя материкового реголита и перекрывающего его морского материала.

Море Ясности (Mare Serenitatis) расположено в одноименном многокольцевом бассейне диаметром около 750 км (Frey, 2011) и глубиной 2 км

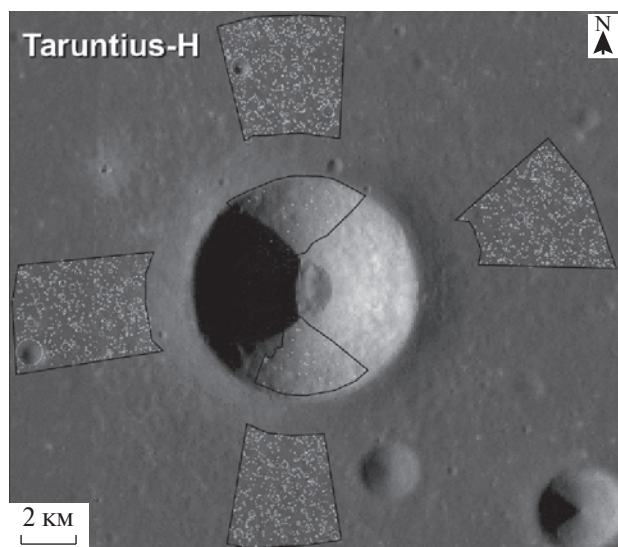


Рис. 2. Области подсчета наложенных кратеров.

(Родионова и др., 2021; Rodionova и др., 2021). Ударный бассейн сформировался либо в донектарианский (Wilhelms и др., 1987), либо в нектарианский период (Fassett и др., 2012). Возраст его морского заполнения варьируется в широком диапазоне от 3.8 до 2.4 млрд лет, но основная фаза вулканизма произошла в относительно узком интервале 3.5–3.4 млрд лет назад (Hiesinger и др., 2000; 2011a). Мощность базальтовых покровов оценивается величиной 2.5–3 км (Hackwill, 2010; Arkani-Named, 1998; Bratt и др., 1982). Предположительно, базальты подстилаются ударным расплавом. Для изученных нами кратеров Моря Ясности спектральные данные, полученные КА Clementine (Lucey и др., 2000), показывают отсутствие неморского материала. Это дает основание считать, что эти кратеры были образованы в однослойной мишени, состоящей из базальтов морского заполнения.

Море Кризисов (Mare Krisium) расположено внутри крупного многокольцевого бассейна нектарианского возраста диаметром 1000 км (Wilhelms и др., 1987; Frey, 2011; Fassett и др., 2012). Возраст морского заполнения варьируется от 3.6 до 2.7 млрд лет (Hiesinger и др., 2011b). Как и в Море Ясности, все изученные нами кратеры, кроме одного, формировались в однослойной мишени морского заполнения. Кратер Гривз (13.17° с. ш., 52.79° в. д., 29.9 км диаметром) расположен на юго-западной окраине Моря Кризисов и показывает наличие большого количества низкожелезистого неморского материала. Очевидно, что этот кратер был образован в двуслойной мишени, состоящей из базальтовых покровов морского заполнения, которые перекрывают материковый реголит.

Горы Апеннины – самая крупная горная цепь, расположенная на видимой стороне Луны. Горы являются остатками внешнего кольца ударного бассейна Моря Дождей диаметром 1160 км. Относительная высота гор составляет 3–6 км, про-

тяженность около 600 км. На востоке горы граничат с многокольцевым бассейном Моря Ясности. Ударный бассейн сформировался в имбрийский период, его абсолютный модельный возраст оценивается величиной 3.85–3.92 млрд лет (Hiesinger, Head, 2006; Alexander, Kahl, 1974). Кратеры, изученные нами, расположены в пределах геологической формации Апеннинских гор (Wilhelms, McCauley, 1971), которая представляет собой сплошные выбросы бассейна Дождей. Мощность выбросов оценивается в 1–2 км (Carr и др., 1971; Spudis, Head, 1977). Кратеры, изученные нами в этом регионе, формировались в однослойной мишени, состоящей из материкового реголита.

Таким образом, в наше исследование были включены кратеры трех категорий: (1) кратеры в двуслойной мишени (Море Изобилия и кратер Гривз в Море Кризисов), (2) кратеры в однослойной морской мишени (Моря Ясности и Кризисов) и (3) кратеры в однослойной материковой мишени (Апеннинские горы).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Абсолютный модельный возраст
крупных кратеров

Проведенные нами измерения частотно-размерного распределения кратеров, наложенных на вал первичных кратеров, и его аппроксимация калибровочной функцией (Neukum и др., 2001) с помощью программы CraterStat (Michael, Neukum, 2010) позволили оценить абсолютный модельный возраст (АМВ) изучаемых кратеров (рис. 2, табл. 2).

Изученные нами кратеры имеют большой интервал возрастов от раннеимбрийского (кратеры Гален и Марко Поло Н) до коперниковского периода (кратер Мессье, рис. 3). Несмотря на большой разброс полученных значений АМВ, все изученные нами кратеры имеют схожую мор-

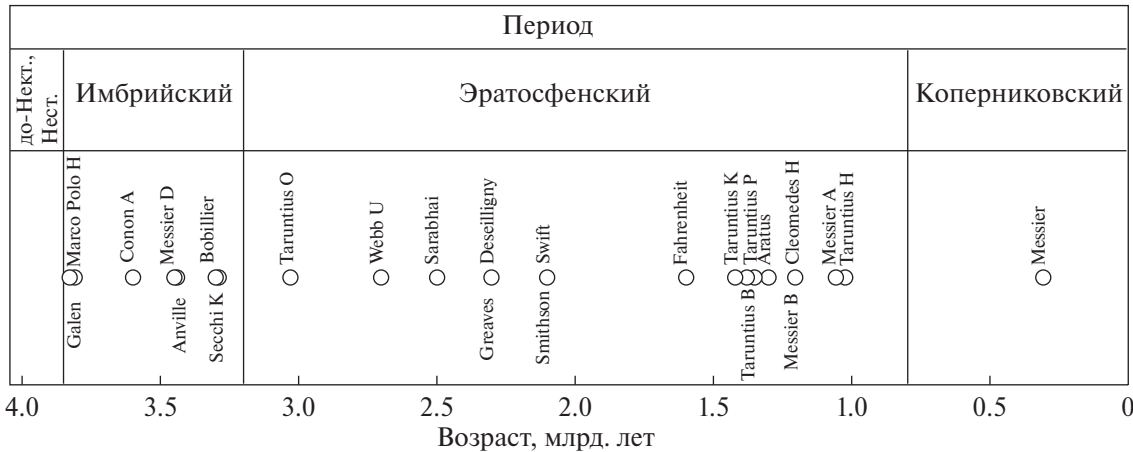


Рис. 3. Абсолютный модельный возраст изученных кратеров.

фологию и имеют близкие значения отношения глубина/диаметр (d/D), которые не зависят ни от возраста кратеров, ни от типа мишени (рис. 4). Средняя величина отношения $d/D = 0.167 \pm 0.018$. Это достаточно близко к отношению $d/D \approx 0.2$ для свежих кратеров диаметром от 1 до 15 км, полученному в работе (Pike, 1977), основанной на изучении морфологии импактных кратеров по данным фотоклинометрии.

Оценка темпа изменения крутизны внутренних склонов первичных кратеров

Полученные нами оценки АМВ и среднего наклона внутренних стенок кратеров позволяют оценить темп изменения крутизны стенок как функции возраста. Прежде всего следует отметить, что крутизна стенок всех изученных нами кратеров никогда не становится менее 24° (табл. 2).

В диапазоне значений уклонов от 24° до 33° крутизна стенок существенно зависит от возраста кратера (рис. 5). Разброс точек на диаграмме крутизна – возраст наилучшим образом аппроксимируется линейной функцией вида:

$$S = -1.86 \times A + 32.48, \quad (1)$$

где S – угол наклона внутренней стенки (град), A – абсолютный модельный возраст кратера (млрд лет); коэффициент корреляции между этими параметрами (r) примерно равен -0.75 (рис. 5), что является значимой величиной. Полученная нами зависимость (1) позволяет оценить темп выполаживания стенок кратеров с течением времени, он равен 1.85 град/млрд лет. Тип мишени не оказывает существенного влияния на изменения крутизны внутренних склонов кратера (рис. 5).

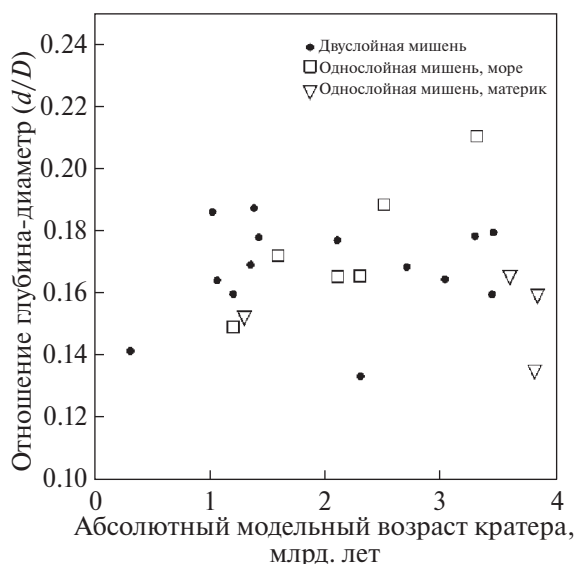


Рис. 4. Вариации отношения глубина/диаметр в зависимости от возраста кратера.

Таблица 2. Основные характеристики изученных кратеров

Кратер	Возраст, млрд лет	Погрешность определения АМВ (+/-), млрд лет	Крутизна стенки, град	D_r/D_w	Темп денудации, мм/млн лет
Сарабхай	2.5	0.5/0.5	27.6	7.34	1.45
Дезейини	2.3	0.4/0.3	24.8	4.76	2.27
Бобилье	3.3	0.8/0.2	26.1	4.14	1.64
Клеомед Н	1.2	0.2/0.2	30	7.03	4.41
Свифт	2.1	0.4/0.4	28.3	7.11	2.76
Гривз	2.3	0.2/0.2	29.6	6.68	2.82
Фаренгейт	1.6	0.1/0.1	29.4	6.94	2.79
Тарунций Б	1.38	0.24/0.24	28.6	6.99	2.70
Смитсон	2.1	0.25/0.25	25.5	4.01	1.88
Тарунций О	3.03	0.22/0.14	27.3	2.85	1.36
Уэбб У	2.7	0.49/0.38	25.6	2.97	1.36
Анвиль	3.44	0.22/0.09	29.5	5.76	1.16
Тарунций К	1.42	0.36/0.36	33	5.05	2.45
Тарунций Н	1.02	0.14/0.14	31.7	8.36	4.39
Тарунций Р	1.35	0.28/0.28	31.3	8.17	2.74
Секки К	3.29	0.67/0.16	27.6	2.95	1.21
Мессье В	1.2	0.34/0.34	27.7	8.61	3.31
Мессье	0.31	0.022/0.022	32.7	15.64	17.25
Мессье А	1.06	0.17/0.17	31	11.25	3.45
Мессье Д	3.45	0.09/0.06	27.5	3.65	1.36
Арат	1.3	0.4/0.4	30.6	5.30	2.95
Гален	3.81	0.05/0.04	24.4	1.63	0.83
Конон А	3.6	0.2/0.07	25.1	3.25	1.19
Марко Поло Н	3.83	0.09/0.08	25.1	4.99	1.20

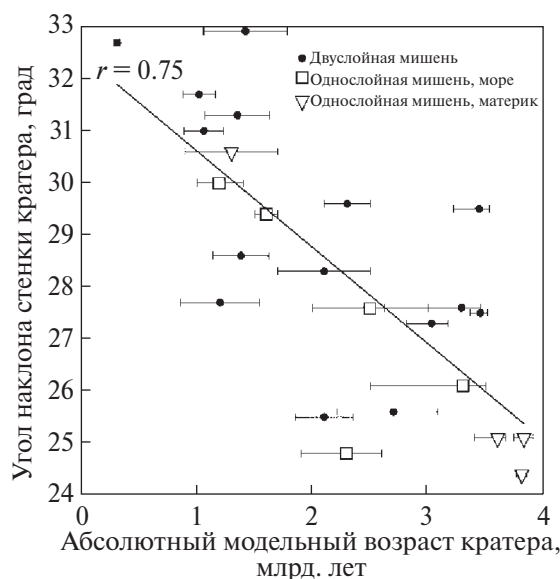


Рис. 5. Вариации крутизны стенок кратера в зависимости от возраста.

*Плотность наложенных кратеров
на склонах крупных кратеров*

Для всех изученных нами кратеров были определены плотности наложенных кратеров на внутренних склонах (D_w) ($1/\text{км}^2$). Наложённые кратеры подсчитывались во всем доступном интервале диаметров, лимитированном пространственным разрешением используемых снимков. Кратерная полость и выбросы формировались одновременно, однако деградация наложенных кратеров в этих областях происходит с разной скоростью за счет склоновых процессов. Крутизна склонов изученных кратеров меняется в диапазоне от 24.4° (кратер Гален) до 33.0° (кратер Тарунций К) (табл. 2). Мы определяли эту величину путем аппроксимации склона линейной функцией в области выше делювиального шлейфа у дна и ниже выполаживающейся поверхности у вала кратера. В этой же области производился подсчет наложенных кратеров. Между величиной угла наклона стенки и плотностью кратеров на ней существует отчетливая связь (рис. 6), которая выражается степенной функцией вида:

$$D_w = 1.36 \times 10^9 \times S^{-5.74}, \quad (2)$$

где S — угол наклона стенки, градусы; коэффициент детерминации, $R^2 = 0.52$.

По мере увеличения крутизны стенки, плотность наложенных на нее кратеров снижается, но в наблюдаемом диапазоне от 24° до примерно 28° разброс значений D_w очень велик (рис. 6). Для более крутых уклонов разброс величин резко снижается (рис. 6). Очевидно, это связано с тем, что плотность наложенных кратеров в основном регулируется склоновыми процессами для поверхностей, наклоненных более чем на 28° , что

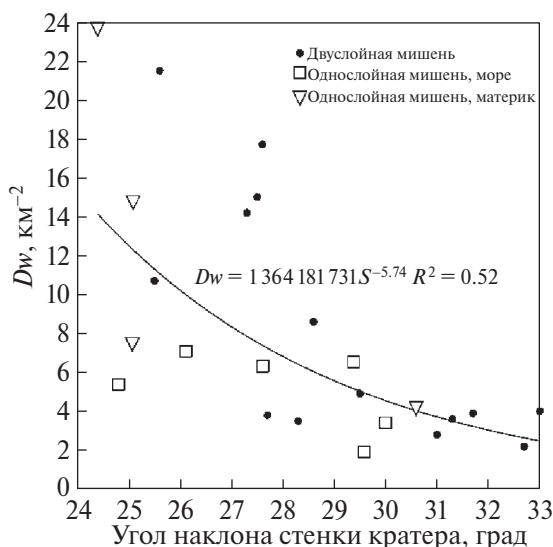


Рис. 6. Изменения плотности кратеров, наложенных на стенки, в зависимости от угла наклона стенок.

близко к углу естественного откоса. Для более пологих поверхностей скорость стирания наложенных кратеров в меньшей степени контролируется склоновыми процессами и их плотность зависит от местных условий накопления кратеров, которые в основном определяются особенностями мишени: строением и гранулометрическим составом реголита, мощностью слагающих слоев, наличием или отсутствием перерыва накоплений вулканических материалов на морских территориях.

*Изменения плотности наложенных кратеров
в зоне выбросов и на стенках первичных
кратеров*

Определения частотно-размерного распределения наложенных кратеров позволяет оценить вариации отношения D_r/D_w , где D_r — плотность наложенных кратеров в зоне сплошных выбросов ($1/\text{км}^2$). Величина этого отношения показывает эффективность стирания малых наложенных кратеров на наклонных поверхностях стенок по сравнению с субгоризонтальными поверхностями зоны выбросов. Значения отношения D_r/D_w приведены в табл. 2; они меняются от 1.63 (кратер Гален) до 15.64 (кратер Мессье). Величина отношения явно зависит от возраста первичного кратера и связана с ним степенной зависимостью вида:

$$D_r/D_w = 8.46 \times A^{-0.68}, \quad (3)$$

где A — возраст первичного кратера; коэффициент детерминации $R^2 = 0.64$. Тип мишени не оказывает влияния на величину отношения (рис. 7).

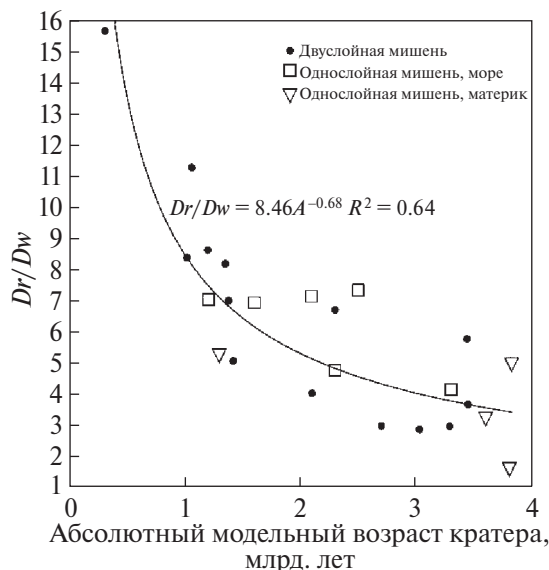


Рис. 7. Вариации отношения плотностей кратеров, наложенных на зону сплошных выбросов и на стенки крупных кратеров в зависимости от возраста.

ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка темпа склоновых процессов на Луне

Сравнение плотностей наложенных кратеров в зоне выбросов и на стенках крупных кратеров позволяет оценить темп склоновых процессов на Луне.

Очевидно, что вариации величин D_r/D_w отражают совокупное действие метеоритной бомбардировки и склоновых процессов. Из-за случайности процесса кратерообразования увеличение количества наложенных кратеров в зоне выбросов и на стенках должно быть одинаковыми, следовательно, возраст кратера не контролировал бы величину отношения D_r/D_w , если бы не действие склоновых процессов, в результате которых популяция кратеров на стенках постоянно стирается.

Для оценки темпа склоновых процессов мы определяли текущий возраст экспозиции стенок по наблюдаемому частотно-размерному распределению наложенных на них кратеров (D_w) и определяли разницу между этим возрастом и возрастом кратера, оцененного по плотности наложенных кратеров в зоне сплошных выбросов (D_r). Полученная разница возрастов определяет промежуток времени, в течение которого склоновые процессы действовали в том или ином кратере. Затем мы оценивали толщину слоя, удаленного со стенок кратера за время его существования. Для этого мы использовали медианный диаметр наложенных кратеров на стенках, который определялся как медианное значение диаметра совокупности наложенных кратеров для каждого “крупного” кратера-хозяина. Мы умножали его на 0.1, что, вероятно, представляет собой оценку глубины экскавации при формировании кратера (Melosh, 1989).

Таким образом, темп склоновых процессов определялся по формуле:

$$E = (0.1 \times D_m) / (A_r - A_w), \quad (4)$$

где D_m — медианный диаметр наложенных кратеров, A_r и A_w — абсолютный модельный возраст в зоне сплошных выбросов и на стенках соответственно.

Оценка темпа склоновых процессов, полученная в нашем исследовании, меняется в широких пределах (табл. 2) от 0.8 мм/млн лет (кратер Гален) до почти 17 мм/млн лет (кратер Мессье) и сильно зависит от возраста кратера (рис. 8). Эта зависимость определяется степенной функцией вида:

$$E = 4.39 \times A^{-1.03}, \quad (5)$$

коэффициент детерминации $R^2 = 0.92$.

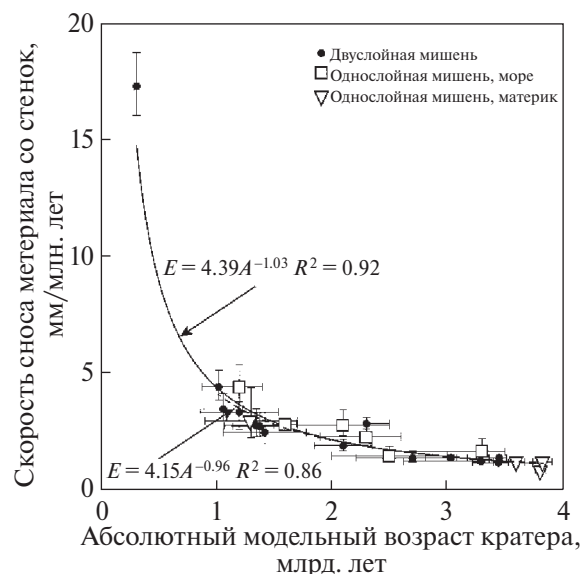


Рис. 8. Изменение темпа склоновых процессов в зависимости от возраста крупного кратера. Показаны две аппроксимирующие кривые: сплошная для всей выборки, пунктирная — для выборки без кратера Мессье.

Вид этой зависимости практически не меняется, если из рассмотрения вывести кратер Мессье с наивысшей оценкой темпа склоновых процессов (рис. 8). Тип мишени не оказывает существенного влияния на темп склоновых процессов.

Несмотря на то, что показатель степени у значения возраста близок к единице, зависимость темпа склоновых процессов от возраста значительно хуже описывается линейной функцией: коэффициент корреляции между величинами E и A , $r = -0.65$.

Очевидно, что темп склоновых процессов на Луне не может быть охарактеризован каким-нибудь одним значением. Он очень высок (по лунным стандартам) для молодых кратеров (кратер Мессье), что, вероятно, связано с быстрым сносом материала со стенок новообразованных кратеров. По мере старения темп склоновых процессов убывает и в нашем случае асимптотически приближается к величине примерно 0.8 мм/млн лет, начиная с возраста 2.5 млрд лет (рис. 8). Полученная нами оценка темпа денудации в два раза выше той, что приведена в работе (Fassett, Thompson, 2014) и в четыре раза больше оценки, полученной в работе (Craddock, Howard, 2000). Такие расхождения, возможно, связаны с неточностями в определении толщины слоя, удаленного со стенок, и в определениях возраста кратеров по измерениям частотно-размерного распределения наложенных кратеров в зоне сплошных выбросов (van der Bogert и др., 2017). Эти неопределенности, однако, носят систематический характер и не должны влиять на сте-

пенной вид зависимости темпа склоновых процессов от возраста.

Изменения морфологии километровых лунных кратеров с течением времени

Полученные нами оценки АМВ и среднего наклона внутренних стенок кратеров позволяют оценить темп изменения крутизны стенок как функции возраста. Прежде всего следует отметить, что крутизна стенок всех изученных нами кратеров никогда не становится менее 24° (табл. 2). В интервале значений уклонов от 24° до 33° крутизна стенок существенно зависит от возраста кратера (рис. 5).

По мере увеличения возраста кратера его стенки становятся более пологими, хотя и в незначительной степени (рис. 5), что должно приводить к снижению темпа деградации кратеров из-за уменьшения градиента уклона. Таким образом, следует ожидать снижения величины D_r/D_w по мере увеличения возраста первичного кратера, что и наблюдается в действительности (рис. 7). Согласно уравнению (1), угол наклона стенки снижается примерно в 1.07 раза ($\sim 6\%$) за миллиард лет. В первый миллиард лет жизни кратера угол наклона снижается примерно на 1.9° , во второй миллиард — на 1.8° , в третий — на 1.7° .

Уменьшение значения величины D_r/D_w с возрастом заметно более выражено, чем изменения наклона стенки: величина отношения снижается примерно в 1.5 раза ($\sim 32\%$) за каждый миллиард лет жизни кратера.

Крайне низкий темп уменьшения углов наклона стенок кратеров говорит о низкой эффективности склоновых процессов и, соответственно, о высокой морфологической стабильности кратеров диаметром первые километры. Все изученные нами кратеры в диапазоне возрастов от 3.83 млрд лет (Марко Поло Н) до 0.31 млрд лет (Мессье) характеризуются примерно одинаковой величиной отношения $d/D = 0.17 \pm 0.02$ (рис. 4), что говорит о неспособности склоновых процессов на стенках кратеров существенно уменьшить его глубину. Следовательно, чтобы заметно уменьшить отношение d/D , т. е. чтобы существенно уменьшить глубину кратера, необходимо заполнить его материалом извне. В условиях Луны такими могут быть либо вулканические отложения, либо выбросы из крупных кратеров, либо то и другое.

Эмпирические и числовые модели формирования выбросов из кратеров (McGetchin и др., 1973; Pike, 1974; Housen и др., 1983; Fassett и др., 2011; Sharpton, 2014) предсказывают быстрое уменьшение толщины выбросов по мере удаления от вала кратера. Слой выбросов толщиной примерно 1.3 км (средняя глубина изученных

нами кратеров) за валом кратеров может образоваться только для кратеров диаметром 80 км и более, согласно модели Pike (1974). Эта модель, однако, сильно переоценивает мощность выбросов, так как не учитывает структурного поднятия вала. В данной модели вал и более дальний покров сплошных выбросов представляют собой чисто аккумулятивное образование. Для более реалистичных моделей, например, Housen и др. (1983), выбросы толщиной более 1.3 км возможны только за валом бассейнов диаметром более 300 км.

Таким образом, существенное заполнение кратеров диаметром 5–15 км выбросами возможно только для древних кратеров, формировавшихся в период интенсивной метеоритной бомбардировки одновременно с формированием бассейнов. После ее окончания главным фактором изменения общей топографической конфигурации кратеров, в частности, уменьшения отношения d/D километровых кратеров, становится вулканизм. Действительно, в пределах морских территорий видно множество полузатопленных и полностью затопленных кратеров.

Важным следствием морфологической стабильности километровых кратеров является надежность оценок абсолютного модельного возраста, сделанных по измерениям их частотно-размерного распределения. Для того чтобы изменить его параметры, нужно весьма мощное событие (или события) обновления поверхности, связанное с формированием обширной вулканической провинции.

К оценкам возраста морских поверхностей, сделанных путем измерения малых кратеров (< 1 км), следует относиться с осторожностью, так как такие кратеры могут быть значительно более чувствительными к внешнему воздействию не только вулканического, но и ударного характера. В частности, малые кратеры гораздо легче могут быть заполнены материалом выбросов из соседних кратеров. Например, в одном из районов Моря Изобилия, где поверхность в наименьшей степени загрязнена поздними выбросами, среднее расстояние до ближайшего кратера равно примерно 840 м, а средний диаметр кратеров равен примерно 340 м. Согласно модели отложения выбросов из километровых кратеров, разработанной Sharpton (2014) путем тщательного топографического анализа таких кратеров, толщина выбросов на середине расстояния между такими кратерами равна примерно четырем метрам. Это составляет примерно 12% их исходной глубины, если принять глубину экскавации равной $1/10$ диаметра кратера (Melosh, 1989).

Для надежного определения возраста становления вулканической провинции или ее частей требуются измерения частотно-размерного рас-

пределения кратеров в пределах больших площадей в сотни-тысячи квадратных километров (Hiesinger и др., 2000; 2003; 2006; 2011a; van der Bogert и др., 2015), на которых будет достаточное количество кратеров километровых размеров, определяющих возраст формирования поверхности. Если малые кратеры, подсчитанные в той же области, лежат на одной изохроне с большими, они существенно усиливают надежность оценки абсолютного модельного возраста. Если же частотно-размерное распределение малых кратеров определяет более молодую изохрону, то такие кратеры отражают возраст какого-нибудь обновляющего поверхность события, не обязательно вулканического.

ВЫВОДЫ

Результаты, полученные в нашем исследовании, позволяют сделать следующие выводы.

1. Темп склоновых процессов на Луне имеет выраженный нелинейный характер и хорошо описывается степенной функцией вида $E = 4.39 \times A^{-1.03}$; коэффициент детерминации $R^2 = 0.92$, где E — темп склоновых процессов (мм/млн лет), A — возраст (млрд лет).

2. Темп склоновых процессов вскоре после формирования крупного кратера весьма высок по лунным стандартам и может составлять первые десятки миллиметров за миллион лет. В нашем исследовании наибольшая величина темпа склоновых процессов составила примерно 17 мм/млн лет.

3. После примерно 2.5 млрд лет существования кратера темп склоновых процессов асимптотически приближается к величине примерно 1 мм/млн лет. В нашем исследовании была получена оценка темпа склоновых процессов для наиболее древних кратеров, которая составляет 0.8 мм/млн лет.

4. Крупные лунные кратеры в интервале диаметров 5–15 км представляют собой морфологически стабильные образования; наклон их стенок менялся очень медленно, примерно 1.85 град/млрд лет, а отношение глубина/диаметр меняется незакономерно и становится меньше с течением времени.

5. Склоновые процессы не в состоянии заметно заполнить многокилометровый кратер рыхлым материалом и изменить его глубину.

6. После окончания эпохи формирования ударных бассейнов главным фактором изменения топографической конфигурации многокилометровых кратеров являлся вулканизм.

7. Тип мишени (двуслойная типа материк/море или однослойная, морская или материковая) не оказывает существенного влияния ни на темп

склоновых процессов, ни на изменение конфигурации многокилометровых кратеров.

8. Многокилометровые кратеры представляют собой структуры, позволяющие надежно определять возраст подстилающей поверхности по их частотно-размерному распределению, которое не подвержено существенным изменениям за счет локальных событий обновления поверхности.

Работа была выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 21–17–00035: Оценка темпов экзогенного обновления поверхности Луны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Родионова Ж.Ф., Жаркова А.Ю., Гришакина Е.А., Шевченко В.В. Топографические особенности лунных морей и бассейнов // Астрон. вестн. 2021. Т. 55. № 3. С. 195–212. (Rodionova Z.F., Zharkova A.Y., Grishakina E.A., Shevchenko V.V. Topographic features of the lunar maria and basins // Sol. Syst. Res. 2021. T. 55. P. 183–199.)
- Флоренский К.П., Базилевский А.Т., Пронин А.А. Геолого-морфологическая характеристика района посадки автоматической лунной станции “Луна-16” // Лунный грунт из Моря Изобилия. М: Наука, 1974. С. 19–22.
- Alexander E.C., Kahl S.B. 40Ar-39Ar studies of lunar breccias // Proc. Lunar Sci. Conf. 5th. 1974. P. 1353–1373.
- Arkani-Hamed J. The lunar mascons revisited // Journal of Geophysical Research: Planets. 1998. V. 103. № E2. P. 3709–3739.
- Basilevsky A.T. On the evolution rate of small lunar craters // Proc. Lunar Sci. Conf. 7th. 1976. V. 1. P. 1005–1020.
- Bratt S.R., Solomon S.C., Head J.W., Thurber C.H. The deep structure of lunar basins: Implications for excavated cavity volumes // Proc. Lunar and Planet. Sci. Conf. 13th. 1982. V. 13. P. 67–68.
- Carr M.H., Howard K.A., El-Baz F. Geologic maps of the Apennine-Hadley Region of the Moon Apollo 15 pre-mission maps // U.S. Geol. Survey Map I-723. Washington, D.C., USA, 1971. 2 P.
- Craddock R.A., Howard A.D. Simulated degradation of lunar impact craters and a new method for age dating farside mare deposits // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. № E8. P. 20387–20401.
- De Hon R.A. Thickness of the western mare basalts // Proc. Lunar and Planet. Sci. Conf. 10th. 1979. V. 3. P. 2935–2955.
- De Hon R.A., Waskom J.D. Geologic structure of the eastern mare basins // Proc. Lunar Sci. Conf. 7th. 1976. V. 7. P. 2729–2746.
- Du J., Fa W., Wiczorek M.A., Xie M., Cai Y., Zhu M.-H. Thickness of lunar mare basalts: New results based on modeling the degradation of partially buried craters // J. Geophys. Res. 2019. V. 124. № 9. P. 2430–2459.

- Fassett C.I., Thomson B.J. Crater degradation on the lunar maria: Topographic diffusion and the rate of erosion on the Moon // *J. Geophys. Res.* 2014. V. 119. P. 2255–2271.
- Fassett C.I., Head J.W., Smith D.E., Zuber M.T., Neumann G.A. Thickness of proximal ejecta from the Orientale basin from Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA) data: Implications for multi-ring basin formation // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38. № 17. L17201. P. 1–5.
- Fassett C.I., Head J.W., Kadish S.J., Mazarico E., Neumann G.A., Smith D.E., Zuber M.T. Lunar impact basins: Stratigraphy, sequence and ages from superposed impact crater populations measured from Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA) data // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. № E00H06. P. 1–13.
- Frey H. Previously unknown large impact basins on the Moon: Implications for lunar stratigraphy // *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.* 2011. V. 477. P. 53–75.
- Hackwill T. Stratigraphy, evolution, and volume of basalts in Mare Serenitatis // *Meteoritics & Planetary Science.* 2010. V. 45. № 2. P. 210–219.
- Haruyama J., Hara S., Hioki K., Iwasaki A., Morota T., Ohtake M., Matsunaga T., Araki H., Matsumoto K., Ishihara Y., Noda H., Sasaki S. Lunar global digital terrain model dataset produced from Selene (Kaguya) Terrain Camera stereo observations // *Proc. Lunar and Planet. Sci. Conf.* 43rd. 2012. Abstract #1200.
- Hiesinger H., Jaumann R., Neukum G., Head J.W. Ages of mare basalts on the lunar nearside // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. № E12. P. 29239–29275.
- Hiesinger H., Head J.W. New views of lunar geoscience: An introduction and overview // *Rev. mineral. and geochem.* 2006. V. 60. № 1. P. 1–81.
- Hiesinger H., Head J.W., Wolf U., Jaumann R., Neukum G. Ages and stratigraphy of mare basalts in Oceanus Procellarum, Mare Nubium, Mare Cognitum, and Mare Insularum // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. № E7. 1. P. 1–27.
- Hiesinger H., Head J.W., Wolf U., Jaumann R., Neukum G. New ages for basalts in Mare Fecunditatis based on crater size-frequency measurements // *Proc. Lunar and Planet. Sci. Conf.* 37th. 2006. Abstract # 1151.
- Hiesinger H., Head J.W., Wolf U., Jaumann R., Neukum G. Ages and stratigraphy of lunar mare basalts: A synthesis // *Recent advances and current research issues in lunar stratigraphy.* 2011a. V. 477. P. 1–52.
- Hiesinger H., van der Bogert C.H., Reiss D., Robinson M.S. Absolute model ages of basalts in Mare Crisium // *EPSC-DPS joint meeting.* 2011b. V. 1. P. 1095.
- Housen K.R., Schmidt R.M., Holsapple K.A. Crater ejecta scaling laws' fundamental forms based on dimensional analysis // *J. Geophys. Res.* 1983. V. 88. № B3. P. 2485–2499.
- Ivanov M.A., Head J.W., Hiesinger H. New insights into the regional and local geological context of the Luna 16 landing site // *Icarus.* 2023. V. 400. id. 115579.
- Kneissl T., van Gasselt S., Neukum G. Map-projection-independent crater size-frequency determination in GIS environments – New software tool for ArcGIS // *Planet. and Space Sci.* 2011. V. 59. P. 1243–1254.
- Lagain A., Bouley S., Baratoux D., Costard F., Wieczorek M. Impact cratering rate consistency test from ages of layered ejecta on Mars // *Planet. and Space Sci.* 2020. V. 180. id. 104755.
- Lemelin M., Lucey P.G., Gaddis L.R., Hare T., Ohtake M. Global map products from the Kaguya multiband imager at 512 ppd: Minerals, FeO, and OMAT // *LPSC47.* 2016. Abstract # 2994.
- Lucey P.G., Blewett D.T., Jolliff B.L. Lunar iron and titanium abundance algorithms based on final processing of Clementine ultraviolet-visible images // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. № E8. P. 20297–20305.
- Mahanti P., Robinson M.S., Thompson T.J., Henriksen M.R. Small lunar craters at the Apollo 16 and 17 landing sites-morphology and degradation // *Icarus.* 2018. V. 299. P. 475–501.
- McCauley J.F., Scott D.H. The geologic setting of the Luna-16 landing site // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1972. V. 13. P. 225–232.
- McGetchin T.R., Settle M., Head J.W. Radial thickness variation in impact crater ejecta: Implications for lunar basin deposits // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1973. V. 20. P. 226–236.
- Melosh H.J. *Impact Cratering: A Geologic Process.* New York: Oxford Univ. Press, 1989. 253 p.
- Michael G.G. Planetary surface dating from crater size-frequency distribution measurements: Multiple resurfacing episodes and differential isochron fitting // *Icarus.* 2013. V. 226. № 1. P. 885–890.
- Michael G.G., Neukum G. Planetary surface dating from crater size-frequency distribution measurements: Partial resurfacing events and statistical age uncertainty // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2010. V. 294. P. 223–229.
- Michael G.G., Platz T., Kneissl T., Schmedemann N. Planetary surface dating from crater size–frequency distribution measurements: Spatial randomness and clustering // *Icarus.* 2012. V. 218. № 1. P. 169–177.
- Neukum G., Ivanov B.A., Hartmann W.K. Cratering records in the inner Solar system in relation to the lunar reference system // *Chronology and Evolution of Mars.* 2001. V. 96. P. 55–86.
- Nozette S., Rustan P., Pleasance L.P., Kordas J.F., Lewis I.T., Park H.S., Priest R.E., Horan D.M., Regeon P., Lichtenberg C.L., and 24 co-authors. The Clementine mission to the Moon: Scientific overview // *Science.* 1994. V. 266. № 5192. P. 1835–1839.
- Pike R.J. Ejecta from large craters on the Moon: Comments on the geometric model of McGetchin et al. // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1974. V. 23. P. 265–274.
- Pike R.J. Size-dependence in the shape of fresh impact craters on the Moon // *Impact and explosion cratering: Planetary and terrestrial implications.* 1977. P. 489–509.

- Rajmon D., Spudis P.* Distribution and stratigraphy of basaltic units in Maria Tranquillitatis and Fecunditatis: A Clementine perspective // *Meteorit. and Planet. Sci.* 2004. V. 39. P. 1699–1720.
- Sharpton V.L.* Outcrops on lunar crater rims: Implications for rim construction mechanisms, ejecta volumes and excavation depths // *J. Geophys. Res.* 2014. V. 119. P. 154–168.
- Smith D.E., Zuber M.T., Jackson G.B., Cavanaugh J.F., Neumann G.A., Riris H., Sun X., Zellar R.S., Coltharp C., Connelly J., and 20 co-authors.* The Lunar Orbiter Laser Altimeter investigation on the Lunar Reconnaissance Orbiter Mission // *Space Sci. Rev.* 2010. V. 150. P. 209–241.
- Spudis P., Head J.W.* Geology of the Imbrium basin Apennine mountains and relation to the Apollo 15 landing site // *Proc. Lunar Sci. Conf.* 8th. 1977. V. 8. P. 2785–2797.
- van der Bogert C.H., Michael G., Kneissl T., Hiesinger H., Pasckert J.-H.* Effects of count area size on absolute model ages derived from random crater size-frequency distributions // *Proc. Lunar and Planet. Sci. Conf.* 46th. 2015. Abstract #1742.
- van der Bogert C.H., Hiesinger H., Spudis P.* The age of the Crisium impact basin // *New Views of the Moon 2 – Europe 2017 (LPI Contrib. № 1988)*. 2017. Abstarct. # 6009.
- Wang J., Kreslavsky M.A., Liu J., Head J.W., Zhang K., Kolenkina M., Zhang L.* Quantitative characterization of impact crater materials on the Moon: Changes in topographic roughness and thermophysical properties with age // *J. Geophys. Res.* 2020. V. 125. № 10. id. e2019JE006091.
- Werner S.C., Medvedev S.* The Lunar rayed-crater population characteristics of the spatial distribution and ray retention // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2010. V. 295. P. 147–158.
- Wilhelms D.E., McCauley J.F., Trask N.J.* The geologic history of the Moon // *US Geol. Surv. Spec. Pap.* Reston: USGS, 1987. № 1348. 302 p.
- Wilhelms D.E., McCauley J.F.* Geologic map of the near side of the Moon // *USGS Map I-703*. 1971.
- Williams J.-P., Pathare A.V., Costello E.S., Gallinger C.L., Hayne P.O., Ghent R.R., Paige D.A., Siegler M.A., Russell P.S., Elder C.M.* The effects of terrain properties upon the small crater population distribution at Giordano Bruno: Implications for lunar chronology // *J. Geophys. Res.* 2022. V. 127. id. e2021JE007131.
- Zhao S., Qian Y., Xiao L., Zhao J., He Q., Huang J., Wang J., Chen H., Xu W.* Lunar mare Fecunditatis: A science-rich region and a concept mission for long-distance exploration // *Remote Sensing.* 2022. V. 14. № 5. id. 1062.

УДК 52–14 + 54.051

ПОВЕДЕНИЕ СЕРЫ НА ПРИМЕРЕ ЖЕЛЕЗНЫХ ШАРИКОВ ИЗ РЕГОЛИТА ПРОБ АС ЛУНА-24 (МОРЕ КРИЗИСОВ)

© 2024 г. А. В. Мохов*, А. П. Рыбчук, Т. А. Горностаева, П. М. Карташов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геохимии
и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН (ГЕОХИ РАН), Москва, Россия

* E-mail: avm8okhov@gmail.com

Поступила в редакцию 19.07.2023 г.

После доработки 07.08.2023 г.

Принята к публикации 17.09.2023 г.

Исследования лунного реголита, доставленного на Землю советской автоматической станцией (АС) Луна-24, с использованием высоколокальных методов электронной микроскопии позволило получить данные, подтверждающие миграцию серы при остывании металлических расплавов в процессе ликвации. В результате образуются локальные концентраты Fe-S, а часть серы вытесняется вовне, образуя серные оболочки на поверхности капель расплава. Их формирование на поверхности связано с механизмом испарения-конденсации в течение процесса остывания железных шариков. Получившиеся покрытия из серы могут сохраняться в случае консервации их в стекле или под тонкими пленками силикатного конденсата.

Ключевые слова: электронная микроскопия, автоматическая станция Луна-24, Море Кризисов, СЭМ, ЭДС, реголит, лунный грунт, самородное железо, сера, стекло, ликвация, конденсация

DOI: 10.31857/S0320930X24010059, EDN: OHOXNB

ВВЕДЕНИЕ

Сернистые соединения являются широко распространенными веществами на поверхности Луны. Уже первые астронавты, выходявшие на поверхность нашего спутника, отмечали своеобразный запах “пороховой гари” от частиц лунного реголита, прилипавших к лунным скафандрам (Черкасов, Шварев, 1975). Сера на Луне представлена в основном в виде сульфидных минералов, содержащихся практически во всех типах пород. Уже первые исследования доставленного на Землю лунного грунта выявили целый ряд сульфидов, в том числе троилит, пентландит, макинавит, кубанит, халькопирит, борнит. Обобщенные факты их обнаружения были освещены в монографии (FrondeL, 1975).

Во время масштабного натурного эксперимента Lunar Crater Observation and Sensing Satellite (LCROSS) по имитации импакта, с помощью УФ-спектрографа, установленного на борту орбитального аппарата (LRO), было изучено облако пара, образовавшееся в результате удара, в котором зафиксирована сера (Gladstone и др., 2010). По данным такого прямого измерения удалось зафиксировать 0.06% атомарной серы среди высокотемпературных (600–1300 К) легколетучих элементов, при этом не исключалось возможное

наличие соединений этого элемента. По мнению (Ringwood, Kesson, 1977), содержания серы в породах Земли и Луны близки.

Дальнейшие исследования лунного реголита показали неравномерный характер распределения серы в лунной коре — морские базальты оказались значительно сильнее обогащены серой (до 3000 мг/кг) по сравнению с континентальными породами, где ее содержание не превышало 20 мг/кг (Kerridge и др., 1975). Выяснилось, что серу содержит и стекло, в том числе и стеклянные шарики лунного реголита. Так, стекла, доставленные миссиями Apollo, усредненно содержат до 0.5 мас.% серы (Righter и др., 2017). По данным других авторов, содержание серы в лунных стеклах может колебаться от 114 до 576 мг/кг (Saal и др., 2008; McCubbin и др., 2015). Особенно отмечается повышенное содержание серы в стеклянных шариках поверхностных отложений (Chou и др., 1975; Meyer (Jr) и др., 1975; Butler (Jr), Meyer (Jr), 1976; Cirlin и др., 1978; Dikov и др., 1978). При этом анализ профилей распределений серы по сечению таких шариков свидетельствует о накоплении этого элемента во внешних областях таких шариков (Dikov и др., 1978; Saal и др., 2008).

Основная доля минералов лунных пород, содержащих серу, сформировалась в период ак-

тивной магматической деятельности. Видимо, дольше всего длились процессы, связанные с вулканизмом. Они тоже являлись источником серы. Состав вулканических газов был смоделирован Renggli с соавторами (Renggli и др., 2017). По данным полученной модели, эти газы содержали в том числе и такие соединения серы, как CS_2 , COS , CS , S_2 , H_2S , H_2S_2 и HS . В широко распространенных лунных стеклах содержание серы колеблется в пределах 115–576 п.п.м., по данным (Saal и др., 2008).

Активная бомбардировка лунной поверхности на протяжении миллиардов лет также могла послужить источником серы. Этот факт явился основанием для предположения, что сера, обнаруженная на поверхности реголита, может иметь метеоритное происхождение (Moore и др., 1972).

Латеральному переносу и осаждению серы на компоненты лунного реголита могла способствовать бомбардировка протонами солнечного ветра (Kerridge и др., 1975). Keller и McKay (1993) считали солнечный ветер одним из основных факторов, способствующих формированию на частицах реголита поверхностной пленки, содержащей легколетучие элементы, в том числе серу. Кроме того, учитывая, что дневная температура по данным, полученным в ходе Diviner Lunar Radiometer Experiment, может достигать 124°C (Williams и др., 2017), а температура плавления серы 112°C (Булидорова и др., 2012), то не исключена ее миграция и в связи с суточными температурными циклами.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Учитывая значимую роль легких элементов (McCubbin и др., 2015) и, в частности, серы в геохимических процессах на Луне, изучение форм выделения и механизмов миграции этого элемента является актуальной задачей. Целью исследований являлся поиск фактов, иллюстративно демонстрирующих поведение серы на поверхности Луны.

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ

Как уже отмечалось (Dikov и др., 1978; Renggli и др., 2017), лунные стеклянные и железные шарики зачастую содержат в себе заметное количество серы. Однако основное количество таких шариков имеет субмикронные размеры. Следовательно, наиболее оптимальными средствами их исследований являются высоколокальные методы аналитической электронной микроскопии.

Изучение осуществлялось на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) TESCAN MIRA-3, оснащенный энергодисперсионным

спектрометром (ЭДС) Oxford AzTec. Поиск фаз и элементный анализ осуществлялись при ускоряющем напряжении 25 кВ, карты распределения элементов по площади регистрировались при ускоряющем напряжении 10 кВ для повышения локальности. Подготовка препарата и резка его пучком ионов галлия выполнялись на двухпучковом микроскопе TESCAN AMBER при 30 кВ и токе 2.5 пА, а финальная полировка – при 5 кВ и токе 150 пА.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Хорошо известно, что микро- и нановыделения самородного железа часто встречаются в пробах лунного реголита (Frondel, 1975; Мохов и др., 2007). Самородное железо в пробах АС Луна-16, Луна-20 и Луна-24 фиксируется в значительных количествах как при микро-, так и наноразмерном масштабе исследований, в большинстве своем в виде шариков. Такие шарики чаще всего встречаются заключенными в матрицу стекла. Эти включения находятся как в расплавленном, так и в конденсатном стекле. Источником железа могут быть как породы Луны, так и материал импакторов, в большом количестве привносимый на ее поверхность на протяжении всей истории существования этого космического тела. Несмотря на ограниченность числа источников, конкретные процессы образования ноль-валентного железа могут различаться.

В ходе изучения препаратов лунного реголита из проб, доставленных АС Луна-24, в результате исследований на сканирующем электронном микроскопе были обнаружены шарики самородного железа диаметром около 10 мкм с заметным содержанием серы (рис. 1, табл. 1, анализ 1). Помимо серы, в спектре фиксируется небольшой пик кремния, при этом остальной набор элементов, присущий расплавленному стеклу, отсутствует. Видимо, наличие кремния обусловлено не столько флюоресценцией в окружающем стекле, а в основном тонкой пленкой высококремниевое, вероятно конденсатного, стекла на поверхности шариков.

Положение шарика в препарате позволило разрезать его пополам пучком ионов галлия на двухпучковом сканирующем микроскопе AMBER. В результате вскрылись многочисленные включения в матрице самого шарика и стала заметной покрывающая его пленка (рис. 2). В составе железной матрицы на ЭДС-спектре, помимо Fe, фиксировались лишь слабые пики Mg, Al, Si, Ca, P, Ni и S (рис. 3а). Во включениях фиксировались пики этих же элементов, однако интенсивность пика S резко увеличилась по сравнению с матрицей, а пики силикатного набора

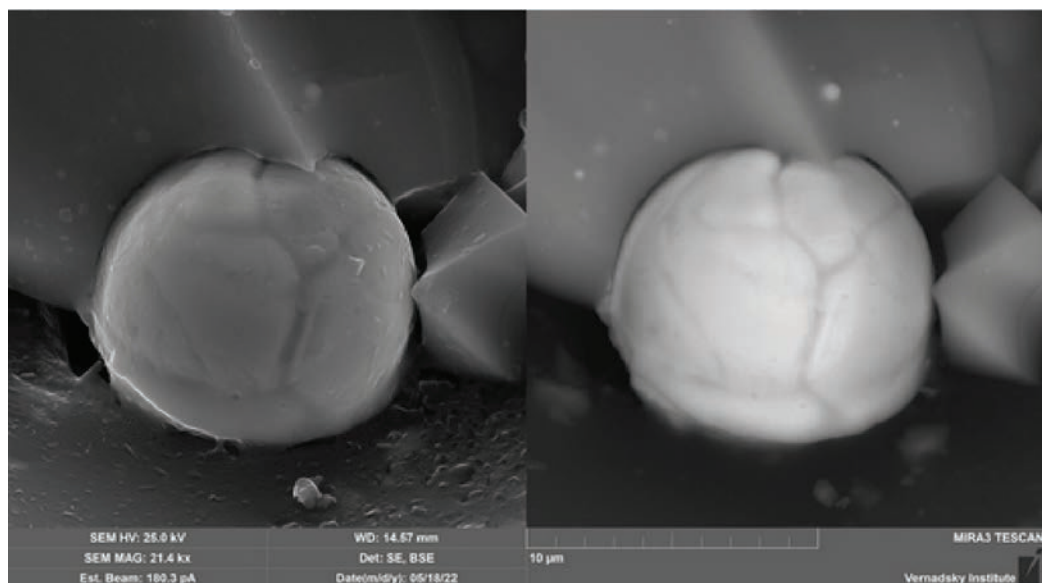


Рис. 1. Исходный вид железного шарика с высоким содержанием серы: слева – вторичные электроны; справа – отраженные. СЭМ.

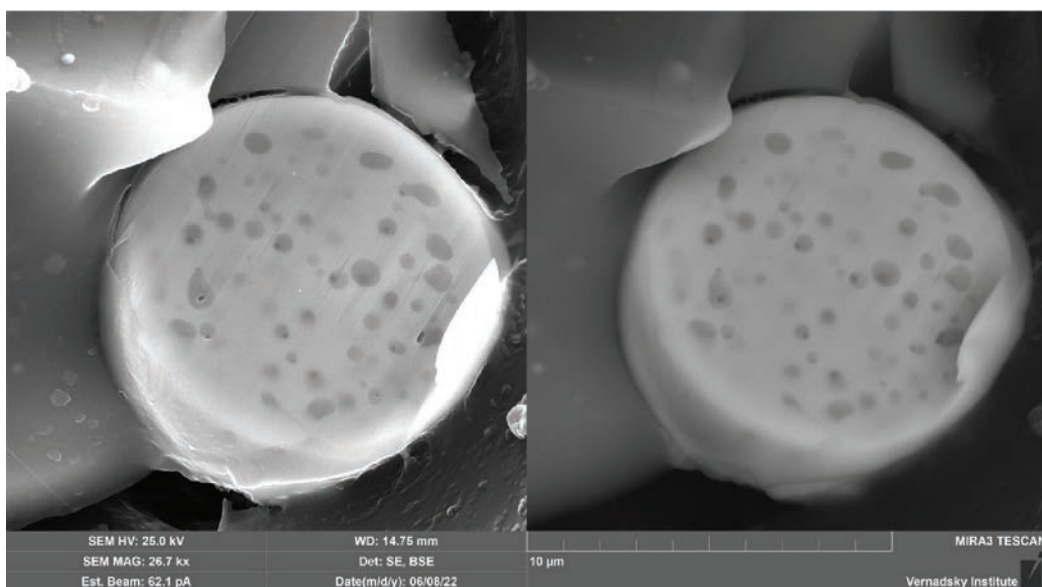


Рис. 2. Вид разрезанного ионным пучком железного шарика: слева – вторичные электроны; справа – отраженные. СЭМ.

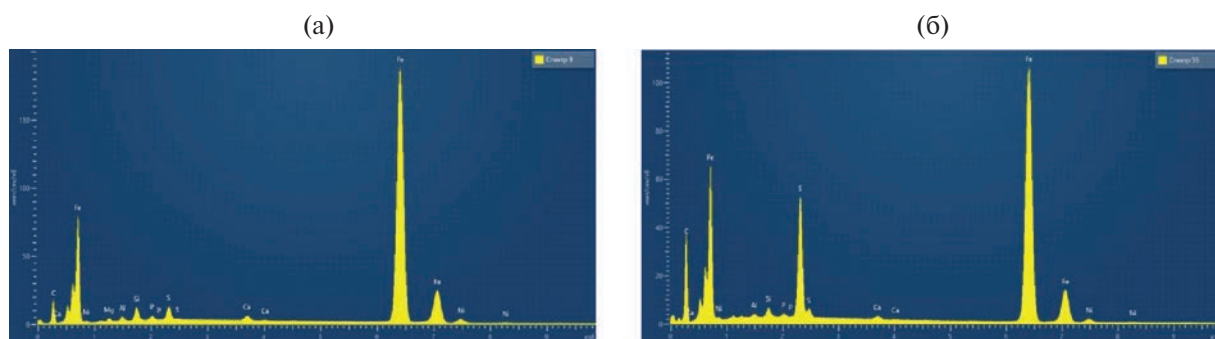


Рис. 3. Рентгеновские энергодисперсионные спектры: (а) – матрицы железного шарика; (б) – включения в нем.

элементов уменьшались вплоть до полного исчезновения в некоторых включениях (рис. 3б). Поэтому можно сделать вывод, что пики Mg, Al, Si и Ca вызваны, скорее всего, флюоресценцией в окружающем железный шарик стекле, а не в нем самом. Анализ состава железной матрицы за вычетом силикатной составляющей приведен в табл. 1, анализ 2, а состав включений – в табл. 1, анализы 3–5. Содержание серы во включениях колеблется в диапазоне 15–32 мас.% по сравнению с 2.6 мас.% в матрице.

Карты распределения элементов, полученные от среза шарика (рис. 4), подтвердили отсутствие в шарике кислорода и концентрацию серы во включениях. Сера также покрывает поверхность шарика тонкой пленкой. При этом ни включения, ни железная матрица, ни поверхностная пленка не дали дифракционных картин на отражение. Методом электронной дифракции на отражение (EBSD) зафиксированы лишь гало.

Пленка серы наиболее отчетливо себя проявила на другом похожем шарике (рис. 5). Как показали карты распределения элементов (рис. 6), он также состоит из железного ядра с примесью серы (табл. 2, анализ 1) и поверхностной пленки с серой в высокой концентрации (табл. 2, анализ 2). Интенсивность сигнала от всех элементов падает в правой части шарика в связи с экранирующим эффектом, вызванным геометрией окружающего

Таблица 1. Анализы железного шарика в разных точках

анализ 1	Si	P	S	Fe	Ni	Bcero
Вес %	11.30	0.93	9.65	75.74	2.38	100.00
± %	0.13	0.09	0.10	0.16	0.06	
Атом. %	18.90	1.41	14.12	63.67	1.90	100.00
анализ 2						
Вес %	0.58	0.33	2.61	92.43	4.05	100.00
± %	0.17	0.17	0.23	0.99	0.97	
Атом. %	1.12	0.58	4.44	90.10	3.75	100.00
анализ 3						
Вес %	3.58	1.14	32.17	61.37	1.73	100.00
± %	0.09	0.07	0.10	0.12	0.05	
Атом. %	5.55	1.60	43.70	47.86	1.29	100.00
анализ 4						
Вес %	8.15	1.12	27.91	61.20	1.63	100.00
± %	0.09	0.06	0.09	0.10	0.04	
Атом. %	12.51	1.55	37.51	47.23	1.19	100.00
анализ 5						
Вес %	2.24	1.93	15.06	78.41	2.36	100.00
± %	0.07	0.06	0.07	0.11	0.05	
Атом. %	3.88	3.03	22.84	68.29	1.95	100.00

Примечание: анализы выполнены в условиях нормировки к 100%.

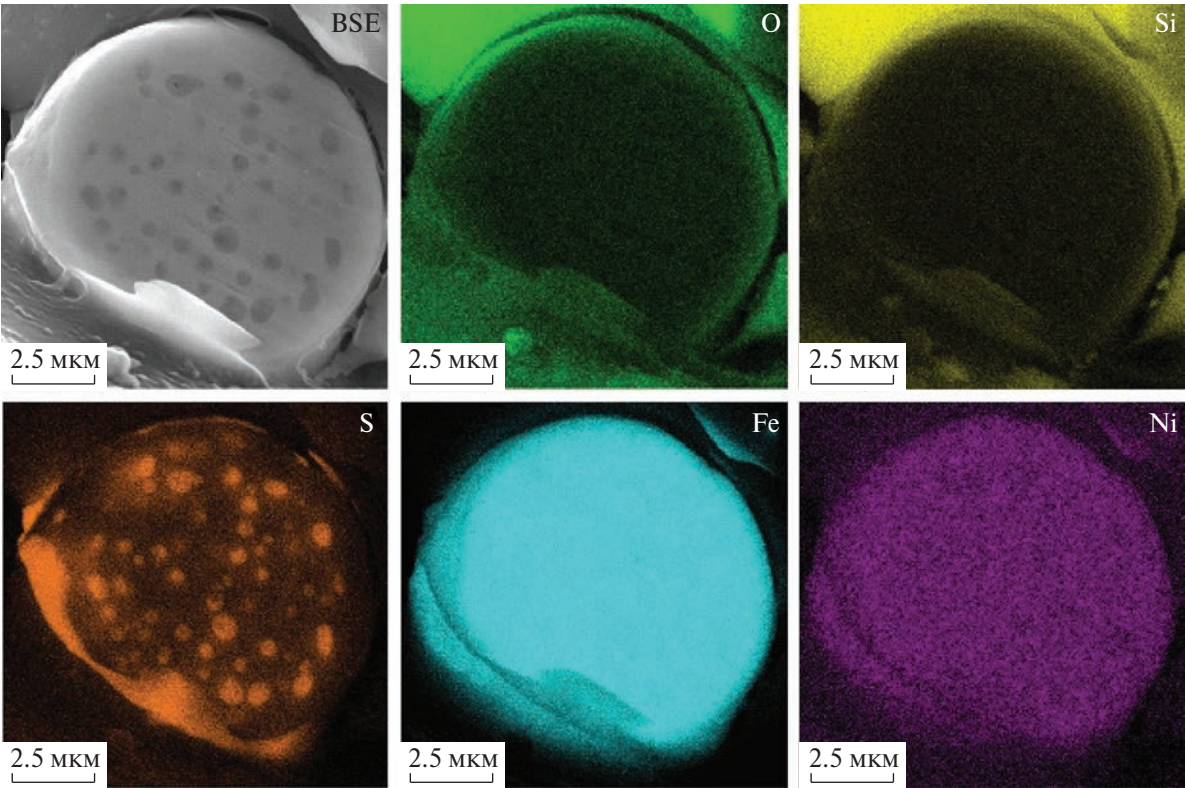


Рис. 4. Карты распределения элементов по разрезанному железному шарiku.

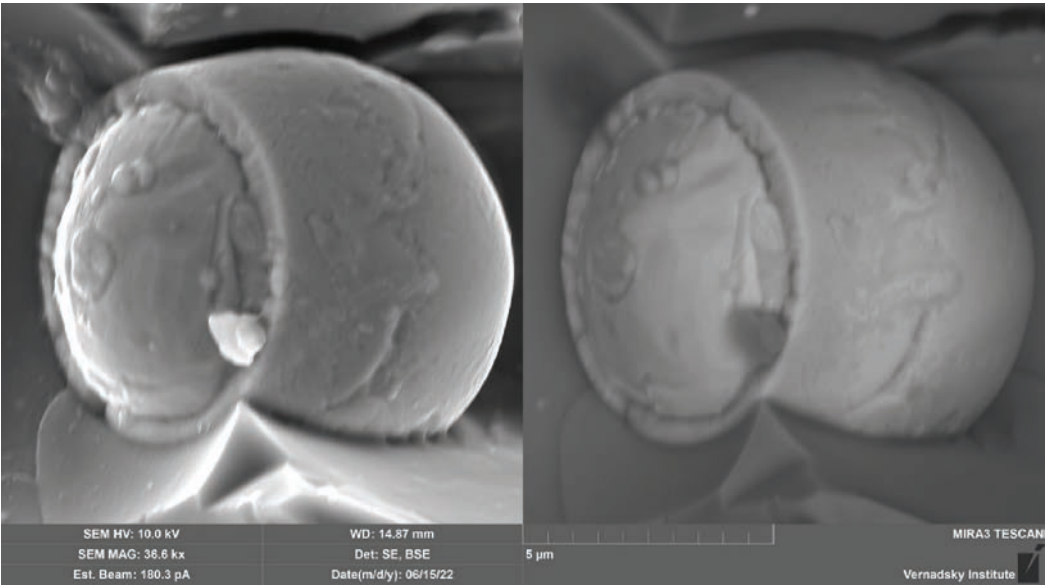


Рис. 5. Железный шарик, покрытый слоем серы: слева – вторичные электроны; справа – отраженные. СЭМ.

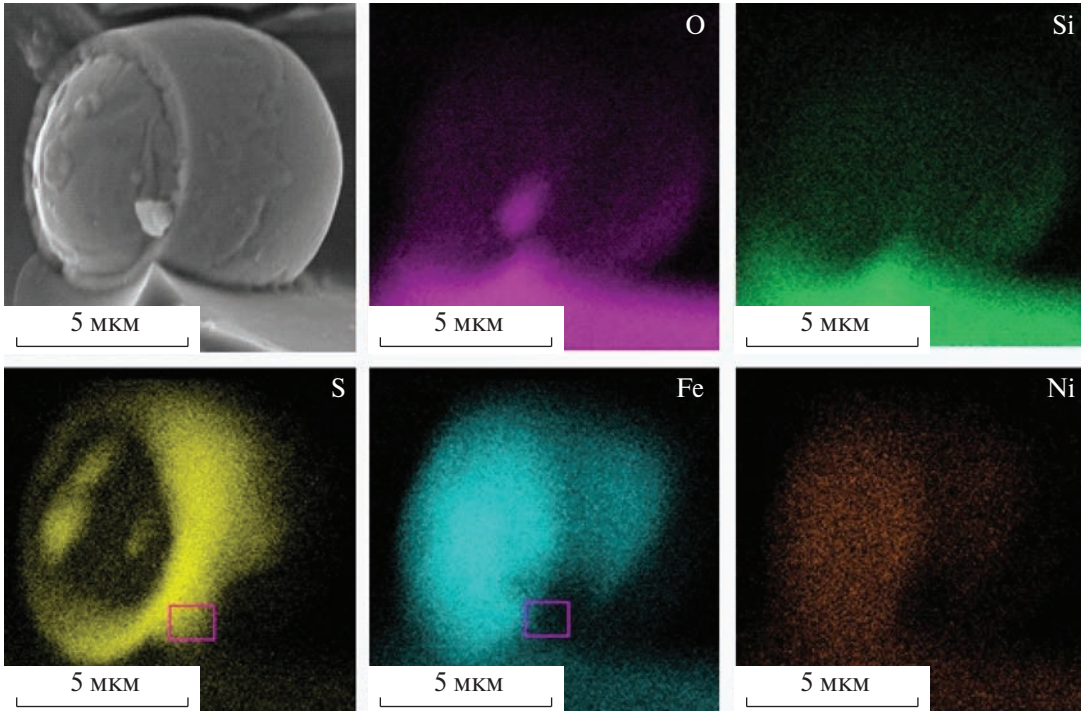


Рис. 6. Карты распределения элементов по железу шарик. Прямоугольником выделен один и тот же участок покрывающей шарик пленки. СЭМ.

стекла. Сигнал от железа в зоне корочки, видимо, возникает из-за небольшой толщины пленки серы и захвата зоной анализа части железного ядра. На ЭДС- спектрах фиксируется небольшой пик Si, видимо, обусловленный наноразмерной покрывающей пленкой высококремниевое конденсатного стекла и флюоресценцией стеклянной матрицы.

Помимо шариков железа, с серой ассоциировалась не вскрытая полость в стеклянной матрице, обнаружить которую позволило использование

Таблица 2. Анализы состава железной матрицы (анализ 1) и поверхностной пленки (анализ 2)

анализ 1	Si	P	S	Fe	Ni	Bcero
Вес %	0.58	0.33	2.61	92.43	4.05	100.00
± %	0.17	0.17	0.23	0.99	0.97	
анализ 2						
Вес %	5.11	0.44	86.74	7.70	0.00	100.00
± %	0.25	0.23	0.82	0.81	0.34	

Примечание: анализы выполнены в условиях нормировки к 100%.

повышенного до 25 кВ ускоряющего напряжения электронного микроскопа (рис. 7). Карты распределения элементов по участку с этой полостью выявили неравномерное распределение

серы, железа и никеля (рис. 8). Так, никель и железо частично коррелировали с серой, а основной объем серы располагался в интерстициях между фазами никеля и железа.

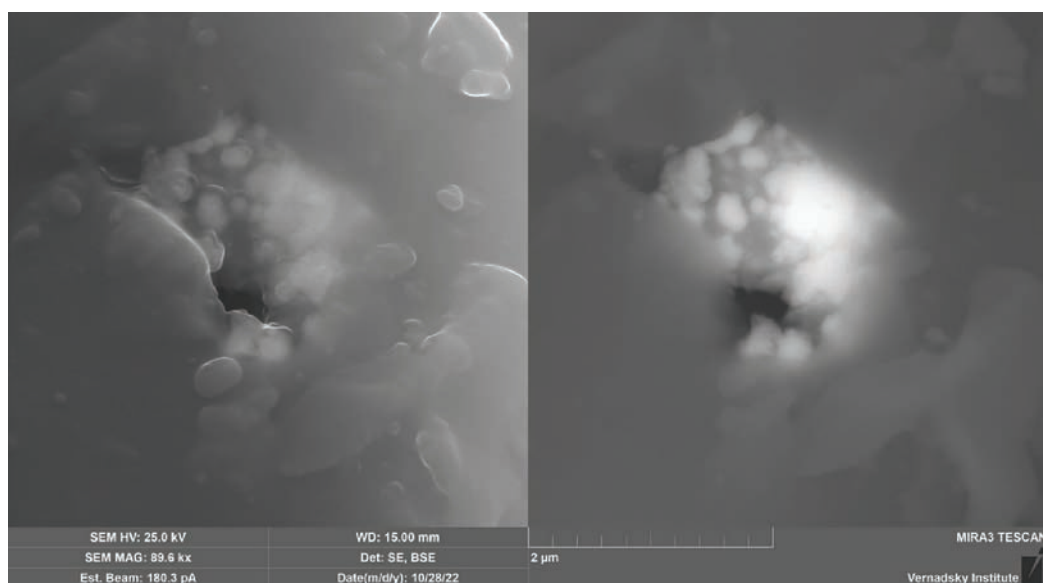


Рис. 7. Полость в стекле с высоким содержанием серы: слева – вторичные электроны; справа – отраженные. СЭМ.

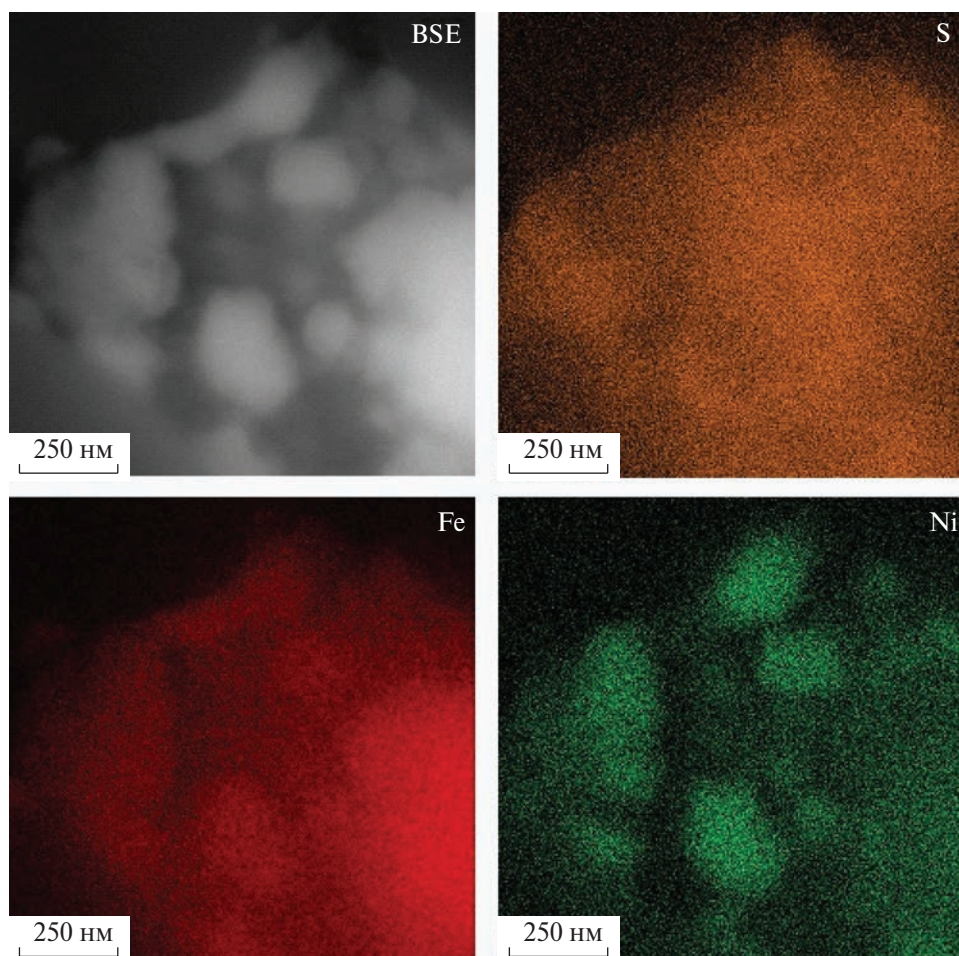


Рис. 8. Распределение серы, никеля и железа в полости стекла. СЭМ.

ОБСУЖДЕНИЕ

Одним из первых исследователей лунного вещества, доставленного на Землю, уже были обнаружены тонкие пленочные покрытия, содержащие серу и кремний (Carten, 1973). Эти данные позднее были подтверждены в работах (Grant и др., 1974) с использованием методов ОЖЕ-спектроскопии при изучении оранжевых стекол из проб Apollo-17, где пленки толщиной около 30 Å содержали, кроме S, еще C, N, Cl. Причем авторы, опираясь на результаты исследования, однозначно интерпретировали источник серы как лунный. Методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии при послойном травлении были обнаружены слои, обогащенные серой в шариках зеленого стекла, причем сера была выявлена в формах S^{2-} , S^0 , S^{4+} , S^{6+} (Dikov и др., 1998). Тенденция к расположению слоев серы в верхних слоях изученных шариков отмечены не только этими авторами, но и подтверждены в ходе экспериментальных работ по лазерному испарению аналогов лунного грунта при изучении образовавшихся конденсатных стекол (Gerasimov и др., 1998).

Регистрация профиля распределения серы от поверхности шарика зеленого стекла к его центру показала падение концентрации этого элемента с 600 п. п. м. до 210 п. п. м. на дистанции в 120 мкм (Saal и др., 2008). В работе (Saal, Hauri, 2021) на основе изучения изотопных отношений серы было выдвинуто предположение об осаждении этого элемента на поверхности стекол при дегазации магматических выбросов.

Настоящее исследование позволило выявить и наглядно продемонстрировать характер миграции серы, связанной с шариками самородного железа. Сера концентрируется в матрице самородного железа и частично вытесняется на поверхность шарика (рис. 1, 2). Видимо, сера в процессе ликвации остывающей капли жидкого железа, обогащенного серой, частично формируется в виде наносфер Fe-S расплава и частично вытесняется на поверхность шарика. Осаждение пленки серы из газовой среды на поверхность образца представляется маловероятным, поскольку стекло, окружающее шарики, такой пленкой не покрыто. На поверхности еще неостывшего шарика осуществляется взаимосвязанный процесс испарения-конденсации. В начале процесса, когда испарение превалирует над конденсацией, некоторая часть поступившей на поверхность шарика серы будет безвозвратно потеряна, испарившись в пространство, поскольку система является открытой. Вопрос степени открытости системы не является таким уж принципиальным. Безвозвратные потери серы рассматриваются как

возможный сценарий и не являются необходимым элементом процесса. Основное предположение в том, что объем системы достаточен для быстрого падения плотности газов в районе шариков, обеспечивая условия конденсации на их поверхности. Это исключает вариант нахождения шариков в матрице стекла. Многочисленные примеры такого включения железных шариков в стекле демонстрируют кардинально другую морфологию таких шариков (Liu и др., 2007; Мохов и др., 2015), исключающую наличие поверхностных пленок и обеспечивающую плотный их контакт с матрицей стекла. Исходя из этого, вариант шариков в стекле мы отвергаем и предположение о достаточном объеме считаем достаточно вероятным.

Далее, при остывании шарика, процесс конденсации будет превалировать над испарением и на поверхности шарика будет формироваться пленка конденсатной серы, скорее всего, в ноль-валентной форме. Толщина пленки будет зависеть от состава исходной капли Fe-S расплава, ее размера и, соответственно, от скорости охлаждения шарика. При относительно медленном остывании время преобладания процесса испарения над конденсацией и безвозвратные потери серы будут значительны и конденсатная пленка окажется очень тонкой. И, наоборот, при быстром остывании роль испарения окажется незначительной по сравнению с процессом конденсации и толщина пленки серы будет больше. Именно это зафиксировано на полученных снимках. Размер шарика на рис. 2 около 10 мкм и он покрыт тонкой пленкой, тогда как шарик на рис. 5 практически вдвое его меньше, его масса, соответственно, существенно меньше, и остывать он будет значительно быстрее, и пленка серы на его поверхности заметно более толстая, несмотря на возможные колебания исходного состава шариков.

В качестве альтернативного механизма формирования серы на поверхности шарика можно предположить лишь застывание жидкой серы, выступившей на поверхности шарика. Но такой механизм возможен лишь при температуре 120°C и давлении 3–7 Па (Химическая энциклопедия, 1995), что на четыре порядка превышает атмосферное давление на Луне 0.3 нПа (Wilson и др., 1999). При температуре, ниже указанной, сера находится в твердом состоянии и не может выделяться, при большей температуре в условиях Луны сера испарится, запуская рассмотренный выше механизм испарения-конденсации. Вероятность осуществления такого механизма застывания крайне мала.

Видимо, шарики образовались путем переплавки какого-либо сульфида железа. Судя по

фазовой диаграмме Fe-S (Walder и др., 2005; Гасанова и др., 2019), в диапазоне температур ~1000–1550°C возможно совместное существование металлического гранецентрированного железа и жидкой серы при ее содержании до 42%. Соединения с более высокими содержаниями серы состоят из фаз Fe_{1-x}S , FeS_2 и жидкой серы. Чистая сера кристаллизуется при снижении температуры, начиная с 115°C. Видимо, при остывании, в процессе ликвации сера вытеснялась в локальные включения с высоким своим содержанием, а также на внешнюю поверхность застывающей капли, где и образовывала пленочное покрытие из железа с высоким содержанием серы или даже из чистой серы. Вероятное наличие в пленке ноль-валентной серы следует из аналогии с результатами ранее выполненными работ по послойному исследованию строения стеклянных шариков (Dikov и др., 1978; Saal и др., 2008), в которых такое состояние серы отмечалось наряду с другими. Еще одним подтверждением высокой концентрации серы в пленке по сравнению с содержанием железа служат карты распределения элементов, выполненные на пониженном до 10 кВ ускоряющем напряжении для улучшения локальности анализа. Прямоугольники на картах распределения железа и серы указывают на один и тот же участок поверхности шарика и наглядно демонстрируют разницу в содержаниях этих элементов (рис. 6). Однако надо учитывать массивность шарика железа по сравнению с незначительной толщиной пленки. Электронный пучок, даже при пониженном ускоряющем напряжении, все равно пробивал тонкую покрывающую пленку и вызывал генерацию характеристического излучения железа массивного шарика. Таким образом, сделать однозначный вывод о наличии или отсутствии железа в покрывающей шарик пленке невозможно, можно говорить лишь о существенно превосходящей концентрации в ней серы по сравнению с железом.

В процессе остывания капель серосодержащего железа из расплава закалка шариков должна была происходить очень быстро, чтобы ликвационные сферы Fe-S были зафиксированы в стадии формирования внутри железной матрицы. Такие условия в большей степени отвечают краевой зоне импакта, хотя и периферийная зона вулканического извержения тоже может соответствовать этим условиям, но, по нашему мнению, вероятность импакта все же выше.

О наличии диффузного механизма вытеснения серы косвенно может свидетельствовать концентрация этого элемента в интерстициях между металлическими фрагментами в обнаруженной закрытой полости в стекле (рис. 7). Невскрытое состояние этой полости позволило сохранить за-

печатанные в ней фазы в неприкосновенности от позднейших изменений. Карты распределения элементов (рис. 8) демонстрируют наличие в полости фрагментов железа с серой, железа с никелем и серой, а также зоны с серой, не коррелирующей ни с какими другими элементами. Видимо сера выделилась при остывании жидкого включения из железо-никель-сера расплава в самостоятельную фазу по такому же диффузионному механизму, как и из железных шариков, но, поскольку система была закрытой, то и потеря на испарение не произошло.

Методы моделирования кристаллизации расплава Fe-S при 5000 К и 360 ГПа показали, что система ведет себя как жидкость или аморфное вещество. С ростом концентрации серы коэффициент самодиффузии сначала растет, а затем снижается. В случае быстрой закалки следует ожидать образования аморфной фазы с элементами кристаллических неупорядоченных блоков и цепочек (Белашенко и др., 2007).

Полученные нами методом EBSD гало аморфного материала от матрицы разрезанного железного шарика и Fe-S включений в нем соответствуют прогнозу такой модели — единичные, неупорядоченно расположенные в матрице фрагменты кристаллической структуры не могли дать дифракционную картину. Но следует учитывать, что появление гало могло быть также вызвано аморфизацией лишь поверхностного слоя в результате воздействия ионного пучка.

На поверхности шарика присутствует и аморфная тончайшая нанометровая пленка высококремниевое стекла, о чем свидетельствует небольшой пик кремния на спектрах ЭДС. Ранее уже отмечалось присутствие кремния наряду с серой в работах (Carten, 1973; Диков и др., 2009). Наличие таких пленок на поверхности вызвано конденсацией кремнезема при более поздних импактах и, видимо, широко распространено. Такие пленки хорошо сохраняются со временем и могут предотвратить вторичные преобразования лежащих под ними минеральных фаз, изолируя их, в числе других факторов, от воздействия атмосферы Земли во время хранения проб (Горностаева и др., 2014). Эта стеклянная пленка сконденсировалась на всей поверхности частички реголита, включая железные шарики, и, как показано в работе (Горностаева и др., 2014), играет консервирующую роль.

ВЫВОДЫ

Впервые получены наглядные данные о поведении серы при остывании металл-сульфидных капель с образованием ликвационных серосодержащих сфер в теле самородного железа. При этом

часть отликвировавшего сульфида отжималась на поверхность металлических сфер. После чего сера конденсировалась в виде тонких пленок, покрывающих поверхность железных шариков. При этом часть серы (или вся, поступившая на внешнюю поверхность шарика), по-видимому, находится в элементарном состоянии. Возникшие таким образом агрегаты металла, сульфида и самородной серы сохраняются благодаря их консервации в массе стекла или под тонкими пленками силикатного конденсата.

Работа выполнена за счет бюджетных средств по госзаданию ГЕОХИ РАН в рамках темы “Новые комплексные подходы к фундаментальной проблеме изучения химического состава, трансформации и миграции наночастиц и легкоподвижных форм элементов в окружающей среде”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белащенко Д.К., Кусков О.Л., Островский О.И. Применение модели погруженного атома к жидким растворам системы Fe-S // Неорганич. материалы. 2007. Т. 43. № 9. С. 1113–1125.
- Булидорова Г.В., Галяметдинов Ю.Г., Ярошевская Х.М., Барабанов В.П. Физическая химия. Казань: Изд-во Казан. нац. исслед. технол. ун-та, 2012. 396 с. ISBN978–5–7882–1367–5.
- Гасанова У.А., Алиев О.М., Бахтиярлы И.Б., Мамедов Ш.Г. Исследование системы FeS–PbS // Журн. неорганич. химии. 2019. Т. 64. № 2. С. 196–200.
- Горностаева Т.А., Мохов А.В., Карташов П.М., Богати-ков О.А. Защитная роль стеклянной пленки на поверхности металлических частиц лунного реголита // ДАН. 2014. Т. 459. № 3. С. 349–351.
- Диков Ю.П., Герасимов М.В., Яковлев О.И., Иванов А.В. Валентное состояние железа в конденсате реголита, доставленного АЛС “Луна-16” // Петрология. 2009. Т. 17. № 5. С. 459–469.
- Мохов А.В., Карташов П.М., Богатилов О.А. Луна под микроскопом: новые данные по минералогии Луны. М.: Наука, 2007. 127 с.
- Мохов А.В., Горностаева Т.А., Карташов П.М., Асадулин Э.Н.Э., Богатилов О.А. Нанокристаллы самородных железа и титана в импактных стёклах лунного реголита // ДАН. 2015. Т. 460. № 4. С. 441–445.
- Черкасов И.И., Шварев В.В. Грунт Луны. М.: Наука, 1975. 143 с.
- Химическая энциклопедия в 5 т. / Ред. Зефилов Н.С. (гл. ред.). М.: Советская энциклопедия, 1995. Т. 4. 639 с.
- Butler (Jr) P., Meyer (Jr) C. Sulfur prevails in coatings on glass droplets: Apollo 15 green and brown glasses and Apollo 17 orange and black (devitrified) glasses // Proc. 7th Lunar Sci. Conf. 1976. P. 1561–1581.
- Carten J.L. Morphology and chemistry of probably VLC (Vapor-Liquid-Solide) – type of whisker structures and other features on surface of breccia 15015.36 // Proc. 4th Lunar Sci. Conf. 1973. P. 413–422.
- Chou C.L., Boynton W.V., Sundberg L.L., Wasson J.T. Volatiles on the surface of Apollo 15 green glass and traceelement distributions among Apollo 15 soils // Proc. 6th Lunar Sci. Conf. 1975. P. 1701–1727.
- Cirlin E.N., Housley R.M., Grant R.W. Studied of volatiles in Apollo 17 samples and their implication to vapor transport processes // Proc. 9th Lunar and Planet. Sci. Conf. 1978. P. 2049–2063.
- Dikov Yu.P., Bogatkov O.A., Barsukov V.L., Florensky K.P., Ivanov A.V., Nemoshkalenko V.V., Alyoshin V.G., Chudinov M.G. Some features of the main element conditions in surface layers of the regolith particles of the Luna automatic stations samples: X-ray photoelectronic spectroscopic studies // Proc. 9th Lunar and Planet. Sci. Conf. 1978. P. 2111–2124.
- Dikov Y.P., Ivanov A.V., Wlotzka F., Galimov E.M., Wänke H. High enrichment of carbon and volatile elements in the surface layers of Luna 16 soil sample 1635: Result of comet or meteorite impact // Earth and Planet. Sci. Lett. 1998. V. 155 № 3–4. 197–204.
- Fronde J.W. Lunar Mineralogy. New York: Wiley-Interscience, 1975. 332 p.
- Gerasimov M.V., Ivanov B.A., Yakovlev O.I., Dikov Y.P. Physics and chemistry of impacts // Earth, Moon, and Planets. 1998. V. 80. № 1. С. 209–259.
- Gladstone G.R., Hurley D.M., Retherford K.D., P. Feldman D., Pryor W.R., Chaufray J.Y., Versteed M., Greathouse T.K., Steffl A.J., Throop H., and 10 co-authors. LRO-LAMP observations of the LCROSS impact plume // Science. 2010. V. 330. № 6003. P. 472–476.
- Grant R.W., Housley R.M., Szalkowski F.J., Marcus H.L. Auger electron spectroscopy of lunar samples // Proc. 5th Lunar Sci. Conf. 1974. P. 2423–2439.
- Keller L., McKay D. Discovery of vapor deposits in the lunar regolith // Science. 1993. V. 261. № 5126. P. 1305–1307.
- Kerridge J.F., Kaplan I.R., Petrowski C. Evidence for meteoritic sulfur in the lunar regolith // Proc. 6th Lunar and Planet. Sci. Conf. 1975. P. 2151–2162.
- Liu Y., Taylor L.A., Thompson J.R., Schnare D.W., Park J.-S. Unique properties of lunar impact glass: Nanophase metallic Fe synthesis // Am. Mineralogist. 2007. V. 92. P. 1420–1427.
- McCubbin F.M., Vander Kaaden K.E., Tartèse R., Klima R.L., Liu Y., Mortimer J., Barnes J.J., Shearer Ch.K., Tremain A.H., Lawrence D.J., and 4 co-authors. Magmatic volatiles (H, C, N, F, S, Cl) in the lunar mantle, crust, and regolith: Abundances, distributions, processes, and reservoirs // Am. Mineralogist. 2015. V. 100. № 8–9. P. 1668–1707.
- Meyer (Jr) C., McKay D.S., Anderson D.H., Butler (Jr) P. The source of sublimates on the Apollo15 green and Apollo 17 orange glass samples // Proc. 6th Lunar Sci. Conf. 1975. P. 1673–1699.
- Moore C.B., Lewis C.F., Cripe J., Delles F.M., Kelly W.R., Gibson (Jr) E.K. Total carbon, nitrogen, and sulphur in

- Apollo 14 lunar samples // Proc. 3rd Lunar Sci. Conf. 1972. P. 2051–2058.
- Renggli C.J., King P.L., Henley R.W., Norman M.D.* Volcanic gas composition, metal dispersion and deposition during explosive volcanic eruptions on the Moon. // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 2017. V. 206. P. 296–311.
- Richter K., Go B.M., Pando K.A., Danielson L., Ross D.K., Rahman Z., Keller L.P.* Phase equilibria of a low S and C lunar core: Implications for an early lunar dynamo and physical state of the current core // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2017. V. 463. P. 323–332.
- Ringwood A.E., Kesson S.E.* Composition and origin of the Moon // Proc. 8th Lunar Sci. Conf. 1977. P. 371–398.
- Saal A.E., Hauri E.H., Cascio M.L., Van Orman J.A., Rutherford M.C., Cooper R.F.* Volatile content of lunar volcanic glasses and the presence of water in the Moon's interior // *Nature*. 2008. V. 454. № 7201. P. 192–195. doi:10.1038/nature07047.
- Saal A.E., Hauri E.H.* Large sulfur isotope fractionation in lunar volcanic glasses reveals the magmatic differentiation and degassing of the Moon // *Sci. Adv.* 2021. V. 7. № 9. id. eabe4641.
- Walder P., Pelton A.D.* Thermodynamic modeling of the Fe-S system // *J. Phase Equilibria and Diffusion*. 2005. V. 26. P. 23–38.
- Williams J.P., Paige D.A., Greenhagen B.T., Sefton-Nash E.* The global surface temperatures of the Moon as measured by the Diviner Lunar Radiometer Experiment // *Icarus*. 2017. V. 283. P. 300–325.
- Wilson J.K., Smith S.M., Baumgardner J., Mendillo M.* Enhancement of the Moon's sodium tail following the Leonid meteor shower of 1998 // *Bull. Am. Astron. Soc.* 1999. V. 31. P. 1132. id. 38.03.

УДК 523.42

КОРОНЫ-ИСТОЧНИКИ МОЛОДОГО ВУЛКАНИЗМА НА ВЕНЕРЕ: ТОПОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ОЦЕНКИ ПРОДУКТИВНОСТИ

© 2024 г. Е. Н. Гусева^{а,*}, М. А. Иванов^а

^а Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

* E-mail: guseva-evgeniya@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.06.2023 г.

После доработки 14.07.2023 г.

Принята к публикации 10.08.2023 г.

Выполненное нами исследование пространственной и генетической связи корон и лопастных равнин позволяет сделать два важных вывода. 1) Около 17% всех вулканических корон Венеры являются источниками молодых лав, образующих лопастные равнины Атлийского периода (короны-источники). Малая доля корон-источников в общей популяции корон отражает снижение темпа формирования мантийных диапиров. 2) Площадь лопастных равнин, связанных с той или иной короной, и площадь самой короны связаны отрицательной корреляцией. Такие соотношения допускают существование только двух моделей завершающих стадий эволюции мантийных диапиров. Проанализировав обе эти модели, мы предполагаем, что в течение Атлийского периода геологической истории Венеры либо существовала единая зона нейтральной плавучести, либо подошва литосферы располагалась примерно на одном уровне.

Ключевые слова: Венера, короны, новы, кольцевое обрамление (вал), топография, вулканизм, лопастные равнины, рифтовые зоны, эволюция родительских диапиров, литосфера

DOI: 10.31857/S0320930X24010061, EDN: OHODPQ

ВВЕДЕНИЕ

Вулканотектонические комплексы Венеры, короны, представляют собой крупные (диаметром до 2500 км) кольцевые формы рельефа Венеры с обрамлением-валом, состоящим из плотно упакованных борозд и гряд (Barsukov и др., 1986; Campbell и др., 1992; Stofan и др., 1992; Basilevsky, Head, 1995; 2000; Stofan, Smrekar, 2005; Grindrod, Hoogenboom, 2006; Ivanov, Head, 2010). Вал образует тектонический компонент корон. Большинство корон выражены на поверхности именно своими тектоническими комплексами. Округлая форма корон, их вулканическая активность и неслучайное пространственное распределение на поверхности (Stofan и др., 1992; Phillips и др., 1992) указывают на то, что короны представляют собой поверхностные проявления мантийных диапиров и, следовательно, отражают процессы мантийной конвекции на Венере (Nikishin, 1986; 1990; Pronin, Stofan, 1990; Janes и др., 1992; Squyres и др., 1992; Stofan и др., 1992; Koch, Manga, 1996; Smrekar, Parmentier, 1996; Smrekar, Stofan, 1997; Jellinek и др., 2002; Johnson, Richards, 2003; Davaille и др., 2017).

В некоторых случаях с коронами связаны морфологически различные вулканические комплексы, образующие вулканический компонент корон. Эти комплексы представлены лавовыми потоками, скоплениями малых вулканов и иногда крутосклонными куполами. Эти образования, вероятно, связаны с формированием корон (Stofan и др., 1992). Лавовые потоки, как правило, представляют собой наиболее распространенные вулканические формы рельефа, занимающие значительную площадь. В подавляющем большинстве случаев лавовые потоки, сливаясь, образуют лопастные равнины, относящиеся к наиболее молодым вулканическим комплексам Венеры (Basilevsky, Head, 1998; Ivanov, Head, 2011; 2013). Лопастные равнины распространены как внутри обрамления корон, так и протягиваются далеко за его пределы, образуя обширные лавовые фартуки вокруг корон — все поля лопастных равнин, пространственно связанные с короной (Ivanov, Head, 2001).

Лопастные равнины занимают наиболее высокое стратиграфическое положение в локальном, региональном и глобальном масштабе (Ivanov, Head, 2011; 2015) и являются характерным атри-

бутом наиболее позднего, Атлийского, периода геологической истории Венеры (Basilevsky, Head, 1998), длительность которого составляет примерно 2/3 всей геологической истории планеты (Ivanov, Head, 2011; 2015). Во всех случаях лопастные равнины, пространственно ассоциирующиеся с коронами, подтапливают их тектонические компоненты и, следовательно, представляют собой результат поздних этапов эволюции некоторых мантийных диапиров. Стратиграфическое положение лопастных равнин говорит о том, что они представляют собой проявления поздней вулканической активности, вероятно, продолжающейся на поверхности Венеры (Shalygin и др., 2015; Herrick, Hensley, 2023).

Распространенность лопастных равнин и, в частности, пространственная и генетическая связь с коронами позволяют подойти к проблеме эволюции картины мантийной конвекции и связанного с ней стиля вулканической активности на протяжении геологической истории Венеры.

Первый вопрос, к решению которого мы обращаемся в нашем исследовании, можно сформулировать так: как часто проявлена связь корон и лопастных равнин? Ответ на этот вопрос позволил бы оценить (по крайней мере на качественном уровне) изменения темпа вулканической активности на Венере. Так как Атлийский период составляет наибольшую часть геологической истории Венеры, а лопастные равнины формировались на протяжении этого периода, то при неизменном или возрастающем темпе формирования мантийных диапиров следовало бы ожидать, что основная часть корон будет связана с лопастными равнинами. При затухающем темпе и/или формировании реологического барьера, препятствовавшего подъему диапиров, доля корон с лопастными равнинами будет уменьшаться.

Каковы вариации площади лопастных равнин, окружающих корону-источник? Это другой важный вопрос, который мы рассматриваем в нашем исследовании. Изменения площади равнин могут отражать эффузивную продуктивность родительского диапира. Здесь мы исходим из предположения, что более крупный диапир приводит к формированию более крупной короны, что представляется естественным. Сравнение эффузивной активности разных корон основано на допущении примерно одинаковой мощности покровов лопастных равнин, окружающих короны. Это допущение основано на двух наблюдательных фактах: (1) потоки лопастных равнин не имеют выраженного фронтального уступа и, следовательно, имеют незначительную мощность (толщину); (2) подавляющее большинство корон – топографически плоские структуры в отличие от крупных вулканов, основное тело кото-

рых, сложенное покровами лав, может достигать нескольких километров в высоту.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В нашей работе мы использовали традиционный метод фотогеологического анализа, позволяющий реконструировать последовательность основных геологических событий и, следовательно, процессов как в локальном, так и в глобальном масштабе. Для фотогеологического анализа корон мы использовали их известные каталоги (Stofan и др., 1992; 2001; Crumpler, Aubele, 2000) в сопоставлении с глобальной геологической картой Венеры, на которой показаны поля лопастных равнин (Ivanov, Head, 2011).

Для каждой каталогизированной короны мы отмечали наличие или отсутствие лопастных равнин и отмечали признаки, указывающие на то, что данная корона является либо источником лопастных равнин, либо пассивно подтапливается ими. Таким образом, нами была выделена субпопуляция корон-источников лопастных равнин. Определение тех полей равнин, которые генетически связаны с конкретной короной, однако, бывает затруднено, так как лопастные равнины могут быть образованы лавовыми потоками из разных источников. Поэтому в нашем исследовании мы сформировали еще одну субпопуляцию, состоящую из тех корон, с которыми можно однозначно связать поля лопастных равнин. Для корон этой субпопуляции были определены площадь самой короны в пределах ее вала и общая площадь окружающих лопастных равнин с помощью равноплощадной проекции Моллвейде.

ПРИМЕРЫ ГЕНЕТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ КОРОН И ЛОПАСТНЫХ РАВНИН

В качестве примеров рассмотрим две короны, являющиеся источниками лопастных равнин.

Корона Nahas-tsan Mons (14.4° ю. ш., 204.9° в. д., рис. 1а) имеет в диаметре около 167 км. Эта корона проявляется на поверхности в виде купольного поднятия и относится к топографическому классу D (Гусева, Иванов, 2022; 2023). Она расположена в области Atla и обрамлена трещинами рифтовой зоны Tkashi-mapa Chasma (рис. 1а). Из этих трещин растекаются потоки лопастных равнин, покрывающие три крупные области суммарной площадью около 84420 км².

Корона Ereshkigal (21° с. ш., 84.3° в. д., рис. 1б) имеет в диаметре около 334 км. В рельефе она представляет собой сложную депрессию с центральным поднятием и относится к топографическому классу W (Гусева, Иванов, 2022; 2023). Эта корона расположена в Akhtamar Planitia

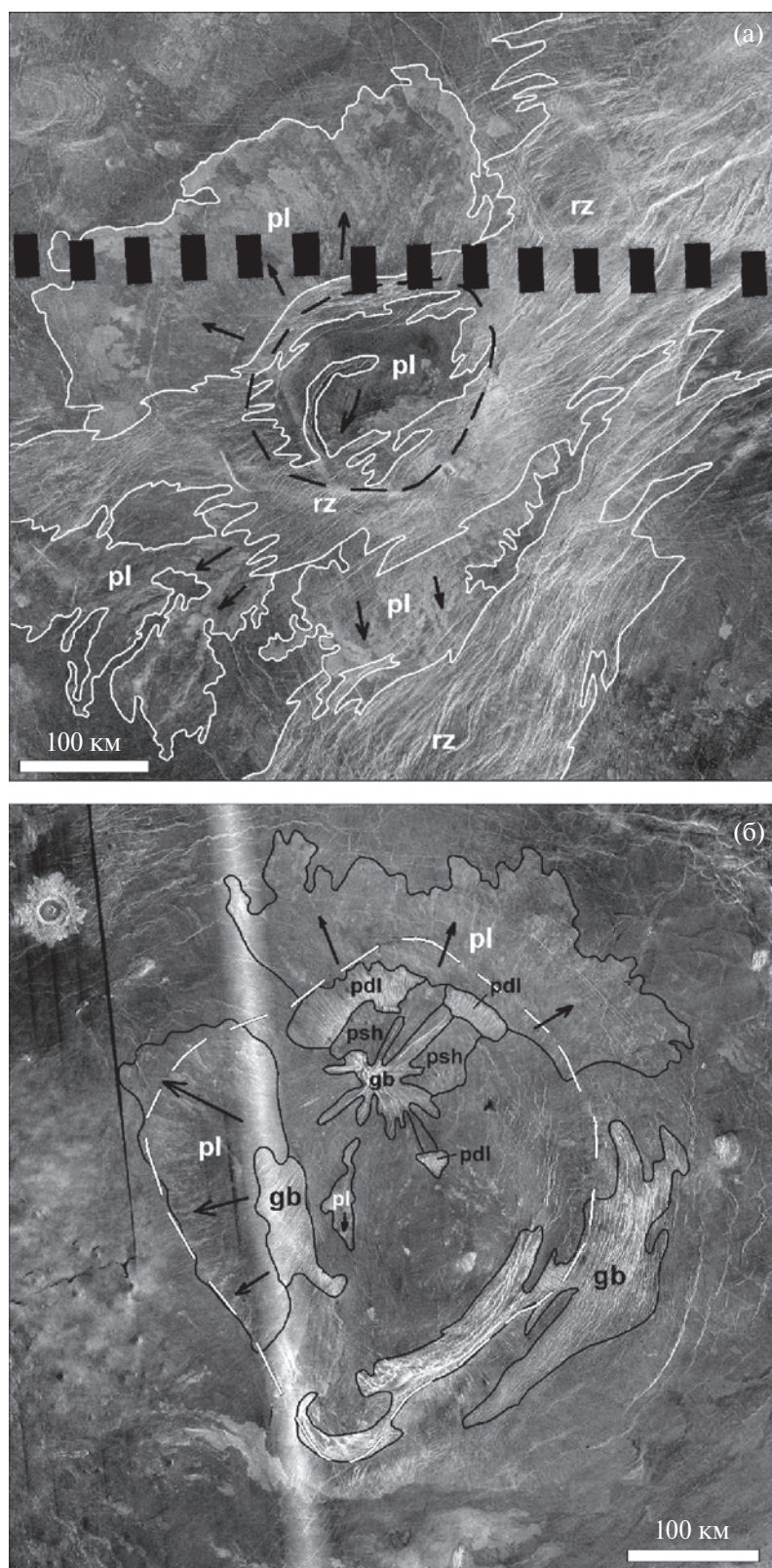


Рис. 1. Примеры корон-источников лопастных равнин: (а) — Nahas-tsan Mons обрамлена трещинами рифтовой зоны, rz, из которых растекаются потоки лопастных равнин, pl — черные стрелки; (б) — корона Ereshkigal обрамлена трещинами поясов борозд, gb, в центральной части короны — радиальная система грабенов (нова), которая является источником лопастных равнин, pl — черные стрелки. Обрамление корон — пунктирные линии, границы подразделений — сплошные линии; изображения в синусоидальной проекции, пространственное разрешение ~225 м/э.и.

и обрамлена трещинами поясов борозд. В ее центральной части расположена радиальная система грабен — нова. Формирование нов связывают с образованием приповерхностных магматических резервуаров, которые служили источниками систем радиальных даек (Aittola, Kostama, 2001; Basilevsky, Raitala, 2002; Krassilnikov, Head, 2003; Aittola, Raitala, 2007; Basilevsky и др., 2009). Нова в короне Ereshkigal представляет собой источник потоков лопастных равнин, которые составляют три полигона: два крупных в обрамлении короны и один малый — в ее центральной части. Суммарная площадь этих потоков лопастных равнин составляет около 59433 км².

ЧАСТОТНО-РАЗМЕРНОЕ И ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОРОН-ИСТОЧНИКОВ ЛОПАСТНЫХ РАВНИН

Фотогеологический анализ каталогизированных корон позволил выявить среди них 90, которые являются источниками лопастных равнин. Такие короны составляют примерно 17% всей популяции и по своим размерам (~100–650 км) перекрывают значительную часть размерного диапазона всех корон Венеры, за исключением наименьших из них (рис. 2а). В диапазоне от 82 до 650 км сосредоточено примерно 75% всей популяции корон, следовательно, проявления молодого вулканизма не характерны только для примерно четверти самых малых корон и коронообразных структур.

Субпопуляция корон, которые представляют собой чистые случаи источников лопастных равнин, насчитывает 41 корону, частотно-размерное распределение которых явно бимодально (рис. 2а). Такая бимодальность, однако, является следствием неслучайного характера отбора корон и, очевидно, не имеет физического смысла.

Примерно половина всех корон-источников (40 из 90 или ~44%) расположена в регионе между сводовыми поднятиями Beta-Atla-Themis (BAT), связанными мощными зонами растяжения (рифтовыми зонами Венеры, рис. 3).

Сводовые поднятия (Stofan и др., 1995; Smrekar и др., 1997) характеризуются ярко выраженными гравитационными особенностями (Sjogren и др., 1983; Konopliv, 1999): очень крупными положительными аномалиями геоида (до 155 м) и гравитационными аномалиями (до 200–300 мГал), а также значительными отрицательными аномалиями Буге (до 400 мГал). Такие значения гравитационного сигнала свидетельствуют о современной активности и поддержке рельефа поднятий как за счет избыточной плавучести (тепловое разуплотнение), так и, возможно, динамически. Вероятно, поднятия связаны с крупными мантийными диапирами, возможно, активными в настоящее время (McGill и др., 1981; Senske и др., 1991; 1992; Phillips, Hansen, 1994; Stofan и др., 1995; Smrekar и др., 1997; Rathbun и др., 1999; Stofan, Smrekar, 2005; Vezolainen и др., 2004; Basilevsky, Head, 2007).

Короны-источники лопастных равнин, как в области БАФ, так и за ее пределами, относятся к топографическим классам D, W и U. Короны класса D (~44% популяции корон-источников)

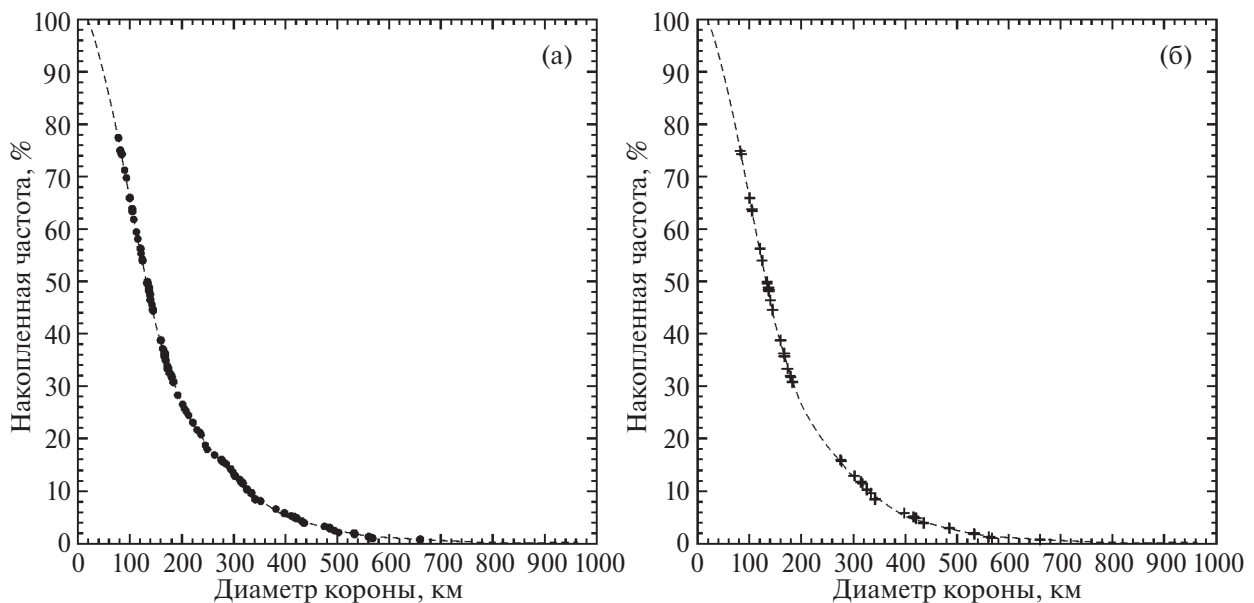


Рис. 2. Частотно-размерное распределение корон-источников лопастных равнин: (а) — все короны-источники (точки); (б) — только те короны, которые представляют чистые случаи источников (крестики). В обоих случаях пунктиром показана непрерывная аппроксимация частотно-размерного распределения всех корон Венеры.

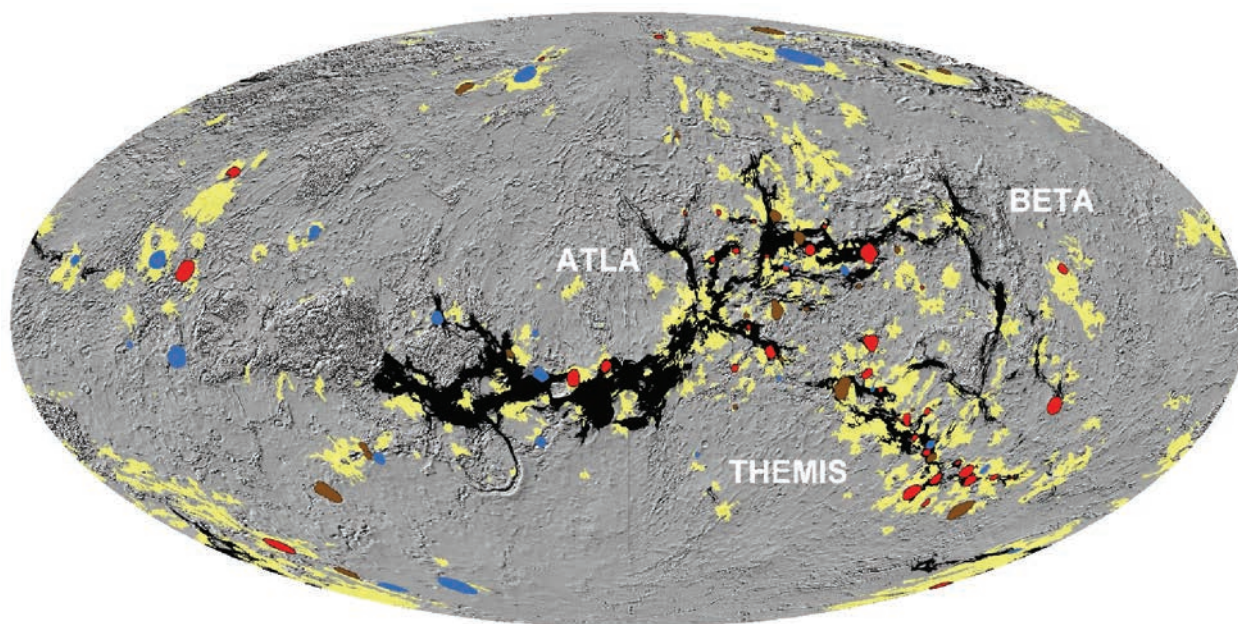


Рис. 3. Короны-источники лопастных равнин. Цветом на карте отмечены их специфические топографические классы: D (красные точки), W (синие точки) и U (коричневые точки), лопастные равнины показаны желтым, рифтовые зоны — черным цветом, геологические границы по (Ivanov, Head, 2011). Изображения в равноплотной проекции Моллвейде, центральный меридиан 180°.

представляют собой куполообразные поднятия, вероятно, отражающие прогрессивную стадию эволюции родительского диапира, когда поверхность над головной частью диапира воздымается за счет тепловой и динамической поддержки (Smrekar, Stofan, 1997). Лопастные равнины, связанные с этими коронами, по-видимому, характеризуют современный этап эволюции диапира. Короны классов W и U представлены в равных пропорциях (по 28%) и характеризуются наличием сложной (W) или простой (U) центральной топографической депрессии, которая, вероятно, формируется после распада и исчезновения тепловой аномалии родительского диапира и, следовательно, характеризует поздние этапы его эволюции.

ОЦЕНКА ЭФФУЗИВНОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ РОДИТЕЛЬСКИХ ДИАПИРОВ ДЛЯ КОРОН-ИСТОЧНИКОВ ЛОПАСТНЫХ РАВНИН

Вполне естественно предположить, что размер (диаметр) короны зависит от размера родительского диапира и над более крупным диапиром формируется более крупная корона, хотя могут быть отклонения от этой тенденции и крупный диапир может приводить к формированию скопления малых корон вместо одной крупной. Так как лопастные равнины относятся к наиболее молодым стратиграфическим подразделениям, их формирование вокруг корон-источников связано

с поздними этапами эволюции родительских диапиров. При этом ожидается, что чем крупнее корона, тем больше площадь связанных с ней полей лопастных равнин.

Возможная тенденция увеличения площади лопастных равнин по мере роста диаметра короны (и, предположительно, родительского диапира) скрывает, однако, потенциальную магматическую активность диапира на поздних стадиях его эволюции. Например, корона меньшего размера может быть окружена полями лопастных равнин, суммарная мощность которых больше (или равна) площади равнин, связанных с более крупной короной. В этом случае, очевидно, что эффузивная продуктивность меньшего диапира выше. Для учета возможных вариаций продуктивности мы в нашей работе пользовались безразмерным параметром P , который представляет собой отношение S_a/S_c , где S_a — площадь лопастных равнин, связанных с короной, а S_c — площадь самой короны-источника.

Мы рассчитали площади лопастных равнин, которые связаны с конкретными коронами, чтобы оценить вулканическую продуктивность корон. Для расчетов мы использовали субпопуляцию корон, которые представляют собой чистые случаи корон-источников, и глобальную геологическую карту Венеры (Ivanov, Head, 2011) в равноплотной проекции Моллвейде.

Для того чтобы охарактеризовать возможные изменения значений отношения P в зависимости от диаметра короны, мы рассмотрели четыре

модели. (1) Площадь лавового фартука (все поля лопастных равнин, пространственно связанные с короной) возрастает строго пропорционально увеличению диаметра короны. (2) Увеличение площади лавового фартука по мере роста диаметра короны происходит случайным образом. (3) По мере увеличения диаметра короны площадь лавового фартука прогрессивно увеличивается. (4) По мере увеличения диаметра короны площадь лавового фартука уменьшается. Во всех случаях модельная корона представляла собой круг заданного диаметра, а лавовый фартук — кольцо вокруг короны. Внутренний диаметр кольца был равен диаметру короны, а внешний диаметр увеличивался по мере роста диаметра короны в зависимости от рассматриваемой модели.

Результаты моделирования представлены на рис. 4. Во всех случаях площадь лопастных равнин, окружающих корону, увеличивалась по мере роста диаметра короны (рис. 4а). Такой результат тривиален и представляет собой следствие того, как была сформулирована модель. Однако следует отметить, что ожидаемое увеличение фартука может происходить либо строго функционально (модели 1, 2 и 4; см. рис. 4а, 4б и 4г), или демонстрировать некоторую степень рассеяния относительно общего тренда (модель 2; см. рис. 4б).

Важные и диагностические изменения наблюдаются, когда мы сравниваем изменения величины отношения P в зависимости от диаметра короны D . В этом случае существуют три типа зависимости P и D .

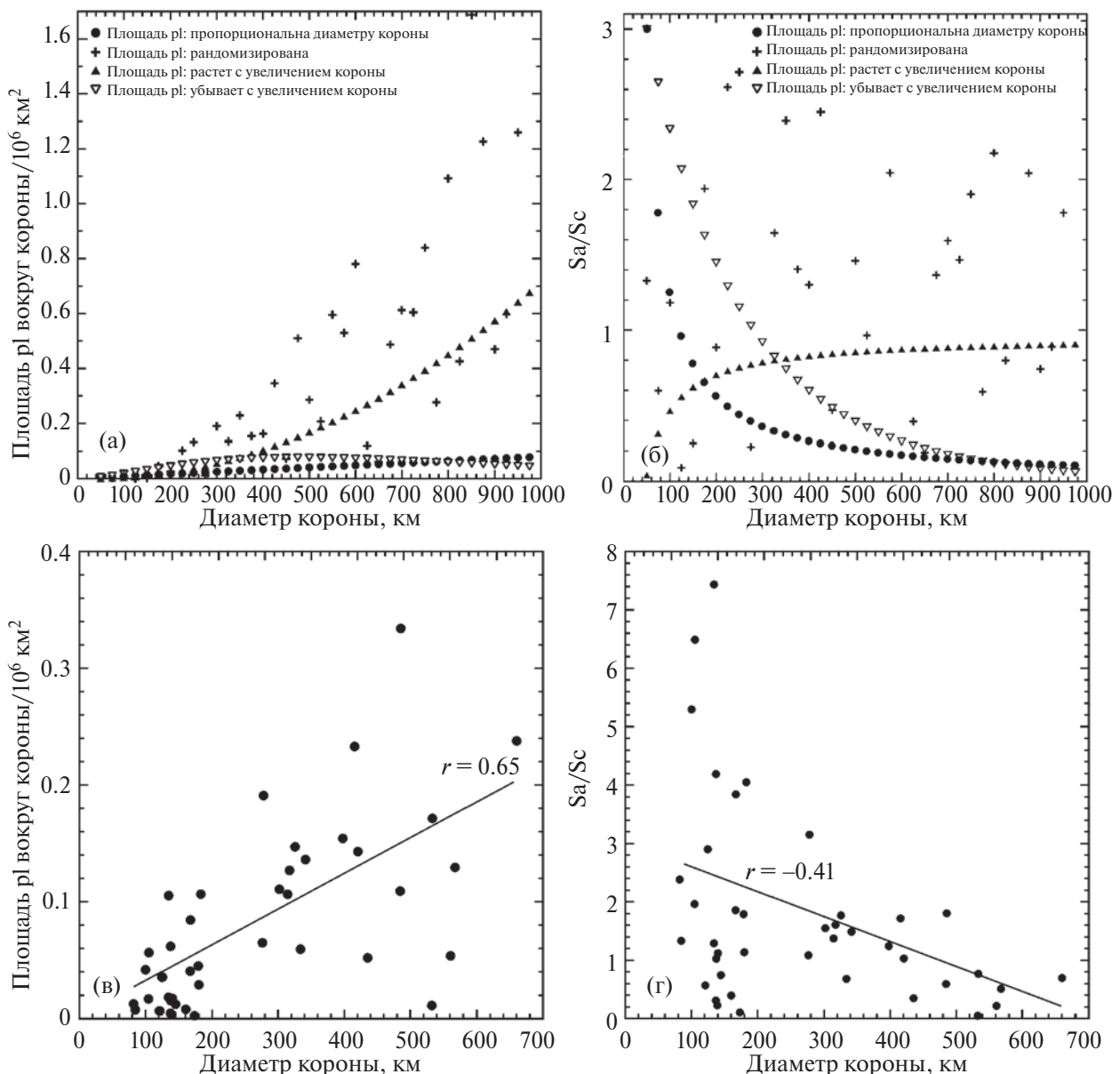


Рис. 4. Модели, показывающие возможные соотношения лопастных равнин и диаметра короны-источника. Обсуждение в тексте.

1. По мере увеличения диаметра короны величина отношения P снижается. Этот тип зависимости соответствует первой и четвертой из рассматриваемых моделей. В первой площадь лавового фартука увеличивается пропорционально росту диаметра короны, а в четвертой — уменьшается. Корреляция между значениями параметров P и D отрицательная (коэффициенты корреляции для моделей 1 и 4: $r = -0.67$ и $r = -0.64$ соответственно, хотя зависимость между параметрами нелинейная).

2. Значения отношения P хаотично меняются по мере увеличения диаметра короны (рис. 46). Этот случай соответствует модели, в которой площадь лавового фартука растет по мере роста диаметра короны, но случайным образом. Корреляция между значениями параметров P и D в этом случае отсутствует ($r = 0.05$).

3. Значения отношения P увеличиваются по мере роста диаметра короны, (рис. 46). Этот случай соответствует модели 3, в которой площадь лавового фартука прогрессивно увеличивается по мере роста диаметра короны. В этом случае корреляция между параметрами P и D положительная ($r = 0.75$, хотя зависимости между этими параметрами нелинейные).

ОБСУЖДЕНИЕ

Короны-источники лопастных равнин составляют около 17% от всей популяции корон. По определению, лопастные равнины формировались в течение Атлийского периода, длительность которого составляет примерно 2/3 всей геологической истории Венеры (Basilevsky, Head, 1998; Ivanov, Head, 2011; 2015). Если формирование корон действительно связано с подъемом мантийных диапиров, на что указывают характерные особенности корон (Nikishin, 1986; 1990; Pronin, Stofan, 1990; Janes и др., 1992; Squyres и др., 1992; Stofan и др., 1992; Koch, Manga, 1996; Smrekar, Parmentier, 1996; Smrekar, Stofan, 1997; Jellinek и др., 2002; Johnson, Richards, 2003; Davaille и др., 2017), то эффузивный вулканизм корон может отражать ту часть картины мантийной конвекции, которая связана с диапирами. Отсутствие признаков тектоники плит в течение геологической истории Венеры (Barsukov и др., 1986; Basilevsky и др., 1986), вероятно, указывает на то, что в этот промежуток времени мантийный диапиризм доминировал как стиль мантийной конвекции, ключом к расшифровке которого является вулканизм корон.

Рассмотрим три возможных сценария изменения темпа мантийного диапиризма с течением времени.

1. Мантийные диапиры могли формироваться примерно в одном темпе на протяжении геологической истории Венеры. В этом случае из-за

длительности Атлийского периода количество корон-источников лопастных равнин должно доминировать в составе всей популяции корон.

2. Темп мантийного диапиризма возрастал с течением времени и, следовательно, частота формирования корон и связанных с ними тектонических и вулканических комплексов тоже возрастала в более молодом геологическом времени. В этом сценарии, как и в предыдущем, следовало бы ожидать доминирования в общей популяции корон-источников лопастных равнин.

3. Темп формирования мантийных диапиров замедлялся с течением времени и/или увеличение мощности (толщины) литосферы препятствовало проникновению диапиров ближе к поверхности и, соответственно, формированию тектонических и вулканических компонентов корон. В рамках такого сценария следует ожидать уменьшения доли корон-источников лопастных равнин в общей популяции. Хотя более древние короны были многочисленнее, они сохранились преимущественно как тектонические комплексы, не полностью затопленные более поздними региональными равнинами. Более молодые короны демонстрируют оба компонента (вулканический и тектонический), но представляют собой более редкие образования.

Полученные нами результаты противоречат первым двум сценариями изменений характера мантийной конвекции и полностью согласуются с предсказаниями третьего сценария. Таким образом, можно сделать вывод, что на протяжении геологической истории Венеры либо темп формирования мантийных диапиров убывал с течением времени, либо реологический литосферный фильтр становился более эффективным, либо оба эти фактора совместно оказывали влияние на характер мантийной конвекции мантии. Частотно-размерное распределение корон-источников показывает, что малые короны доминируют в их популяции (рис. 2). Следовательно, фильтрующий эффект литосферы не оказывал существенного влияния на проявления мантийного диапиризма на поверхности, малая доля корон-источников в общей популяции корон отражает снижение темпа формирования мантийных диапиров.

Площадь лопастных равнин, потоки которых можно однозначно связать с той или иной короной, позволяют высветить еще один аспект формирования и эволюции мантийных диапиров на Венере, а именно соотношение их эффузивной и интрузивной активности. Мы рассмотрели четыре возможных модели изменения площади лопастных равнин, связанных с коронами. Первая из них представляет возможный природный

случай, когда магмогенерирующая способность диапиров увеличивается пропорционально увеличению их размера. Такой пропорциональности можно было бы достичь, если головная часть всех диапиров, генерирующих лопастные равнины, располагалась бы на одной глубине, соответствующей либо зоне нейтральной плавучести (ЗНП), либо подошве литосферы, которая может играть роль реологической ловушки для диапиров. В этом случае декомпрессионное плавление в головной части диапира приводило бы к формированию магматических резервуаров, объем которых контролировался бы в первую очередь размером диапира. Для таких диапиров, при прочих равных условиях, соотношение между интрузивной и эффузивной активностью сохранялось бы неизменным и увеличение размеров магматического резервуара в головной части диапира приводило бы к пропорциональному увеличению объемов как эффузивных тел (лавовых потоков), так и интрузивных тел, например, роев даек (Head, Wilson, 1992; Grosfils, Head, 1994; Lopez и др., 1999; Herrick, 1999; Ernst и др., 2001).

Вторая модель может представлять такой сценарий эволюции родительских диапиров, в котором глубина головной части диапира меняется случайным образом в зависимости от вариаций плотностных и реологических свойств литосферы, объема и тепловой истории родительского диапира. В этом сценарии случайная, закономерно меняющаяся глубина головной части диапира

приводит к тому, что баланс между интрузивной и эффузивной активностью может сохраняться только применительно к каждому конкретному случаю. Следовательно, объем эффузивных тел закономерно меняется от одной короны к другой, хотя общее увеличение площади лавовых потоков увеличивается по мере роста потенциального магматического резервуара.

Третья модель может описывать ситуацию, когда более крупные диапиры поднимаются ближе к поверхности. В этом случае эффективность декомпрессионного плавления увеличивается, а объем магматического резервуара возрастает непропорционально размеру диапира. Более мелкое положение головной части диапира может приводить к тому, что дайки вокруг главного магматического резервуара, будут чаще пересекать поверхность и, таким образом, усиливать эффузивную активность короны и уменьшать общий объем интрузивных тел, связанных с диапиром.

Четвертая модель — антипод третьей и описывает ситуацию, когда глубина головной части увеличивается для более крупных диапиров. В этом случае их магматическая активность может смещаться в сторону преимущественного формирования интрузивных тел, а объем эффузивного материала может уменьшаться.

Мы сравнили предсказания моделей с результатами измерений площадей лопастных равнин, которые однозначно связаны с той или иной короной (рис. 4в). Между площадью лопа-

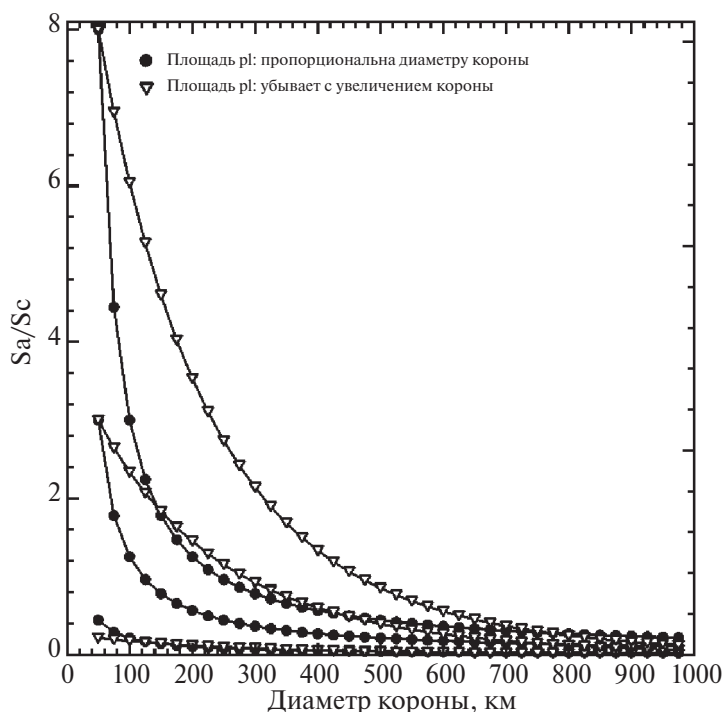


Рис. 5. Вариации значений параметра P в зависимости от модели: линии с точками соответствуют модели 1 (рис. 4б); линии с треугольниками соответствуют модели 4 (рис. 4б).

ных равнин и площадью короны-источника наблюдается заметная положительная корреляция ($r = 0.65$), хотя разброс значений площади равнин велик. Такая корреляция свидетельствует, тем не менее, что увеличение размера родительского диапира, действительно ведет к повышению эффузивной активности корон и увеличению площади лавового фартука. Полученный результат, однако, не позволяет оценить достоверность той или иной из рассматриваемых моделей, так как для всех них увеличение диаметра короны сопровождается ростом площади окружающих лопастных равнин (рис. 4а).

Сопоставление параметров P и D для реальных корон (рис. 4г) показывает, что между их значениями существует отрицательная корреляция, хотя и довольно слабая ($r = -0.41$). Тем не менее наблюдаемые соотношения P и D позволяют отвергнуть модели 2 (случайные изменения площади лавового фартука вокруг корон) и 3 (прогрессивное увеличение площади лопастных равнин). Следовательно, нет оснований считать, что глубина зоны нейтральной плавучести была разной для разных корон (модель 2) или уменьшалась для более крупных корон (модель 3).

Отрицательная корреляция параметров P и D (рис. 4в) не противоречит первой (увеличение лавового фартука пропорционально росту диаметра короны, рис. 4г) и четвертой (прогрессивное уменьшение площади лопастных равнин по мере роста диаметра короны, рис. 4г) модели. Однако предсказания этих моделей полностью перекрываются в отношении изменений значений P и D (рис. 5), и поэтому мы не можем оценить правдоподобность моделей на основании полученных нами результатов. Можно только отметить, что нет очевидных природных факторов, приводящих к систематическому увеличению глубины зоны нейтральной плавучести более крупных диапиров. Поэтому четвертая модель представляется менее реалистичной, и мы склонны рассматривать первую модель, предсказывающую примерно одинаковую глубину ЗНП для всех корон-источников лопастных равнин, как модель, в большей мере характеризующую реальную ситуацию на Венере.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное нами исследование пространственной и, вероятно, генетической связи корон и лопастных равнин позволяет сделать два важных вывода, касающихся изменения картины мантийной конвекции на Венере.

1. Только 17% всей популяции корон Венеры являются источниками молодых лав, образующих лопастные равнины Атлийского периода. Такая малая доля вулканических корон-источников го-

ворит о том, что либо темп формирования мантийных диапиров убывал с течением времени на протяжении геологической истории Венеры, либо утолщающаяся литосфера все более эффективно отфильтровывала поднимающиеся диапиры, либо оба эти фактора совместно оказывали влияние на характер мантийной конвекции. Частотно-размерное распределение корон-источников показывает, что малые короны доминируют в их популяции (рис. 2). Следовательно, фильтрующий эффект литосферы не оказывал существенного влияния на проявления мантийного диапиризма на поверхности, малая доля корон-источников в общей популяции корон отражает снижение темпа формирования мантийных диапиров.

2. Площадь лопастных равнин, которые можно однозначно связать с той или иной короной, и площадь самой короны связаны отрицательной корреляцией (рис. 4в). Такие соотношения допускают существование только двух моделей завершающих стадий эволюции диапиров: (а) все родительские диапиры корон-источников лопастных равнин располагались примерно на одной глубине, соответствующей либо зоне нейтральной плавучести, либо подошве реологического барьера литосферы; (б) глубина, на которой останавливался подъем диапиров, была больше для более крупных диапиров. Так как для этой модели нет очевидных физических причин, мы предполагаем, что в течение Атлийского периода геологической истории Венеры либо существовала единая зона нейтральной плавучести, либо подошва литосферы располагалась примерно на одном уровне.

Работа выполнена по Госзаданию ГЕОХИ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гусева Е.Н., Иванов М.А. Короны Венеры: геологические, топографические и морфометрические характеристики // Астрон. вестн. 2022. Т. 56. № 2. С. 84–91. (Guseva E.N., Ivanov M.A. Coronae of Venus: geological, topographic and morphometric characteristics // Sol. Syst. Res. 2022. V. 56. № 2. P. 76–83).
- Гусева Е.Н., Иванов М.А. Пространственные и генетические соотношения корон, лопастных равнин и рифтовых зон Венеры // Астрон. вестн. 2023. Т. 57. № 2. С. 113–123. (Guseva E.N., Ivanov M.A. Spatial and genetic relationships of coronae, lobate plains and rift zones of Venus // Sol. Syst. Res. 2023. V. 57. № 2. P. 112–121).
- Aittola M., Kostama V.-P. Venusian novae and arachnoids: Characteristics, differences and the effect of the geological environment // Planet. and Space Sci. 2001. V. 48. P. 1479–1489.
- Aittola M., Raitala J. Venusian novae: Classification and associations to volcano-tectonic structures // Sol. Syst. Res. 2007. V. 41. № 5. P. 395–412.

- Barsukov V.L., Basilevsky A.T., Burba G.A., Bobinna N.N., Kryuchkov V.P., Kuzmin R.O., Nikolaeva O.V., Pronin A.A., Ronca L.B., Chernaya I.M., and 20 co-authors. The geology and geomorphology of the Venus surface as revealed by radar images obtained by Venera 15 and 16 // *J. Geophys. Res.* 1986. V. 91. № B4. P. D378–D398.
- Basilevsky A.T., Aittola M., Raitala J., Head J.W. Venus astra/novae: Estimates of the absolute time duration of their activity // *Icarus*. 2009. V. 203. P. 337–351.
- Basilevsky A.T., Head J.W. Global stratigraphy of Venus: Analysis of a random sample of thirty-six test areas // *Earth, Moon and Planets*. 1995. V. 66. P. 285–336.
- Basilevsky A.T., Head J.W. The geologic history of Venus: A stratigraphic view // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. P. 8531–8544.
- Basilevsky A.T., Head J.W. Geologic units on Venus: Evidence for their global correlation // *Planet. and Space Sci.* 2000. V. 48. P. 75–111.
- Basilevsky A.T., Head J.W. Beta Regio, Venus: Evidence for uplift, rifting, and volcanism due to a mantle plume // *Icarus*. 2007. V. 192. P. 167–186.
- Basilevsky A.T., Pronin A.A., Ronca L.B., Kryuchkov V.P., Sukhanov A.L., Markov M.S. Styles of tectonic deformations on Venus: Analysis of Venera 15 and 16 data // *Proc. 16th Lunar and Planet. Sci. Conf. Part 2. J. Geophys. Res.* 1986. V. 91. № B4. P. D339–D411.
- Basilevsky A.T., Raitala J. Morphology of selected novae (astra) from the analysis of Magellan images at Venus // *Planet. and Space Sci.* 2002. V. 50. P. 21–39.
- Campbell D.B., Stacy N.J.S., Newman W.I., Arvidson R.E., Jones E.M., Musser G.S., Roper A.Y., Schaber C. Magellan observations of extended impact crater related features on the surface of Venus // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. № E10. P. 16.249–16.277.
- Crumpler L.S., Aubele J. Volcanism on Venus // *Encyclopedia of Volcanoes* / Eds: Sigurdsson H., Houghton B., McNutt S.R., Rymer H., Stix J. Academic Press, 2000. P. 727–770.
- Davaille A., Smrekar S.E., Tomlinson S. Experimental and observational evidence for plume-induced subduction on Venus // *Nature Geosci.* 2017. V. 10. № 5. P. 349–355.
- Ernst R.E., Grosfils E.B., Mège D. Giant dike swarms: Earth, Venus and Mars // *Ann. Rev. Earth and Planet. Sci.* 2001. V. 29. P. 489–534.
- Grindrod P.M., Hoogenboom T. Coronae on Venus // *Astron. and Geophys.* 2006. V. 47. P. 3.16–3.21.
- Grosfils E., Head J.W. The global distribution of giant radiating dike swarms on Venus: Implications for the global stress state // *Geophys. Res. Lett.* 1994. V. 21. P. 701–704.
- Head J.W., Wilson L. Magma reservoirs and neutral buoyancy zones on Venus: Implications for the formation and evolution of volcanic landforms // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. № E3. P. 3877–3903.
- Herrick R.R. Small mantle upwellings are pervasive on Venus and Earth // *Geophys. Res. Lett.* 1999. V. 26. № 6. P. 803–806.
- Herrick R.R., Hensley S. Surface changes observed on a Venusian volcano during the Magellan mission // *Science*. 2023. V. 379. № 6638. P. 1205–1208.
- Ivanov M.A., Head J.W. Geology of Venus: Mapping of a global geotraverse at 30° N latitude // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. № E8. P. 17515–17566.
- Ivanov M.A., Head J.W. The Lada Terra rise and Quetzalpetlatl Corona: A region of long-lived mantle upwelling and recent volcanic activity on Venus // *Planet. and Space Sci.* 2010. V. 58. P. 1880–1894.
- Ivanov M.A., Head J.W. Global geological map of Venus // *Planet. and Space Sci.* 2011. V. 59. P. 1559–1600.
- Ivanov M.A., Head J.W. The history of volcanism on Venus // *Planet. and Space Sci.* 2013. V. 84. P. 66–92.
- Ivanov M.A., Head J.W. The history of tectonism on Venus: A stratigraphic analysis // *Planet. and Space Sci.* 2015. V. 113. P. 10–32.
- Janes D.M., Squyres S.W., Bindshadler D.L., Baer G., Schubert G., Sharpton V.L., Stofan E.R. Geophysical models for the formation and evolution of coronae on Venus // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. № E10. P. 16055–16068.
- Jellinek A.M., Lenardic A., Manga M. The influence of interior mantle temperature on the structure of plumes: Heads for Venus, tails for the Earth // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29. № 11. P. 27–1–27–4.
- Johnson C.L., Richards M.A. A conceptual model for the relationship between coronae and large-scale mantle dynamics on Venus // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. № E6. P. 12–1–12–18.
- Koch D.M., Manga M. Neutrally buoyant diapirs: A model for Venus coronae // *Geophys. Res. Lett.* 1996. V. 23. № 3. P. 225–228.
- Konopliv A.S., Banerdt W.B., Sjogren W.L. Venus Gravity: 180th degree and order model // *Icarus*. 1999. V. 139. P. 3–18.
- Krassilnikov A.S., Head J.W. Novae on Venus: Geology, classification, and evolution // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. № E9. P. 5108.
- Lopez I., Marquez A., Oyarzun R. Are coronae restricted to Venus?: Corona-like tectonovolcanic structures on Earth // *Earth, Moon and Planets*. 1999. V. 77. P. 125–137.
- McGill G.E., Steenstrup S.J., Barton C., Ford P.G. Continental rifting and the origin of Beta Regio, Venus // *Geophys. Res. Lett.* 1981. V. 8. № 7. P. 737–740.
- Nikishin A.M. Hot spot tectonics on Venus: implications for rifting and doming // *Lunar and Planet. Sci. Conf.* 1986. V. XVII. P. 615–616.
- Nikishin A.M. Tectonics of Venus: a review // *Earth, Moon and Planets*. 1990. V. 50/51. P. 101–125.
- Phillips R.J., Hansen V.L. Tectonic and magmatic evolution of Venus // *Ann. Rev. Earth and Planet. Sci.* 1994. V. 22. P. 597–654.
- Phillips R.J., Raubertas R.F., Arvidson R.E., Sarkar I.C., Herrick R.R., Izenberg N., Grimm R.E. Venus impact

- craters and resurfacing history // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. № E10. P. 15923–15948.
- Pronin A.A., Stofan E.R.* Coronae on Venus: Morphology and distribution // *Icarus*. 1990. V. 87. P. 452–474.
- Rathbun J.A., Janes D.M., Squyres S.W.* Formation of Beta Regio, Venus: Results from measuring strain // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. P. 1917–1927.
- Senske D.A., Head J.W., Stofan E.R., Campbell D.B.* Geology and structure of Beta Regio, Venus: Results from Areibo radar imaging // *Geophys. Res. Lett.* 1991. V. 18. № 6. P. 1159–1162.
- Senske D.A., Schaber G.G., Stofan E.R.* Regional topographic rises on Venus: Geology of western Eistla Regio and comparison to Atla Regio and Beta Regio // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. P. 13395–13420.
- Shalygin E.V., Markiewicz W.J., Basilevsky A.T., Titov D.V., Ignatiev N.I., Head J.W.* Active volcanism on Venus in the Ganiki Chasma rift zone // *J. Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42. P. 4762–4769.
- Sjogren W.L., Bills B.G., Birkeland P.B., Esposito P.B., Konopliv A.R., Mottinger N.A., Ritke S.J., Phillips R.J.* Venus gravity anomalies and their correlations with topography // *J. Geophys. Res.* 1983. V. 88. № B2. P. 1119–1128.
- Smrekar S.E., Stofan E.R.* Corona formation and heat loss on Venus by coupled upwelling and delamination // *Science*. 1997. V. 277. P. 1289–1294.
- Smrekar S.E., Stofan E.R., Kiefer W.S.* Large volcanic rises on Venus // *Venus II* / Eds: Bougher S.W., Hunten D.M., Phillips R.J. Univ. Arizona Press, 1997. P. 845–878.
- Smrekar S.E., Parmentier E.M.* The interaction of mantle plumes with surface thermal and chemical boundary layers: Applications to hotspots on Venus // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. № B3. P. 5397–5410.
- Squyres S.W., Janes D.M., Baer G., Bindshandler D.L., Shubert G., Sharpton V.L., Stofan E.R.* The morphology and evolution of coronae on Venus // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. № E8. P. 13611–13634.
- Stofan E.R., Sharpton V.L., Shubert G., Baer G., Bindshandler D.L., Janes D.M., Squyres S.W.* Global distribution and characteristics of coronae and related features on Venus: implication for origin and relation to mantle processes // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. № E8. P. 13347–13378.
- Stofan E.R., Smrekar S.E., Bindshadler D.L., Senske D.A.* Large topographic rises on Venus: Implications for mantle upwelling // *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100. № E11. P. 23317–23327.
- Stofan E.R., Smrekar S.E., Tapper S.W., Guest J.E., Grindrod P.M.* Preliminary analysis of an expanded corona database for Venus // *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28. P. 4267–4270.
- Stofan E.R., Smrekar S.E.* Large topographic rises, coronae, large flow field, and large volcanoes on Venus: Evidence for mantle plumes? // *Geol. Soc. Am. Spec. Paper*. 2005. V. 388. P. 841–861.
- Vezolainen A.V., Solomatov V.S., Basilevsky A.T., Head J.W.* Uplift of Beta Regio: Three-dimensional model // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. id. E08007 (8 p.).

УДК 523.34–834

АНАЛИЗ КОНЦЕНТРАЦИЙ ВОДОРОДА В ТЕКТОНИЧЕСКИ ДЕФОРМИРОВАННОМ УДАРНОМ КРАТЕРЕ В РАЙОНЕ ЮЖНОГО ПОЛЮСА ЛУНЫ

© 2024 г. А. Б. Санин^{а,*}, И. Г. Митрофанов^а, А. Т. Базилевский^б,
М. Л. Литвак^а, М. В. Дьячкова^а

^а Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

^б Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

* e-mail: sanin@np.cosmos.ru

Поступила в редакцию 06.06.2023 г.

После доработки 15.08.2023 г.

Принята к публикации 02.09.2023 г.

В статье приведено описание кратера в краевой зоне южной полярной области Луны с координатами центра 126.59° з. д., 64.32° ю. ш. Диаметр кратера составляет 34 км. Он обладает трещиноватым днищем, что считается признаком внедрения магмы в подкратерное пространство. Абсолютный возраст образования изучаемого кратера был оценен равным ~3.85 млрд лет по пространственной плотности наложенных на его вал малых кратеров. В окрестностях изучаемого кратера преобладает низкожелезистый анортозитовый материал. Можно утверждать, что бассейн исследуемого кратера очень сухой по сравнению с его окрестностью. Существенная потеря водорода/воды и ее перераспределения со дна кратера на территорию вокруг кратера могли быть вызваны переработкой поверхности вследствие внедрения магмы под кратер, следы которого прослеживаются по наличию трещин на днище кратера.

Ключевые слова: Луна, кратер, трещиноватое днище, ложбины, текстура реголита, возраст кратера, возраст материала днища, магматическая активность, ЛЕНД, WEN, водород, вода

DOI: 10.31857/S0320930X24010073, **EDN:** OHKJIN

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время полярные и приполярные области Луны вызывают большой интерес у научного сообщества, так как там находятся локальные участки, где могли сохраниться залежи летучих веществ, включая водяной лед (см., например, Pieters и др., 2009; Colaprete и др., 2010; Mitrofanov и др., 2010; Sanin и др., 2017). Только в 2023 г. были осуществлены запуски двух посадочных аппаратов, которые, как планировалось, должны были прилуниться в окрестности 70 параллели в южном полушарии Луны. К сожалению, российская посадочная станция Луна-25 (планировавшееся место посадки: 43.544° в. д., 69.545° ю. ш., Казмерчук и др., 2016; Митрофанов и др., 2021) была потеряна в результате столкновения с поверхностью Луны. Индийская посадочная станция Chandrayaan-3 с небольшим луноходом Pragyan 23 августа совершила успешную посадку в точке с координатами 32.319° в. д., 69.373° ю. ш. (по данным индийского космического агентства https://www.isro.gov.in/chandrayaan3_gallery.html).

Считается, что водяной лед может присутствовать на дне вечнотененных полярных кратеров, где температура достигает всего нескольких десятков кельвинов (см., например, Watson и др., 1961; Vasavada и др., 1999). К сожалению, такие кратеры малопригодны и труднодоступны для посадок космических аппаратов. Тем не менее орбитальные исследования на борту аппарата NASA Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) показали, что повышенное содержание водорода обнаруживается и в освещенных районах, где водяной лед мог сохраниться под верхним сухим изолирующим слоем реголита (Mitrofanov и др., 2012; Sanin и др., 2017).

Таким образом, изучение любых форм лунного рельефа, включая относительно небольшие кратеры, находящиеся в околополярных районах, представляет интерес с точки зрения возможного присутствия летучих веществ.

В материковой местности в краевой зоне южной полярной области Луны находится кратер диаметром 34 км с координатами центра 126.59° з. д., 64.32° ю. ш. Он обладает трещиноватым днищем,

что считается признаком внедрения магмы в подкратерное пространство (см., например, Schultz, 1976; Jozwiak и др., 2012). Фотогеологический анализ снимков LROC WAC и NAC показал, что кратер образовался ~3.85 млрд лет назад, а трещиноватость его днища, указывающая на внедрение под него магмы, возникла в интервале (200–300) млн – 1 млрд лет назад (Базилевский и др., 2024). Сравнительная близость этого кратера к полюсу заставляет думать, что в реголите на его днище может быть примесь льда H_2O и других летучих компонентов. А это вызывает вопрос, как типичные для полярных областей Луны скопления замороженных летучих в реголите могли реагировать с эффектом внедрения магмы: 1) никак, 2) не накапливаясь за счет подогрева снизу или 3) пары магматических летучих могли быть дополнительным источником для замороженных летучих реголита.

ОПИСАНИЕ КРАТЕРА

Изучаемый кратер (рис. 1) располагается в типичной материковой области, где преобладающие формы рельефа – это ударные кратеры диаметром в десятки километров и более, наложенные на равнины материкового типа, по-видимому, родственные равнинам места посадки КК Apollo-16 (Hodges, Muehlberger, 1981).

На рис. 1 видно, что основные элементы рельефа поверхности днища изучаемого кратера – холмы и ложбины, иногда уступы. Они полого-склонные с крутизной склонов не более 10° – 15° , в редких случаях до 20° . В ряде мест внутренних

склон изучаемого кратера переходит в дугообразные в плане (параллельные очертаниям вала кратера) ложбины глубиной 50–150 м от среднего уровня поверхности днища (Базилевский и др., 2024). Эта особенность части кратеров с трещиноватыми днищами отмечалась в упомянутых выше работах Schultz (1976) и Jozwiak и др. (2012). Ложбины, а это сглаженной формы трещины, характеризуются длиной от 2 до 10 км, шириной 0.3–1 км и глубиной 50–150 м. Расположение ложбин в плане полигональное с элементами дугообразного. Уступы наблюдаются в околосклонных частях днища на севере, юге и юго-востоке. Их длина 6–10 км и высота 50–150 м.

Морфология днища кратера также изучалась на снимках LROC NAC с разрешением около 1 м, полученных при высотах Солнца над горизонтом 14.3° и 24.1° . На этих изображениях видно, что на краях ложбин нет резких уступов. Крутизна их внутренних склонов сверху вниз постепенно увеличивается, а потом уменьшается.

На краю одной из ложбин находится кратер диаметром около 700 м. На изображении, полученном при высоте Солнца 14.3° , восточная часть кратера затенена, т. е. крутизна верхней части его внутреннего склона больше 14.3° . Край тени находится примерно в центре этого кратера. А это значит, что отношение глубины этого кратера к его диаметру примерно 0.25. Судя по крутизне внутреннего склона этого кратера, он относится к морфологическому классу В, но с необычно большим отношением глубины к диаметру. Согласно этим характеристикам, абсолютный возраст этого кратера не более 1 млрд лет (Basilevsky,

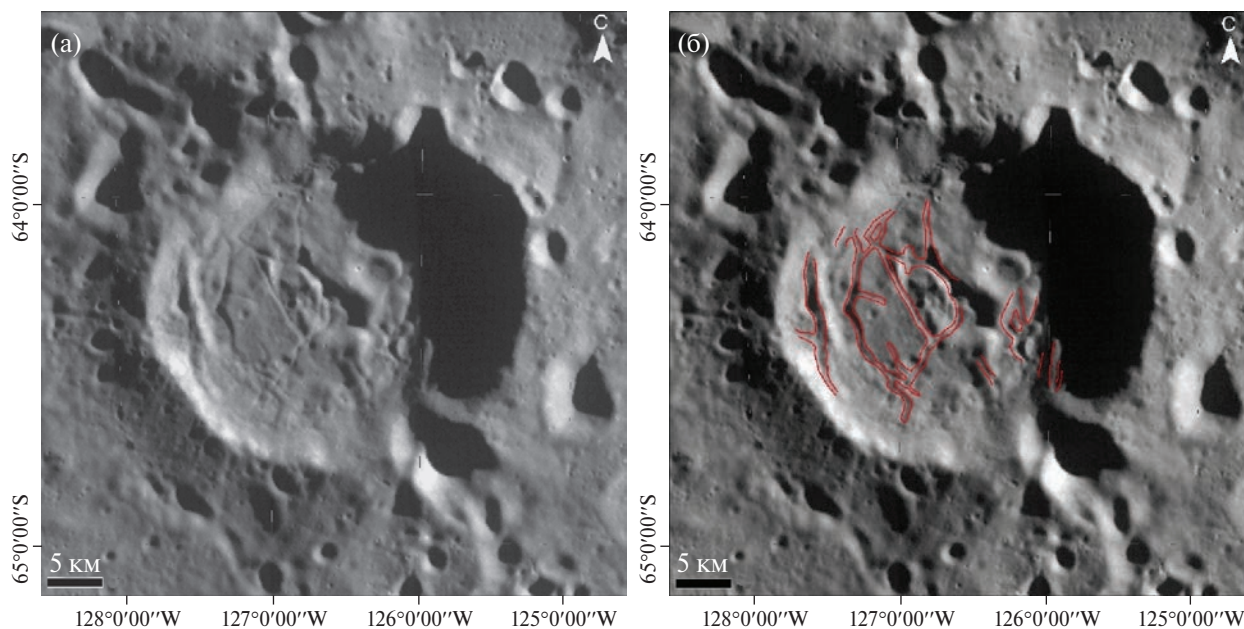


Рис. 1. Изображение изучаемого кратера: (а) – фрагмент мозаики снимков WAC – WAC_GLOBAL_P900S0000_100M; (б) – то же с показанными двойными красными линиями ложбинами (трещинами) на дне кратера.

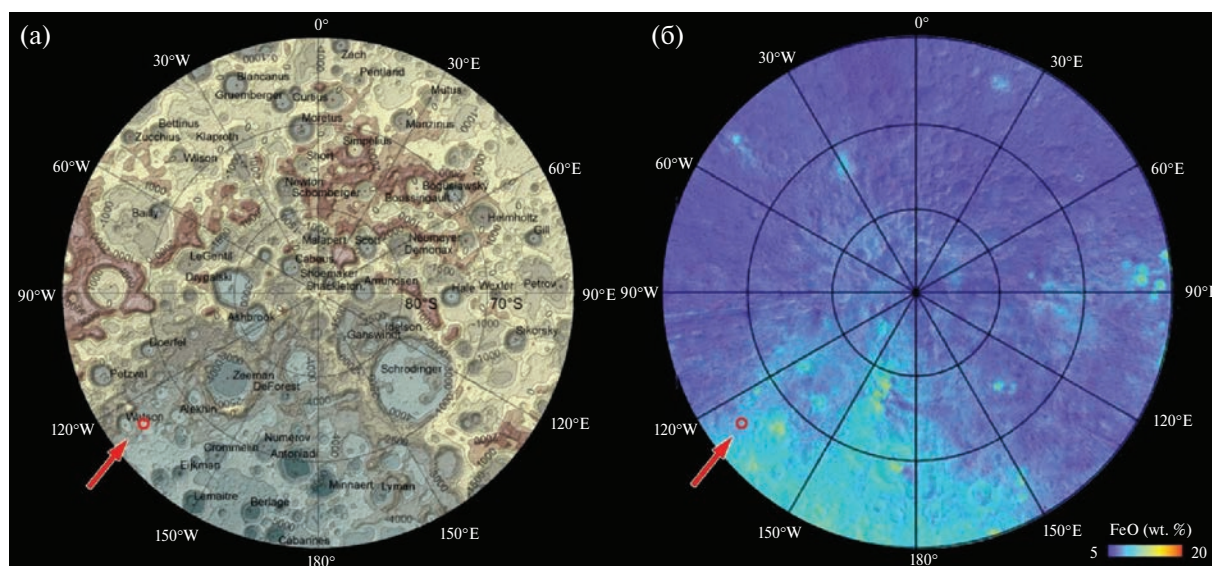


Рис. 2. Положение изучаемого кратера (красные стрелка и кружок): (а) — на гипсометрической карте южной полярной области Луны (Гришакина и др., 2014); (б) — на карте содержания FeO в этой же области по Lemelin и др. (2022).

1976; Базилевский, 2015). Кратер диаметром 700 м в момент образования должен был проникнуть через слой реголита в скальное основание. Но на его валу не видно камней. Очевидно, они разрушились под воздействием ударов метеоритов и суточных колебаний температуры поверхности. Из оценок Basilevsky и др. (2013; 2015) и Li и др. (2018) следует, что время, необходимое для практически полного разрушения камней метрового диапазона размеров на поверхности Луны, составляет 200–300 млн лет. Таким образом, возраст этого 700-метрового кратера, вероятно, находится в пределах (200–300) млн – 1 млрд лет (Базилевский и др., 2024).

Абсолютный возраст образования изучаемого 34-километрового кратера был оценен по пространственной плотности наложенных на его вал малых кратеров (Базилевский и др., 2024) и оказался равным ~3.85 млрд лет назад. Следует, однако, отметить, что в окрестностях изучаемого кратера, включая его вал, много вторичных кратеров и какая-то часть малых кратеров, использованных для оценки возраста, могут быть вторичными. То есть приведенная оценка может быть завышена. Подсчет пространственной плотности малых кратеров на днище изучаемого кратера привел к двум оценкам: ~1 млрд лет и ~3.5 млрд лет. Первая, возможно, соответствует возрасту переработки поверхности при внедрении под кратер магмы и, соответственно, возрасту образования трещин растяжения, что согласуется с оценкой, приведенной в предыдущем абзаце этой статьи. А второй — возрасту изучаемого кратера. Очевидно, внедрение магмы в подкратерное пространство произошло гораздо позже образования изучаемого кратера (Базилевский и др., 2024).

Минералогический и химический состав поверхности в южной полярной области, включая окрестности изучаемого кратера, рассматривался в работе Lemelin и др. (2022) по данным измерений Kaguya Spectral Profiler. На рис. 2 приведена гипсометрическая карта южной полярной области и результаты измерений там FeO в материале поверхности.

На этом рисунке видно, что в окрестностях изучаемого кратера преобладает низкожелезистый, очевидно, анортозитовый материал. По данным Taylor и др. (1991), в пристинных анортозитах Луны содержится от 0.2 до 6% FeO (таблица A6.11 у Taylor и др., 1991). По-видимому, изучаемый кратер образован в анортозитовой мишени.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ WEN

Данные о распределении водорода в окрестности исследуемого кратера могут быть получены из измерений российского прибора ЛЕНД, установленного на борту КА NASA LRO. Многолетняя непрерывная работа на орбите Луны начиная с 2009 г. позволила накопить достаточную статистику и построить карты распределения водорода в приповерхностном лунном грунте (на глубину до 1 м) не только полярных, но и приполярных областей, а коллимирующая способность прибора — отличить кратер с характерным размером 30 км от его окружения. Лунные карты эквивалентной воды (обозначается термином WEN — понятие, в котором весь обнаруженный водород приписывается водному эквиваленту) с высоким пространственным разрешением были представлены в работе Sanin и др., (2017), где было показано, что ряд локальных областей внутри и в окрестности

вечнозатененных лунных кратеров может содержать в среднем до 0.5% водяного льда по массовой доле. При проверке гипотезы о двухслойном строении грунта, когда сухой верхний слой с толщиной от нескольких десятков см до 1 м покрывает водосодержащий слой, численные оценки показали, что содержание водяного льда может достигать до нескольких процентов по массовой доле.

В этой работе мы воспользовались алгоритмом оценки содержания WEN, предложенным в работе Sanin и др. (2017), и построили карту распре-

ления WEN в окрестности исследуемого кратера, которая показана на рис. 3. Из карты хорошо видно, что величина WEN варьируется от нескольких десятков ppm (частей на миллион) до 250 ppm.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наибольший интерес в полученном результате представляет тот факт, что с высокой статистической значимостью можно утверждать,

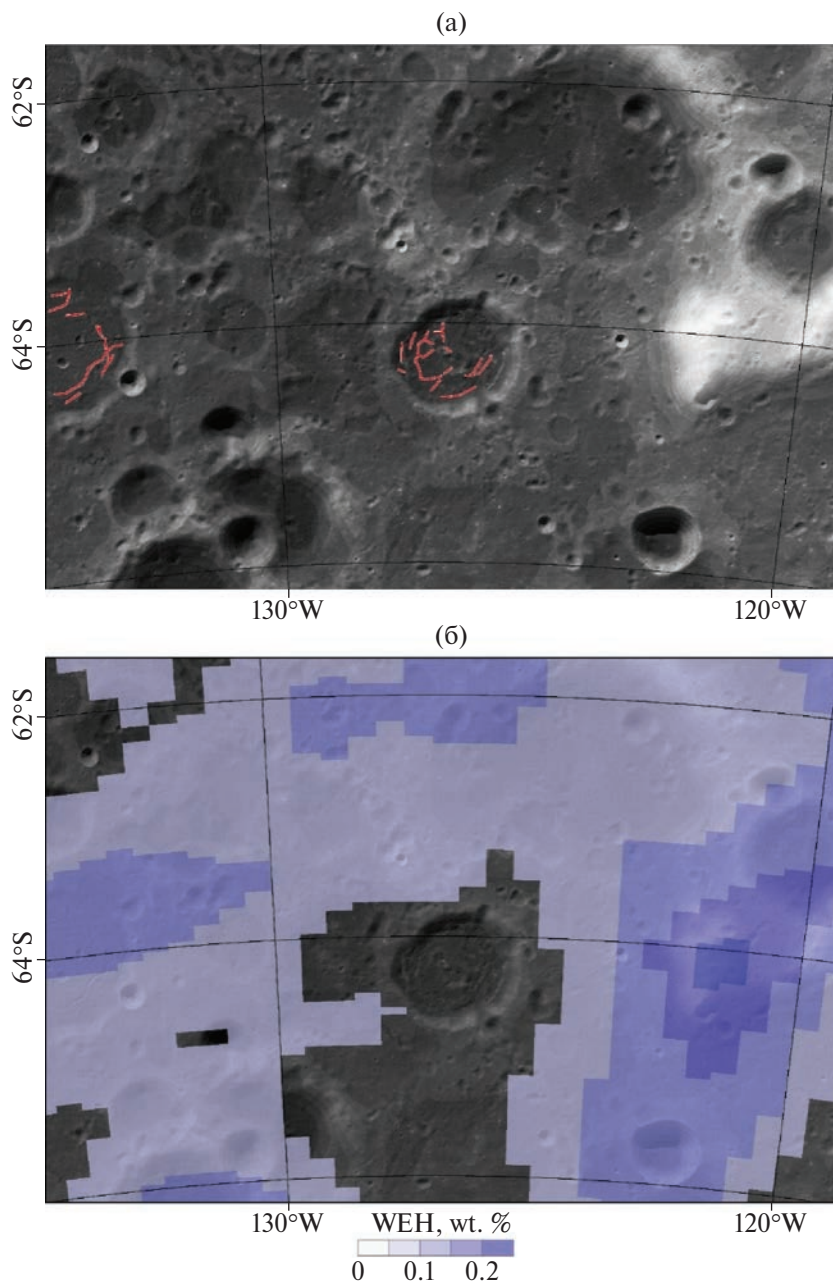


Рис. 3. Окрестности изучаемого кратера: (а) — LROC WAC изображение; красные линии — трещины / ложбины на дне изучаемого кратера (в центре изображения) и на дне другого кратера, расположенного в 70 км к западу от изучаемого; (б) — концентрации водного эквивалента водорода (WEN), при концентрациях <0.05% голубой заливки нет и видно LROC WAC изображение.

что бассейн исследуемого кратера очень сухой по сравнению с его окрестностью (рис. 3). Подобное соотношение не является уникальным. Так, в работе Stagg и др. (2018) были рассмотрены 300 кратеров с диаметром 30–100 км, лежащих в средних и высоких широтах. Анализ темпа счета эпитепловых нейтронов, измеренного прибором ЛЕНД, показал более низкое содержание водорода во внутренней части кратеров по сравнению с типичными значениями во внешней окрестности кратера на данной широте. Было показано, что темп счета эпитепловых нейтронов во внутренней части кратера в среднем возрастает на 0.1 отсч/с, а значимость этого эффекта составляет $\sim 9\sigma$. Lawrence и др. (2015), сравнивая данные темпа счета эпитепловых нейтронов (прибор LPNS на борту КА Lunar Prospector) и значения альбедо лунной поверхности в ближнем инфракрасном диапазоне 750 нм, по данным КА Clementine, показали, что существует связь между наличием водорода в лунном реголите на умеренных широтах и параметрами зрелости лунного реголита. Более “свежий” и непроработанный лунный реголит меньше насыщен водородом/молекулами воды, которые образуются при облучении лунной поверхности протонами солнечного ветра (так называемая солнечная вода). В свою очередь, Stagg и др. (2018) также исследовали корреляцию между нейтронным темпом счета и зрелостью поверхности. Было показано, что для подгруппы из 30 кратеров, демонстрирующих наиболее высокие значения эпитеплового нейтронного потока, наблюдаются очень высокие значения показателя параметра ОМАТ (комбинация показателей альбедо поверхности в диапазонах 750 нм и 950 нм (Lucey и др., 2000)), который характеризует степень зрелости поверхности. В данном случае высокие значения параметра ОМАТ соответствуют наиболее молодым и незрелым кратерам.

Возраст исследуемого кратера, по разным оценкам (см. предыдущий раздел статьи), составляет от 3.5 до 3.85 млрд лет, а возраст переработки его днища — от сотен миллионов до 1 млрд лет. Это не позволяет выделить его по оптическим параметрам зрелости, которые работают для поверхности, возраст которой не превышает несколько сотен миллионов лет, и плохо выделяются для поверхности, возраст которой составляет до 1 млрд лет (Lucey и др., 2000). Можно, однако, предположить, что солнечная вода, накопленная в этом достаточно старом кратере, могла испытывать существенные вариации на шкале времени и одним из важных факторов здесь является переработка поверхности вследствие внедрения магмы под кратер, следы которого прослеживаются по наличию трещин на дне кратера. Это могло привести к существенной потере водорода/воды и ее

перераспределения со дна кратера на территорию вокруг кратера.

Авторы признательны С.С. Красильникову и М.А. Иванову за помощь в этой работе.

Работа по оценке концентрации воды/водорода выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Тема ОСВОЕНИЕ, № 122042500014–1 (для А.Б. Санина, И.Г. Митрофанова, М.Л. Литвака и М.В. Дьячковой).

Работа была финансово поддержана грантом Российского научного фонда № 21–17–00035: Оценка темпов экзогенного обновления поверхности Луны (для А.Т. Базилевского)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Базилевский А.Т. Оценка абсолютного возраста ударных кратеров Луны, Меркурия и Марса по степени их морфологической выраженности // Исследования Солнечной системы: Космические вехи. Материалы научной сессии, посвященной 80-летию академика М.Я. Марова. Четвертый Международный симпозиум по исследованию Солнечной системы. ИКИ РАН, Москва, 14–18 октября 2013. Сер. Механика, управление и информатика / Ред. Захаров А.В. Москва. 2015. С. 213–228.
- Базилевский А.Т., Красильников С.С., Иванов М.А. Ударный кратер со следами тектонических деформаций в южной полярной области Луны // Астрон. вестн. 2024. Т. 58. № 1. С. DOI: 10.31857/S0320930X22020050. (Bazilevsky A.T., Krasilnikov S.S., Ivanov M.A. Impact crater with traces of tectonic deformation in the south polar region of the Moon // Sol. Syst. Res. 2024. V. 58. № 1. P.).
- Гришакина Е.А., Лазарев Е.Н., Родионова Ж.Ф., Шевченко В.В. Гипсометрическая карта Луны // ГАИШ МГУ, МИИГАиК, 2014.
- Казмерчук П.В., Мартынов М.Б., Москатиньев И.В., и др., Космический аппарат “Луна-25” — основа новых исследований Луны // Вестн. НПО им. С.А. Лавочкина. 2016. № 4. С. 9–19.
- Митрофанов И.Г., Зеленый Л.М., Третьяков В.И., Калашников Д.В. Луна-25: первая полярная миссия на Луну // Астрон. вестн. 2021. Т. 55. № 6. С. 497–508. DOI:10.31857/S0320930X21060098. (Mitrofanov I.G., Zelenyi L.M., Tret'yakov V.I., Kalashnikov D.V. Luna-25: The First Polar Mission to the Moon // Sol. Syst. Res. 2021. V. 55. № 6. P. 485–495. DOI:10.1134/S0038094621060095).
- Basilevsky A.T. On the evolution rate of small lunar craters // Proc. 7th Lunar Sci. Conf. 1976. P. 1005–1020.
- Basilevsky A.T., Head J.W., Horz F. Survival times of meter-sized boulders on the surface of the Moon // Planet. and Space Sci. 2013. V. 117. P. 118–126.
- Basilevsky A.T., Head J.W., Horz F., Rumsley K. Survival times of meter-sized rock boulders on the surface of airless bodies // Planet. and Space Sci. 2015. V. 89. P. 312–328.

- Colaprete A., Schultz P., Heldmann J., Wooden D., Shirley M., Ennico K., Hermalyn B., Marshall W., Ricco A., Elphic R.C., Goldstein D., Summy D., Bart G.D., Asphaug E., Korycansky D. and 2 coauthors. Detection of water in the LCROSS ejecta plume // *Science*. 2010. V. 330 (6003). P. 463–468.
- Hodges C.A., Muehlberger W.R. Geology of the Apollo 16 area, Central Lunar Highlands // *US Geol. Surv. Prof. Paper* 1048 / Eds: Ulrich G.E., 1981. 133 p., DOI:10.3133/pp1048.
- Jozwiak L.M., Head J.W., Zuber M.T., Smith D.E., Neumann G.A. Lunar floor-fractured craters: Classification, distribution, origin and implications for magmatism and shallow crustal structure // *J. Geophys. Res.*: 2012. V. 117. id. E11005. DOI:10.1029/2012JE004134
- Lawrence D.J., Peplowski P.N., Plescia J.B., Greenhagen B.T., Maurice S., Prettyman Th.H. Bulk hydrogen abundances in the lunar highlands: measurements from orbital neutron data // *Icarus*. 2015.V. 255. P. 127–134. DOI:10.1016/j.icarus.2015.01.005
- Lemelin M., Lucey P.G., Camon A. Compositional maps of the lunar polar regions derived from the Kaguya spectral profiler and the Lunar Orbiter Laser Altimeter Data // *Planet. Sci. J.* 2022. V. 3. P. 1–14.
- Li Yuan, Basilevsky A.T., Xie Minggang, Ip Wing-Huen. Correlations between ejecta boulder spatial density of small lunar craters and the crater age // *Planet. and Space Sci.* 2018. V. 162. P. 52–61.
- Lucey P.G., Blewett D.T., Taylor G.J., Hawke B.R. Imaging of lunar surface maturity // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105(E8). P. 20377–20386. DOI:10.1029/1999JE001110
- Mitrofanov I.G., Sanin A.B., Boynton W.V., Chin G., Garvin J.B., Golovin D., Evans L.G., Harshman K., Kozyrev A.S., Litvak M.L., Malakhov A., Mazari-co E., McClanahan T., Milikh G., Mokrousov M. and 14 coauthors. Hydrogen mapping of the lunar south pole using the LRO neutron detector experiment LEND // *Science*. 2010.V. 330(6003). P. 483. DOI:10.1126/science.1185696
- Mitrofanov I., Litvak M., Sanin A., Malakhov A., Golovin D., Boynton W., Droege G., Chin G., Evans L., Harshman K., Fedosov F., Garvin J., Kozyrev A., McClanahan T., Milikh G. and 9 coauthors. Testing polar spots of water-rich permafrost on the Moon: LEND observations onboard LRO // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117 id. E00H27. DOI:10.1029/2011JE003956
- Pieters C.M., Goswami J.N., Clark R.N., Annadurai M., Boardman J., Buratti B., Combe J.-P., Dyar M.D., Green R., Head J.W., Hibbitts C., Hicks M., Isaacson P., Klima R., Kramer G. and 14 coauthors. Character and spatial distribution of OH/H₂O on the surface of the Moon seen by M3 on Chandrayaan-1 // *Science*. 2009.V. 326(5952). P. 568–572. DOI:10.1126/science.1178658
- Sanin A.B., Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Bakhtin B.N., Bodnarik J.G., Boynton W.V., Chin G., Evans L.G., Harshman K., Fedosov F., Golovin D.V., Kozyrev A.S., Livengood T.A., Malakhov A.V., McClanahan T.P. and 5 coauthors. Hydrogen distribution in the lunar polar regions // *Icarus*. 2017. V. 283. P. 20–30. DOI: 10.1016/j.icarus.2016.06.002
- Schultz P.H. Floor-fractured lunar craters // *Moon*. 1976. V. 15. P. 241–273.
- Taylor G.J., Warren P., Ryder G., Delano J., Pieters C., Lofgren G. Lunar rocks // *Lunar sourcebook. A User's Guide to the Moon* / Eds: Heiken G.H., Vaniman D.T., French B.M. 1991. P. 183–284.
- Starr R.D., Litvak M.L., Petro N.E., Mitrofanov I.G., Boynton W.V., Chin G., Livengood T.A., McClanahan T.P., Sanin A.B., Sagdeev R.Z., Su J.J. Crater age and hydrogen content in lunar regolith from LEND neutron data // *Planet. and Space Sci.* 2018. V. 162. P. 105–112. DOI: 10.1016/j.pss.2017.08.001
- Vasavada A.R., Paige D.A., Wood S.E. Near-surface temperatures on Mercury and the Moon and the stability of polar ice deposits // *Icarus*. 1999. V. 141. P. 179–193.
- Watson K., Murray B.C., Brown H. The behavior of volatiles on the lunar surface // *J. Geophys. Res.* 1961. V. 66 (9). P. 3033–3045. DOI:10.1029/JZ066i009p03033

РОСТ ЛУНЫ ЗА СЧЕТ ТЕЛ, ВЫБРОШЕННЫХ С ЗЕМЛИ

© 2024 г. С. И. Ипатов^a, *^a Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

*E-mail: siipatov@hotmail.com

Поступила в редакцию 13.08.2023 г.

После доработки 14.09.2023 г.

Принята к публикации 22.09.2023 г.

Изучена эволюция орбит тел, выброшенных с Земли на стадии ее аккумуляции и ранней эволюции при ударах крупных планетезималей. В рассмотренных вариантах расчетов движения тел, выброшенных с Земли, большая часть тел покидала сферу Хилла Земли и двигалась по гелиоцентрическим орбитам. Их динамическое время жизни достигало нескольких сотен миллионов лет. При более высоких скоростях выброса v_{ej} вероятности столкновений тел с Землей и Луной в основном были ниже. На всем рассматриваемом интервале времени при скорости выброса v_{ej} , равной 11.5, 12 и 14 км/с, значения вероятности столкновения тела с Землей составляли примерно 0.3, 0.2 и 0.15–0.2 соответственно. При скоростях выброса $v_{ej} \leq 11.25$ км/с, т. е. немного превышающих параболическую скорость, большая часть выброшенных тел выпадала обратно на Землю. Вероятность столкновения выброшенного с Земли тела с Луной, движущейся по ее современной орбите, была примерно в 15–35 раз меньше, чем с Землей при $v_{ej} \geq 11.5$ км/с. Вероятность столкновения таких тел с Луной составляла в основном около 0.004–0.008 при скоростях выброса не менее 14 км/с и около 0.006–0.01 при $v_{ej} = 12$ км/с. Она была больше при меньших скоростях выброса и была в диапазоне 0.01–0.02 при $v_{ej} = 11.3$ км/с. На Луне может находиться вещество, выброшенное с Земли при аккумуляции Земли и при поздней тяжелой бомбардировке. При этом, как получено в наших расчетах, тел, выброшенных с Земли и упавших на зародыш Луны, было бы недостаточно для того, чтобы Луна выросла до своей современной массы из маленького зародыша, двигавшегося по современной орбите Луны. Этот результат свидетельствует в пользу образования лунного зародыша и дальнейшего его роста до большей части современной массы Луны вблизи Земли. Нам кажется более вероятным, что первоначальный зародыш Луны с массой не более 0.1 от массы Луны образовался одновременно с зародышем Земли из общего разреженного сгущения. Для более эффективного роста зародыша Луны желательно, чтобы при некоторых соударениях тел-ударников с Землей выброшенные тела не просто вылетали из кратера, а часть вещества выходила на орбиты вокруг Земли, как в модели мультиимпактов. Средние скорости столкновений выброшенных тел с Землей тем больше, чем больше скорость выброса. Значения этих скоростей столкновений составили около 13, 14–15, 14–16, 14–20, 14–25 км/с при скорости выброса, равной 11.3, 11.5, 12, 14 и 16.4 км/с соответственно. Скорости столкновений тел с Луной были также выше при больших скоростях выброса и находились в основном в пределах 7–8, 10–12, 10–16 и 11–20 км/с при v_{ej} , равной 11.3, 12, 14 и 16.4 км/с соответственно.

Ключевые слова: Земля, Луна, выброс тел, эволюция орбит, вероятности столкновений, скорости столкновений

DOI: 10.31857/S0320930X24010081, **EDN:** OHGFCE

ВВЕДЕНИЕ

В ходе формирования Земли и Луны на них выпадали различные тела-планетезимали. При столкновениях таких тел с Землей с нее могло выбрасываться вещество, часть из которого выпадала на Землю и Луну. Armstrong и др. (2002) предлагали изучать лунные породы, чтобы найти в них вещество, выброшенное с Земли во время поздней тяжелой бомбардировки и лучше понимать историю Земли. Считается (Bottke, Norman, 2017), что поздняя тяжелая бомбардировка было

примерно 4.2–3.5 млрд лет назад и могла быть вызвана окончанием процесса аккумуляции планет и миграцией планет-гигантов. В последнее время выпадения крупных тел, способных вызвать выброс вещества с Земли за пределы ее сферы Хилла, редки. В работе (Gattaccesa и др., 2023) утверждается, что найденный метеорит Northwest Africa 13188 является земным метеоритом, выпавшим обратно на Землю. В настоящей работе обсуждается вероятность выпадения выброшенных с Земли тел на Луну, скорости столкновений

выброшенных тел с Землей и Луной, а также рост зародыша Луны при выпадении на него тел, выброшенных с Земли. Ниже сначала приведем обзор некоторых работ по теме статьи.

Модели формирования Луны

Существуют различные модели образования Луны. Обзоры этих моделей приведены нами в статье (Ипатов, 2018), в разделе 2.1 монографии (Маров и др., 2019), и в разделе 3.2 большого обзора (Маров, Ипатов, 2023). Большую популярность имеет теория мегаимпакта (например, Hartmann, Davis, 1975; Cameron, Ward, 1976; Canup, Asphaug, 2001; Canup, 2004; 2012; Canup и др., 2013; 2021; Cuk, Stewart, 2012; Cuk и др., 2016; Barr, 2016). В рамках этой модели считается, что Луна образовалась в результате выброса силикатной мантии Земли при ее столкновении с телом размером с Марс. Рассматривались многочисленные варианты столкновений с различными массами ударников и скоростями столкновений. Модель мегаимпакта сталкивается с определенными трудностями, прежде всего, геохимического характера. В частности, критика этой модели приводилась в многочисленных работах Галимова и его соавторов (Галимов и др., 2005; Галимов, 1995; 2008; 2011; 2013; Galimov, Krivtsov, 2012; Васильев и др., 2011). Например, Галимов (2011) полагал, что теория мегаимпакта не может объяснить то, что не обнаружен сдвиг изотопного состава между лунным и земным веществом, так как выброшенный при мегаимпакте материал должен состоять на 80–90% из пара, а при испарении расплава изотопные составы K, Mg, Si могут заметно меняться.

В модели мультиимпактов (Ringwood, 1989; Витязев, Печерникова, 1996; Gorkavii, 2004; Горькавый, 2007; Svetsov и др., 2012; Citron и др., 2014; Rufu, Aharonson, 2015; Rufu и др., 2017; 2021) рассматривалось формирование и рост зародыша Луны в основном за счет вещества земной коры, выброшенного с зародыша Земли при его нескольких столкновениях с телами протопланетного диска. Rufu и др. (2017) считали, что было около 20 ударников. В их расчетах рассматривались массы ударников от 1% до 9% от массы Земли и скорости столкновений от v_{esc} до $4v_{esc}$, где v_{esc} — параболическая скорость на поверхности Земли. Используемый в их расчетах алгоритм осуществлял гидродинамическое моделирование. В различных вариантах моделей мегаимпакта и мультиимпактов выброшенное вещество (частично в виде пара) образовывало диск, из которого формировался зародыш Луны. В мультиимпактной модели после каждого столкновения из диска образовывалось новое тело,

которое, удаляясь от Земли, сталкивалось и объединялось с предыдущим зародышем Луны. Rufu и др. (2017) отмечали, что зародыш Луны образовывался на расстоянии, большем предела Роша (трех радиусов Земли).

Теория коаккреции рассматривает образование Луны из роя малых тел. Этой модели посвящена монография и ряд статей Рускол (1960; 1963; 1971; 1975). Основным источником околоземного роя тел в этой модели является захват частиц допланетного диска во время их столкновений (“свободной со свободной” и “свободной со связанной”). В работе (Афанасьев, Печерникова, 2022) найдено, что в результате парных столкновений допланетных тел формируется околоземный рой с массой порядка 10^{-5} массы современной Луны. Авторы предположили, что этот рой мог служить триггером для дальнейшей аккреции за счет столкновений тел протолунного роя с телами из зоны питания планеты и с выбросами от ударов крупных тел по растущей Земле.

Галимов с соавторами (Галимов и др., 2005; Галимов, 1995; 2008; 2011; 2013; Galimov, Krivtsov, 2012; Васильев и др., 2011) разрабатывали модель формирования зародышей Земли и Луны из единого первоначального газопылевого разреженного сгущения в протопланетном диске, с последующим образованием и сжатием двух фрагментов. Данная модель удовлетворяет геохимическим ограничениям и позволяет также объяснить известные различия в химическом составе Луны и Земли, в том числе дефицит железа, обеднение летучими и обогащение тугоплавкими окислами Al, Ca, Ti вещества Луны по сравнению с Землей. Галимов и др. предположили, что во внутренней части сгущения около 40% летучего вещества (в том числе FeO) пылевых частиц, образовавших зародыши, испарилось, и изначально высокотемпературные зародыши Луны и Земли были одинаково истощены в железе. Зародыши росли, аккумулируя частицы, богатые железом, и находившиеся на момент образования зародышей во внешней части сгущения. Рост зародыша Земли был быстрее роста зародыша Луны.

Согласно модели, представленной в (Galimov, Krivtsov, 2012), разреженное сгущение с массой, равной массе системы Земля–Луна, через время около 50–70 млн лет после начала формирования Солнечной системы сжалось за 10^4 – 10^5 лет, образовав зародыши Земли и Луны. Такое длительное время существования сгущений после начала формирования Солнечной системы не было получено в работах специалистов, занимающихся изучением формирования и эволюции сгущений. В большинстве работ, посвященных образованию планетезималей (Cuzzi и др., 2008; 2010; Cuzzi, Hogan, 2012; Johansen и др., 2007; 2009a;

2009b; 2011; 2012; Lyra и др., 2008; 2009; Youdin, 2011; Youdin, Kenyon, 2013), непосредственное время формирования (после начала формирования из уплотненного газопылевого диска) и сжатия разреженных сгущений не превышало 1000 оборотов вокруг Солнца, а в некоторых моделях происходило всего за несколько десятков оборотов вокруг Солнца. По нашему мнению, нельзя объяснить то, что в модели Галимова падение частиц из внешней части сгущения в центр сгущения (на зародыши Земли и Луны) началось через 50 млн лет, а не сразу после образования сгущения. Ведь в их модели внешняя часть сгущения была холодной, и пылинки имели нулевые скорости. Подробнее критика модели Галимова рассматривалась в работе (Ипатов, 2018).

Ипатов (2018) показал, что угловой момент сгущения, необходимый для формирования зародышей системы Земля–Луна, мог быть приобретен при столкновении двух сгущений с общей массой, большей $0.01m_E$ (m_E — масса Земли). Большая часть вещества, вошедшего в формирующуюся Луну, была выброшена с Земли при многочисленных столкновениях с ней планетезималей и тел меньшего размера. Аналогичный механизм был предложен Ипатовым (2017a; 2017b) для модели формирования транснептуновых спутниковых систем. В отличие от сгущения, породившего зародыши Земли и Луны, сгущение, породившее зародыш Марса, не обладало большим угловым моментом и смогло при сжатии породить только небольшие спутники Фобос и Деймос. Угловые моменты сгущений, породивших зародыши Меркурия и Венеры, были недостаточны даже для формирования малых спутников. В отличие от модели Галимова, в модели Ипатова (2018) зародыш Земли рос за счет выпадения на него планетезималей, а не пыли из внешней части сгущения с массой порядка массы Земли. В отличие от модели мультиимпактов, в модели Ипатова первоначальный зародыш Луны образовался из того же сгущения, что и зародыш Земли. Объекты, выброшенные с зародыша Земли при столкновениях с другими объектами, имели больше шансов войти в состав крупного зародыша Луны, чем объединиться с аналогичными объектами малой массы. Зародыш Луны, образовавшийся при сжатии сгущения, мог быть триггером для его роста до современной массы Луны в основном за счет вещества, выброшенного с Земли при ее бомбардировке планетезималами. По нашему мнению, для модели мультиимпактов все планеты земной группы должны были бы обладать крупными спутниками, так как на них выпадали такие же тела, как и на зародыш Земли. Для объяснения современного содержания железа в Луне Ипатов (2018) оценил, что доля вещества, выброшенного

с зародыша Земли и выпавшего на зародыш Луны, должна была почти на порядок превышать сумму общей массы планетезималей, выпавших непосредственно на зародыш Луны, и начальной массы зародыша Луны, образовавшегося из родительского сгущения, при условии, что этот начальный лунный зародыш содержал такую же долю железа, что и планетезимали.

Согласно (Salmon, Canup, 2012; Cuk, Stewart, 2012), большая полуось орбиты образовавшегося зародыша Луны равнялась $6r_E - 7r_E$, где r_E — радиус Земли. Из-за приливных взаимодействий расстояние между Землей и Луной могло сравнительно быстро достигнуть $30r_E$ (Touma, Wisdom, 1994; Pahlevan, Morbidelli, 2015). Например, Pahlevan и Morbidelli (2015) получили, что расстояние между Землей и Луной увеличилось до $20r_E - 40r_E$ за $10^6 - 10^7$ лет. Современное расстояние между Землей и Луной равно $60.4r_E$. В модели мультиимпактов считается (Rufu и др., 2017), что из-за приливных взаимодействий образовавшийся спутник Земли меньшей массы со временем удалялся от Земли и догонял образовавшийся ранее более массивный и первоначально более удаленный от Земли спутник.

Выпадение тел, выброшенных с Земли, на другие планеты и Луну

В работах (Gladman и др., 2005) и (Reyes-Ruiz и др., 2012) моделировалась эволюция орбит тел, выброшенных с Земли, в течение 30000 лет, причем в работе (Reyes-Ruiz и др., 2012) число рассмотренных тел было в 50 раз больше, чем в (Gladman и др., 2005). Эти авторы проводили расчеты эволюции орбит вещества, выброшенного с Земли, с несколькими значениями v_{ej} скорости выброса от 11.22 до 16.4 км/с. В работе (Gladman и др., 2005) вероятность столкновения выброшенного тела с Землей за 30 тыс. лет варьировалась от 0.09 при $v_{ej} = 11.22$ км/с до 0.001–0.003 при $13.2 \leq v_{ej} \leq 16.4$ км/с. При расчетах определялись вероятности столкновений выброшенных тел с Землей, Венерой и Марсом. В (Reyes-Ruiz и др., 2012) использовался пакет интегрирования Mercury (Chambers, 1999). Как и в (Gladman и др., 2005), начальные тела стартовали вертикально и точки старта были распределены равномерно по поверхности Земли. Тела стартовали с высоты $h = 100$ км над Землей. Интегрирование заканчивалось, когда выброшенное тело сталкивалось с Луной, планетой или Солнцем, или удалялось от Солнца на 40 а. е., или если рассматриваемый интервал времени достигал 30 тыс. лет. Вычислялись вероятности столкновений тел с Землей, Луной, Венерой, Марсом, Юпитером, Сатурном и Солнцем.

Armstrong и др. (2002) рассматривали выпадение вещества, выброшенного с Земли во время поздней тяжелой бомбардировки. Они полагают, что, согласно Жаркову (2000), большая полуось орбиты Луны равнялась $21.6r_E$ около 3.9 млрд лет назад. Считалось, что при скорости ударника, равной 14 км/с, масса вещества, выброшенного с Земли, равнялась 0.14 массы ударника. Рассматриваемый интервал времени после выброса вещества не превышал 1000 лет, при этом большинство столкновений (90%) происходило за время не более 100 лет. Выпадения тел обратно на Землю и на Луну происходили в основном при скорости выброса, близкой к параболической скорости на поверхности Земли. Из таблицы 2 в (Armstrong и др., 2002) следует, что при скорости v_∞ выброшенных тел на бесконечности, равной 0, доли тел, выпавших на Землю и Луну, равнялись 0.61 и 0.004 соответственно. При этом отношение этих долей равнялось 152.5. При $v_\infty = 1$ км/с эти доли равнялись 0.06 и 0 соответственно.

Выброс вещества из кратера

На рис. 12.3 монографии (Мелош, 1994) приведено отношение потерянной массы к массе ударника в зависимости от скорости удара v_{col} и второй космической скорости v_{esc} небесного объекта. Чем меньше v_{col} , тем меньше это отношение масс. Из этого рисунка видно, что для Земли это отношение близко к 0.1 и 0.01 при v_{col} , равном 45 и 30 км/с соответственно. Для Луны такое отношение меньше 0.1 и 0.01 при v_{col} , равном 7.5 и 5 км/с соответственно. Оно близко к 1 для v_{col} , близком к 20 км/с.

Артемьева и Шувалов (2008) численно моделировали удары по Луне астероидов со скоростью 18 км/с и ледяных тел со скоростями 25 и 55 км/с под углами от 15° до 90° к поверхности. Максимальные выбросы со скоростями, выше скорости убегания Луны, достигались при углах 45° – 60° и составляли от 4 до 12 масс ударяющего тела при ударе астероида и параболической кометы соответственно. Эти оценки выброса были в несколько раз больше, чем приближенные оценки на рис. 12.3 в (Мелош, 1994). Были оценены потери массы Луной за счет ударов космических тел.

Artemieva (2014) путем численного моделирования сравнивала удары астероидов размером 1–500 м со скоростью 18 км/с под углом 45° по пористой среде, имитирующей лунный реголит, с ударами по сплошной непористой мишени. Оказалось, что пористость может на порядок уменьшить выброс твердых фрагментов, являющихся источником лунных метеоритов. Число тел, выпадающих на переднюю полусферу поверхности Луны, немного больше числа тел, вы-

падающих на заднюю полусферу (Gallant и др., 2009; Wang, Zhou, 2016).

Согласно формуле (4) из (Armstrong и др., 2002), масса тел, выброшенных со скоростями, большими v_{ej} , равна $m_{ej} = 0.11(\rho/\rho_i)^{0.2}(v_i/v_{ej})^{1.2}m_i$, где ρ и ρ_i – плотности ударника и цели, v_i – скорость столкновения, m_i – масса ударника. При одинаковых плотностях, $v_i = 14$ км/с и $v_{ej} = v_{esc}$ Armstrong и др. (2002) получили массу тел, выброшенных с Земли, равной $0.14m_i$. Они отмечали, что скорости выброса в основном меньше $0.85v_i$.

Svetsov (2011) получил ряд других зависимостей m_{ej} от v_i/v_{ej} : (1) $m_{ej} = 0.03(\rho/\rho_i)^{0.2}(v_i/v_{ej})^{1.65}m_i$ на основе экспериментов с базальтами при скоростях 6 км/с, приведенных в (Holsapple, Housen, 2007) и (2) $m_{ej} = 0.03(v_i/v_{ej})^{2.3}m_i$ на основе своих численных расчетов при $v_i < 10$ км/с. По этим формулам при v_i/v_{ej} , равном 1, получаем $m_{ej} = 0.03m_i$, а при $v_i/v_{ej} = 2$ имеем $m_{ej} = 0.094m_i$ и $m_{ej} = 0.148m_i$ соответственно для первой и второй вышеприведенных формул. Согласно (Svetsov, 2011), масса m_{ej} выбрасываемого материала больше массы ударника, если скорость столкновения не менее чем в 3–5 раз превышает параболическую скорость на поверхности цели. В работе (Svetsov и др., 2012) отмечалось, что масса вещества, выброшенного с Земли, была максимальна при углах столкновения около 30° – 45° и не превышала 0.04, 0.06 и 0.13 от массы ударника при скорости столкновения, равной 12, 15 и 20 км/с соответственно.

По формуле (7.12.3) из (Мелош, 1994), m_{ej} пропорционально $v_{ej}^{-1.7}$ и $v_{ej}^{-1.2}$ для воды и песка соответственно. Согласно рисунку 12.3 из этой работы, масса вещества, выброшенного с Земли, составляла примерно 0.01 и 0.1 от массы ударника при скоростях столкновения, равных 30 и 45 км/с соответственно. Для Луны масса выброшенного вещества превышала массу ударника примерно при скоростях, больших 20 км/с. На основании рисунков 3 и 5 из (Шувалов, Трубецкая, 2011) можно сделать вывод о том, что при скорости столкновения, равной 18 км/с, отношение массы выброшенного вещества (со скоростями, большими параболической скорости на поверхности Земли) к массе ударника было порядка 0.002 и 0.2 при вертикальном и косом (при 45°) ударах соответственно. В этих расчетах ударник и мишень были гранитными.

Результаты вышеприведенных работ свидетельствуют в пользу того, что при скорости столкновения тела с Землей со скоростью не более 20 км/с масса выброшенного вещества не превышает 0.15 массы ударника.

Согласно (Шувалов, Трубецкая, 2011), значения угла i_{ej} выброса вещества в основном находятся между 20° и 55° , особенно между 40° и 50° . Близкие значения углов были получены в (Raducan

и др., 2022) при выпадении тел на астероиды. В экспериментах с микронными частицами со скоростями столкновений до 2.5 км/с (Barnouin и др., 2019) были получены углы выброса от 40° до 80° при скоростях около 1 км/с и от 40° до 70° при больших скоростях. При максимальной рассмотренной скорости (2.5 км/с) этот диапазон был еще более узким: от 43° до 59°.

Veesh и др. (2019) отмечали, что из-за атмосферы Землю могут покинуть только тела диаметром не менее 0.7 м. Они могли быть выброшены при образовании кратера диаметром не менее 10 км. Наиболее молодые земные кратеры такого размера образовались около миллиона лет назад.

В работе (Маров, Ипатов, 2021) обсуждались скорости столкновений тел с Землей и Луной. Скорости столкновений планетезималей, образовавшихся в зоне питания Земли, с Землей и Луной современных масс были равны примерно 13–15 и 8–10 км/с соответственно. Для планетезималей из других зон питания планет земной группы эти диапазоны скоростей равнялись 13–19 и 8–16 км/с. Как отмечалось выше, при скоростях столкновений, меньших 20 км/с, доля выброшенного с Земли вещества, вероятно, не превышала 0.15. Для большинства тел, приходящих к Земле из зоны внешнего астероидного пояса и зоны планет-гигантов, эти диапазоны составили 23–26 и 20–23 км/с для Земли и Луны соответственно. Однако для отдельных тел эти скорости могли быть близки к 40 км/с. Как отмечалось выше, скорости большинства тел, выброшенных с Земли, были меньше скоростей столкновений.

РАССМАТРИВАЕМЫЕ МОДЕЛИ, ВАРИАНТЫ РАСЧЕТОВ И НАЧАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

В настоящей работе рассматривается эволюция орбит тел, выброшенных с Земли. В каждом варианте расчетов изучалось движение 250 выброшенных с Земли тел при фиксированных значениях угла выброса i_{ej} (отсчитываемого от плоскости поверхности или от другой параллельной плоскости), скорости выброса v_{ej} и шага интегрирования по времени t_s . В разных вариантах значения угла выброса i_{ej} составляли 15°, 30°, 45°, 60°, 89° или 90°. Скорость v_{ej} тел, выброшенных из Земли, в основном равнялась 11.22, 11.5, 12, 14, 16.4 или 20 км/с. Выбросы тел с $v_{ej} = 20$ км/с довольно редкие, но возможны при высокоскоростных столкновениях с Землей тел, приходящих из-за орбиты Юпитера. Рассматривались также и другие значения скоростей в диапазоне от 11.22 до 11.5 км/с, так как в этом диапазоне зависимость вероятностей столкновений тел с Лу-

ной и планетами от v_{ej} сильнее, чем при больших значениях v_{ej} . Скорость вращения земной поверхности вокруг оси Земли (0.46 км/с) и скорость движения Луны вокруг Земли (1.02 км/с) не учитывались. Они невелики по сравнению с рассматриваемыми скоростями выброса.

Для интегрирования уравнений движения использовался симплектический алгоритм из пакета SWIFT (Levison, Duncan, 1994). Учитывалось гравитационное влияние Солнца и всех восьми планет. Начальные положения планет на их орбитах брались из тестового файла этого пакета. Из интегрирования исключались тела, которые столкнулись с планетами или Солнцем или достигли 2000 а. е. от Солнца. В рассмотренных вариантах расчетов движения тел, выброшенных с Земли, большая часть тел покидала сферу Хилла Земли и двигалась по гелиоцентрическим орбитам. Движение тел, выброшенных с Земли, изучалось в течение максимального динамического времени жизни T_{end} всех рассмотренных в варианте тел, которое в вариантах расчетов составляло часто около 200–700 млн лет. Такой выброс часто был на стадиях аккумуляции Земли и поздней тяжелой бомбардировки. Ранее (Gladman и др., 2005; Reyes-Ruiz и др., 2012) при моделировании выброса тел со всей поверхности Земли рассматривались начальные скорости, перпендикулярные поверхности Земли, и интервал времени в 30 тыс. лет. Реально, как отмечалось во Введении, углы выброса в основном не превышают 55°, а подавляющее число тел, выброшенных на гиперболические орбиты, остается на орбитах после 30 тыс. лет. Вероятность выпадения тела на Землю различна для различных точек на поверхности Земли (например, из пространства за орбитой Земли больше, чем из пространства внутри орбиты Земли).

Рассматриваемый шаг интегрирования по времени t_s в некоторых вариантах равнялся 1, 2, 5 или 10 сут., и сравнивались результаты расчетов, полученные при разных t_s . Эти расчеты дали близкие результаты. Если не оговорено особо, то в статье приведены данные для расчетов с t_s , равном пяти суткам. В (Frantseva и др., 2022) отмечалось, что в рассматриваемом симплектическом алгоритме из пакета SWIFT шаг интегрирования по времени существенно уменьшается при расстоянии между объектами, меньшими 3.5 радиуса Хилла. Результаты расчетов, приведенные в (Ipatov, Mather, 2004a; 2004b), показали, что симплектический алгоритм и алгоритм BULSTO (Bulirsh, Stoer, 1966) дают похожие результаты при изучении движения тел в Солнечной системе.

Рассматривался выброс тел из шести противоположных точек земной поверхности для ряда значений скоростей и углов выброса тел. В сери-

ях расчетов v_f и v_c движение тел начиналось соответственно от наиболее и наименее удаленных от Солнца точек F (far) и C (close) земной поверхности на линии от Солнца к Земле. В сериях uv и vb тела стартовали соответственно с точек W (forward) и B (back) поверхности Земли по ходу движения Земли и с противоположной стороны Земли. В сериях ui и vi тела стартовали соответственно с точек U (up) и D (down) поверхности Земли с максимальным и минимальным значениями z (при оси oz , перпендикулярной плоскости орбиты Земли). В серии v_f для нескольких начальных данных тела стартовали с высоты h над поверхностью Земли. Если не оговорено особо, то ниже речь идет о телах, стартовавших с поверхности Земли (при $h=0$).

Вероятности столкновений выброшенных тел с Землей и другими планетами вычислялись при интегрировании уравнений движения как число тел, столкнувшихся с планетой, к начальному числу тел. Кроме того, вероятности столкновений тел с Землей и Луной рассчитывались на основе массивов элементов орбит мигрировавших тел (хранящихся с шагом 500 лет за все время эволюции орбит) аналогично (Ipatov, Mather, 2003; 2004a; 2004b; Ипатов, 2000; 2019). Основной алгоритм вычисления вероятности был описан Ипатовым (1988; 2000), а дополнение к алгоритму, которое учитывает изменение скорости объекта, движущегося по эксцентричной орбите, приведено в (Ipatov, Mather, 2004b). В этом алгоритме считалось, что тела движутся вокруг Солнца по невозмущенным кеплеровским орбитам вне сферы действия большего тела. Движение внутри сферы действия рассматривалось в рамках задачи двух тел. Используемый алгоритм сложнее, чем обычно используемый подход Эпика (Örik, 1951), и вычисляемая вероятность сближения до сферы действия зависит также от синодического периода обращения двух тел вокруг Солнца.

Вычислялись также значения $k_{pE/pM} = p_E^*/p_M^*$ отношения вероятностей p_E^* и p_M^* столкновений тел с Землей и Луной, полученных на основе массивов элементов орбит. Это отношение вычислялось только для тел, первоначально покинувших сферу действия Земли. При малых скоростях выброса большинство выброшенных с Земли тел могли выпадать обратно на Землю, не покидая сферу действия Земли. Ниже вероятность столкновения тела с Луной вычислялась по формуле $p_M = p_E/k_{pE/pM}$, где p_E — это вероятность столкновения тела с Землей, вычисленная при интегрировании уравнений движения (независимо от того, покидало ли тело сферу действия Земли).

Значения p_E^* и p_M^* вычислялись в предположении, что Земля и Луна движутся независимо вокруг Солнца по одинаковой гелиоцентрической

орбите, т. е. Луна находится вне сферы Хилла Земли. Реально отношение вероятностей столкновений тел с Землей и Луной может быть меньше $k_{pE/pM}$ и тем меньше, чем ближе орбита Луны к Земле. Как отмечается в следующем разделе, в расчетах значение $k_{pE/pM}$ часто могло быть порядка 30. Если бы гипотетически Луна находилась у самой поверхности Земли, то это отношение вероятностей столкновений равнялось бы отношению квадратов радиусов Земли и Луны, т. е. 13.39. Поэтому, в зависимости от большой полуоси орбиты Луны вокруг Земли, это отношение может находиться от 13.4 до $k_{pE/pM}$. Для тел, которые вошли в сферу Хилла и затем могли выпасть на Землю, был шанс столкнуться с Луной, если бы она попала в тот конус траекторий, которые достигали поверхности Земли. Этот конус ограничен параболическими траекториями, достигавшими Земли. Поэтому можно приближенно предположить, что отношение вероятностей столкновений с Землей и Луной зависит от большой полуоси a_M (в радиусах Земли r_E) орбиты Луны как $k = b \cdot a_M^{1/2} + c$. Полагая, что $k = k_{pE/pM}$ при $a_M = a_{Ms} = 230.7$ (на границе сферы Хилла Земли) и $k = 13.4$ при $a_M = 1$, получаем $b = 0.07k_{pE/pM} - 0.944$ и $c = 13.4 - b = 14.344 - 0.07k_{pE/pM}$. При вычислении $k_{pE/pM}$ использовался метод сфер действия. Радиус сферы действия Земли равен 929000 км, т. е. в $a_M = a_{Ms} = 145.8$ раз больше радиуса r_E Земли. При таком $a_M = 145.8$ имеем $b = 0.09k_{pE/pM} - 1.21$ и $c = 14.61 - 0.09k_{pE/pM}$.

В табл. 1 приведены значения отношения k вероятностей столкновений тел с Землей и Луной при отношении a_M большой полуоси орбиты Луны к радиусу Земли r_E , равном 60 или 5, и при этом начальном отношении $k_{pE/pM}$ на расстоянии, равном радиусу a_{Ms} сферы Хилла ($a_{Ms} = 230.7$) или сферы действия Земли ($a_{Ms} = 145.8$). Для двух рассмотренных значений a_{Ms} (230.7 и 145.8) значения k довольно близки. Значения k меньше для меньших значений большой полуоси орбиты Луны. При $a_M = 5$ значения k слабо зависели от $k_{pE/pM}$ и были около 14–16. При $a_M = 60$ отношение $k/k_{pE/pM}$ было в диапазонах 0.825–0.87, 0.71–0.78 и 0.65–0.74 при $k_{pE/pM}$, равном 20, 30 и 40 соответственно. При больших наклонениях орбит тел, входящих в сферу действия Земли, орбита Луны может не пересекать вышеупомянутый конус траекторий движения тел к Земле или она может пересекать конус не по его центру. Поэтому реальное отношение вероятности столкновений тел с Землей и Луной может быть больше значений k , приведенных в табл. 1. Однако оно не превышает $k_{pE/pM}$.

Таблица 1. Отношение k вероятностей столкновений тел с Землей и Луной при большой полуоси a_M (равной 60 или 5 радиусам Земли r_E) орбиты Луны и начальном отношении $k_{pE/pM}$ этих вероятностей (равном 20, 30 или 40) на расстоянии, равном радиусу $a_{Ms}r_E$ сферы Хилла ($a_{Ms} = 230.7$) или сферы действия Земли ($a_{Ms} = 145.8$) для рассматриваемой модели

	$a_{Ms} = 230.7$	$a_{Ms} = 145.8$	$a_{Ms} = 230.7$	$a_{Ms} = 145.8$
	$a_M = 60$	$a_M = 60$	$a_M = 5$	$a_M = 5$
$k_{pE/pM} = 20$	16.5	17.4	13.96	14.1
$k_{pE/pM} = 30$	21.2	23.45	14.8	15.2
$k_{pE/pM} = 40$	25.9	29.5	15.7	16.35

Ниже в следующем разделе отмечается, что скорости входа тел в сферу действия Земли после их первоначального выброса из нее в основном находятся в диапазоне 10–25 км/с. Эта скорость увеличивается по мере приближения тела к Земле. Параболическая скорость на поверхности Луны равна 2.38 км/с. Для относительной скорости, равной 10 км/с, эффективный радиус Луны больше ее физического радиуса всего в 1.028 раза, то есть оба радиуса практически одинаковы. При больших относительных скоростях эффективный радиус Луны меньше. Квадрат эффективного радиуса r_{eff} небесного тела радиуса r равен $r_{eff}^2 = r^2[1 + (v_{par}/v_{rel})^2]$, где v_{par} – параболическая скорость на поверхности этого небесного тела, а v_{rel} – относительная скорость малого тела при его входе в сферу действия небесного объекта (точная формула справедлива для относительной скорости на бесконечности).

На основе отношения $k_{pE/pM}$ числа планетезималей, сталкивающихся с Землей и Луной, можно оценить (Маров, Ипатов, 2021) характерные скорости v_{relE} (относительно Земли) планетезималей при входе в сферу действия Земли по формуле:

$$(v_{relE}/v_{parE})^2 = [k_{pE/pM} (v_{parM}/v_{parE})^2 (r_M/r_E)^2 - 1] / [1 - k_{pE/pM} (r_M/r_E)^2],$$

где r_M и r_E – радиусы Луны и Земли, а $v_{parM} = 2.38$ км/с и $v_{parE} = 11.186$ км/с – параболические скорости у поверхности Луны и Земли соответственно. Отношение $k_{pE/pM}$ вычислялось на основе элементов орбит тел в течение большого интервала времени, за который могло происходить много сближений тел с Землей до радиуса ее сферы действия. Поэтому вышеприведенная формула позволяет получить характерные скорости тел, входивших в сферу действия. Скорости различных сближений могли быть разными и могли отличаться от этих характерных скоростей. Для скоростей v_{colE} и v_{colM} столкновений тел с Землей и Луной справедливы соотно-

шения $v_{colE}^2 = v_{relE}^2 + v_{parE}^2$ и $v_{colM}^2 = v_{relM}^2 + v_{parM}^2$. При $v_{relE} = v_{relM}$ на основе значений v_{relE} вычислялись также значения v_{colM} и v_{colE} .

Результаты проведенных расчетов (при $h=0$ и $t_s=5^d$) представлены на рис. 1–3. На рис. 1 приведены значения $k_{pE/pM} = p_E^*/p_M^*$ отношения вероятностей столкновений тел с Землей и Луной, полученных на основе массивов элементов орбит. На рис. 2 представлены значения вероятности столкновений тел с Луной, вычисленной по формуле $p_M = p_E/k_{pE/pM}$. На рис. 3 приведены значения скоростей столкновений тел с Луной и Землей. Рассматриваемые на рис. 1–3 величины приводятся в зависимости от угла выброса i_{ej} для различных значений v_{ej} скорости выброса и для шести точек выброса с поверхности Земли. Для небольшого числа вариантов (с фиксированными значениями v_{esc} , i_{ej} и точки выброса) было проведено два варианта расчетов, каждый с 250 начальными телами. В этом случае на рисунках приведены два одинаковых знача при том же значении i_{ej} .

ВЕРОЯТНОСТИ И СКОРОСТИ СТОЛКНОВЕНИЙ ВЫБРОШЕННЫХ ТЕЛ С ЛУНОЙ

При скоростях выброса v_{ej} , не меньших 11.3 км/с, большинство выброшенных тел покидали сферу Хилла Земли и начинали двигаться вокруг Солнца. В ходе эволюции они могли столкнуться с планетами или Солнцем или быть выброшенными на гиперболические орбиты (Ipatov, 2023). В настоящей работе основное внимание мы уделяем изучению выпадений выброшенных тел на Луну.

В предыдущем разделе отмечалось, что вероятность столкновения тел с Луной, вычислялась по формуле $p_M = p_E/k_{pE/pM}$, где p_E – это вероятность столкновения с Землей, полученная при интегрировании уравнений движения, а $k_{pE/pM} = p_E^*/p_M^*$ – отношение вероятностей столкновений тел с Землей и Луной, полученных на основе массивов элементов орбит. Поэтому сначала остановимся на значениях p_E и $k_{pE/pM}$.

Полученные результаты показывают, что при более высоких скоростях выброса v_{ej} вероятности p_E и p_M столкновений тел с Землей и Луной в основном были ниже. Вероятности p_E столкновений тел с Землей были примерно одинаковыми для расчетов с разными рассмотренными значениями t_s шага интегрирования. При скоростях $11.5 \leq v_{ej} \leq 14$ км/с вероятность p_E не сильно зависела от точки выброса на поверхности Земли. Ниже приводятся значения p_E , полученные в вариантах с фиксированными значениями v_{ej} и i_{ej} .

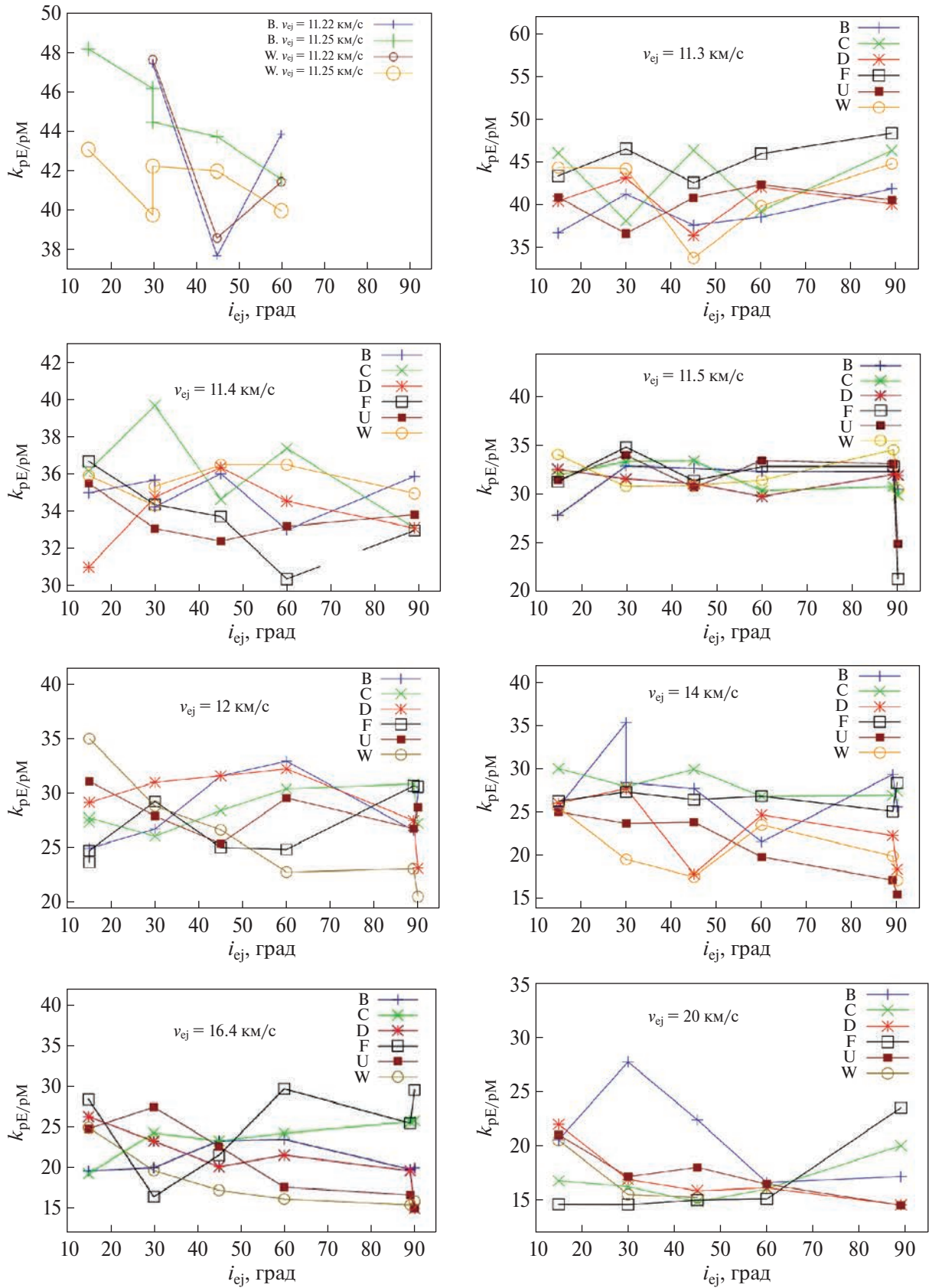


Рис. 1. Значения $k_{pE/pM} = p_E^*/p_M^*$ отношения вероятностей столкновений тел с Землей и Луной, полученных на основе массивов элементов орбит, в зависимости от угла выброса i_{ej} (в градусах) для ряда значений v_{ej} скорости выброса (в км/с) и различных точек выброса.

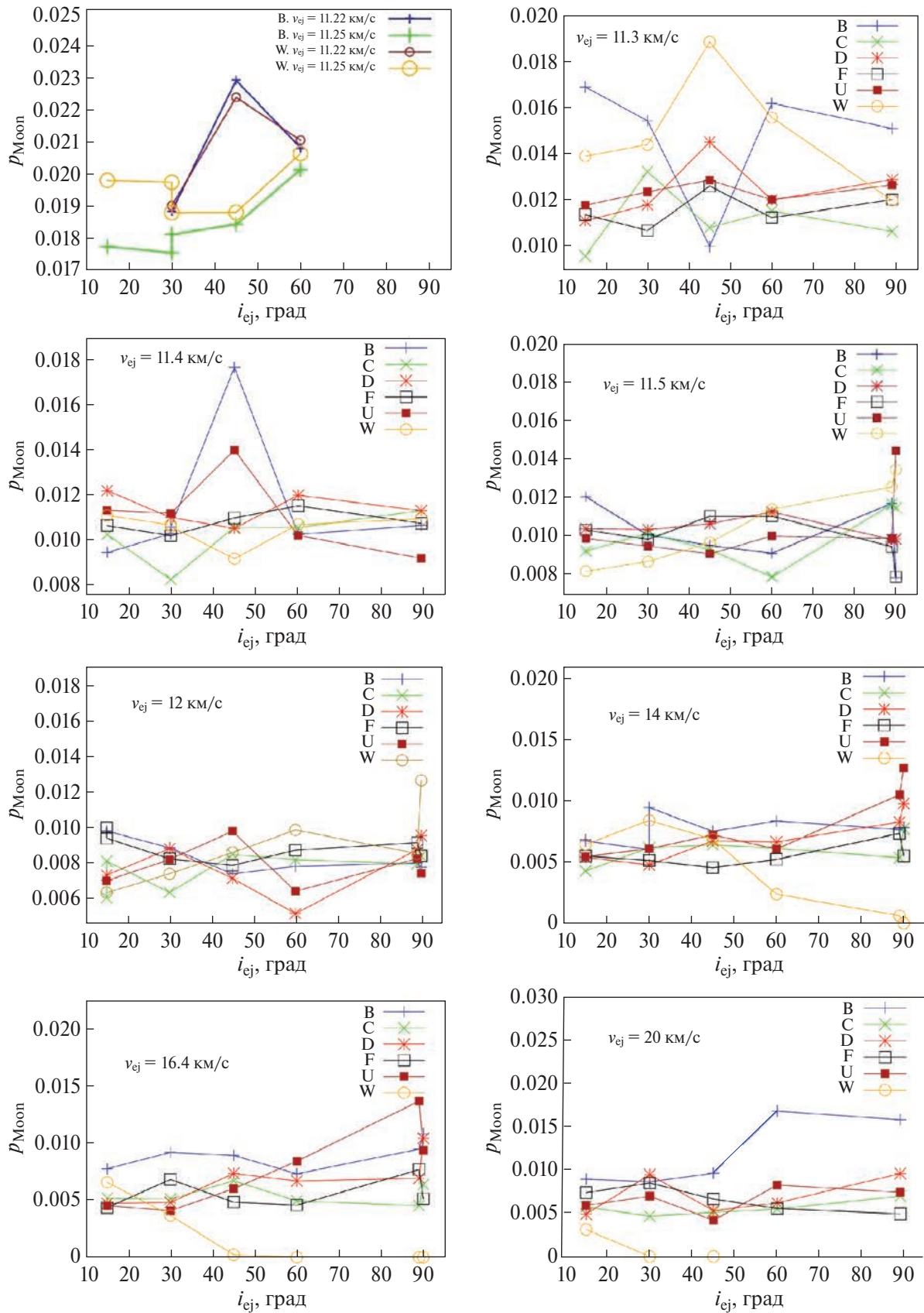


Рис. 2. Значения вероятности столкновений тел с Луной, вычисленной по формуле $p_{\text{M}} = p_{\text{E}}/k_{\text{PE/PM}}$, в зависимости от угла выброса i_{ej} (в градусах) для ряда значений v_{ej} скорости выброса (в км/с) и различных точек выброса.

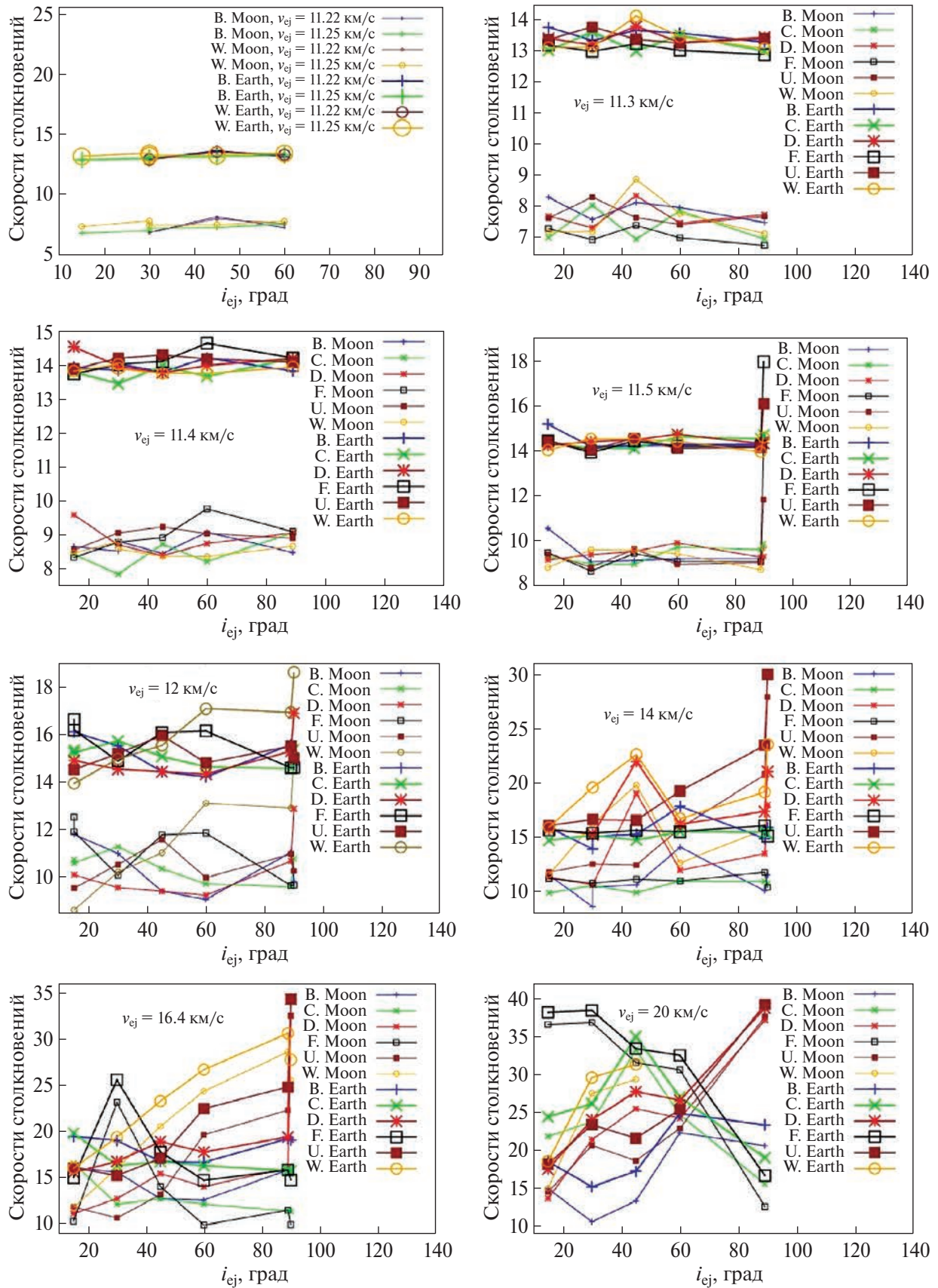


Рис. 3. Значения скоростей столкновений (в км/с) тел с Луной и Землей в зависимости от угла выброса i_{ej} (в градусах) для ряда значений v_{ej} скорости выброса (в км/с) и различных точек выброса.

Среднее по всем выброшенным телам значение p_E зависит от распределения тел по v_{ej} и i_{ej} .

При скоростях выброса $v_{ej} \leq 11.25$ км/с, т. е. немного превышающих параболическую скорость, большая часть выброшенных тел быстро выпадала обратно на Землю. При $v_{ej} = 11.22$ и $v_{ej} = 11.25$ км/с некоторая часть выброшенных тел покидала сферу Хилла Земли только для двух точек выброса (W и B) на противоположных направлениях линии движения Земли по гелиоцентрической орбите. Для этих двух точек выброса данные на рис. 1–3 не приводятся для значений i_{ej} , при которых все тела выпадали на Землю, не покидая ее сферу действия. Выброс тел из сферы действия Земли при таких скоростях ($v_{ej} = 11.22$ и $v_{ej} = 11.25$ км/с) для других точек выброса возможен только если начальная точка старта находится выше поверхности Земли. Например, в серии vf при $v_{ej} = 11.22$ км/с и $i_{ej} \geq 45^\circ$ времена эволюции орбит выброшенных тел составляли 15 дней, 25 дней, 20 лет и около 400 млн лет при высоте старта над поверхностью Земли h , равной 0, 20, 50 и 100 км соответственно. В этих расчетах при $h = 100$ км и $i_{ej} = 45^\circ$ около 38%, 44% и 49% начальных тел столкнулись с Землей за время, равное 1, 10 и $T_{end} = 393$ млн лет соответственно.

На рис. 1, 2, 3 данные приведены для конечных рассмотренных интервалов времени $T = T_{end}$ (когда все тела уже столкнулись с планетами или Солнцем или достигли 2000 а. е. от Солнца), которые при $v_{ej} \geq 11.3$ км/с в основном находились в интервале от 200 до 700 млн лет и достигали 1356 млн лет. Для таких v_{ej} значения $T_{end} < 100$ млн лет были получены только в серии расчетов vw при $v_{ej} = 16.4$ км/с и $i_{ej} \geq 60^\circ$, а также при $v_{ej} = 20$ км/с и $i_{ej} \geq 45^\circ$.

В табл. 2 при $i_{ej} = 45^\circ$ приведены значения отношения вероятностей столкновений тел с Землей за пять интервалов времени от 0.01 до 100 млн лет к аналогичным вероятностям в конце эволюции для нескольких серий N_v расчетов (для разных точек выброса) и нескольких скоростей v_{ej} выброса. Для оценок вероятностей столкновений тел с Землей и Луной за эти времена эти отношения нужно умножить на вероятности p_E и p_M столкновений тел с соответственно Землей и Луной за весь рассмотренный интервал времени. Эти вероятности также приведены в табл. 2. В табл. 3 приведены интервалы значений вероятности p_E столкновений тел с Землей за несколько интервалов времени T для нескольких серий N_v расчетов и нескольких значений скоростей выброса v_{ej} (в км/с) при угле выброса i_{ej} , равном 45° .

При $v_{ej} \geq 12$ км/с **вероятности столкновений тел с Землей** в течении первых 30 тыс. лет не превышали 0.004, как и в (Gladman, 2005; Reyes-

Ruiz и др., 2012). Вероятности столкновений тел с Землей в основном меньше для больших значений v_{ej} . Зависимость вероятности столкновений тел с Луной от v_{ej} немного меньше, чем с Землей, так как при больших скоростях входа тела в сферу действия Земли разница между вероятностями столкновений тел с Землей и Луной меньше. Разница между вероятностями p_E столкновений тел с Землей при различных точках выброса больше для больших значений v_{ej} . За время $T = 1$ млн лет p_E в табл. 3 могло принимать значения больше 0.5 при $v_{ej} = 11.3$ км/с и равняться нулю при $v_{ej} \geq 16.4$ км/с.

В рассмотренных вариантах для $i_{ej} = 45^\circ$ отношение значений p_E при $T = 10$ млн лет и при $T = 1$ млн лет не превышало двух для $v_{ej} \leq 11.5$ км/с и могло достигать четырех при больших значениях v_{ej} . При $T \geq 10$ млн лет и $v_{ej} \leq 12$ км/с значения p_E для разных точек и углов выброса $i_{ej} \leq 89^\circ$ отличались обычно не более чем в два раза. При $T = T_{end}$ и v_{ej} , равном 11.5, 12 и 14 км/с, значения p_E равнялись примерно 0.3, 0.2 и 0.15–0.2 соответственно. Единственное существенное отличие было в варианте vw (при выбросе с передней точки движения Земли) при $v_{ej} \geq 16.4$ км/с. Для точки выброса W при $v_{ej} = 16.4$ км/с и $30^\circ \leq i_{ej} \leq 60^\circ$ не менее 80% тел были выброшены на гиперболические орбиты и не менее 17% тел столкнулись с Солнцем. Все тела, выброшенные из точки W с $v_{ej} = 20$ км/с, столкнулись с Землей при $i_{ej} \geq 45^\circ$ (причем при $i_{ej} \geq 60^\circ$ – за время, меньшее 700 лет), а значения p_E равнялись 0.016 и 0.064 при i_{ej} , равном 30° и 15° соответственно. При этом более 90% тел выбрасывались на гиперболические орбиты при $i_{ej} = 30^\circ$, а 70% тел выпадали на Солнце при $i_{ej} = 15^\circ$. В некоторых вариантах значения p_E при $i_{ej} = 90^\circ$ могли отличаться даже от значений p_E при $i_{ej} = 89^\circ$. Например, для серии vf и $v_{ej} = 11.5$ км/с значения p_E равнялись 0.31 и 0.17 при $i_{ej} = 89^\circ$ и $i_{ej} = 90^\circ$ соответственно. Эти различия могут быть связаны с тем, что исходные данные при $i_{ej} = 90^\circ$ были очень близки для различных тел в одном и том же варианте, и не было такого осреднения по направлениям выброса, как при меньших значениях i_{ej} . Значения скоростей выброса при $i_{ej} = 90^\circ$ могли отличаться только в девятой значащей цифре, а координаты были полностью одинаковы.

В табл. 2 для $v_{ej} = 11.3$ км/с отношение числа столкнувшихся с Землей тел при некотором времени T к аналогичному числу при $T = T_{end}$ меньше отличалось для пар вариантов vw и vb , vf и vc , vi и vd . Хотя почти во всех вариантах табл. 2 при $v_{ej} \geq 11.3$ км/с динамические времена жизни последних долгоживущих тел превышали 100 млн лет, больше половины выпавших на Землю тел выпадали на нее за время $T < 1$ млн лет при $v_{ej} = 11.3$ км/с и за время $T < 10$ млн лет при

Таблица 2. Вероятности столкновений тел с Землей и Луной в различные моменты времени

p	N_v	v_{ej} , км/с					N_v	v_{ej} , км/с				
		11.3	11.5	12	14	16.4		11.3	11.5	12	14	16.4
p_{001}	vw	0.642	0.053	0.018	0	0	vb	0.647	0.026	0.017	0.0	0.0
p_{01}	vw	0.774	0.224	0.035	0.033	0	vb	0.760	0.269	0.052	0.019	0.019
p_1	vw	0.899	0.547	0.298	0.167	0	vb	0.856	0.526	0.276	0.173	0.115
p_{10}	vw	0.937	0.827	0.667	0.333	0	vb	0.916	0.782	0.707	0.558	0.519
p_{100}	vw	1.0	0.987	1.0	0.90	1.0	vb	1.0	0.987	0.931	0.962	0.962
p_E	vw	0.636	0.30	0.228	0.156	0.004	vb	0.668	0.312	0.232	0.208	0.208
p_M	vw	0.019	0.010	0.009	0.007	0.0002	vb	0.018	0.010	0.007	0.007	0.009
p_{001}	vf	0.209	0.046	0.041	0.033	0.038	vc	0.144	0.064	0.017	0.021	0.0
p_{01}	vf	0.425	0.218	0.041	0.033	0.038	vc	0.496	0.141	0.083	0.042	0.026
p_1	vf	0.724	0.552	0.306	0.133	0.192	vc	0.728	0.462	0.30	0.146	0.077
p_{10}	vf	0.918	0.816	0.816	0.60	0.577	vc	0.912	0.679	0.633	0.562	0.590
p_{100}	vf	0.985	0.977	0.918	0.966	1.0	vc	0.992	0.949	0.950	0.938	0.923
p_E	vf	0.536	0.348	0.196	0.120	0.104	vc	0.50	0.312	0.240	0.192	0.156
p_M	vf	0.013	0.011	0.008	0.005	0.005	vc	0.011	0.009	0.008	0.006	0.007
p_{001}	vu	0.328	0.029	0.016	0.0	0.0	vd	0.303	0.060	0.032	0.0	0.0
p_{01}	vu	0.580	0.186	0.048	0.047	0.0	vd	0.636	0.277	0.032	0.033	0.0
p_1	vu	0.815	0.471	0.274	0.116	0.088	vd	0.856	0.518	0.238	0.066	0.054
p_{10}	vu	0.885	0.714	0.613	0.558	0.559	vd	0.947	0.783	0.635	0.533	0.297
p_{100}	vu	0.992	0.929	0.968	0.907	0.971	vd	1.0	0.952	0.968	0.933	0.919
p_E	vu	0.524	0.280	0.248	0.172	0.136	vd	0.528	0.332	0.224	0.120	0.148
p_M	vu	0.013	0.009	0.010	0.007	0.006	vd	0.007	0.011	0.007	0.007	0.007

Примечания —

1) Отношения $p_{001}, p_{01}, p_1, p_{10}$ и p_{100} вероятностей столкновений тел с Землей за времена T , равные соответственно 0.01, 0.1, 1, 10 и 100 млн лет, к аналогичным вероятностям в конце эволюции для нескольких серий N_v расчетов (vw, vb, vf, vc, vu и vd) и нескольких скоростей v_{ej} (в км/с) выброса (приведенных в первой строке таблицы) при угле выброса i_{ej} , равном 45° .

2) p_E и p_M — это вероятности столкновений тел с соответственно Землей и Луной за весь рассмотренный интервал времени.

3) Значения $p_{001}, p_{01}, p_1, p_{10}, p_{100}, p_E$ и p_M приведены в строках таблицы, начиная с второй строки, причем в каждой строке приведены данные для двух точек выброса (для двух значений N_v). Данные для разных точек выброса разделены двойными линиями.

Таблица 3. Интервал значений вероятности p_E столкновений тел с Землей за несколько интервалов времени T (в млн лет) для нескольких серий N_v расчетов и нескольких значений скоростей выброса v_{ej} (в км/с) при угле выброса i_{ej} , равном 45°

T	$v_{ej} = 11.3$	$v_{ej} = 11.5$	$v_{ej} = 12$	$v_{ej} = 14$	$v_{ej} = 16.4$	$v_{ej} = 20$
0.01	0.072–0.432	0.008–0.02	0.004–0.008	0.0–0.004	0.0–0.004	0.0
0.1	0.228–0.508	0.044–0.092	0.008–0.02	0.004–0.008	0.0–0.004	0.0
1	0.364–0.572	0.132–0.192	0.06–0.072	0.008–0.036	0.0–0.024	0.0–0.02
10	0.456–0.612	0.2–0.284	0.152–0.164	0.04–0.116	0.0–0.092	0.0–0.096
100	0.496–0.668	0.26–0.34	0.18–0.244	0.108–0.20	0.004–0.2	0.0–0.192
T_{end}	0.50–0.668	0.28–0.348	0.196–0.248	0.12–0.208	0.004–0.208	0.0–0.216

$v_{ej} \leq 12$ км/с. При $T = 100$ млн лет значения p_E превышали 90% от значений p_E при $T = T_{\text{end}}$. Среднее значение p_E зависит от распределения тел по v_{esc} и i_{ej} . При $T = T_{\text{end}}$ оно, вероятно, около 0.2. Отношение вероятности столкновений тел с Землей к вероятностям столкновений тел с другими планетами и Солнцем со временем обычно уменьшалось. Общее количество тел, доставленных на Землю и Венеру, вероятно, не сильно отличалось.

Значения отношения $k_{pE/pM} = p_E^*/p_M^*$ вероятностей столкновений тел с Землей и Луной, полученные на основе массивов элементов орбит, приведены на рис. 1 для конечных рассмотренных интервалов времени. Из этого рисунка видно, что значения $k_{pE/pM}$ находятся в основном в диапазонах 35–48, 30–40, 30–35, 25–32, 17–30, 15–30 и 15–25 при v_{ej} , равном 11.3, 11.4, 11.5, 12, 14, 16.4 и 20 км/с соответственно. Более узкий диапазон был получен при $v_{ej} = 11.5$ км/с. В среднем по разным вариантам не было существенного отличия в значениях $k_{pE/pM}$ при различных значениях i_{ej} от 15° до 89°. Существенное отличие значений $k_{pE/pM}$ иногда было при i_{ej} равном 89° и 90°. Оно было связано с тем, что при $i_{ej} = 90^\circ$ вектора начальных скоростей рассмотренных тел были практически одинаковыми. В (Reyes-Ruiz и др., 2012) для $h = 100$ км значения $k_{pE/pM}$ были в диапазоне от 30 до 33 при v_{ej} , равном 12.7, 14.7 и 16.4 км/с, и равнялись 79 и 144 при v_{ej} , равном 11.71 и 11.22 км/с. Как отмечалось в предыдущем разделе, значения отношения вероятности столкновений тел с Землей и Луной могут быть немного меньше значений $k_{pE/pM}$.

На рис. 1–3 данные приведены для конечного момента времени (обычно равного нескольким сотням миллионов лет), когда все тела выпали на планеты или Солнце или достигли 2000 а. е. от Солнца. Значения $k_{pE/pM}$ были в основном больше при рассмотрении меньших интервалов времени. При $T = 10$ млн лет примерно в 90% вариантов значения $k_{pE/pM}$ были больше, чем при $T = T_{\text{end}}$, причем положительная разность между этими значениями не превышала 2 в более половине вариантов и была от 2 до 4 примерно в четверти вариантов.

Примерно такое же (20–40) характерное отношение количества тел, сталкивавшихся с Землей, к числу тел, сталкивавшихся с Луной, было получено в (Маров, Ипатов, 2023) для планетезималей, пришедших к Земле из зоны питания планет земной группы. Для тел, первоначально находившихся на расстоянии от Солнца, большем 3 а. е., это отношение было в основном в диапазоне от 16.4 до 17.4.

На рис. 2 приведены значения вероятности столкновений тел с Луной, вычисленной по форму-

ле $p_M = p_E/k_{pE/pM}$, в зависимости от угла выброса i_{ej} для ряда значений v_{ej} , скорости выброса и различных точек выброса. Эти значения вероятностей приведены для всего рассмотренного интервала времени. Вероятность p_M столкновения тела с Луной находилась в основном в районе 0.01–0.017 при $v_{ej} = 11.3$ км/с, 0.008–0.014 при $v_{ej} = 11.4$ км/с, 0.008–0.014 при $v_{ej} = 11.5$ км/с, 0.006–0.01 при $v_{ej} = 12$ км/с и 0.004–0.008 при $v_{ej} \geq 14$ км/с. Заметная зависимость p_M от i_{ej} была только для точки выброса W на передней полусфере при $v_{ej} \geq 14$ км/с. Для этой точки выброса значения p_M были заметно меньше вышеприведенных значений при $i_{ej} \geq 60^\circ$ и $v_{ej} = 14$ км/с, при $i_{ej} \geq 45^\circ$ и $v_{ej} = 16.4$ км/с, а также при $v_{ej} = 20$ км/с. В (Reyes-Ruiz и др., 2012) для $h = 100$ км и $v_{ej} = 12.7$ км/с большее число тел сталкивалось с планетами при выбросе тел из задней полусферы Земли, чем из передней полусферы. Из-за движения Земли по орбите тела, стартовавшие из ее задней полусферы, имеют меньшую скорость движения относительно Солнца, получают менее эксцентричные гелиоцентрические орбиты и, соответственно, имеют большую вероятность столкновений с планетами.

Как отмечалось в предыдущем разделе, на рис. 2 приведены значения p_M для орбиты Луны на границе сферы действия Земли. Для современной орбиты Луны (при $a_M = 60$) эти оценки p_M будут немного больше (так как значения отношения k вероятностей столкновений с Землей и Луной могут быть немного меньше $k_{pE/pM}$), но практически такие же. В табл. 1 при $a_M = 60$ отношение $k/k_{pE/pM}$ было в диапазонах 0.825–0.87, 0.71–0.78 и 0.65–0.74 при $k_{pE/pM}$, равном 20, 30 и 40 соответственно. Реальное отношение $k/k_{pE/pM}$ может быть больше этих значений, но не превышает 1.

Выше приведены значения вероятностей столкновений выброшенных тел с Луной за весь рассмотренный интервал времени (около нескольких сотен миллионов лет). Разность между значениями $k_{pE/pM}$ при $T = 10$ млн лет и $T = T_{\text{end}}$ в основном не превышала 10%. Поэтому для приближенных оценок можно пользоваться значениями $k_{pE/pM}$ из рис. 1. Доли тел, выпавших на Луну за разные моменты времени относительно их конечных значений, примерно такие же, как данные табл. 2, приведенные для Земли.

Отношение вероятностей столкновений тел с Луной за первые 10 млн лет к этим вероятностям за весь интервал времени в основном находилось в интервалах 0.7–0.8, 0.55–0.65 и 0.45–0.6 при v_{ej} ,

равном 11.5, 12 и 16.4 км/с соответственно (см. табл. 2). Это отношение имело тенденцию к убыванию при больших значениях v_{ej} .

Значения **скоростей столкновений тел с Луной и Землей** в зависимости от угла выброса i_{ej} для ряда значений v_{ej} скорости выброса и различных точек выброса представлены на рис. 3. Параболическая скорость на поверхности Луны в несколько раз меньше характерной скорости входа тела в сферу действия Земли. Поэтому значения скорости столкновения тела с Луной лишь немного превышали скорость входа тела в сферу действия Земли. Отношение этих скоростей равно 1.05, 1.03 и 1.01 при $k_{pE/pM}$, равном 20, 30 и 40 соответственно.

Средние скорости столкновений выброшенных тел с Землей и Луной тем больше, чем больше скорость выброса v_{ej} . Значения скоростей столкновений тел с Землей составили в основном около 13, 14–15, 14–16, 14–20, 14–25 и 15–35 км/с при скорости выброса, равной 11.3, 11.5, 12, 14, 16.4 и 20 км/с соответственно. Скорости столкновений тел с Луной находились в основном в пределах 7–8, 10–12, 10–16, 11–23 и 12–33 км/с при v_{ej} , равном 11.3, 12, 14, 16.4 и 20 км/с соответственно. Чем больше v_{ej} , тем шире диапазон значений средних скоростей столкновений с Землей или Луной, полученных для различных углов и точек выброса.

РОСТ ЗАРОДЫША ЛУНЫ ПРИ ВЫПАДЕНИИ НА НЕГО ВЕЩЕСТВА, ВЫБРОШЕННОГО С ЗАРОДЫША ЗЕМЛИ

Тела, выброшенные с Земли, могли участвовать в формировании Луны, как при аккумуляции Земли и Луны, так и при поздней тяжелой бомбардировке (late heavy bombardment). Для того, чтобы содержать нынешнюю долю железа, Луна должна была аккумулировать основную часть своей массы из мантии Земли (Ипатов, 2018). Приведенные выше расчеты показывают, что при современной орбите и массе Луны на нее выпадало бы около 1% тел, выброшенных с Земли. Эта доля меньше при меньшей массе зародыша Луны. Из полученных оценок вероятностей столкновений тел, выброшенных с Земли, с Луной, двигавшейся по ее современной орбите, (рис. 2) можно сделать вывод о том, что для того, чтобы Луна приобрела большую часть своей массы за счет вещества, выброшенного с Земли при ее неоднократной бомбардировке, масса вещества, выброшенного с Земли во время ее аккумуляции, должна быть сравнима с массой Земли. Анализируя приведенные во введении данные о характерных скоростях столкновений планетезималей с Землей и зависимости массы вещества, выброшенно-

го при столкновении тела с Землей, от скорости столкновения, можно ожидать, что при большинстве столкновений ударников с Землей масса выброшенного вещества была в несколько раз (чаще на порядок) меньше массы ударника. Сопоставимый с массой ударника выброс вещества мог быть только при сравнительно редких столкновениях с Землей тел, приходивших из-за орбиты Марса. Эти оценки свидетельствуют в пользу того, что тел, выброшенных с Земли и упавших на зародыш Луны, вероятно, было недостаточно для роста Луны из маленького зародыша на ее современной орбите. Этот результат свидетельствует в пользу образования лунного зародыша и дальнейшего его роста до большей части современной массы Луны вблизи Земли. Ипатов (2018) предположил, что первоначальный зародыш Луны с массой не более 0.1 от массы Луны образовался одновременно с зародышем Земли из общего разреженного сгущения.

Отношение доли тел, столкнувшихся с Землей, к доле тел, столкнувшихся с Луной, для планетезималей из зон питания планет земной группы близко к аналогичному рассмотренному выше отношению $k_{pE/pM}$ для тел, выброшенных с Земли и покинувших ее сферу действия. В (Маров, Ипатов, 2021) отмечалось, что отношение k_{EM} количества планетезималей, сталкивающихся с Землей и Луной, варьировалось в основном от 20 до 40. При этом для планетезималей с большими полуосями начальных орбит $0.9 \leq a_0 \leq 1.1$ а. е. и с небольшими начальными эксцентриситетами k_{EM} было в основном в диапазоне от 30 до 40, а планетезимали, первоначально более удаленные от орбиты Земли, приходили к ней с более эксцентричных орбит, и такое отношение k_{EM} для них было меньше, чем для близких слабо эксцентричных орбит. На рис. 1 значения $k_{pE/pM}$ варьировались в основном от 35–47 при $v_{ej} = 11.3$ км/с до 17–30 при $v_{ej} = 16.4$ км/с и 15–25 при $v_{ej} = 20$ км/с.

Суммарная масса тел, выброшенных с Земли и до выхода из ее сферы действия столкнувшихся с Луной на ее современной орбите, вероятно, была невелика. В проведенных расчетах, за исключением выброса тел со скоростями, чуть превышавшими параболическую скорость Земли, выброшенные тела сразу покидали сферу действия Земли и до выхода из этой сферы могли пересекать орбиту Луны не более одного раза. Многие наклоненные орбиты выброшенных тел могли не пересекать орбиту Луны. Отношение двух радиусов Луны к длине ее орбиты равно 0.00144 и указывает на максимальное значение вероятности столкновения тела с Луной для рассматриваемой модели. Это отношение на порядок меньше представленных на рис. 2 веро-

ястностей столкновений выброшенных тел, которые покидали сферу действия Земли, но потом в течение миллионов лет неоднократно входили в эту сферу. Для возможности многократных сближений выброшенного тела с Луной нужно, чтобы апогей его орбиты вокруг Земли находился за орбитой Луны, но внутри сферы действия Земли (а перицентрическое расстояние было больше радиуса Земли). Такая возможность больше для меньшего расстояния Луны от Земли.

Рассмотрим следующую модель. Пусть при столкновениях планетезималей с Землей в среднем масса выброшенного вещества равнялась k_{ej} от массы вещества, вошедшего в Землю. При росте массы Земли на $k_E \times m_E$ суммарная масса планетезималей, вошедших в сферу действия Земли и столкнувшихся с Луной, равна $k_E m_E (1 + k_{ej}) / r_{EM}$. Масса тел, выброшенных с Земли и выпавших на Луну после выхода из сферы действия Земли (при, возможно, многократных последующих попадании в сферу действия Земли), равна $k_{ej} \times k_E \times m_E \times p_E / k_{pE/pM}$. Отношение k_{plb} массы планетезималей, выпавших на Луну, к массе тел, выброшенных с Земли и выпавших на Луну, равно $(k_{pE/pM} / r_{EM}) (1 + k_{ej}) / (k_{ej} \times p_E)$. Как отмечалось выше, $k_{pE/pM} / r_{EM}$ близко к 1. Поэтому k_{plb} близко к $(1 + k_{ej}) / (k_{ej} \times p_E)$. Так как $k_{ej} < 1$ (иначе Земля бы не выросла), то $(1 + k_{ej}) / k_{ej} > 2$. Доля p_E тел, выброшенных с Земли и выпавших позднее обратно на нее, порядка 0.2–0.3 (табл. 2–3). Из результатов, представленных во введении, можно сделать вывод о том, что для большинства столкновений планетезималей с Землей k_{ej} не превышало 0.15. При $k_{ej} = 0.15$ и $p_E = 0.3$ k_{plb} близко к 25. Эти оценки показывают, что суммарная масса планетезималей (с большим содержанием железа, чем в мантии Земли), столкнувшихся с Луной на ее современной орбите, была по крайней мере в несколько раз больше массы тел, выброшенных с Земли и затем столкнувшихся с Луной. Учет выпадений планетезималей, более богатых железом, непосредственно на Луну, как и оценки в начале данного раздела, свидетельствует в пользу приобретения Луной основной массы вещества более близко к Земле, чем современная орбита Луны.

При орбите Луны, близкой к Земле, доля тел, выброшенных с Земли и покинувших сферу действия Земли, при выпадении на Луну могла быть всего немного больше 13 (отношения квадратов радиусов Земли и Луны). Однако модели роста массы зародыша Луны в основном за счет таких тел препятствует то, что еще большее число тел (не выброшенных с Земли) с примерно такими же (в среднем немного большими) скоростями могло выпадать непосредственно на Луну (не будучи выброшенными с Земли) и приносить на

Луну материал более богатый железом, чем мантия Земли.

Нам кажется более вероятным, что, как было предложено в (Ипатов, 2018), первоначальный зародыш Луны (с массой на порядок меньшей современной массы Луны) образовался одновременно с зародышем Земли при сжатии общего разреженного сгущения. Это сгущение получило угловой момент, необходимый для образования двойной системы, при столкновении двух сгущений. Такие столкновения сгущений не часты, что объясняет отсутствие крупных спутников у других планет земной группы. Рост зародыша Луны, вероятно, происходил в рамках модели мультиимпактов, когда вещество, выброшенное с Земли, образовывало диск около Земли, из которого аккумулировались тела. В (Rufu и др., 2017) массы ударников были не меньше массы современной Луны. Проведенные нами расчеты эволюции орбит выброшенных тел были для столкновений более мелких планетезималей с Землей, при которых большинство выброшенного вещества, не выпавшего сразу обратно на Землю, покидало сферу действия Земли. Наличие первоначально крупного зародыша Луны способствовало более эффективному захвату выброшенного с Земли вещества зародышем Луны. Для более эффективного роста зародыша Луны желательно, чтобы при некоторых соударениях тел-ударников с Землей выброшенные тела не просто вылетали из кратера, а часть вещества выходила бы на орбиты вокруг Земли.

ВЫВОДЫ

Рассматривалась эволюция орбит тел, выброшенных с Земли при ударах крупных тел-планетезималей. Такие столкновения происходили во время аккумуляции Земли и во время поздней тяжелой бомбардировки. В каждом варианте расчетов исследовалось движение 250 тел, выброшенных с Земли, при фиксированных значениях угла выброса i_{ej} (отсчитываемого от плоскости поверхности), скорости выброса v_{ej} и шага интегрирования по времени. В разных вариантах значения угла выброса i_{ej} составляли 15°, 30°, 45°, 60°, 89° или 90°. Скорость v_{ej} тел, выброшенных из Земли, в основном равнялась 11.22, 11.5, 12, 14, 16.4 или 20 км/с, но рассматривались и другие значения в диапазоне от 11.22 до 11.5 км/с. Учитывалось гравитационное влияние Солнца и всех восьми планет. Из интегрирования исключались тела, которые столкнулись с планетами или Солнцем или достигли 2000 а. е. от Солнца. Рассматривался выброс тел из шести противоположных точек земной поверхности для ряда значений скоростей и углов выброса тел. В рассмотренных

вариантах расчетов движения тел, выброшенных с Земли, большая часть тел покидала сферу Хилла Земли и двигалась по гелиоцентрическим орбитам. Их динамическое время жизни достигало нескольких сотен миллионов лет.

Средние скорости столкновений выброшенных тел с Землей и Луной тем больше, чем больше скорость выброса. Значения скоростей столкновений тел с Землей составили около 13, 14–15, 14–16, 14–20, 14–25 и 15–35 км/с при скорости выброса, равной 11.3, 11.5, 12, 14, 16.4 и 20 км/с соответственно. Скорости столкновений тел с Луной находились в основном в пределах 7–8, 10–12, 10–16, 11–23 и 12–33 км/с при v_{ej} , равном 11.3, 12, 14, 16.4 и 20 км/с соответственно.

Вероятности p_E и p_M столкновений тел с Землей и Луной в среднем были ниже при более высоких скоростях выброса v_{ej} . На всем рассматриваемом интервале времени при значениях v_{ej} , равных 11.5, 12 и 14 км/с, значения p_E составляли примерно 0.3, 0.2 и 0.15–0.2 соответственно. При скоростях выброса $v_{ej} \leq 11.25$ км/с, т. е. немного превышающих параболическую скорость, большая часть выброшенных тел выпадала обратно на Землю. Вероятность p_M столкновения выброшенного с Земли тела с Луной была примерно в 15–35 раз меньше, чем с Землей при скорости выброса $v_{ej} \geq 11.5$ км/с. Вероятность столкновения таких тел с Луной на ее современной орбите составляла в основном около 0.004–0.008 при скоростях выброса не менее 14 км/с и около 0.006–0.01 при $v_{ej} = 12$ км/с. Эта вероятность была больше при меньших скоростях выброса и была в диапазоне 0.01–0.02 при скорости выброса, равной 11.3 км/с.

Полученные результаты показывают, что тел, выброшенных с Земли и выпавших на зародыш Луны, было бы недостаточно для того, чтобы Луна выросла до своей современной массы из небольшого зародыша, двигавшегося по современной орбите Луны. Этот вывод свидетельствует в пользу того, что зародыш Луны образовался (например, одновременно с зародышем Земли из общего разреженного сгущения) и в дальнейшем приобрел большую часть массы Луны на небольшом расстоянии от Земли. Для более эффективного роста зародыша Луны желательно, чтобы при некоторых соударениях тел-ударников с Землей выброшенные тела не просто вылетали из кратера, а часть вещества выходила на орбиты вокруг Земли, как в модели мультиимпактов.

Автор выражает глубокую признательность А.Б. Макалкину за полезные замечания, способствовавшие улучшению статьи.

Исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда, проект 21–17–00120.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Артемяева Н.А., Шувалов В.В. Численное моделирование высокоскоростных ударных выбросов при падении на Луну комет и астероидов // Астрон. вестн. 2008. Т. 42. № 4. С. 351–356. (Artemieva N.A., Shuvalov V.V. Numerical simulation of high-velocity impact ejecta following falls of comets and asteroids onto the Moon // Sol. Syst. Res. 2008. V. 42. № 4. P. 329–334).
- Афанасьев В.Н., Печерникова Г.В. О вероятности захвата допланетных тел в протолунный рой при формировании системы Земля–Луна // Астрон. вестн. 2022. Т. 56. № 6. С. 389–409. (Afanas'ev V.N., Pechernikova G.V. On the probability of capturing preplanetary bodies into the protolunar swarm during the formation of the Earth–Moon system // Sol. Syst. Res. 2022. V. 56. № 6. P. 382–402).
- Васильев С.В., Кривцов А.М., Галимов Э.М. Исследование процесса роста системы планета-спутник в результате аккумуляции вещества пылевого облака // Астрон. вестн. 2011. Т. 45. С. 420–429. (Vasil'ev S.V., Krivtsov A.M., Galimov E.M. Study of the planet-satellite system growth process as a result of the accumulation of dust cloud material // Sol. Syst. Res. 2011. V. 45. № 5. P. 410–419).
- Витязев А.В., Печерникова Г.В. Ранняя дифференциация Земли и проблема лунного состава // Физика Земли. 1996. № 6. С. 3–16.
- Галимов Э.М. Проблема происхождения системы Земля–Луна // Проблемы зарождения и эволюции биосферы / Ред. Галимов Э.М. М.: Наука, 1995. С. 8–45.
- Галимов Э.М. Современное состояние проблемы происхождения системы Земля–Луна // Проблемы зарождения и эволюции биосферы / Ред. Галимов Э.М. М.: Книжный дом “ЛИБРОКОМ”, 2008. С. 213–222.
- Галимов Э.М. Образование Луны и Земли из общего супрапланетного газо-пылевого сгущения // Геохимия. 2011. Т. 6. № 6. С. 563–580.
- Галимов Э.М. Анализ изотопных систем (Hf-W, Rb-Sr, J-Pu-Xe, U-Pb) применительно к проблеме формирования планет на примере системы Земля–Луна // Проблемы зарождения и эволюции биосферы / Ред. Галимов Э.М. М.: КРАСАНД, 2013. С. 47–59.
- Галимов Э.М., Кривцов А.М., Забродин А.В., Легкоступов М.С., Энеев Т.М., Сидоров Ю.И. Динамическая модель образования системы Земля–Луна // Геохимия. 2005. № 11. С. 1139–1150.
- Горькавый Н.Н. Образование Луны и двойных астероидов // Изв. Крым. Астрофиз. Obs. 2007. Т. 103. № 2. С. 143–155.
- Жарков В.Н. Об истории лунной орбиты // Астрон. вестн. 2000. Т. 34. С. 1–11. (Zharkov V.N. On the history of the lunar orbit // Sol. Syst. Res. 2000. V. 34. P. 1–11).

- Ипатов С.И.* Времена эволюции дисков планетезималей // Астрон. журн. 1988. Т. 65. № 5. С. 1075–1085.
- Ипатов С.И.* Миграция небесных тел в Солнечной системе. Изд-во УРСС, 2000. 320 с. (также Изд. стереотип. URSS. 2021. 320 с.)
<https://doi.org/10.17513/np.451>. <https://elibrary.ru/item.asp?id=46237738>. http://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_29239
- Ипатов С.И.* Формирование транснептуновых спутниковых систем на стадии сгущений // Астрон. вестн. 2017а. Т. 51. № 4. С. 321–343. (*Ipatov S.I.* Formation of trans-Neptunian satellite systems at the stage of condensations // Sol. Syst. Res. 2017а. V. 51. № 4. P. 294–314.)
<https://doi.org/10.1134/S0038094617040013>,
<https://arxiv.org/abs/1801.05217>
- Ипатов С.И.* Формирование орбит меньших компонент в обнаруженных двойных объектах транснептунового пояса // Астрон. вестн. 2017б. Т. 51. № 5. С. 441–449. (*Ipatov S.I.* Origin of orbits of secondaries in the discovered trans-Neptunian binaries // Sol. Syst. Res. 2017b. V. 51. № 5. P. 409–416.)
<https://doi.org/10.1134/S0038094617050045>,
<https://arxiv.org/abs/1801.05254>
- Ипатов С.И.* Формирование зародышей Земли и Луны из общего разреженного сгущения и их последующий рост // Астрон. вестн. 2018. Т. 52. № 5. С. 411–426. (*Ipatov S.I.* Formation of embryos of the Earth and the Moon from the common rarefied condensation and the subsequent growth // Sol. Syst. Res. 2018. V. 52. № 5. P. 401–416.)
<https://doi.org/10.1134/S0038094618050040>.
<http://arxiv.org/abs/2003.09925>.
<https://www.academia.edu/38545653/>
- Ипатов С.И.* Вероятности столкновений планетезималей из различных областей зоны питания планет земной группы с формирующимися планетами и Луной // Астрон. вестн. 2019. Т. 53. № 5. С. 349–379. <https://elibrary.ru/item.asp?id=39180392>, DOI: 10.1134/S0320930X19050049. (*Ipatov S.I.* Probabilities of collisions of planetesimals from different regions of the feeding zone of the terrestrial planets with forming planets and the Moon // Sol. Syst. Res. 2019. V. 53. № 5. P. 332–361.)
<https://doi.org/10.1134/S0038094619050046>.
<http://arxiv.org/abs/2003.11301>. <https://rdcu.be/bRVA8>. <https://www.academia.edu/42216860>)
- Маров М.Я., Ипатов С.И.* Формирование Земли и Луны: влияние малых тел // Геохимия. 2021. Т. 66. № 11. С. 964–971.
DOI: 10.31857/S0016752521110078.
<http://arxiv.org/abs/2112.06047>
- Маров М.Я., Ипатов С.И.* Процессы миграции в Солнечной системе и их роль в эволюции Земли и планет // Успехи физ. наук 2023. Т. 193. № 1. С. 2–32.
<https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.08.039044>.
<http://arxiv.org/abs/2309.00716>
- Маров М.Я., Воронаев С.А., Ипатов С.И., Бадюков Д.Д., Слюта Е.Н., Стенников А.В., Федюлов В.С., Душен-*
ко Н.В., Сорокин Е.М., Кронрод Е.В. Формирование Луны и ранняя эволюция Земли. М.: URSS, 2019. 320 с.
- Мелош Г.* Образование ударных кратеров: геологический процесс. Пер. с англ. М.: Мир, 1994. 336 с.
- Рускол Е.Л.* О происхождении Луны. I: Образование околоземного роя тел // Астрон. журн. 1960. Т. 37. № 4. С. 690–702.
- Рускол Е.Л.* О происхождении Луны. II: Рост Луны в околоземном спутниковом рое // Астрон. журн. 1963. Т. 40. № 2. С. 288–296.
- Рускол Е.Л.* О происхождении Луны. III: Некоторые вопросы динамики околоземного роя // Астрон. журн. 1971. Т. 48. № 4. С. 819–829.
- Рускол Е.Л.* Происхождение Луны. М.: Наука, 1975. 188 с.
- Шувалов В.В., Трубецкая И.А.* Численное моделирование высокоскоростных выбросов при ударах комет и астероидов: предварительные результаты // Астрон. вестн. 2011. Т. 45. № 5. С. 402–411. (*Shuvalov V.V., Trubetskaya I.A.* Numerical simulation of high-velocity ejecta following comet and asteroid impacts: preliminary results // Sol. Syst. Res. 2011. V. 45. P. 392–401).
- Armstrong J.C., Wells L.E., Guillermo G.* Rummaging through Earth's attic for remains of ancient life // Icarus. 2002. V. 160. P. 183–196.
- Artemieva N.* From the Moon to the Earth without Jules Verne – lunar meteorites and lunar dust delivery // 45th Lunar and Planet. Sci. Conf. 2014. #1659. (Abstract).
- Barnouin O.S., Dalya R.T., Cintala M.J., Crawford D.A.* Impacts into coarse-grained spheres at moderate impact velocities: Implications for cratering on asteroids and planets // Icarus. 2019. V. 325. P. 67–83.
- Barr A.C.* On the origin of Earth's Moon // J. Geophys. Res.: Planets. 2016. V. 121. P. 1573–1601. <https://arxiv.org/pdf/1608.08959.pdf>.
- Beech M., Comte M., Coulson I.* The production of terrestrial meteorites – Moon accretion and lithopanspermia // Am. J. Astron. and Astrophys. 2019. V. 7. № 1. P. 1–9.
- Bottke W.F., Norman M.D.* The late heavy bombardment // Ann. Rev. Earth and Planet. Sci. 2017. V. 45. P. 619–647.
- Bulirsh R., Stoer J.* Numerical treatment of ordinary differential equations by extrapolation methods // Num. Math. 1966. № 8. P. 1–13.
- Cameron A.G.W., Ward W.R.* The origin of the Moon // Lunar and Planet. Sci. Conf. 1976. V. 7. P. 120–122 (Abstract).
- Canup R.M.* Simulations of a late lunar-forming impact // Icarus. 2004. V. 168. № 2. P. 433–456.
- Canup R.M.* Forming a Moon with an Earth-like composition via a giant impact // Science. 2012. V. 338. P. 1052–1055.

- Canup R.M., Asphaug E.* Origin of the Moon in a giant impact near the end of the Earth's formation // *Nature*. 2001. V. 412. № 6848. P. 708–712.
- Canup R.M., Barr A.C., Crawford D.A.* Lunar-forming impacts: High-resolution SPH and AMR-CTH simulations // *Icarus*. 2013. V. 222. P. 200–219.
- Canup R.M., Richter K., Dauphas N., Pahlevan K., Čuk M., Lock S.J., Stewart S.T., Salmon J., Ruffy R., Nakajima M., Magna T.* Origin of the Moon // *New views of the Moon II*. Book chapter. 2021. 71 p. <https://arxiv.org/abs/2103.02045>
- Chambers J.E.* A hybrid symplectic integrator that permits close encounters between massive bodies // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 1999. V. 304. P. 793–799.
- Citron R.I., Aharonson O., Perets H., Genda H.* Moon formation from multiple large impacts // 45th Lunar and Planet. Sci. Conf. 2014. #2085 (Abstract).
- Cuk M., Stewart S.T.* Making the Moon from a fast-spinning Earth: A giant impact followed by resonant despinning // *Science*. 2012. V. 338. P. 1047–1052.
- Cuk M., Hamilton D.P., Lock S.J., Stewart S.T.* Tidal evolution of the Moon from a high-obliquity, high-angular-momentum Earth // *Nature*. 2016. V. 539. P. 402–406.
- Cuzzi J.N., Hogan R.C.* Primary accretion by turbulent concentration: The rate of planetesimal formation and the role of vortex tubes // 43th Lunar and Planet. Sci. Conf. 2012. #2536 (Abstract).
- Cuzzi J.N., Hogan R.C., Sharif K.* Toward planetesimals: Dense chondrule clumps in the protoplanetary nebula // *Astrophys. J.* 2008. V. 687. P. 1432–1447.
- Cuzzi J.N., Hogan R.C., Bottke W.F.* Towards initial mass functions for asteroids and Kuiper belt objects // *Icarus*. 2010. V. 208. P. 518–538.
- Frantseva K., Nesvorný D., Mueller M., van der Tak F.F.S., ten Kate I.L., Pokorný P.* Exogenous delivery of water to Mercury // *Icarus*. 2022. V. 383. id. 114980 (11 pp.).
- Gallant J., Gladman B., Cuk M.* Current bombardment of the Earth-Moon system: Emphasis on cratering asymmetries // *Icarus*. 2009. V. 202. P. 371–382.
- Gattacceca J., Debaille V., Devouard B., Leya I., Jourdan F., Braucher R., Roland J., Pourkhorsandi H., Goderis S., Jambon A.* Northwest Africa 13188: a possible meteorite ... from Earth! // *Abstracts of Goldschmidt Conf.* 2023. <https://conf.goldschmidt.info/goldschmidt/2023/meetingapp.cgi/Paper/20218>
- Gladman B., Dones L., Levison H.F., Burns J.A.* Impact seeding and reseedling in the inner Solar System // *Astrobiology*. 2005. V. 5. P. 483–496. <https://www.liebertpub.com/doi/10.1089/ast.2005.5.483>
- Galimov E.M., Krivtsov A.M.* Origin of the Moon. New concept. Berlin.: De Gruyter, 2012. 168 p.
- Gorkavyy N.N.* The new model of the origin of the Moon // *Bull. Am. Astron. Soc.* 2004. V. 36. Abstr. P. 861.
- Hartmann W.K., Davis D.R.* Satellite-sized planetesimals and lunar origin // *Icarus*. 1975. V. 24. P. 504–515.
- Holsapple K.A., Housen K.R.* A crater and its ejecta: An interpretation of deep impact // *Icarus*. 2007. V. 187. P. 345–356.
- Ipatov S.I.* Collisions of bodies ejected from several places on the Earth and the Moon with the terrestrial planets and the Moon // *Abstracts of 54th Lunar and Planet. Sci. Conf.* 2023. #1508. <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2023/pdf/1508.pdf>
- Ipatov S.I., Mather J.C.* Migration of trans-Neptunian objects to the terrestrial planets // *Earth, Moon, and Planets*. 2003. V. 92. P. 89–98. <https://doi.org/10.1023/B:MOON.0000031928.45965.7b>. <http://arXiv.org/format/astro-ph/0305519>
- Ipatov S.I., Mather J.C.* Comet and asteroid hazard to the terrestrial planets // *Adv. Space Res.* 2004a. V. 33. P. 1524–1533. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(03\)00451-4](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(03)00451-4). <http://arXiv.org/format/astro-ph/0212177>
- Ipatov S.I., Mather J.C.* Migration of Jupiter-family comets and resonant asteroids to near-Earth space // *Ann. NY. Acad. Sci.* 2004b. V. 1017. P. 46–65. <https://doi.org/10.1196/annals.1311.004>. <http://arXiv.org/format/astro-ph/0308448>.
- Johansen A., Oishi J.S., Mac Low M.-M., Klahr H., Henning T., Youdin A.* Rapid planetesimal formation in turbulent circumstellar disks // *Nature*. 2007. V. 448. P. 1022–1025.
- Johansen A., Youdin A., Klahr H.* Zonal flows and long-lived axisymmetric pressure bumps in magnetorotational turbulence // *Astrophys. J.* 2009a. V. 697. P. 1269–1289.
- Johansen A., Youdin A., Mac Low M.-M.* Particle clumping and planetesimal formation depend strongly on metallicity // *Astrophys. J.* 2009b. V. 704. P. L75–L79.
- Johansen A., Klahr H., Henning T.* High-resolution simulations of planetary formation in turbulent protoplanetary discs // *Astron. and Astrophys.* 2011. V. 529. id. A62 (16 p.).
- Johansen A., Youdin A.N., Lithwick Y.* Adding particle collisions to the formation of asteroids and Kuiper belt objects via streaming instabilities // *Astron. and Astrophys.* 2012. V. 537. id. A125 (17 p.).
- Levison H.F., Duncan M.J.* The long-term dynamical behavior of short-period comets // *Icarus*. 1994. V. 108. P. 18–36.
- Lyra W., Johansen A., Klahr H., Piskunov N.* Embryos grown in the dead zone. Assembling the first protoplanetary cores in low mass self-gravitating circumstellar disks of gas and solids // *Astron. and Astrophys.* 2008. V. 491. P. L41–L44.
- Lyra W., Johansen A., Zsom A., Klahr H., Piskunov N.* Planet formation bursts at the borders of the dead zone in 2D numerical simulations of circumstellar disks // *Astron. and Astrophys.* 2009. V. 497. P. 869–888.

- Melosh H.* Ejection of rock fragments from planetary bodies // *Geology*. 1985. V. 13. P. 144–148.
- Ópik E.J.* Collision probabilities with the planets and the distribution of interplanetary matter // *Proc. Roy. Irish Acad. Sect. A*. 1951. V. 54. P. 165–199.
- Pahlevan K., Morbidelli A.* Collisionless encounters and the origin of the lunar inclination // *Nature*. 2015. V. 527. № 7579. P. 492–494.
(<https://arxiv.org/abs/1603.06515>)
- Raducan S.D., Davison T.M., Collins G.S.* Ejecta distribution and momentum transfer from oblique impacts on asteroid surfaces // *Icarus*. 2022. V. 374. article id. 114793 (16 p.).
(<https://arxiv.org/abs/2105.01474>)
- Reyes-Ruiz M., Chavez C.E., Aceves H., Hernandez M.S., Vazquez R., Nuñez P.G.* Dynamics of escaping Earth ejecta and their collision probabilities with different Solar System bodies // *Icarus*. 2012. V. 220. P. 777–786.
- Ringwood A.E.* Flaws in the giant impact hypothesis of lunar origin // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1989. V. 95. № 3–4. P. 208–214.
- Rufu R., Aharonson O.* A multiple impact hypothesis for Moon formation // 46th Lunar and Planet. Sci. Conf. 2015. #1151 (Abstract).
- Rufu R., Aharonson O., Perets H.B.* A multiple-impact origin for the Moon // *Nature Geosci.* 2017. V. 10. P. 89–94.
- Rufu R., Salmon J., Pahlevan K., Visscher C., Nakajima M., Righter K.* The origin of the Earth-Moon system as revealed by the Moon // *Bull. Am. Astron. Soc.* 2021. V. 53. № 4 (Planet. Sci. and Astrobiology Decadal Surv. 2023–2032, white paper). e-id. 238.
DOI: 10.3847/25c2cf6b.6e7d4ab6
- Salmon J., Canup R.M.* Lunar accretion from a Roche-interior fluid disk // *Astrophys. J.* 2012. V. 760. id. A83. (18 p.).
- Svetsov V.* Cratering erosion of planetary embryos // *Icarus*. 2011. V. 214. P. 316–326.
- Svetsov V.V., Pechernikova G.V., Vityazev A.V.* A model of Moon formation from ejecta of macroimpacts on the Earth // 43th Lunar and Planet. Sci. Conf. 2012. #1808 (Abstract).
- Touma J., Wisdom J.* Evolution of the Earth-Moon system // *Astron. J.* 1994. V. 108. № 5. P. 1943–1961.
- Wang N., Zhou J.-L.* Analytical formulation of lunar cratering asymmetries // *Astron. and Astrophys.* 2016. V. 594. id. A52. (25 p.).
- Youdin A.N.* On the formation of planetesimals via secular gravitational instabilities with turbulent stirring // *Astrophys. J.* 2011. V. 731. id. A99 (18 p.).
- Youdin A.N., Kenyon S.J.* From disks to planets // *Planets, Stars and Stellar Systems. Solar and Stellar Planetary Systems* / Eds: Oswalt T.D., French L.M., Kalas P. Dordrecht: Springer Science+Business Media, 2013. V. 3. P. 1–62.
http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-5606-9_1

УДК 528.94;523.4

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ГИПЕРИОНА В ПРОЕКЦИЯХ ТРЕХОСНОГО ЭЛЛИПСОИДА НА ОСНОВЕ НОВОЙ ОПОРНОЙ СЕТИ И ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА

© 2024 г. А. И. Соколов^а, И. Е. Надеждина^б, М. В. Нырцов^а,
А. Э. Зубарев^б, М. Э. Флейс^с, Н. А. Козлова^{б,*}

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

^б Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК) Москва, Россия

^с Институт географии РАН, Москва, Россия

*e-mail: mexlab@miigaik.ru

Поступила в редакцию 30.05.2023 г.

После доработки 10.07.2023 г.

Принята к публикации 03.09.2023 г.

В работе были использованы данные о спутнике Сатурна Гиперионе, полученные по результатам полета космического аппарата (КА) Cassini, ввиду их полноты, разрешения и качества изображений. Они указали на хаотичность вращения Гипериона, вследствие чего возникла неоднозначность определения системы его координат, связанной с телом. Были получены размеры аппроксимирующего эллипсоида и параметры перехода из системы координат, первоначально принятой в предположении равномерного вращения Гипериона вокруг Сатурна, в систему координат, оси которой совпадают с осями найденного эллипсоида. Также была создана цифровая модель поверхности Гипериона, на основе которой были вычислены геодезические высоты относительно трехосного эллипсоида с определенными параметрами. Методика расчета высот основана на совместном использовании уравнения нормали к поверхности, проходящей через заданную точку, и уравнения собственно поверхности. В результате проведенных исследований была составлена карта Гипериона в проекции трехосного эллипсоида с горизонталями, построенными на основании вычисленных геодезических высот. Представлена оригинальная методика исследования характера вращения Гипериона с помощью проекции положения Сатурна на поверхность Гипериона для всех известных моментов времени в объектоцентрической системе координат. Реализация данной методики позволила предположить, что собственная ось вращения Гипериона прецессирует относительно наибольшей оси тела в направлении против часовой стрелки.

Ключевые слова: Гиперион, хаотическое вращение, проекции трехосного эллипсоида, картографирование Гипериона, опорная сеть, цифровая модель рельефа

DOI: 10.31857/S0320930X24010093, EDN: OGQNVN

ВВЕДЕНИЕ

Данные, полученные космическим аппаратом (КА) Cassini, позволили установить хаотичность вращения спутника Сатурна Гипериона, что потребовало уточнения планетоцентрической системы координат для этого небесного тела. Однако еще до полета Cassini была выбрана планетоцентрическая система координат, в которой были зарегистрированы названия некоторых форм рельефа поверхности. Для получения фотомозаики необходима поверхность относимости, в качестве которой могут выступать эллипсоид или сфера. В статье (Thomas и др., 2007) впервые представлена модель поверхности Гипериона, однако без приведения значений осей эллипсоида,

т. е. дан средний радиус сферы и размах значений радиус-векторов от 95 до 182 км. В 2010 г. впервые были опубликованы значения полуосей эллипсоида Гипериона (Thomas, 2010) и в более поздней статье (Harbison и др., 2011) они же были использованы для оценки вращения. Ввиду того, что миссия Cassini продолжалась вплоть до 2017 г. и за период с 2010 по 2016 гг. были получены новые снимки, в статье (Надеждина, Конопихин, 2022) приведена модель поверхности, полученная по всем имеющимся данным.

Вследствие подтвержденной хаотичности вращения Гипериона существует неоднозначность определения системы его координат, связанной с телом. Хаотичность вращения Гипериона не позволяет использовать прямой метод решения

задачи фотограмметрии. Вместо этого в качестве начальной принимается система координат, определенная исходя из предположения о равномерном вращении Гипериона вокруг Сатурна. Затем для пролета с наибольшим количеством изображений и продолжительностью по времени данные телеметрии приводятся в выбранную систему координат. После измерения связующих точек и уравнивания методом связок определяются координаты опорных точек на поверхности объекта и уточняются данные телеметрии, участвующие в самом длительном пролете. Для остальных изображений опорные точки и уточненные данные телеметрии используются с целью включения всех данных в обработку, что позволяет восстановить положение точек съемки, углов ориентирования камер и координат опорных точек в единой системе координат.

Затем облако опорных точек, полученных на основе фотограмметрической обработки изображений, аппроксимируется трехосным эллипсоидом и определяются параметры перехода от выбранной ранее системы координат к системе координат эллипсоида, пригодной для картографирования поверхности Гипериона.

В работе также проводится оценка характера вращения Гипериона на основе расчета проекции положения Сатурна на поверхность Гипериона для всех известных моментов времени в принятой объектоцентрической системе координат. Можно заметить, что положение Сатурна в системе координат Гипериона выстраивается в цепочки векторов, описывающие характер его вращения.

Для отображения рельефа Гипериона на карте представлена методика вычисления геодезических высот точек поверхности относительно трехосного эллипсоида с выбранными параметрами, основанная на совместном использовании уравнения нормали к поверхности, проходящей через заданную точку, и уравнения собственно поверхности.

В результате проведенных исследований была составлена карта Гипериона в цилиндрической и азимутальной проекциях меридианного сечения трехосного эллипсоида с горизонталями, построенными на основании вычисленных геодезических высот.

МИССИИ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Спутник Сатурна Гиперион являлся объектом исследования нескольких космических миссий. В рамках двух из них (Voyager-1, -2) состоялось всего по одному пролету над поверхностью тела с разрешением грубее 3 км, что не позволило восстановить модель его поверхности. Последняя



Рис. 1. Пример изображения Гипериона, полученного миссией Cassini (NASA/JPL/SpaceScienceInstitute).

миссия, проводившая исследования в системе Сатурна — это миссия Cassini. КА Cassini совершил девять успешных пролетов над поверхностью Гипериона в период с 2005 по 2016 гг. с разрешением от 23 м/пиксель до 3 км/пиксель. КА Cassini был оснащен комплектом из двух камер: широкоугольной (WAC) с фокусным расстоянием 200.77 мм и узкоугольной (NAC) с фокусным расстоянием 2003.44 мм. Размер каждого изображения составляет 1024×1024 пикселя. Для дальнейших исследований нами были использованы только данные, полученные по результатам полета Cassini, ввиду их полноты, разрешения и качества изображений (рис. 1).

ЗАДАНИЕ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ ГИПЕРИОНА ДЛЯ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ

При определении системы координат для Гипериона существует неоднозначность. С одной стороны, планетоцентрическая система координат не определена в связи с хаотичностью его вращения (https://naif.jpl.nasa.gov/pub/naif/generic_kernels/pck/pck00011.tpc), что также подтверждается в (Wisdom и др., 1984). С другой стороны, имеются утвержденные Международным астрономическим союзом названия и координаты форм рельефа в этой самой системе координат (https://planetarynames.wr.usgs.gov/SearchResults?Target=75_Hyperion). Связано это с тем, что по данным полетов космических аппаратов Voyager не был достоверно установлен факт хаотичности вращения Гипериона, а результаты полета Cassini

указали именно на хаотичность, однако принятые названия и координаты особенностей рельефа менять не стали.

Ввиду описанной неоднозначности определения системы координат Гипериона рассмотрим подробнее этот вопрос. Из-за хаотичности вращения Гипериона прямой метод решения задачи фотограмметрии оказывается неработоспособным, что наглядно показано в статье (Надеждина, Конопихин, 2022). Также в ней рассмотрена методика получения положения координат и углов ориентирования камеры для всех моментов времени в единой системе координат. Необходимо остановиться на вопросе задания невращающейся системы координат тела подробнее.

Рассмотрим набор изображений, их метаданные и моменты времени, в которые они были получены. На основе телеметрии для каждого момента времени можно вычислить координаты точек съемки и ориентации камер в системах координат Сатурна (IAU Saturn), J2000. Однако, не зная параметров вращения Гипериона (IAU Hyperion), вычислить ориентацию и координаты КА на орбите относительно Гипериона невозможно. Для решения данной проблемы примем в качестве системы координат (IAU Hyperion) набор параметров, предполагающий равномерное вращение Гипериона вокруг Сатурна. Далее выберем пролет с наибольшим количеством изображений и длительностью по времени (предполагая, что изображения, полученные в данном пролете, обеспечат максимальное покрытие поверхности) и приведем данные телеметрии в принятую систему координат.

Выполнив измерение связующих точек и последующее уравнивание методом связок, определим координаты точек на поверхности объекта (опорных точек) и уточним данные телеметрии, участвующие в самом длительном пролете. Для всех остальных изображений будем использовать опорные точки и уточненные данные телеметрии как опорную информацию для включения всех данных в обработку. Включение всех данных в обработку позволяет восстановить положение точек съемки, углов ориентирования камер и координат опорных точек в единой системе координат. Однако оси этой директивно принятой системы координат могут не соотноситься с осями инерции тела, поскольку при ее назначении не были известны параметры вращения Гипериона, а фактически они были назначены.

Облако опорных точек, полученных на основе фотограмметрической обработки изображений, определяет форму тела, на основе которой можно выбрать (установить) систему координат, пригодную для картографирования. Для установления такой системы координат выделим главные гео-

метрические оси тела. Аппроксимируем облако опорных точек эллипсоидом, удовлетворяющим следующим условиям:

1) $a > b > c$, где a — наибольшая полуось, c — наименьшая;

2) $\sum PV^2 = \min$ — сумма квадратов отклонения опорных точек от поверхности эллипсоида минимальна, путем решения уравнения поправок вида:

$$V = \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} - 1,$$

$$P = \frac{1}{\sigma^2},$$

где: V — отклонение от поверхности эллипсоида каждой точки; P — вес измеренной точки; σ — средняя квадратическая ошибка конкретной точки.

Полуоси полученного таким образом аппроксимирующего эллипсоида имеют размеры 177.6 км, 128.5 км и 105.6 км. Далее необходимо определить параметры перехода из ранее введенной системы координат в систему координат, оси которой совпадают с осями найденного эллипсоида. После этого картографическая система координат считается заданной: направления осей системы координат Гипериона совпадают с осями выбранного эллипсоида a , b , c ; центр эллипсоида совпадает с геометрическим центром масс облака опорных точек, при условии постоянной плотности тела.

Для максимально точного отображения проекции изображений на поверхность выбранного эллипсоида необходимо сгустить опорную сеть, состоящую из чуть более 2000 точек. Сгущение опорной сети осуществляется автоматическими методами построения цифровых моделей поверхности, наиболее точным из которых является метод Semi-Global Matching (SGM) (Hirschmuller, 2005). Сгущение опорной сети выполнено цифровой фотограмметрической системе (ЦФС) PHOTOMOD7.3, в результате чего было отождествлено порядка 1 млн точек поверхности Гипериона. Полученное плотное облако точек подверглось фильтрации и было преобразовано в криволинейную систему координат (широта-долгота-высота), тем самым получена цифровая модель поверхности (ЦМП) Гипериона. Далее выполнено ортотрансформирование изображений в эту же систему координат на основе ЦМП и уточненных данных о положении и ориентации КА Cassini. Полученные отдельные ортотрансформированные изображения были объединены в единую мозаику с последующим глобальным и локальным выравниванием яркости. Окончательная фотометрически скорректированная мозаика и ЦМП явились основой для дальнейшего картографирования спутника.

ОЦЕНКА ХАРАКТЕРА ВРАЩЕНИЯ ГИПЕРИОНА

Системы координат тел определяются исходя из характера вращения тел. Для тел с регулярным вращением ось Y системы координат определяет направление на центральное тело, ось X задает направление движения по орбите, ось Z дополняет систему до правой, что можно проиллюстрировать на примере Луны (рис. 2).

Характер вращения (западное или восточное) определяет направление отсчета долгот и поэтому требует детального рассмотрения. С целью установить направление вращения Гипериона мы рассчитали проекцию положения центрального тела (Сатурна) на поверхность Гипериона для всех известных моментов времени в принятой объектоцентрической системе координат, что наглядно представлено на ортомозаике его поверхности (рис. 3).

Можно заметить, что положение Сатурна в системе координат Гипериона выстраивается в цепочки векторов, описывающие характер его вращения. Например, для случая регулярного синхронного вращения положение центрального тела концентрировалось бы вблизи одной точки (как в системе Земля–Луна (рис. 2), где период собственного вращения и сидерический период близки) или представляло бы линию (как в случае, например, Марса и Фобоса, Сатурна и Энцелада и т. д.). К сожалению, из-за скудности данных описать характер вращения Гипериона не представляется возможным, тем не менее можно говорить о том, что собственная ось вращения Гипериона обладает прецессией отно-

сительно наибольшей оси тела, принятой нами за ось X (совпадает с большей полуосью эллипсоида a), в направлении против часовой стрелки. Далее мы вычислили среднюю скорость собственного вращения Гипериона, что эквивалентно $60.13^\circ \pm 16.4^\circ$ в сутки. Полученные результаты согласуются с данными (Harbison и др., 2011; Thomas и др., 1995).

Поскольку положение оси вращения Гипериона значительно отличается от положения наименьшей оси найденного нами аппроксимирующего эллипсоида, определение направления отсчета долгот по направлению вращения для этого небесного тела затруднительно. Поэтому для картографирования нами выбрана система планетоцентрических координат с отсчетом долгот на восток.

ВЫЧИСЛЕНИЕ ВЫСОТ

Для отображения рельефа Гипериона на карте рассмотрим определение геодезических высот. Вычисление геодезической высоты относительно трехосного эллипсоида основано на совместном использовании уравнения нормали к поверхности, проходящей через заданную точку, и уравнения собственно поверхности. Метод вычисления предложен в (Флейс и др., 2019).

Расстояние h от точки физической поверхности небесного тела (x_0, y_0, z_0) до математической поверхности (геодезическая высота) задается отрезком прямой, перпендикулярной этой поверхности и проходящей через точку (x_0, y_0, z_0).

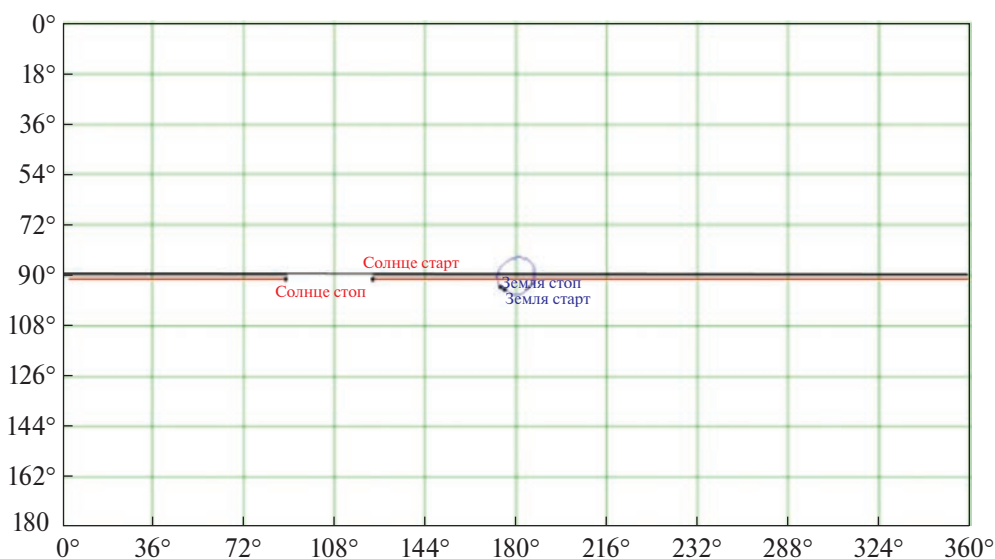


Рис. 2. Мнимый наблюдатель на полюсе Луны (топоцентрическая СК), ориентированный по нулевому меридиану. Синяя траектория — изменение положения Земли (реальный угловой размер) за 28 земных суток. Красная траектория — изменение положения Солнца за тот же период. По горизонтальной оси указан азимут направления, по вертикальной — зенитное расстояние в градусах.

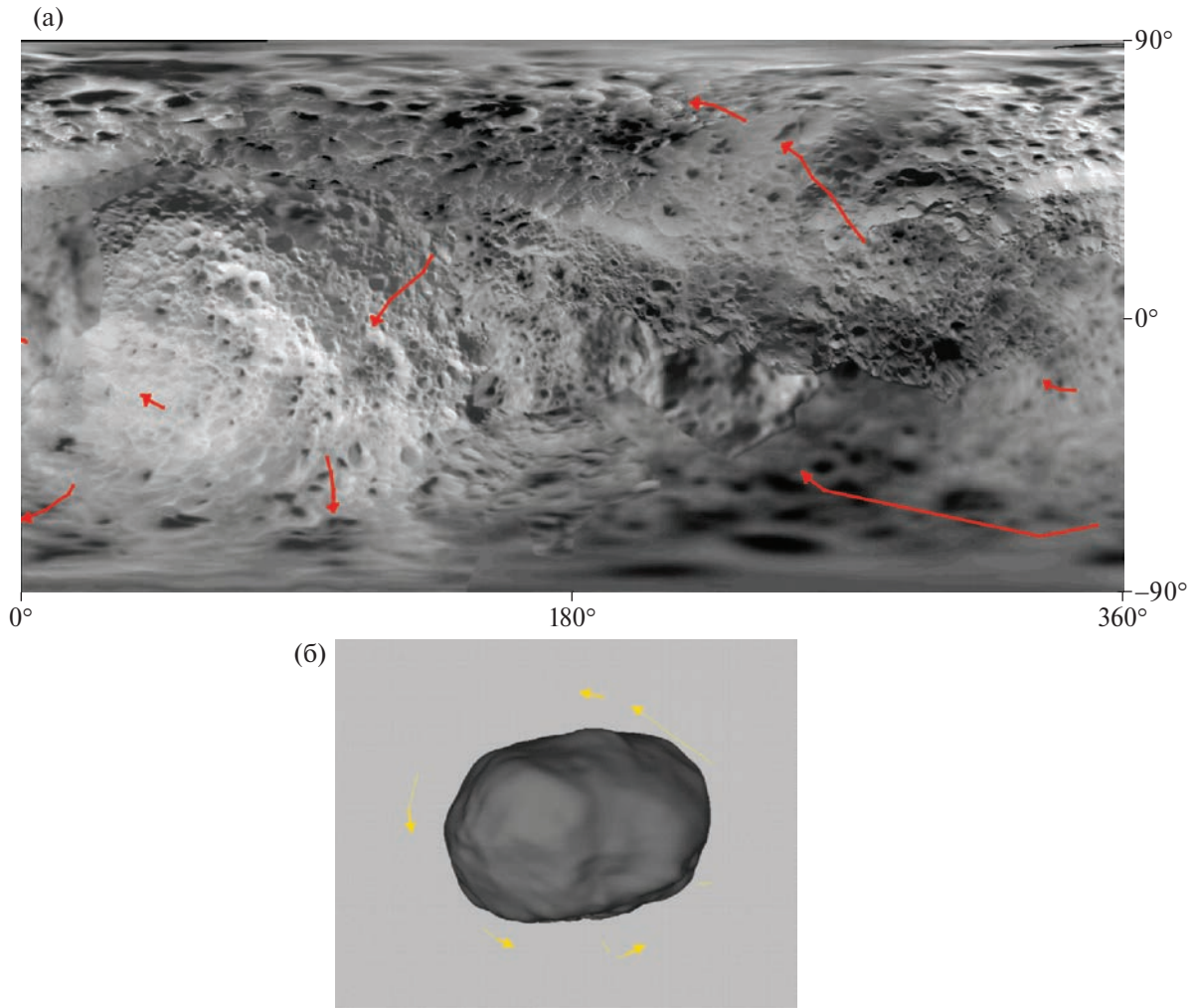


Рис. 3. Определение характера вращения Гипериона. Стрелками показано “мгновенное” направление движения проекции Сатурна по поверхности Гипериона: (а) – на ортомозаике; (б) – на 3D-модели Гипериона.

$$h = \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 + (z_0 - z)^2}, \quad (1)$$

где x, y, z – координаты точки на поверхности.

Уравнение прямой:

$$\frac{x_0 - x}{\frac{\partial f(x, y, z)}{\partial x}} = \frac{y_0 - y}{\frac{\partial f(x, y, z)}{\partial y}} = \frac{z_0 - z}{\frac{\partial f(x, y, z)}{\partial z}}$$

где $f(x, y, z) = C$ – уравнение математической поверхности.

Если исходные данные представлены в виде цифровой модели рельефа Φ , λ , r , то координаты x_0, y_0, z_0 получаются из формул:

$$x_0 = r \cos \Phi \cos \lambda, y_0 = r \cos \Phi \sin \lambda, z_0 = r \sin \Phi,$$

где r – длина радиус-вектора в точку (x_0, y_0, z_0) .

Если в качестве математической поверхности принят трехосный эллипсоид с полуосями a , b и c , то получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{x_0 - x}{\frac{x}{a^2}} = \frac{y_0 - y}{\frac{y}{b^2}}, \\ \frac{x_0 - x}{\frac{x}{a^2}} = \frac{z_0 - z}{\frac{z}{c^2}}, \\ \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \end{cases} \quad (2)$$

или

$$\begin{cases} \frac{x_0 - x}{x} = \frac{(1 - e_{ab}^2)(y_0 - y)}{y}, \\ \frac{x_0 - x}{x} = \frac{(1 - e_{ac}^2)(z_0 - z)}{z}, \\ \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \end{cases} \quad (3)$$

где $e_{ab}^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2}$ — квадрат эксцентриситета экваториального эллипса, $e_{ac}^2 = \frac{a^2 - c^2}{a^2}$ — квадрат эксцентриситета эллипса начального меридиана.

Для повышения точности вычислений сделаем подстановку:

$$x_0 = ax_{0n}, y_0 = by_{0n}, z_0 = cz_{0n}, x = ax_n, y = by_n, z = cz_n.$$

Затем, выразив y_n и z_n через x_n , получим следующую систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} y_n = \frac{(1 - e_{ab}^2)y_{0n}x_n}{x_{0n} - e_{ab}^2x_n}, \\ z_n = \frac{(1 - e_{ac}^2)z_{0n}x_n}{x_{0n} - e_{ac}^2x_n}, \\ x_n^2 + \frac{(1 - e_{ab}^2)^2 y_{0n}^2 x_n^2}{(x_{0n} - e_{ab}^2x_n)^2} + \frac{(1 - e_{ac}^2)^2 z_{0n}^2 x_n^2}{(x_{0n} - e_{ac}^2x_n)^2} = 1. \end{array} \right. \quad (4)$$

На основании третьего уравнения получим уравнение шестой степени относительно x_n :

$$x_n^6 + a_{11}x_n^5 + a_{12}x_n^4 + a_{13}x_n^3 + a_{14}x_n^2 + a_{15}x_n + a_{16} = 0 \quad (5)$$

где коэффициенты равны:

$$\begin{aligned} a_{11} &= -\frac{2e_{ac}^2e_{ab}^2x_{0n}(e_{ac}^2 + e_{ab}^2)}{e_{ac}^4e_{ab}^4}, \\ a_{12} &= \frac{x_{0n}^2 \left[(e_{ac}^2 + e_{ab}^2)^2 + 2e_{ac}^2e_{ab}^2 \right] + y_{0n}^2e_{ac}^4(1 - e_{ab}^2)^2 + z_{0n}^2e_{ab}^4(1 - e_{ac}^2)^2}{e_{ac}^4e_{ab}^4} - 1, \\ a_{13} &= \frac{2x_{0n} \left[(e_{ac}^2 + e_{ab}^2)(e_{ac}^2e_{ab}^2 - x_{0n}^2) - y_{0n}^2e_{ac}^2(1 - e_{ab}^2)^2 - z_{0n}^2e_{ab}^2(1 - e_{ac}^2)^2 \right]}{e_{ac}^4e_{ab}^4}, \\ a_{14} &= \frac{x_{0n}^2 \left[x_{0n}^2 + y_{0n}^2(1 - e_{ab}^2)^2 + z_{0n}^2(1 - e_{ac}^2)^2 - (e_{ac}^2 + e_{ab}^2)^2 - 2e_{ac}^2e_{ab}^2 \right]}{e_{ac}^4e_{ab}^4}, \\ a_{15} &= \frac{2x_{0n}^3(e_{ac}^2 + e_{ab}^2)}{e_{ac}^4e_{ab}^4}, a_{16} = -\frac{x_{0n}^4}{e_{ac}^4e_{ab}^4}. \end{aligned}$$

Здесь и далее первая цифра в индексе является номером многочлена, а вторая дополняет степень до шести.

Если точка (x_0, y_0, z_0) лежит в одной из координатных плоскостей или математическая по-

верхность является эллипсоидом вращения, уравнение (5) переходит в уравнение четвертой степени, корни которого находим способом Феррари, описанным в книге (Сушкевич, 1941). Там же есть описание метода решения кубического уравнения, используемого в способе Феррари. При этом, помимо формулы Кардано, дано и тригонометрическое решение, необходимое в тех случаях, когда формула Кардано не применима.

При решении уравнения (5) используем метод Штурма. Все выводы и доказательства подробно описаны в статье (Шафаревич, 1954). Первым шагом применения метода Штурма является определение границ отрезка, на котором находятся корни уравнения. Для уравнения шестой степени следует выбрать максимальное из чисел:

$$6|a_{11}|, \sqrt{6|a_{12}|}, \sqrt[3]{6|a_{13}|}, \sqrt[4]{6|a_{14}|}, \sqrt[5]{6|a_{15}|}, \sqrt[6]{6|a_{16}|}.$$

Полученное число является правой границей отрезка, а это же число со знаком минус является левой границей отрезка. Затем строим ряд Штурма. Первый многочлен ряда представляет собой левую часть уравнения (5). Второй многочлен ряда (производный многочлен) имеет вид:

$$6x_n^5 + 5a_{11}x_n^4 + 4a_{12}x_n^3 + 3a_{13}x_n^2 + 2a_{14}x_n + a_{15}.$$

Третий многочлен является остатком от деления первого многочлена на второй, взятым с обратным знаком. Для получения четвертого многочлена делим второй многочлен на третий и так

далее. Каждый следующий многочлен (остаток от деления с обратным знаком) имеет меньшую степень, чем предыдущий, и общие корни каждой пары (если они есть) являются общими для всего ряда. После деления пятого многочлена на

шестой получаем число a_{76} . Если a_{76} равно нулю, то у первого и второго многочлена есть общий корень x_{1n} , и для первого многочлена этот корень кратный. Дважды разделив первый многочлен на $(x_n - x_{1n})$, решаем полученное уравнение четвертой степени.

Если a_{76} не равно нулю, на границах отрезка вычисляем значения многочленов ряда Штурма и определяем для каждой границы число перемен знака. Разница этих двух чисел и есть число корней нашего уравнения на отрезке. Начиная с первого отрезка, границы которого мы определили, методом деления отрезка пополам получаем отрезок, длина которого меньше заданной точности, содержащий один корень уравнения. Затем, если число корней уравнения больше одного, также получаем второй корень уравнения. Если определенное число корней на первом отрезке больше двух, делим исходный многочлен на $(x_n - x_{1n})$ и $(x_n - x_{2n})$ и решаем полученное уравнение четвертой степени.

Каждый из полученных корней подставляется в уравнения системы (4) для вычисления значений y_n и z_n . Затем, вернувшись к исходным переменным x , y и z , подставим эти значения в выражение (1). Тогда каждому из корней уравнения (5) будет соответствовать значение h . Минимальное значение h и есть искомая геодезическая высота. По соответствующим этому значению h прямоугольным координатам x , y и z вычисляются новые планетоцентрические координаты Φ , λ , r :

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \Phi = \arcsin \frac{z}{r}, \lambda = \arctg \frac{y}{x}.$$

Исходная цифровая модель рельефа в планетоцентрических координатах содержит точки с регулярным шагом по широте и долготе. Однако при вычислении высот относительно трехосного эллипсоида точки получают новые координаты (Φ, λ, h) , где широта и долгота отличаются от исходных и не имеют регулярного шага. Для удобства пересчета планетоцентрических координат в прямоугольные (в проекциях трехосного эллипсоида) была осуществлена предварительная интерполяция с переходом к регулярной сетке (с шагом 1°).

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ

Для формирования общего представления о поверхности небесного тела чрезвычайно важным является сохранение форм структур рельефа. Согласно рекомендациям, приведенным в Атласе для выбора картографических проекций (Гинзбург, Салманова, 1957), в случаях, когда наибольшее значение имеет качество передачи очертаний

и форм объектов, предпочтительно применение проекций, в которых минимизированы или полностью устранены искажения углов. Использование при картографировании референц-поверхности трехосного эллипсоида с определенными выше параметрами ограничивает выбор таких проекций. К наиболее известным можно отнести равноугольную проекцию Якоби и проекции меридианного сечения.

Равноугольная проекция Якоби имеет давнюю историю (немецкий математик К. Якоби предложил формулы этой проекции еще в XIX веке), однако лишь в 2014 г. была впервые использована для картографирования небесного тела (Nyrtsov и др., 2014). Более узнаваема цилиндрическая проекция меридианного сечения (проекция Бугаевского). Для некоторых небесных тел в определенных диапазонах широт она близка к равноугольной, в частности, для спутника Марса Фобоса, при картографировании которого и была впервые применена советским картографом, профессором Л.М. Бугаевским (Большаков, 1992). При этом была использована оригинальная компоновка, предложенная профессором К.Б. Шингарёвой: изображение в цилиндрической проекции дополнялось показом приполярных областей в азимутальной проекции, разделенных пополам. Однако азимутальная проекция имела иной характер искажений.

В 2006 г. цилиндрическая проекция Бугаевского была применена и для Деймоса при создании многоязыковой карты спутников Марса (<http://planetmaps.ru/multilingual-planet-maps.html>), причем в той же компоновке. В 2015 г. модифицированная версия этой проекции была использована для Атласа Фобоса (Карачевцева и др., 2015). Оригинальная компоновка была сохранена и в этом случае. Лишь в 2019 г. благодаря получению формул азимутальной проекции меридианного сечения стало возможным изображение приполярных областей в аналогичной по характеру искажений проекции, что и было реализовано при картографировании Фобоса (Нырцов и др., 2021).

Таким образом, описанная компоновка, включающая цилиндрическую проекцию меридианного сечения, неоднократно применялась для карт небесных тел и является достаточно узнаваемой. Поэтому она была использована и при картографировании Гипериона: изображения в цилиндрической и азимутальной проекциях меридианного сечения были совмещены аналогичным образом. При этом компоновка подверглась некоторым изменениям. Первое из них — распространение азимутальной проекции на весь диапазон долгот — обеспечивает целостность изображения приполярных областей. Второе изменение обу-

словлено распределением искажений различных видов (масштаб длин вдоль меридианов, масштаб площадей, наибольшее искажение углов) в проекциях меридианного сечения для Гипериона. Так, на рис. 4 приведены изоколы наибольшего искажения углов. Из рисунка видно, что в цилиндрической проекции этот показатель на широте 60° превышает 30° , в азимутальной же проекции даже на экваторе он лишь немногим больше 10° . Для уменьшения искажений цилиндрическая проекция была ограничена широтой 50° (более существенное ограничение привело бы к сокращению области перекрытия, необходимой для целостного и непрерывного восприятия изображения). С учетом расположения карты на листе формата А4 в альбомной ориентации был выбран масштаб 1:5 500 000. Параллели и меридианы проведены через 30° .

Для отображения поверхности Гипериона использовалась фотомозаика, полученная в результате обработки одиночных изображений с учетом найденного нами аппроксимирующего эллипсоида в качестве референц-поверхности. Она представляет собой растровое изображение в планетоцентрических координатах (широ-

та Φ , долгота λ) в квадратной цилиндрической проекции сферы (или проекции Плате-Карре). С учетом выбранной компоновки, из этой фотомозаики было получено три новых изображения: первое в диапазоне широт от -50° до 50° , второе — от -90° до -30° и третье — от 30° до 90° . Прямоугольные координаты опорных точек для трансформирования в цилиндрическую (для первого изображения) и азимутальную (для двух других изображений) проекции меридианного сечения были рассчитаны по формулам, представленным в (Нырцов и др., 2021), с шагом 4° по широте и долготе. Такая величина шага считается нами достаточной для корректной работы алгоритмов трансформирования с учетом масштаба карты.

Трансформирование фотомозаики в цилиндрическую проекцию осуществлялось непосредственно из системы планетоцентрических координат. Для трансформирования в азимутальную проекцию изображения были предварительно спроецированы в равнопромежуточную вдоль меридианов азимутальную проекцию сферы. Трансформирование выполнялось средствами QGIS, тип трансформации — сплайн

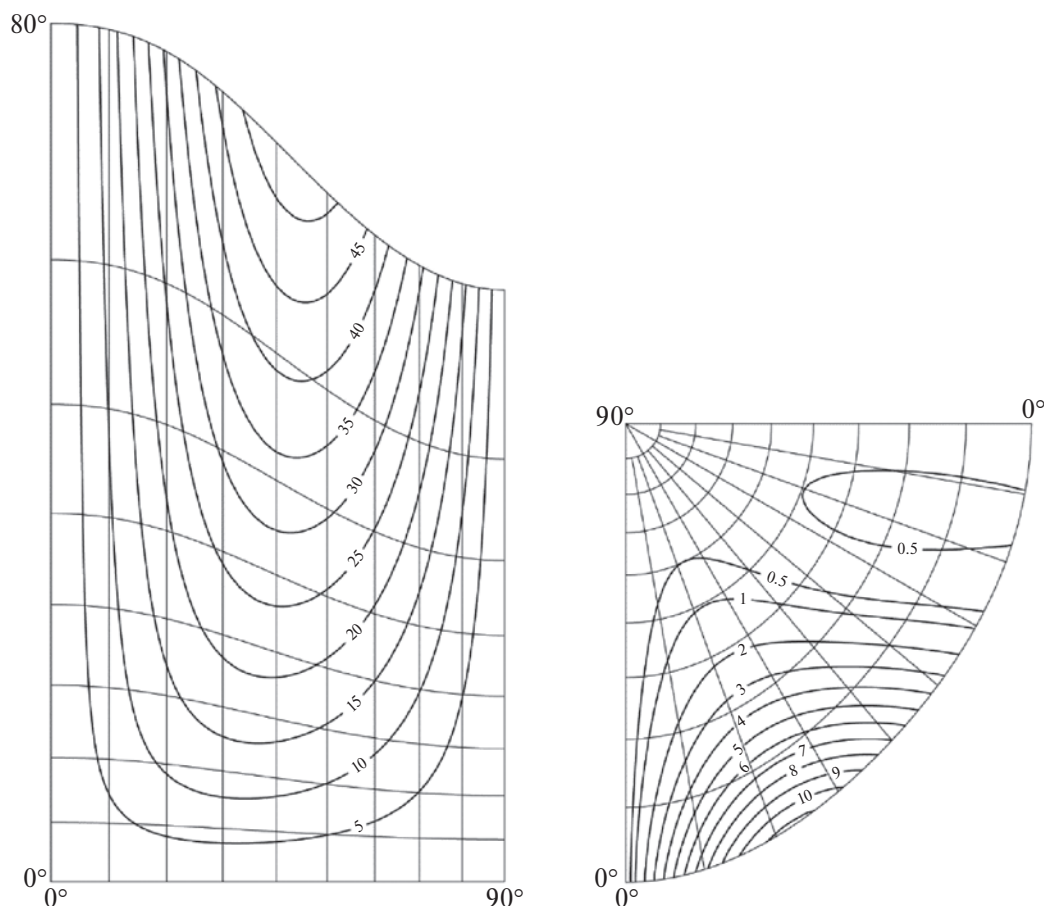


Рис. 4. Изоколы наибольшего искажения углов (град.) для Гипериона в проекциях меридианного сечения: (а) — цилиндрической; (б) — азимутальной.

типа “тонких пластин” (Thin Plate Spline), метод интерполяции – “ближайший сосед” (Nearest Neighbor).

Используемая при картографировании цифровая модель рельефа представлена в виде текстового файла, в котором точкам на поверхности трехосного эллипсоида с шагом в 1° по широте и долготе (Φ , λ) соответствует геодезическая

высота h . Файл был разбит на три фрагмента в соответствии с выбранной компоновкой карты (аналогично тому, как это было сделано с фотомозаикой). Для каждой точки по формулам, представленным в (Нырцов и др., 2021), были вычислены прямоугольные координаты в цилиндрической или азимутальной проекции меридианного сечения. Интерполяция и построение

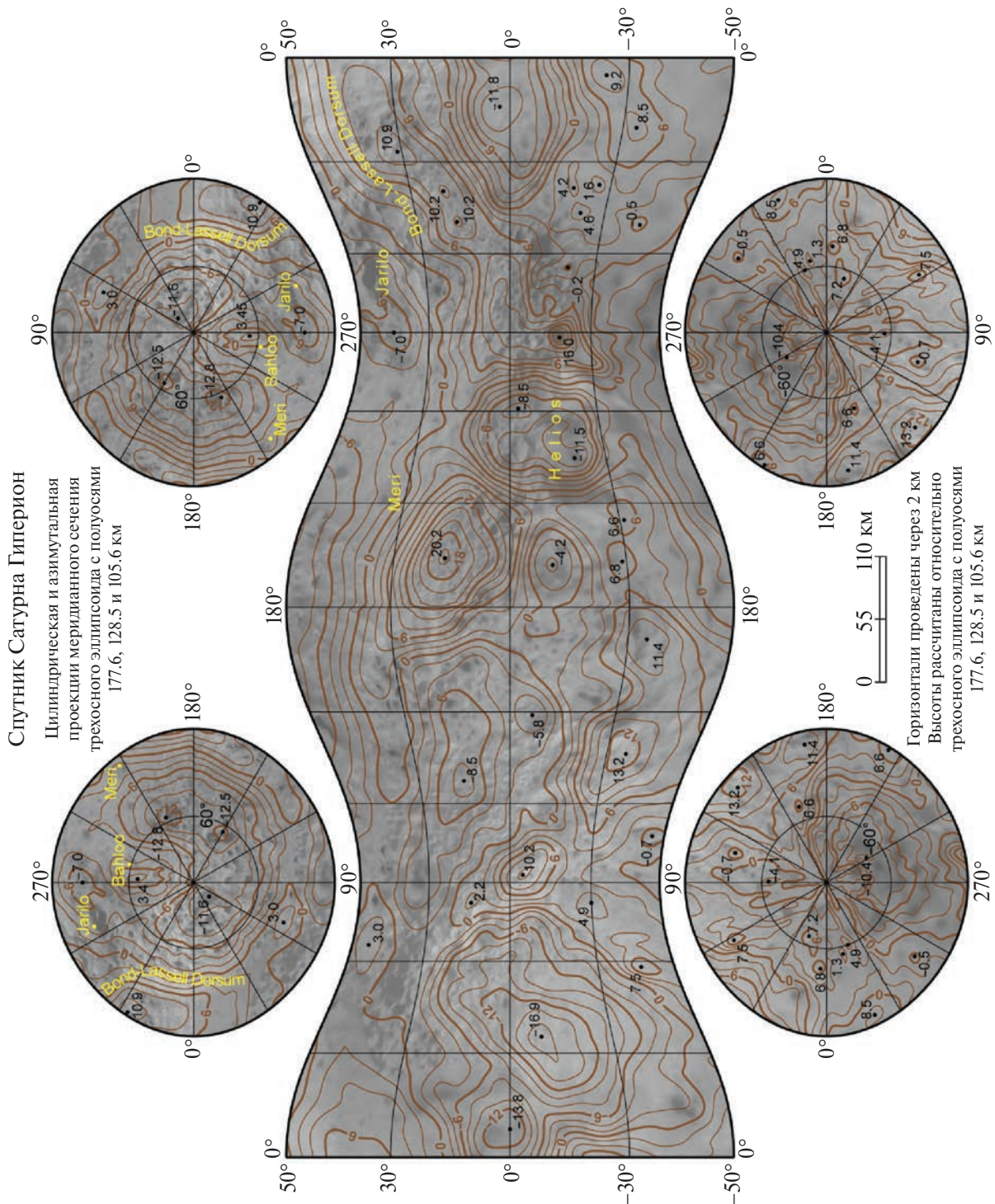


Рис. 5. Карта Гипериона в проекциях трехосного эллипсоида.

горизонталей выполнялись средствами Golden Software Surfer, метод интерполяции — радиальные базисные функции (Radial Basis Functions).

Составленная карта Гипериона представлена на рис. 5. На карте прослеживаются — как по фотомозаике, так и в горизонталях — крупнейшие особенности поверхности этого небесного тела: гряда Бонда-Лассела, кратеры Гелиос и Ярило. Хорошо различаются участки поверхности с разными типами рельефа: уступы с большими перепадами высот (в районе 30° — 60° широты и 120° — 240° долготы), крупные поднятия (0° — 30° широты, 180° — 210° долготы), равнины с многочисленными локальными замкнутыми формами (-20° — -0° широты, 300° — 0° долготы). Отметки высот подчеркивают как локальные, так и глобальные их экстремумы. Общий перепад высот поверхности около 37 км: от -16.9 км до 20.2 км.

Выбор проекций и компоновки обеспечивает корректное отображение очертаний рельефа на составленной карте благодаря минимизации искажений углов. Кроме того, по карте видно, что построенные горизонталы хорошо согласуются с фотомозаикой. Таким образом, подобранный трехосный эллипсоид оптимален для аппроксимации фигуры этого небесного тела. Использование этой математической поверхности при картографировании Гипериона более предпочтительно по сравнению со сферой или эллипсоидом вращения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С учетом новых данных, в работе определена система координат, пригодная для картографирования Гипериона, вычислены параметры трехосного эллипсоида, аппроксимирующего поверхность этого небесного тела исходя в основном из геометрических соображений и взаимного расположения точек поверхности, полученных при фотограмметрической обработке изображений. Представлена оригинальная методика исследования характера вращения Гипериона с помощью проекции положения Сатурна на поверхность Гипериона для всех известных моментов времени в объектоцентрической системе координат. Реализация данной методики позволила предположить, что собственная ось вращения Гипериона прецессирует относительно наибольшей оси тела в направлении против часовой стрелки.

Составлена карта поверхности Гипериона в проекции трехосного эллипсоида с вычисленными параметрами. Выбор проекции и компоновки карты связан прежде всего с возможностью сохранения формы структур рельефа. Кроме того, цилиндрическая и азимутальная проекции мери-

дианного сечения в предложенной компоновке являются достаточно узнаваемыми, а уменьшение расстояния от экватора до параллели с заданной широтой при увеличении долготы от 0° до 90° в цилиндрической проекции наглядно демонстрирует экваториальное сжатие. Для нанесения на карту горизонталей были рассчитаны геодезические высоты относительно трехосного эллипсоида с использованием решения уравнения шестой степени методом Штурма и уравнения четвертой степени методом Феррари.

Картографическая часть статьи выполнена по Государственным заданиям № 121051400061-9 (А.И. Соколов, М.В. Нырцов) и FMWS-2024-0009 № 1023032700199-9 (М.Э. Флейс). Фотограмметрическая часть поддержана Государственным заданием FSFE-2024-0001 № 124071100067-9 (И.Е. Надеждина, А.Э. Зубарев, Н.А. Козлова).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Большаков В.Д. (ред.) Атлас планет земной группы и их спутников. М.: МИИГАиК, 1992. 208 с.
- Гинзбург Г.А., Салманова Т.Д. Атлас для выбора картографических проекций. М.: Геодезиздат, 1957. 239 с.
- Карачевцева И.П., Кононихин А.А., Коханов А.А., Родионова Ж.Ф., Козлова Н.А. Атлас Фобоса / Ред. Савиных В.П. М.: МИИГАиК, 2015. 220 с.
- Надеждина И.Е., Кононихин А.А. Перспективы комплексного подхода к изучению динамики хаотического вращения малых небесных тел // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2022. Т. 66. № 3. С. 27–41.
DOI:10.30533/0536-101X-2022-66-3-27-41
- Нырцов М.В., Флейс М.Э., Соколов А.И. Проекция меридианного сечения: новый класс проекций для трехосного эллипсоида // Геодезия и картография. 2021. Т. 82. № 2. С. 11–22.
DOI:10.22389/0016-7126-2021-968-2-11-22
- Сушкевич А.К. Основы высшей алгебры. М.-Л.: ОГИЗ, 1941. 460 с.
- Флейс М.Э., Нырцов М.В., Борисов М.М., Соколов А.И. Точное определение геодезических высот точек относительно трехосного эллипсоида // ДАН. 2019. Т. 486. № 4. С. 489–493.
DOI:10.31857/S0869-56524864489-493
- Шафаревич И.Р. О решении уравнений высших степеней (метод Штурма). М.: Гостехиздат, 1954. 24 с.
- Harbison R.A., Thomas P.C., Nicholson P.C. Rotational modeling of Hyperion // Celest. Mech. Dyn. Astron. 2011. V. 110. P. 1–16.
DOI:10.1007/s10569-011-9337-3
- Hirschmuller H. Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information // IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), San Diego, CA, USA. 2005. P. 807–814.
DOI:10.1109/CVPR.2005.56

- Nyrtsov M.V., Fleis M.E., Borisov M.M., Stooke Ph.J.* Jacobi conformal projection of the triaxial ellipsoid: New projection for mapping of small celestial bodies // *Cartography from Pole to Pole. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography* / Eds: Buchroithner M. et al. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. P. 235–246.
DOI:10.1007/978-3-642-32618-9_17
- Thomas P.C.* Sizes, shapes, and derived properties of the saturnian satellites after the Cassini nominal mission // *Icarus*. 2010. V. 208. № 1. P. 395–401.
DOI:10.1006/icar.1995.1147
- Thomas P., Armstrong J., Asmar S., Burns J.A., Denk T., Giese B., Helfenstein P., Iess L., Johnson T.V., McEwen A., and 8 co-authors.* Hyperion's sponge-like appearance // *Nature*. 2007. V. 448. P. 50–53.
DOI:10.1038/nature05779
- Thomas P.C., Black G.J., Nicholson P.D.* Hyperion: Rotation, shape, and geology from Voyager images // *Icarus*. 1995. V. 117. № 1. P. 128–148.
DOI:10.1006/icar.1995.1147
- Wisdom J., Peale S.J., Mignard F.* The chaotic rotation of Hyperion // *Icarus*. 1984. V. 58. № 2. P. 137–152.
DOI:10.1016/0019-1035(84)90032-0

УДК 521.19

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ РЕЛЯТИВИСТСКОГО ВРАЩЕНИЯ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ НА ПРИМЕРЕ ЮПИТЕРА И ЕГО ГАЛИЛЕЕВЫХ СПУТНИКОВ

© 2024 г. В. В. Пашкевич*, А. Н. Вершков

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: pashvladvit@yandex.ru

Поступила в редакцию 08.08.2023 г.

После доработки 08.09.2023 г.

Принята к публикации 27.09.2023 г.

Данная статья посвящена некоторым аспектам исследования релятивистских эффектов (геодезической прецессии и геодезической нутации, вместе составляющих геодезическое вращение) во вращении небесных тел Солнечной системы на примере Юпитера и его галилеевых спутников (Ио, Европы, Ганимеда и Каллисто). Показано различие векторов угловой скорости геодезического вращения в зависимости от выбора координатной системы отсчета. Так, абсолютная величина вектора угловой скорости геодезического вращения исследуемого спутника относительно барицентра Солнечной системы не будет совпадать с абсолютной величиной аналогичного вектора исследуемого спутника относительно барицентра спутниковой системы планеты. В результате впервые определены наиболее существенные вековые и периодические члены геодезического вращения: а) Юпитера и его галилеевых спутников в углах Эйлера, в возмущающих членах физической либрации и в абсолютной величине вектора углового поворота геодезического вращения исследуемого тела относительно барицентра Солнечной системы и плоскости средней орбиты Юпитера эпохи J2000.0; б) галилеевых спутников Юпитера в возмущающих членах физической либрации и абсолютной величине вектора углового поворота геодезического вращения исследуемого тела относительно барицентра системы спутников Юпитера и плоскости средней орбиты исследуемого спутника эпохи J2000.0. Полученные аналитические величины геодезического вращения изучаемых объектов могут быть использованы для численного исследования их вращения в релятивистском приближении, а также использованы для оценки влияния релятивистских эффектов на орбитально-вращательную динамику тел экзопланетных систем.

Ключевые слова: релятивистское вращение, геодезическая прецессия, геодезическая нутация, Юпитер, Ио, Европа, Ганимед, Каллисто

DOI: 10.31857/S0320930X24010109, EDN: OGPYCB

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее существенными эффектами в релятивистском вращении небесных тел вокруг своей оси являются систематический эффект — геодезической прецессии (de Sitter, 1916) и периодический эффект — геодезической нутации (Fukushima, 1991). Оба эти эффекта составляют геодезическое вращение небесного тела и имеют формальное сходство с известными в классической механике явлениями прецессии и нутации. Их появление не связано с действием на тело каких-либо сил, в отличие от вышеупомянутых эффектов классической механики, а обусловлено изменением направления его оси вращения в результате параллельного переноса вектора углового момента тела вдоль его орбиты в искривленном пространстве-времени.

Систематическое, или вековое, изменение геодезического вращения исследуемого тела в рассматриваемых углах x (в данном исследовании $\Delta x = x_{\text{релятив.}} - x_{\text{ньютонов.}}$ принимает значения рассматриваемых разностей углов Эйлера ($\Delta\psi$, $\Delta\theta$, $\Delta\varphi$) в релятивистском и ньютоновом приближениях, разностей возмущающих членов физической либрации ($\Delta\tau$, $\Delta\rho$, $\Delta\sigma$) в релятивистском и ньютоновом приближениях и абсолютной величины вектора углового поворота геодезического вращения $|\bar{\Lambda}|$ исследуемого тела) может быть представлено в виде полинома по степеням времени:

$$\Delta x_I = \sum_{n=0}^N \Delta x_n t^n,$$

где t — время; Δx_n — коэффициенты вековых членов; N — степень аппроксимирующего полинома.

Традиционно в небесной механике нутационное движение оси вращения тела называют периодическим, хотя оно может описываться как периодическими рядами Фурье, так и дополнительно к ним смешанными по времени рядами Пуассона (см., например, Вулард, 1963; Абалакин, 1979; Brumberg, Bretagnon, 2000). Таким образом, в данной статье эффект геодезической нутации исследуемого тела в рассматриваемых углах x будет представлен в виде суммы периодических членов рядов Фурье и смешанных по времени пуассоновских членов (которые далее в статье будут называться “периодическими” и “смешанными” членами):

$$\Delta x_{II} = \sum_j \sum_{k=0}^M \left(\Delta x_{Cjk} \cos(v_{j0} + v_{j1}t) + \Delta x_{Sjk} \sin(v_{j0} + v_{j1}t) \right) t^k,$$

где t — время; индекс суммирования j определяет количество суммируемых членов; Δx_{Sjk} , Δx_{Cjk} — коэффициенты периодических членов и смешанных по времени пуассоновских членов; v_{j0} , v_{j1} — фазы и частоты исследуемого тела; M — параметр аппроксимации.

В различной литературе по небесной механике используются разные названия одного и того же понятия, поэтому чтобы не было путаницы и разночтений дадим определения некоторых из них.

“Средняя орбита тела эпохи”, или “неподвижная орбита тела эпохи”, — это усреднённая относительно выбранной эпохи возмущённая орбита исследуемого тела, учитывающая только вековые (прецессионные) возмущения от возмущающих тел, т. е. орбита без периодических (нутационных) возмущений.

“Мгновенная орбита тела”, или “истинная орбита даты тела”, или просто “орбита даты тела”, — это возмущённая орбита тела на текущий момент времени (даты), учитывающая как вековые (прецессионные) возмущения от возмущающих тел, так и периодические (нутационные) возмущения от возмущающих тел.

На рис. 1 (слово “средняя” опущено) под “орбитой тела” подразумевается “средняя орбита тела эпохи”.

“Средний экватор тела эпохи”, или “неподвижный экватор тела эпохи”, — это усреднённый относительно выбранной эпохи экватор исследуемого тела, на положение которого влияют только вековые (прецессионные) возмущения от возмущающих тел.

“Мгновенный экватор тела”, или “истинный экватор даты тела”, или просто “экватор даты тела”, — определяет истинное положение экватора тела на текущий момент времени (даты), учиты-

вает как вековые (прецессионные) возмущения от возмущающих тел, так и периодические (нутационные) возмущения от возмущающих тел.

На рис. 1 (слово “истинный” опущено) под “экватором даты тела” подразумевается “истинный экватор даты тела”.

В предыдущих работах (Eroshkin, Pashkevich, 2007; Пашкевич, 2016; Pashkevich, Vershkov, 2022) проводились исследования геодезического вращения тел Солнечной системы относительно неподвижной эклиптики эпохи J2000.0 и барицентра Солнечной системы.

Благодаря реализации в последнее время современных космических проектов по изучению планет Солнечной системы и их спутников появились новые долгосрочные высокоточные эфемериды этих тел (Giorgini и др., 2001; Park и др., 2021). Использование этих эфемерид позволяет уточнить орбиты этих тел и, как следствие, построить более высокоточные долгосрочные теории их релятивистского вращения относительно собственных координатных систем. Для этих целей вместо плоскости эклиптики в качестве опорных плоскостей лучше использовать плоскости орбит исследуемых планет и их спутников (Baland и др., 2023).

Основываясь на исследованиях тел Солнечной системы с известными параметрами движения, можно выявить закономерности во влиянии релятивистских эффектов на орбитально-вращательную динамику тел экзопланетных систем. Особенно интересно изучение объектов с существенным геодезическим вращением, обусловленным, в первую очередь, их близостью к возмущающему центральному телу (например, у спутников планет-гигантов), а не массой центрального тела (Pashkevich, Vershkov, 2022), как это бывает у объектов, вращающихся вокруг сверхмассивных центральных тел (например, нейтронных звезд).

Знание аналитических значений геодезического вращения небесных тел позволит использовать релятивистские поправки, в частности, как для вычисления параметров собственного вращения небесных тел при построении высокоточных долгосрочных численных или полуаналитических теорий вращения тел вокруг собственного центра масс в релятивистском приближении, так и для оценки степени влияния релятивистских факторов на данные, получаемые из наблюдений.

Основной целью данного исследования является определение наиболее существенных вековых и периодических членов геодезического вращения Юпитера относительно его неподвижной орбиты эпохи J2000.0 и барицентра Солнечной системы (Solar System Barycenter — SSB), и его галилеевых спутников (Ио (J1), Европы (J2),

Ганимеда (J3), и Каллисто (J4)) относительно неподвижной орбиты Юпитера эпохи J2000.0 и барицентра Солнечной системы и относительно неподвижной орбиты изучаемого спутника Юпитера эпохи J2000.0 и барицентра системы спутников Юпитера (Jovian System Barycenter – JSB).

Для этого будем использовать модифицированный авторами метод, разработанный в статье (Пашкевич, 2016) для вычисления величин геодезического вращения любых тел Солнечной системы, имеющих долгосрочные эфемериды.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

В следующих четырех пунктах излагается суть применяемого модифицированного метода (Пашкевич, 2016):

1. Задача о геодезическом (релятивистском) вращении Юпитера и его галилеевых спутников изучается относительно кинематически невращающейся (Koreikin и др., 2011) собственной координатной системы исследуемых тел (Archinal и др., 2018). Положения, скорости и орбитальные элементы для Ио, Европы, Ганимеда и Каллисто берутся из Horizons On-Line Ephemeris System (Giorgini и др., 2001). Для Солнца, Луны, Плутона и больших планет положения и скорости вычисляются с помощью фундаментальной эфемериды JPL DE441/LE441 (Park и др., 2021).

2. Используя Horizons On-Line Ephemeris System (Giorgini и др., 2001), для каждого исследуемого тела авторы получили временной ряд оскулирующих элементов его орбиты (для Юпитера на интервале времени от AD999 24 декабря 12 ч. 00 мин. до AD3000 08 января 12 ч. 00 мин. с шагом 1 сут., для его галилеевых спутников на интервале времени от AD1599 26 декабря 00 ч. 00 мин. до AD2400 13 января 00 ч. 00 мин. с шагом 0.1 периода их обращения вокруг Юпитера). Из него методом наименьших квадратов, используя разработанный В.В. Пашкевичем комплекс про-

грамм (Series of Programs for Calculations of Trends) SPCT2023, были вычислены средние элементы их орбит (табл. 1):

$$y = \sum_{n=0}^6 y_n t^n, \quad (1)$$

где y_n – коэффициенты вековых членов, $y = i_0, \Omega, J, \Omega_j$; i_0 – наклон средней орбиты исследуемого тела эпохи J2000.0 к эклиптике, Ω – долгота восходящего узла средней орбиты исследуемого тела эпохи J2000.0 на эклиптике, J – наклон средней орбиты исследуемого тела эпохи J2000.0 к неподвижному экватору Земли (ICRF), $\Omega_j = \Upsilon D$ – долгота восходящего узла средней орбиты исследуемого тела эпохи J2000.0 на экваторе Земли эпохи J2000.0 (ICRF – International Celestial Reference Frame (Ma и др., 1998)) (рис. 1), t – время в юлианских днях от эпохи J2000.0.

В результате, из полученных средних элементов орбит Юпитера и его галилеевых спутников были вычислены средние орбиты Юпитера (вокруг SSB) и его галилеевых спутников (вокруг JSB) эпохи J2000.0.

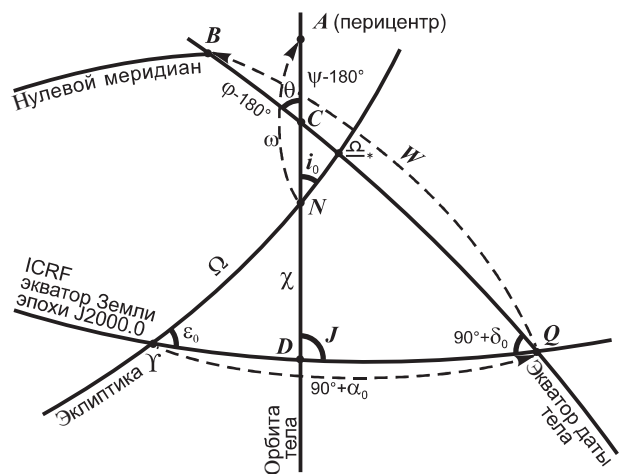


Рис. 1. Определение углов ориентации исследуемого тела для перехода между геоцентрической системой координат и кинематически невращающейся собственной системой координат исследуемого тела.

Таблица 1. Средние элементы орбит Юпитера и его галилеевых спутников эпохи J2000.0

Объект	P	i_0 , угл. град	Ω , угл. град	J , угл. град	Ω_j , угл. град
Юпитер (B5)	11.862 лет	1.30400566	100.47584272	23.23561035	3.25171174
Ио (J1)	1.769 сут.	2.21474943	–22.16602976	25.50314080	–1.94049249
Европа (J2)	3.551 сут.	2.23865896	–22.03183642	25.50643617	–1.92829117
Ганимед (J3)	7.155 сут.	2.15872228	–22.31943589	25.44569687	–1.90327473
Каллисто (J4)	16.689 сут.	2.02604234	–21.45503716	25.33579801	–1.70796843

Примечание: P – сидерический период обращения (Юпитера вокруг Солнца, галилеевых спутников вокруг Юпитера). Из средних элементов орбит Юпитера и его галилеевых спутников эпохи J2000.0 в табл. 1 приводятся только постоянные члены, которые используются в данном исследовании (так как для неподвижной орбиты эпохи J2000.0 $t = 0$, следовательно, и вековые члены выражения (1) обращаются в ноль).

На рис. 1 изображены углы ориентации исследуемого тела для перехода между геоцентрической системой координат и неподвижной собственной системой координат исследуемого тела: α_0 — прямое восхождение северного полюса вращения тела; δ_0 — склонение северного полюса вращения тела; $W = QB$ — угловое расстояние нулевого меридиана тела, отсчитываемое по подвижному экватору даты тела от неподвижного экватора Земли эпохи J2000.0; ε_0 — угол наклона неподвижного экватора Земли эпохи J2000.0 к неподвижной эклиптике эпохи J2000.0; ψ — угол долготы нисходящего узла подвижного экватора даты тела на его средней орбите эпохи J2000.0, отсчитываемый от перицентра его орбиты (точка A на рис. 1); θ — угол наклона подвижного экватора даты тела к его средней орбите эпохи J2000.0; φ — угол собственного вращения тела между восходящим узлом его средней орбиты эпохи J2000.0 и главной осью OA (рис. 3) минимального момента инерции тела (точка B на рис. 1); ω — угловое расстояние перицентра средней орбиты тела эпохи J2000.0 от узла N; χ — долгота нисходящего узла эклиптики на средней орбите исследуемого тела эпохи J2000.0; Y — точка весеннего равноденствия Земли эпохи J2000.0; Ω_* — точка осеннего равноденствия даты исследуемого тела на эклиптике.

3. С помощью формул, приведенных в данном пункте, вычисляются временные ряды скоростей геодезического вращения для каждого исследуемого тела в углах Эйлера, в возмущающих членах физической либрации и в абсолютной величине вектора угловой скорости вращения, с шагом: 12 ч. для Юпитера (B5), 4 ч. 14 мин. 44.160 с для Ио (J1), 8 ч. 31 мин. 20.640 с для Европы (J2), 17 ч. 10 мин. 19.200 с для Ганимеда (J3) и 1 сут. 16 ч. 3 мин. 21.600 с для Каллисто (J4) на 800-летнем интервале времени (от AD1599 26 декабря 00 ч. 00 мин. до AD2400 13 января 00 ч. 00 мин.). (Шаг выбирался с учётом достижения необходимой точности для дальнейших вычислений из получаемых временных рядов периодических членов геодезического вращения исследуемых тел. Для спутников этот шаг равен 0.1 периода их обращения вокруг Юпитера.)

Формула вектора угловой скорости геодезического вращения для любых тел Солнечной системы имеет следующий вид (Eroshkin, Pashkevich, 2007):

$$\bar{\sigma}_i = \frac{1}{c^2} \sum_{j \neq i} \frac{Gm_j}{|\bar{R}_i - \bar{R}_j|^3} (\bar{R}_i - \bar{R}_j) \wedge \left(\frac{3}{2} \dot{\bar{R}}_i - 2 \dot{\bar{R}}_j \right), \quad (2)$$

где c — скорость света в вакууме; G — гравитационная постоянная; индекс i соответствует исследуемым телам (Юпитеру и его галилеевым спутникам), a, j — возмущающим телам (Солнцу, Луне,

Плутону и большим планетам (Юпитер исключается из возмущающих тел, когда становится исследуемым телом)); $\bar{R}_i, \dot{\bar{R}}_i, \bar{R}_j, \dot{\bar{R}}_j$ — барицентрические векторы положений и скоростей i -го и j -го тела, соответственно; m_j — масса j -го тела; символ $\wedge$ означает векторное произведение.

Разность векторов скоростей в правой части векторного произведения формулы (2) не является симметричной (т. е. в данном случае формула не является симметричной из-за разных величин коэффициентов в разности барицентрических векторов скоростей исследуемого и возмущаемого тел) относительно выбора начала отсчета координатной системы, таким образом, результирующее значение вектора, вычисленного по этой формуле, будет зависеть от выбранной системы координат.

Для наглядности вышесказанного сравним два исследуемых вектора угловой скорости геодезического вращения в различных системах координат:

1) вектор угловой скорости геодезического вращения, вычисляемый относительно SSB, имеет вид

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_{(SSB)i} &= \frac{1}{c^2} \sum_{j \neq i} \frac{Gm_j}{|\bar{r}_{ji}|^3} (\bar{r}_{ji}) \wedge \left(\frac{3}{2} \dot{\bar{r}}_{ji} - \frac{1}{2} \dot{\bar{R}}_{(SSB)j} \right) = \\ &= \frac{1}{c^2} \sum_{j \neq i} \frac{Gm_j}{|\bar{r}_{ji}|^3} \left(\frac{3}{2} \bar{r}_{ji} \wedge \dot{\bar{r}}_{ji} - \frac{1}{2} \bar{r}_{ji} \wedge \dot{\bar{R}}_{(SSB)j} \right), \end{aligned}$$

где $\bar{R}_{(SSB)i}, \dot{\bar{R}}_{(SSB)i}, \bar{R}_{(SSB)j}, \dot{\bar{R}}_{(SSB)j}$ — барицентрические векторы (относительно SSB) положений и скоростей i -го и j -го тела, соответственно; $\bar{r}_{ji} = \bar{R}_{(SSB)i} - \bar{R}_{(SSB)j}$; $\dot{\bar{r}}_{ji} = \dot{\bar{R}}_{(SSB)i} - \dot{\bar{R}}_{(SSB)j}$;

2) вектор угловой скорости геодезического вращения, вычисляемый относительно JSB, имеет вид

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_{(JSB)i} &= \frac{1}{c^2} \sum_{j \neq i} \frac{Gm_j}{|\bar{r}_{ji}|^3} (\bar{r}_{ji}) \wedge \left(\frac{3}{2} \dot{\bar{r}}_{ji} - \frac{1}{2} \dot{\bar{R}}_{(JSB)j} \right) = \\ &= \frac{1}{c^2} \sum_{j \neq i} \frac{Gm_j}{|\bar{r}_{ji}|^3} \left(\frac{3}{2} \bar{r}_{ji} \wedge \dot{\bar{r}}_{ji} - \frac{1}{2} \bar{r}_{ji} \wedge \dot{\bar{R}}_{(JSB)j} \right), \end{aligned}$$

где $\bar{R}_{(JSB)i}, \dot{\bar{R}}_{(JSB)i}, \bar{R}_{(JSB)j}, \dot{\bar{R}}_{(JSB)j}$ — барицентрические векторы (относительно JSB) положений и скоростей i -го и j -го тела, соответственно; $\bar{r}_{ji} = \bar{R}_{(JSB)i} - \bar{R}_{(JSB)j}$; $\dot{\bar{r}}_{ji} = \dot{\bar{R}}_{(JSB)i} - \dot{\bar{R}}_{(JSB)j}$.

В результате выражение разности этих векторов угловой скорости геодезического вращения имеет вид:

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_{(SSB)i} - \bar{\sigma}_{(JSB)i} &= \\ &= \frac{1}{c^2} \sum_{j \neq i} \frac{Gm_j}{|\bar{r}_{ji}|^3} \left(\frac{1}{2} \bar{r}_{ji} \wedge \dot{\bar{R}}_{(JSB)j} - \frac{1}{2} \bar{r}_{ji} \wedge \dot{\bar{R}}_{(SSB)j} \right) = \\ &= \frac{1}{c^2} \sum_{j \neq i} \frac{Gm_j}{|\bar{r}_{ji}|^3} \frac{1}{2} (\bar{r}_{ji}) \wedge (\dot{\bar{r}}_{(SSB)(JSB)}), \end{aligned}$$

где $\dot{\bar{r}}_{(SSB)(JSB)} = \dot{\bar{R}}_{(JSB)j} - \dot{\bar{R}}_{(SSB)j}$ — вектор скорости движения барицентров друг относительно друга. Далее в формулах индекс i будет опущен. Следовательно $\bar{\sigma}_{SSB} \neq \bar{\sigma}_{JSB}$. (Заметим, что если бы формула была симметричной, например:

$$\bar{\sigma}_i = \frac{1}{c^2} \sum_{j \neq i} \frac{Gm_j}{|\bar{R}_i - \bar{R}_j|^3} (\bar{R}_i - \bar{R}_j) \wedge \left(\frac{3}{2} \dot{\bar{R}}_i - \frac{3}{2} \dot{\bar{R}}_j \right),$$

тогда

$$\bar{\sigma}_{(SSB)i} = \bar{\sigma}_{(JSB)i} = \frac{1}{c^2} \sum_{j \neq i} \frac{Gm_j}{|\bar{r}_{ji}|^3} \left(\frac{3}{2} \bar{r}_{ji} \wedge \dot{\bar{r}}_{ji} \right).$$

Для симметричной формулы результирующее значение величины вектора не зависит от выбора координатной системы.)

Тем самым в нашем исследовании показана зависимость величины эффекта геодезического вращения от выбора координатной системы из вида самой формулы.

Поэтому для исследуемых спутников относительно разных систем координат существуют разные векторы угловой скорости их геодезического вращения, более того, эти векторы не переходят один в другой путем параллельного переноса или угловых поворотов, как это происходит для векторов угловой скорости в евклидовом пространстве (т. е. не проецируются друг в друга и имеют разные величины своих абсолютных значений).

Таким образом, вектор угловой скорости геодезического вращения исследуемого спутника относительно SSB $\bar{\sigma}_{SSB}$ не будет совпадать с аналогичным вектором исследуемого спутника относительно JSB $\bar{\sigma}_{JSB}$ (рис. 2).

Известно, что не возмущаемый (т. е. не возмущаемый другими телами, кроме центрального тела — задача двух тел) вектор угловой скорости геодезического вращения исследуемого тела перпендикулярен плоскости орбиты этого тела (Baland и др., 2023). Поэтому для наглядности различия между векторами, на рис. 2 будем пренебрегать возмущениями от других тел, таким образом, вектор спутника Юпитера $\bar{\sigma}_{JSB}$ перпендикулярен плоскости своей средней орбиты, а другой вектор спутника Юпитера $\bar{\sigma}_{SSB}$ перпендикулярен плоскости средней орбиты Юпитера.

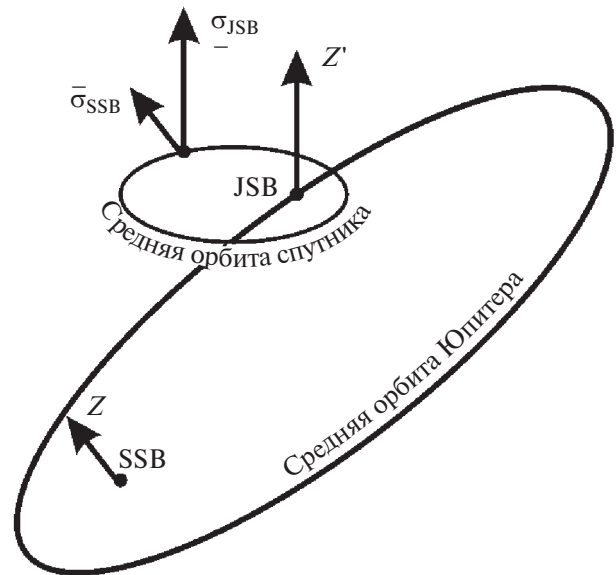


Рис. 2. Различие между вектором угловой скорости геодезического вращения исследуемого спутника относительно SSB и аналогичным вектором исследуемого спутника относительно JSB. Ось SSBZ перпендикулярна плоскости средней орбиты Юпитера, а ось JSBZ' перпендикулярна плоскости средней орбиты спутника Юпитера.

В данном исследовании были вычислены значения векторов угловой скорости геодезического вращения галилеевых спутников Юпитера относительно SSB и относительно JSB и значение вектора угловой скорости геодезического вращения Юпитера относительно SSB. Для их вычисления в формуле (1) используются барицентрические координаты и скорости, взятые из эфемерид JPL DE441/LE441 (Park и др., 2021), Horizons On-Line Ephemeris System (Giorgini и др., 2001), координатная система которых является геоцентрической. Поэтому необходимо произвести редукцию компонент вектора угловой скорости геодезического вращения Юпитера и его галилеевых спутников от геоцентрической системы координат к телоцентрической координатной системе (Archinal и др., 2018).

Благодаря комментариям в работе (Baland и др., 2023) Пашкевичем была найдена и исправлена ошибка в знаке в формуле редукции (3) (Пашкевич, 2016), в этой формуле $-\varepsilon_*$ нужно заменить на ε_* , в результате исправленная формула имеет следующий вид:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{pmatrix} = r(\gamma_* B) p(\varepsilon_*) r(\gamma_0 \gamma_*) p(\varepsilon_0) r(\Delta) \begin{pmatrix} \sigma_X \\ \sigma_Y \\ \sigma_Z \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где $\varepsilon_* = \angle \gamma_* Q$ (рис. 1) — угол наклона от неподвижной эклиптики эпохи J2000.0 к экватору даты

исследуемого тела; в данной статье вместо γ_0, γ_* используются обозначения $\gamma, \underline{\Omega}_*$, соответственно (т. е. $\gamma_* \mathbf{B} = \underline{\Omega}_* \mathbf{B}$, $\gamma_0 \gamma_* = \gamma \underline{\Omega}_*$ (рис. 1), $\mathbf{B}$ – точка пересечения нулевого меридиана исследуемого тела с его экватором даты (рис. 1)); матрицы поворота на угол a определяются формулами (Абалакин, 1979):

$$\begin{aligned} r(a) &= \begin{pmatrix} \cos a & \sin a & 0 \\ -\sin a & \cos a & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \\ p(a) &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos a & \sin a \\ 0 & -\sin a & \cos a \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (4)$$

В данной статье формула (3) упростится (так как в данном исследовании используются эфемериды JPLDE441/LE441 (Park и др., 2021) и Horizons On-Line Ephemeris System (Giorgini и др., 2001), не требующие дополнительного поворота на $\Delta = -0''.05294$ вдоль экватора Земли, как это было необходимо в более ранних эфемеридах JPL, не используемых в данной работе):

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{pmatrix} = r(\underline{\Omega}_* \mathbf{B}) p(\varepsilon_*) r(\gamma \underline{\Omega}_*) p(\varepsilon_0) \begin{pmatrix} \sigma_X \\ \sigma_Y \\ \sigma_Z \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где $\varepsilon_0 = 23^\circ 26' 21''.448 = 84381''.448$ (Giorgini и др., 2001; Park и др., 2021); $\sigma_X, \sigma_Y, \sigma_Z$ – компоненты геоцентрического вектора угловой скорости геодезического вращения тела; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – компоненты телоцентрического вектора угловой скорости геодезического вращения тела; X, Y, Z – компоненты вектора $\bar{\mathbf{R}}$ в формуле (2). В данном исследовании вместо формулы (5) использовалась эквивалентная ей формула, требующая меньшего числа вычислений и поворотов:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{pmatrix} = r(W) p(90^\circ - \delta_0) r(\alpha_0 + 90^\circ) \begin{pmatrix} \sigma_X \\ \sigma_Y \\ \sigma_Z \end{pmatrix}, \quad (6)$$

значения величин α_0, δ_0, W можно найти в работе (Archinal и др., 2018).

Итак, как показано на рис. 1, с помощью трех матриц в формуле (6) производится редукция компонент вектора угловой скорости геодезического вращения Юпитера и его галилеевых спутников от геоцентрической системы координат (координатная система используемых в данном исследовании эфемерид (Park и др., 2021; Giorgini и др., 2001) к телоцентрической координатной системе (Archinal и др., 2018)), осуществляя следующие повороты:

- поворот на угол $\alpha_0 + 90^\circ$ вдоль неподвижного геоэкватора (ICRF) эпохи J2000.0 от точки весеннего равноденствия Земли эпохи J2000.0 к точке восходящего узла экватора даты изучаемого тела;

- поворот на угол $90^\circ - \delta_0$ от неподвижного геоэкватора (ICRF) эпохи J2000.0 к экватору даты изучаемого тела;

- поворот на угол W вдоль экватора даты изучаемого тела от точки восходящего узла экватора даты изучаемого тела к точке пересечения нулевого меридиана планеты с экватором даты изучаемого тела.

Скорости геодезического вращения тел Солнечной системы определяются для Юпитера и его галилеевых спутников в углах Эйлера и в возмущающих членах физической либрации с использованием следующих выражений (Пашкевич, 2016):

$$\left. \begin{aligned} \Delta\dot{\psi} &= -\frac{\sigma_1 \sin \varphi + \sigma_2 \cos \varphi}{\sin \theta} \\ \Delta\dot{\theta} &= -\sigma_1 \cos \varphi + \sigma_2 \sin \varphi \\ \Delta\dot{\phi} &= \sigma_3 - \Delta\dot{\psi} \cos \theta \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} \sin \theta \Delta\dot{\psi} &= -\sigma_1 \sin \varphi - \sigma_2 \cos \varphi = \Delta(I\dot{\sigma}) \\ \Delta\dot{\theta} &= -\sigma_1 \cos \varphi + \sigma_2 \sin \varphi = \Delta\dot{\rho} \\ \Delta\dot{\psi} + \Delta\dot{\phi} &= \sigma_3 - (\sigma_1 \sin \varphi + \sigma_2 \cos \varphi) \tan \frac{\theta}{2} = \Delta\dot{\tau} \end{aligned} \right\}.$$

Здесь ψ, θ, φ – углы Эйлера (рис. 1 и 3) (замечим, что в данном исследовании углы Эйлера (рис. 3) относятся к экватору вращения (истинному экватору даты) исследуемого тела, как определено в работе (Archinal и др., 2018), и могут не совпадать с углами Эйлера, определенными в классической механике относительно экватора фигуры исследуемого тела (Суслов, 1946), за исключением случаев, когда экватор фигуры исследуемого тела совпадает с экватором его вращения); τ, ρ и σ (не стоит путать с вектором $\bar{\sigma}$) – возмущающие члены физической либрации исследуемого тела для его средней орбиты эпохи J2000.0 в долготу, в наклоне и в долготу узла, соответственно; I – постоянный угол наклона экватора исследуемого тела эпохи J2000.0 к его средней орбите эпохи J2000.0; $\Delta\dot{\psi} = \dot{\psi}_r - \dot{\psi}$, $\Delta\dot{\theta} = \dot{\theta}_r - \dot{\theta}$ и $\Delta\dot{\phi} = \dot{\phi}_r - \dot{\phi}$ – разности производных по времени от релятивистских и ньютоновых углов Эйлера исследуемого тела, соответственно; $\Delta(I\dot{\sigma}) = I\dot{\sigma}_r - I\dot{\sigma}$, $\Delta\dot{\rho} = \dot{\rho}_r - \dot{\rho}$ и $\Delta\dot{\tau} = \dot{\tau}_r - \dot{\tau}$ – разности производных по времени от релятивистских и ньютоновых возмущающих членов физической либрации исследуемого тела, соответственно; точка означает дифференциро-

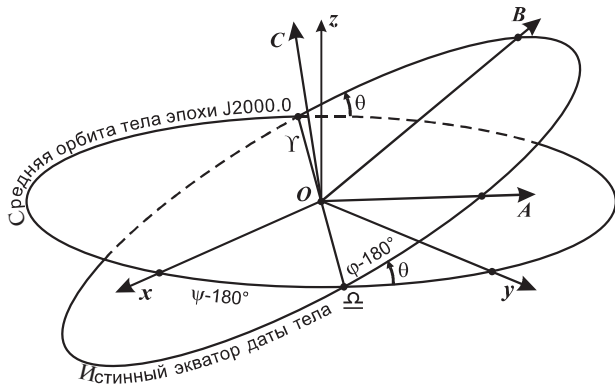


Рис. 3. Определение углов Эйлера исследуемого тела относительно кинематически невращающейся его собственной системы координат (ось инерции OC перпендикулярна плоскости истинного экватора даты исследуемого тела, а ось OZ перпендикулярна плоскости средней орбиты исследуемого тела эпохи J2000.0).

вание по времени. По сути, эти различия являются скоростями геодезического вращения исследуемого тела в углах Эйлера и в его возмущающих членах физической либрации.

Значения углов θ и φ , используемых в вычислениях по формуле (7), определяются из решения сферического треугольника DCQ (рис. 1), применяя для этого формулы сферической геометрии (Жаров, 2006). В нем известны два угла (D и Q) и сторона между ними ($DQ = YQ - YD = \alpha_0 + 90^\circ - \Omega_j$). В результате вычисляются стороны DC и QC и угол θ , а угол $\varphi = QB - QC + 180^\circ = W - QC + 180^\circ$.

Выражение для абсолютной величины вектора угловой скорости геодезического вращения исследуемого тела имеет вид:

$$|\vec{\sigma}| = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}. \quad (8)$$

Данная формула верна, так как величина вектора не зависит от выбранной для его проецирования системы координат.

4. Наиболее существенные составляющие скорости геодезического вращения исследуемого тела находятся из вычисленных временных рядов аналитическими и численными методами — численного интегрирования, наименьших квадратов и спектрального анализа. В результате вычисляются значения коэффициентов основных систематических и периодических членов скорости геодезического вращения тела.

Численно интегрируя методом “Гаусса—Лежандра по 10 точкам” (Press и др., 1986) полученные значения скоростей геодезического вращения исследуемого тела в углах Эйлера, в его возмущающих членах физической либрации и в абсолютной величине вектора угловой скорости вращения, вычисляются численные временные ряды величин геодезического вращения

исследуемого тела в рассматриваемых углах и абсолютной величине вектора углового поворота геодезического вращения тела $|\vec{\Lambda}| = \left| \int \vec{\sigma} dt \right|$.

Выражение для вычисления величины эффекта геодезического вращения небесного тела имеет вид:

$$\Delta x = \Delta x_I + \Delta x_{II} = \sum_{n=0}^N \Delta x_n t^n + \sum_j \sum_{k=0}^M \left(\Delta x_{Cjk} \cos(v_{j0} + v_{j1}t) + \Delta x_{Sjk} \sin(v_{j0} + v_{j1}t) \right) t^k, \quad (9)$$

где Δx_n — коэффициенты вековых членов; Δx_{Sjk} , Δx_{Cjk} — коэффициенты периодических и смешанных членов при синусах и косинусах, соответственно; $\Delta x = x_{\text{релятив.}} - x_{\text{ньютон.}}$; $\Delta x = \Delta \psi, \Delta \theta, \Delta \varphi, \Delta t, \Delta \rho, \Delta I \sigma, |\vec{\Lambda}|$; v_{j0}, v_{j1} — фазы и частоты исследуемого тела в данном исследовании берутся из работы (Archinal и др., 2018); индекс суммирования j определяет количество суммируемых периодических членов и его значение изменяется для каждого исследуемого тела; t — время в юлианских днях; $N = 1, M = 1$.

Сначала методом наименьших квадратов в рассматриваемых углах для каждого исследуемого тела из полученных для него численных временных рядов вычисляются систематические члены геодезической прецессии Δx_r , и их величины вычитаются из исходных временных рядов. Таким образом, исключив вековые члены из исходных временных рядов, результирующие ряды содержат только периодические члены (некоторые из таких рядов приведены на рис. 4–6).

Далее, используя результирующие временные ряды и набор периодических гармоник, взятых из работы (Archinal и др., 2018), во всех исследуемых углах для каждого исследуемого тела методом спектрального анализа (Jenkins, Watts, 1969) авторы строят спектры мощности (некоторые из них

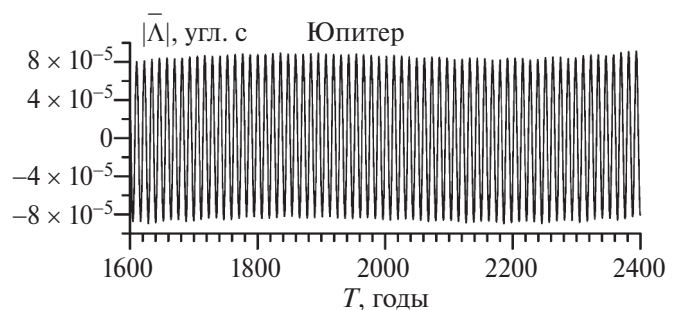


Рис. 4. Временной ряд изменения геодезической нутации Юпитера для абсолютной величины вектора его углового поворота геодезического вращения $|\vec{\Lambda}_{SSB}|$ относительно SSB и средней орбиты Юпитера на интервале времени 800 лет.

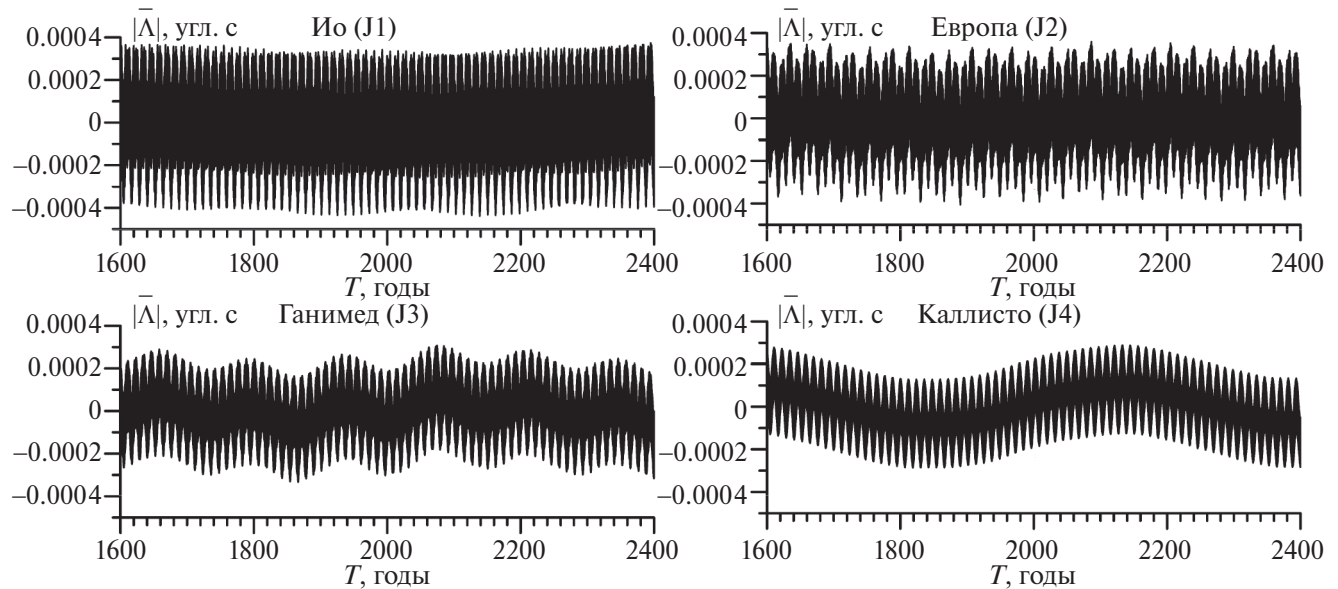


Рис. 5. Временные ряды изменения геодезической нутации галилеевых спутников Юпитера для абсолютной величины вектора их углового поворота геодезического вращения $|\bar{\Lambda}_{SSB}|$ относительно SSB и средней орбиты Юпитера на интервале времени 800 лет.

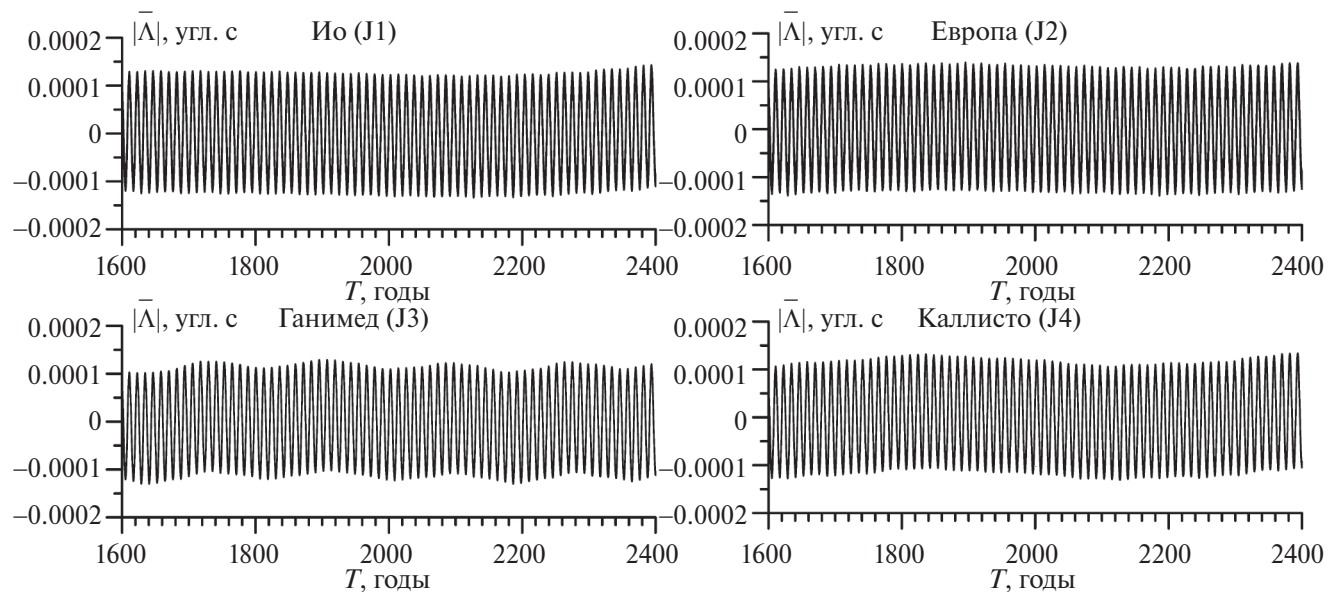


Рис. 6. Временные ряды изменения геодезической нутации галилеевых спутников Юпитера для абсолютной величины вектора их углового поворота геодезического вращения $|\bar{\Lambda}_{JSB}|$ относительно JSB и средней орбиты спутника на интервале времени 800 лет.

приведены на рис. 7–9). С их помощью определяется дальнейший порядок (в порядке убывания от гармоник с наибольшей мощностью к гармонике с наименьшей мощностью) вычисления периодических членов, соответствующих этим гармоникам, и их исключения из результирующего ряда. В результате для каждого исследуемого тела методом наименьших квадратов вычисляются периодические члены геодезической нутации $\Delta\chi_{II}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для Юпитера и его галилеевых спутников в углах Эйлера, в возмущающих членах физической либрации и в абсолютной величине вектора их углового поворота геодезического вращения вычислены вековые (табл. 2 и 3) и периодические члены их геодезического вращения (табл. 4 и 5). Их значения используются в выражении (9) для вычисления величины эффекта геодезического вращения небесного тела.

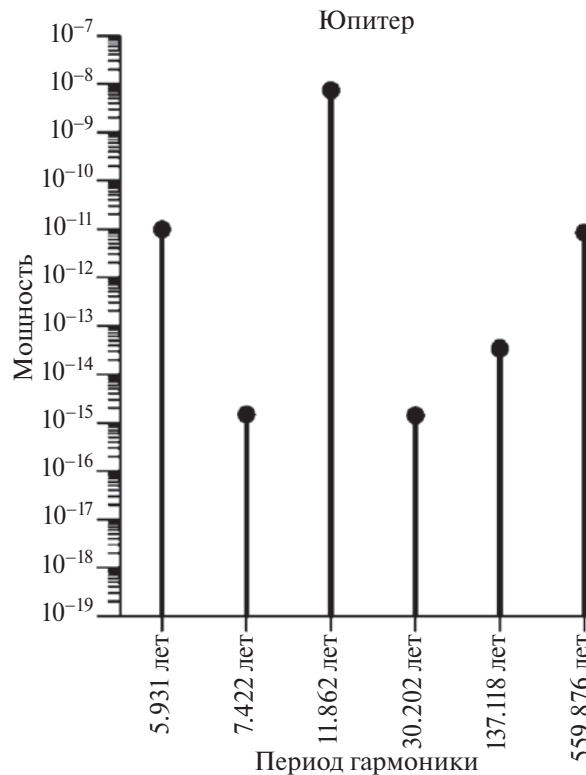


Рис. 7. Спектр мощности Юпитера для абсолютной величины вектора его углового поворота геодезического вращения $|\bar{\Lambda}_{SSB}|$ относительно SSB и средней орбиты Юпитера.

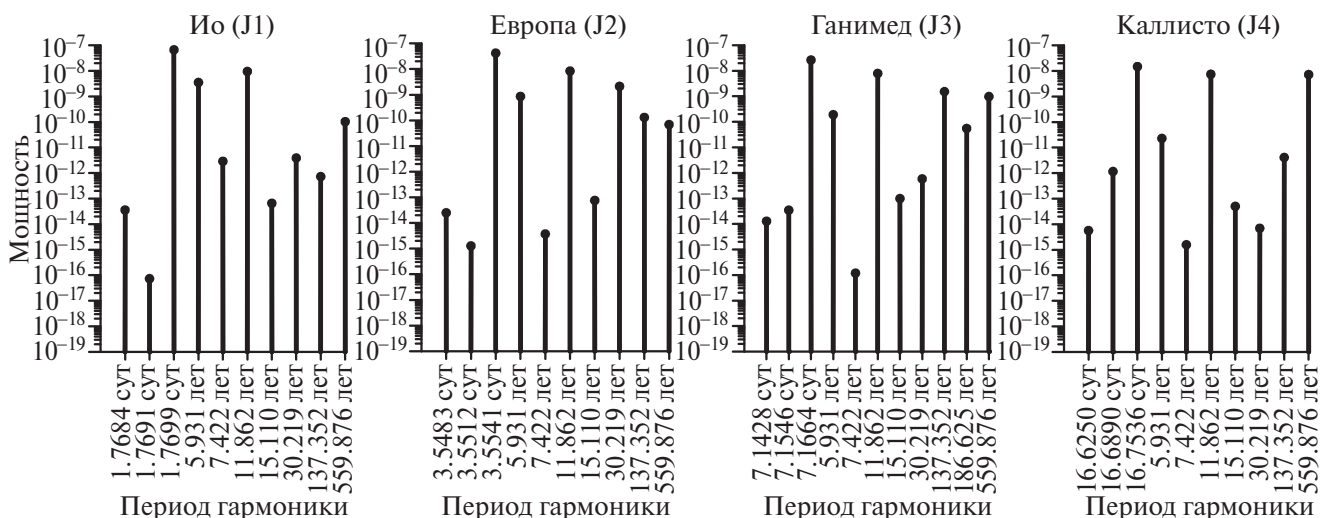


Рис. 8. Спектры мощности галилеевых спутников Юпитера для абсолютной величины вектора их углового поворота геодезического вращения $|\bar{\Lambda}_{SSB}|$ относительно SSB и средней орбиты Юпитера.

Вековые (табл. 3) и периодические (табл. 5) члены геодезического вращения галилеевых спутников Юпитера относительно JSB из-за особенности в синусе наклона $(\sin \theta)^{-1}$ (7) вычисляются только в возмущающих членах физической либрации и абсолютной величине вектора углового поворота геодезического вращения тела относительно средней орбиты исследуемого спутника эпохи J2000.0. В табл. 4 и 5 оставлены наиболее

существенные периодические члены с наиболее весомыми гармониками в их спектрах мощности (рис. 7–9) (в данном случае исключены гармоники, чей вклад в спектр мощности на три порядка меньше максимального. Так, из шести гармоник спектра для абсолютной величины вектора углового поворота геодезического вращения Юпитера (рис. 7) оставлены только три его гармоники (табл. 4).

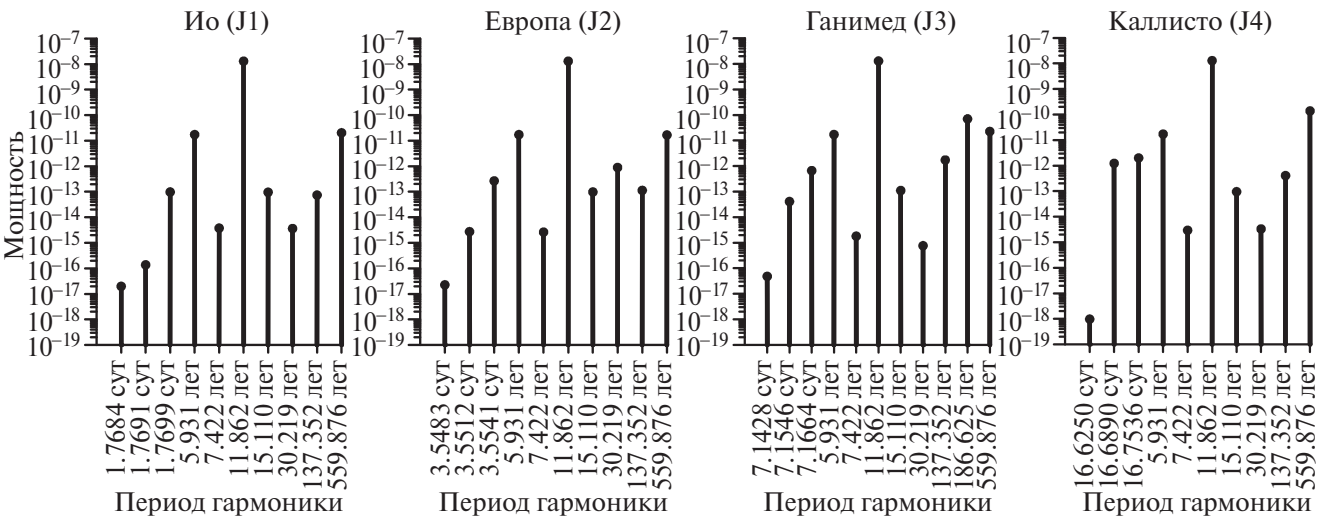


Рис. 9. Спектры мощности галилеевых спутников Юпитера для абсолютной величины вектора их углового поворота геодезического вращения $|\bar{\Lambda}_{JSB}|$ относительно JSB и средней орбиты спутника.

Таблица 2. Вековые члены геодезического вращения Юпитера и его галилеевых спутников, вычисленные для углов Эйлера, параметров физической либрации и в абсолютной величине вектора их углового поворота относительно SSB и средней орбиты Юпитера

Тело	Юпитер (B5), $a=5.2029$ а. е.	Ио (J1), $a=421800$ км	Европа (J2), $a=671100$ км	Ганимед (J3), $a=1070400$ км	Каллисто (J4), $a=1882700$ км
Параметр (угл. с)					
$\Delta\psi_1$	$-0.3117t$	$-0.4264t$	$-0.2490t$	$-0.2977t$	$-0.2944t$
$\Delta\theta_1$	$5\times 10^{-7}t$	$-0.1210t$	$-0.0236t$	$-0.0062t$	$-0.0044t$
$\Delta\varphi_1$	$-2\times 10^{-5}t$	$-1341.5587t$	$-420.1821t$	$-130.7324t$	$-31.8793t$
$\Delta\tau_1$	$-0.3118t$	$-1341.9851t$	$-420.4310t$	$-131.0301t$	$-32.1737t$
$\Delta(I\sigma)_1$	$-0.0170t$	$-0.0239t$	$-0.0151t$	$-0.0157t$	$-0.0139t$
$ \bar{\Lambda} _1$	$0.3118t$	$1342.0490t$	$420.4637t$	$131.0456t$	$32.1790t$

Таблица 3. Вековые члены геодезического вращения галилеевых спутников Юпитера, вычисленные для параметров физической либрации и в абсолютной величине вектора их углового поворота относительно JSB и средней орбиты спутника

Спутник	Ио (J1), $a=421800$ км	Европа (J2), $a=671100$ км	Ганимед (J3), $a=1070400$ км	Каллисто(J4), $a=1882700$ км
Параметр (угл. с)				
$\Delta\theta_1$	$-0.0609t$	$0.0086t$	$0.0027t$	$0.0027t$
$\Delta\tau_1$	$-1342.0881t$	$-420.5343t$	$-131.1334t$	$-32.2770t$
$\Delta(I\sigma)_1$	$-0.1195t$	$-0.0229t$	$0.0020t$	$0.0094t$
$ \bar{\Lambda} _1$	$1342.0881t$	$420.5342t$	$131.1334t$	$32.2770t$

Примечание: в табл. 2–3: t – динамическое барицентрическое время (Temps Dynamique Barycentrique – TDB) измеряется в юлианских тысячелетиях (tjy) (365250 суток) от эпохи J2000.0; a – большая полуось орбит Юпитера и его спутников.

Таблица 4. Периодические и смешанные члены геодезического вращения Юпитера и его галилеевых спутников, вычисленные для углов Эйлера, параметров физической либрации и в абсолютной величине вектора их углового поворота относительно SSB и средней орбиты Юпитера

Тело	Параметр (угл. с)	Период	Аргумент	Коэффициент при $\cos(\text{аргумент}), ((\text{угл. с}) \times 10^{-6})$	Коэффициент при $\sin(\text{аргумент}), ((\text{угл. с}) \times 10^{-6})$
Юпитер (B5)	$\Delta\psi_{II}$	11.862 лет	λ_5	$21.6144+4.4208t$	$-82.5517-0.8898t$
		559.876 лет	Je	$13.4688-76.0074t$	$10.8813+65.3776t$
		5.931 лет	Jd	$2.9843+0.4400t$	$-0.8552+0.6162t$
		137.118 лет	Jc	$-0.4169+3.3367t$	$0.3496+2.1046t$
	$\Delta\theta_{II}$	559.876 лет	Je	$-2.9523+21.2373t$	$-3.6402-18.0637t$
		137.118 лет	Jc	$0.0638-0.9536t$	$-0.1239-0.5583t$
		30.202 лет	Jb	$-0.0271-0.0162t$	$0.0040-0.0807t$
		11.862 лет	λ_5	$-0.0094-0.0194t$	$-0.0060+0.0637t$
	$\Delta\varphi_{II}$	559.876 лет	Je	$-15.9931+74.9080t$	$-9.4152-67.1425t$
		137.118 лет	Jc	$0.5726-3.2540t$	$-0.2499-1.8430t$
		30.202 лет	Jb	$-0.1311+0.5056t$	$0.0474-0.4328t$
	$\Delta\tau_{II}$	11.862 лет	λ_5	$21.2540+4.5698t$	$-82.8337+0.1697t$
		5.931 лет	Jd	$3.0064+0.2687t$	$-0.8390+0.4810t$
		559.876 лет	Je	$-2.5144-1.1126t$	$1.4574-1.7675t$
	$\Delta(I\sigma)_{II}$	11.862 лет	λ_5	$1.1776+0.2670t$	$-4.4928-0.0320t$
		559.876 лет	Je	$0.4426-4.1923t$	$0.9392+3.6135t$
		5.931 лет	Jd	$0.1625+0.0259t$	$-0.0466+0.0346t$
		137.118 лет	Jc	$-0.0700+0.1832t$	$0.0750+0.1141t$
	$ \bar{\Lambda} _{II}$	11.862 лет	λ_5	$-21.2545-4.5696t$	$82.8332-0.1682t$
		5.931 лет	Jd	$-3.0064-0.2709t$	$0.8391-0.4821t$
		559.876 лет	Je	$2.4911+1.2239t$	$-1.4717+1.6682t$
Ио (J1)	$\Delta\psi_{II}$	559.876 лет	Ω_{L54}	$-22950.8220+101040.2153t$	$-7297.0660-86574.4459t$
		137.352 лет	Ω_{L53}	$8045.0564-6713.4553t$	$-9556.7202-3883.9093t$
		7.422 лет	Ω_{L51}	$-541.0161+326.3821t$	$2537.1069+125.8945t$
		30.219 лет	Ω_{L52}	$-863.5325-2052.7101t$	$1698.5568-2130.0943t$
	$\Delta\theta_{II}$	559.876 лет	Ω_{L54}	$-3726.9530+23122.2346t$	$-4106.0024-19932.8723t$
		137.352 лет	Ω_{L53}	$559.2590-1049.2446t$	$283.3482-547.2629t$
		7.422 лет	Ω_{L51}	$-148.5377+48.3189t$	$-23.0757+9.2947t$
		30.219 лет	Ω_{L52}	$-65.7976+61.1071t$	$-81.3023-188.5410t$
	$\Delta\varphi_{II}$	559.876 лет	Ω_{L54}	$22917.6868-100878.6524t$	$7282.7611+86438.5192t$
		137.352 лет	Ω_{L53}	$-8033.5350+6703.3373t$	$9542.5533+3876.9082t$
		7.422 лет	Ω_{L51}	$539.5816-325.9930t$	$-2533.3371-122.5827t$
		30.219 лет	Ω_{L52}	$862.2137+2047.1093t$	$-1696.2122+2129.8247t$
	$\Delta\tau_{II}$	1.770 сут.	D_{51}	$-9.2087+11.6153t$	$258.7824+0.3468t$
		11.862 лет	λ_5	$22.1710+4.1205t$	$-82.2192-1.9509t$
		559.876 лет	Ω_{L54}	$-33.2136+163.3117t$	$-14.1985-137.1139t$
		137.352 лет	Ω_{L53}	$11.7507-10.7380t$	$-14.3487-6.5202t$
		7.422 лет	Ω_{L51}	$-0.7427+0.7112t$	$3.7721+0.4400t$
		5.931 лет	J8	$3.0899+0.7191t$	$-0.7681+0.6082t$
		30.219 лет	Ω_{L52}	$-1.2701-3.1745t$	$2.4906-2.7694t$

Таблица 4. Продолжение

Тело	Параметр (угл. с)	Период	Аргумент	Коэффициент при $\cos(\text{аргумент}), ((\text{угл. с}) \times 10^{-6})$	Коэффициент при $\sin(\text{аргумент}), ((\text{угл. с}) \times 10^{-6})$
	$\Delta(I\sigma)_{II}$	559.876 лет	Ω_{L54}	$-1248.2306+5497.0427t$	$-397.3204-4709.6679t$
		137.352 лет	Ω_{L53}	$437.5331-364.8521t$	$-519.8317-211.8508t$
		7.422 лет	Ω_{L51}	$-29.6306+16.9071t$	$138.2311+7.8380t$
		30.219 лет	Ω_{L52}	$-47.0880-112.6170t$	$92.6421-115.4349t$
	$ \bar{\Lambda} _{II}$	1.770 сут.	D_{51}	$9.2013-11.6068t$	$-258.5789-0.3475t$
		11.862 лет	λ_5	$-24.5096-5.1278t$	$94.4672+0.0717t$
		5.931 лет	J8	$36.4659-4.3212t$	$46.8850+2.1410t$
		559.876 лет	Ω_{L54}	$4.9330-46.8809t$	$8.8519+39.1806t$
		30.219 лет	Ω_{L52}	$1.3223-0.0870t$	$-1.4611-0.3814t$
		7.422 лет	Ω_{L51}	$1.1845-0.1205t$	$-1.2179-0.0138t$
	$\Delta\psi_{II}$	559.876 лет	Ω_{L54}	$-11386.5075+35810.7142t$	$6680.5149-28130.7476t$
		137.352 лет	Ω_{L53}	$-1915.1708-1221.5746t$	$1644.6876-3416.4759t$
		30.219 лет	Ω_{L52}	$-1955.0491-28746.3828t$	$1031.6872-26083.8840t$
		7.422 лет	Ω_{L51}	$-151.5889+45.9568t$	$120.8322+110.2081t$
		15.11 лет	J7	$-115.2828-337.1568t$	$-30.6304-3128.3614t$
	$\Delta\theta_{II}$	559.876 лет	Ω_{L54}	$-996.8543+4490.6495t$	$-1268.1163-3782.4604t$
		137.352 лет	Ω_{L53}	$-63.4078-137.7709t$	$-154.2259+11.4460t$
		30.219 лет	Ω_{L52}	$-52.1133+1349.2627t$	$-105.2553-1534.8308t$
		7.422 лет	Ω_{L51}	$-6.4976+8.6305t$	$-7.3277-1.1637t$
	$\Delta\varphi_{II}$	559.876 лет	Ω_{L54}	$11372.3049-35761.5369t$	$-6671.6615+28094.2715t$
		137.352 лет	Ω_{L53}	$1912.0768+1220.0505t$	$-1642.0724+3410.7532t$
		30.219 лет	Ω_{L52}	$1952.3233+28701.3131t$	$-1030.4588+26049.9008t$
		7.422 лет	Ω_{L51}	$150.7371-45.9397t$	$-120.6437-107.0323t$
		15.11 лет	J7	$114.5751+338.5026t$	$29.3765+3126.8202t$
Европа (J2)	$\Delta\tau_{II}$	3.5541 сут.	D_{52}	$-11.6677+4.3883t$	$204.8108+0.2234t$
		11.862 лет	λ_5	$21.5464+3.6599t$	$-82.3619-1.1366t$
		559.876 лет	Ω_{L54}	$-14.2809+50.9639t$	$8.9606-37.6953t$
		137.352 лет	Ω_{L53}	$-2.8616-2.1539t$	$2.4280-5.2430t$
		5.931 лет	J8	$3.0672+0.8711t$	$-0.7831+0.5363t$
		30.219 лет	Ω_{L52}	$-2.6789-42.6649t$	$1.3675-36.5329t$
	$\Delta(I\sigma)_{II}$	559.876 лет	Ω_{L54}	$-605.5900+1917.9708t$	$358.5968-1497.4646t$
		137.352 лет	Ω_{L53}	$-105.1126-66.7916t$	$92.1160-180.5340t$
		30.219 лет	Ω_{L52}	$-110.4493-1558.3277t$	$62.0449-1390.4315t$
		7.422 лет	Ω_{L51}	$-7.7874+3.0971t$	$6.5603+4.4687t$
	$ \bar{\Lambda} _{II}$	3.5541 сут.	D_{52}	$11.6577-4.3870t$	$-204.6419-0.2253t$
		11.862 лет	λ_5	$-22.6834-2.4703t$	$88.6761+2.2961t$
		30.219 лет	Ω_{L52}	$30.0868-5.5963t$	$-34.8182-4.2374t$
		5.931 лет	J8	$16.8989-1.8543t$	$23.8696+0.9873t$
		137.352 лет	Ω_{L53}	$6.8467+4.1163t$	$-9.1340+6.7665t$
		559.876 лет	Ω_{L54}	$7.1845-14.5624t$	$-4.1147+9.9082t$

Таблица 4. Продолжение

Тело	Параметр (угл. с)	Период	Аргумент	Коэффициент при $\cos(\text{аргумент}), ((\text{угл. с}) \times 10^{-6})$	Коэффициент при $\sin(\text{аргумент}), ((\text{угл. с}) \times 10^{-6})$
Ганимед (J3)	$\Delta\psi_{II}$	559.876 лет	Ω_{L54}	$-3935.6926+13179.2577t$	$174.0359-9918.2231t$
		137.352 лет	Ω_{L53}	$-596.7236-1471.8295t$	$-1033.5358-1658.1010t$
		186.625 лет	$3\Omega_{L54}$	$112.0732-619.5584t$	$173.4122+1032.2197t$
		30.219 лет	Ω_{L52}	$-71.6614+259.5968t$	$90.0299+274.3836t$
		7.143 сут.	$\lambda_{53}+\lambda_5$	$-80.3923+0.2283t$	$-11.7982+1.2803t$
		7.166 сут.	D_{53}	$-5.7310+2.6014t$	$80.9137+0.3573t$
		11.862 лет	λ_5	$14.1255+17.5083t$	$-78.6881+15.2737t$
		5.931 лет	J8	$52.1962+2.0014t$	$54.8662+1.2652t$
	$\Delta\theta_{II}$	559.876 лет	Ω_{L54}	$-415.5843+2021.3567t$	$-440.1180-1720.0932t$
		137.352 лет	Ω_{L53}	$85.0853-41.2602t$	$-71.1086-92.1141t$
		186.625 лет	$3\Omega_{L54}$	$11.4692-136.4939t$	$11.5067+132.5710t$
		30.219 лет	Ω_{L52}	$-6.7729-20.6378t$	$-2.8465+8.8942t$
	$\Delta\varphi_{II}$	559.876 лет	Ω_{L54}	$3933.0177-13173.1621t$	$-175.2794+9916.6693t$
		137.352 лет	Ω_{L53}	$596.4942+1467.3688t$	$1031.1916+1653.3046t$
		186.625 лет	$3\Omega_{L54}$	$-115.6033+618.5210t$	$-179.3926-1028.6547t$
		30.219 лет	Ω_{L52}	$71.4234-261.6194t$	$-90.0708-271.2114t$
		7.143 сут.	$\lambda_{53}+\lambda_5$	$80.4932+0.5104t$	$11.8009+1.2682t$
		7.166 сут.	D_{53}	$-5.8532-0.6976t$	$80.8411-0.2710t$
		5.931 лет	J8	$-49.1848-1.7621t$	$-55.7023-0.5567t$
	$\Delta\tau_{II}$	7.166 сут.	D_{53}	$-11.5844+1.8990t$	$161.7571+0.0864t$
		11.862 лет	λ_5	$21.2575+4.3492t$	$-82.5924-0.0430t$
		186.625 лет	$3\Omega_{L54}$	$-3.6720-5.2205t$	$-5.4410+4.2788t$
		5.931 лет	J8	$3.0511+0.5340t$	$-0.8150+0.5269t$
		559.876 лет	Ω_{L54}	$-2.6573+15.0688t$	$-0.9262-8.4412t$
		137.352 лет	Ω_{L53}	$-0.7421-3.5672t$	$-1.5440-3.4257t$
		15.11 лет	J7	$0.1595+0.5669t$	$0.1702-1.0126t$
		7.155 сут.	λ_{53}	$-0.0369+0.1673t$	$-0.1834-0.5949t$
		30.219 лет	Ω_{L52}	$-0.1110+0.3317t$	$0.0962+0.6189t$
	$\Delta(I\sigma)_{II}$	559.876 лет	Ω_{L54}	$-218.5031+694.7377t$	$22.9134-520.1284t$
		137.352 лет	Ω_{L53}	$-44.6705-81.7997t$	$-37.9675-77.7141t$
		186.625 лет	$3\Omega_{L54}$	$5.3702-36.7884t$	$7.2470+55.2751t$
		30.219 лет	Ω_{L52}	$-3.4652+13.7983t$	$4.3845+14.0524t$
		7.143 сут.	$\lambda_{53}+\lambda_5$	$-4.2332+0.0991t$	$-0.6213+0.0832t$
		7.166 сут.	D_{53}	$-0.3019+0.1428t$	$4.2606-0.0693t$
		11.862 лет	λ_5	$0.7224+0.8914t$	$-4.1570+0.9019t$
		5.931 лет	J8	$2.7463-0.0351t$	$2.8917-0.0282t$
	$ \bar{\Lambda} _{II}$	7.166 сут.	D_{53}	$11.5751-1.8972t$	$-161.6255-0.0974t$
		11.862 лет	λ_5	$-21.6122-2.5758t$	$85.7375+0.5961t$
		137.352 лет	Ω_{L53}	$22.9416-5.1019t$	$-31.4256+12.6220t$
		559.876 лет	Ω_{L54}	$21.0774+1.7051t$	$-23.0256-6.3236t$
		5.931 лет	J8	$6.6696-1.2914t$	$12.0481-0.2454t$
		186.625 лет	$3\Omega_{L54}$	$4.1358+0.0095t$	$6.1424-8.3474t$
		30.219 лет	Ω_{L52}	$-0.4413-1.0873t$	$0.6224-0.0359t$

Таблица 4. Окончание

Тело	Параметр (угл. с)	Период	Аргумент	Коэффициент при $\cos(\text{аргумент}), ((\text{угл. с}) \times 10^{-6})$	Коэффициент при $\sin(\text{аргумент}), ((\text{угл. с}) \times 10^{-6})$
Каллисто (J4)	$\Delta\psi_{II}$	559.876 лет	Ω_{L54}	$-3085.8817+6395.6224t$	$-410.1365-4062.3474t$
		137.352 лет	Ω_{L53}	$-155.1210+323.7668t$	$216.2099+495.7919t$
		11.862 лет	λ_5	$14.0717+59.0226t$	$-85.2687+45.2141t$
		16.625 сут.	$\lambda_{54}+\lambda_5$	$-61.0308+0.1936t$	$-5.2897+0.9520t$
		16.754 сут.	D_{54}	$-0.1302+2.7188t$	$60.8831+0.5599t$
		30.219 лет	Ω_{L52}	$-9.8776-186.9747t$	$24.6394+0.4679t$
		15.11 лет	J7	$-0.2015-5.3932t$	$-12.3390+42.9008t$
	$\Delta\theta_{II}$	559.876 лет	Ω_{L54}	$25.5470+312.1362t$	$-257.5189-212.9777t$
		137.352 лет	Ω_{L53}	$-13.6879-21.9526t$	$-7.9178+5.6109t$
		16.625 сут.	$\lambda_{54}+\lambda_5$	$-0.2427+0.0536t$	$2.8047-0.0044t$
		16.754 сут.	D_{54}	$2.8008+0.0199t$	$0.0242-0.1001t$
		30.219 лет	Ω_{L52}	$-1.4201-1.8654t$	$-0.9025-1.4982t$
	$\Delta\varphi_{II}$	559.876 лет	Ω_{L54}	$3086.0317-6388.0416t$	$408.0648+4059.8807t$
		137.352 лет	Ω_{L53}	$154.3291-322.3438t$	$-215.6234-495.5752t$
		16.625 сут.	$\lambda_{54}+\lambda_5$	$61.1119+0.3658t$	$5.2924+0.8297t$
		16.754 сут.	D_{54}	$-0.4920-0.0419t$	$60.8585-0.6946t$
		30.219 лет	Ω_{L52}	$9.8718+186.6318t$	$-24.3477-0.7931t$
	$\Delta\tau_{II}$	15.11 лет	J7	$0.5404+0.8274t$	$12.4537-43.6121t$
		16.754 сут.	D_{54}	$-0.6203+2.6763t$	$121.7436-0.1464t$
		11.862 лет	λ_5	$21.2087+4.5376t$	$-82.5517+0.1171t$
		5.931 лет	J8	$2.9851+0.3374t$	$-0.8764+0.4015t$
		559.876 лет	Ω_{L54}	$0.0604+9.3525t$	$-1.9554-3.6583t$
		16.689 сут.	λ_{54}	$-0.1497+1.5449t$	$-1.0654-0.1068t$
		137.352 лет	Ω_{L53}	$-0.5567+0.7436t$	$0.4050+0.7946t$
	$\Delta(I\sigma)_{II}$	559.876 лет	Ω_{L54}	$-221.1565+279.7596t$	$69.9171-172.7261t$
		137.352 лет	Ω_{L53}	$-5.0848+9.7995t$	$7.8576+19.4721t$
		11.862 лет	λ_5	$0.6928+2.6783t$	$-3.8795+1.9695t$
		16.625 сут.	$\lambda_{54}+\lambda_5$	$-2.8045-0.0068t$	$-0.2430+0.0608t$
		16.754 сут.	D_{54}	$-0.0065+0.1189t$	$2.7980+0.0390t$
		30.219 лет	Ω_{L52}	$-0.6034-8.4129t$	$1.1395-0.0367t$
	$ \bar{\Lambda} _{II}$	16.754 сут.	D_{54}	$0.6171-2.6772t$	$-121.6584+0.1620t$
		11.862 лет	λ_5	$-21.3578+0.2723t$	$83.4700+3.1915t$
		559.876 лет	Ω_{L54}	$56.1117-4.5482t$	$-63.7233+0.9259t$
		5.931 лет	J8	$0.3056-0.6196t$	$4.7659-0.1959t$
		137.352 лет	Ω_{L53}	$-1.2171+1.6775t$	$1.6186+1.1381t$
		16.689 сут.	λ_{54}	$0.1496-1.5431t$	$1.0642+0.1079t$

Таблица 5. Периодические и смешанные члены геодезического вращения галилеевых спутников Юпитера, вычисленные для параметров физической либрации и в абсолютной величине вектора их углового поворота относительно JSB и средней орбиты спутника

Спутник	Параметр (угл. с)	Период	Аргумент	Коэффициент при $\cos(\text{аргумент}), ((\text{угл. с}) \times 10^{-6})$	Коэффициент при $\sin(\text{аргумент}), ((\text{угл. с}) \times 10^{-6})$
Ио (J1)	$\Delta\theta_{\text{II}}$	559.876 лет	Ω_{L54}	$71.6643-1760.4335t$	$420.8237+1215.5157t$
		7.422 лет	Ω_{L51}	$-62.0073-70.4047t$	$109.2117+176.1223t$
		30.219 лет	Ω_{L52}	$-21.1573+81.5540t$	$74.1960+162.7571t$
		137.352 лет	Ω_{L53}	$2.2924-128.1429t$	$66.0597+396.8310t$
	$\Delta\tau_{\text{II}}$	11.862 лет	λ_5	$28.3544+6.1854t$	$-110.1027+0.1561t$
		559.876 лет	Ω_{L54}	$1.2349+19.5576t$	$-5.0722-12.6009t$
		5.931 лет	J8	$3.9820+0.3774t$	$-1.1741+0.5465t$
	$\Delta(I\sigma)_{\text{II}}$	559.876 лет	Ω_{L54}	$-561.6401+7454.5725t$	$-1598.2399-5855.8741t$
		7.422 лет	Ω_{L51}	$-123.7501-309.7438t$	$-56.4984-58.5010t$
		30.219 лет	Ω_{L52}	$-76.7396-221.4011t$	$-42.7792-122.1287t$
		137.352 лет	Ω_{L53}	$12.5728-76.4321t$	$-46.7733+6.0371t$
	$ \bar{\Lambda} _{\text{II}}$	11.862 лет	λ_5	$-28.3378-6.1238t$	$110.1125-0.1415t$
		559.876 лет	Ω_{L54}	$-1.3395-16.2165t$	$4.3021+10.1177t$
		5.931 лет	J8	$-3.9815-0.3767t$	$1.1756-0.5475t$
Европа (J2)	$\Delta\theta_{\text{II}}$	559.876 лет	Ω_{L54}	$4867.5125-35818.5568t$	$5833.3005+30298.4603t$
		137.352 лет	Ω_{L53}	$-177.4351+1760.2904t$	$218.1829+1022.6355t$
		30.219 лет	Ω_{L52}	$45.2896-187.6553t$	$141.9686+497.9494t$
		11.862 лет	λ_5	$-17.0173-1.1246t$	$-11.5898-1.1681t$
	$\Delta\tau_{\text{II}}$	11.862 лет	λ_5	$28.2292+6.0622t$	$-110.0283+0.2431t$
		5.931 лет	J8	$3.9710+0.2726t$	$-1.1522+0.4080t$
		559.876 лет	Ω_{L54}	$3.1863+0.5510t$	$-2.0200+2.7260t$
	$\Delta(I\sigma)_{\text{II}}$	30.219 лет	Ω_{L52}	$-132.4355-219.9600t$	$-18.6669-147.1523t$
		559.876 лет	Ω_{L54}	$83.1354+135.7838t$	$-100.0919-0.4094t$
		137.352 лет	Ω_{L53}	$-26.7294-34.8096t$	$23.1235-29.7624t$
		15.11 лет	J7	$3.6628+7.7595t$	$-5.5513+3.9283t$
		11.862 лет	λ_5	$-0.6708+2.6845t$	$-1.0768+6.6508t$
	$ \bar{\Lambda} _{\text{II}}$	11.862 лет	λ_5	$-28.2307-6.1035t$	$110.0250-0.2755t$
		5.931 лет	J8	$-3.9752-0.2779t$	$1.1479-0.4072t$
		559.876 лет	Ω_{L54}	$-3.4793-0.7823t$	$2.1251-2.9115t$
Ганимед (J3)	$\Delta\theta_{\text{II}}$	137.352 лет	Ω_{L53}	$241.5157+110.6352t$	$369.6714+682.1298t$
		559.876 лет	Ω_{L54}	$172.5134-825.2496t$	$316.0139+541.3554t$
		186.625 лет	$3\Omega_{L54}$	$-51.4174-83.0091t$	$32.2591+159.6262t$
		30.219 лет	Ω_{L52}	$0.8979-4.4519t$	$-3.7098+4.0979t$
	$\Delta\tau_{\text{II}}$	11.862 лет	λ_5	$28.2221+5.9792t$	$-110.0840+0.2456t$
		186.625 лет	$3\Omega_{L54}$	$-4.0014-5.0996t$	$-7.3172+10.8256t$
		559.876 лет	Ω_{L54}	$3.8344-0.9787t$	$-1.9191+4.6488t$
		5.931 лет	J8	$3.9654+0.3140t$	$-1.1706+0.5154t$

Таблица 5. Окончание

Спутник	Параметр (угл. с)	Период	Аргумент	Коэффициент при $\cos(\text{аргумент}), ((\text{угл. с}) \times 10^{-6})$	Коэффициент при $\sin(\text{аргумент}), ((\text{угл. с}) \times 10^{-6})$
	$\Delta(I\sigma)_{II}$	137.352 лет	Ω_{L53}	$-351.9278-323.2815t$	$302.0418-240.1284t$
		559.876 лет	Ω_{L54}	$-112.0286-203.3264t$	$138.3680+224.7149t$
		186.625 лет	$3\Omega_{L54}$	$-18.4503-81.7625t$	$-68.8950+8.7477t$
		30.219 лет	Ω_{L52}	$4.3644+13.4906t$	$-2.5943-2.1542t$
	$ \bar{\Lambda} _{II}$	11.862 лет	λ_5	$-28.2311-6.0250t$	$110.0820-0.2619t$
		186.625 лет	$3\Omega_{L54}$	$3.9518+4.2716t$	$7.3633-10.8681t$
		559.876 лет	Ω_{L54}	$-4.1272+0.5552t$	$2.3418-4.3162t$
		5.931 лет	J8	$-3.9690-0.3464t$	$1.1702-0.5321t$
		137.352 лет	Ω_{L53}	$-0.7927-1.4991t$	$1.0441+3.6693t$
Каллисто (J4)	$\Delta\theta_{II}$	559.876 лет	Ω_{L54}	$903.5307-318.3073t$	$1208.7536+220.5568t$
		137.352 лет	Ω_{L53}	$-1.6881+53.2247t$	$-52.3382-16.8704t$
		30.219 лет	Ω_{L52}	$-0.0909-1.6142t$	$2.2410+4.3751t$
		11.862 лет	λ_5	$1.1511+1.1354t$	$-0.1613+1.0402t$
		5.931 лет	J8	$0.3239+1.0349t$	$-0.2345+0.4500t$
	$\Delta\tau_{II}$	11.862 лет	λ_5	$28.2358+6.3105t$	$-110.0283+0.3991t$
		559.876 лет	Ω_{L54}	$6.5603+2.4524t$	$-5.3943+1.0145t$
		5.931 лет	J8	$3.9688+0.2907t$	$-1.1641+0.4971t$
		16.754 суток	D_{54}	$0.0094+0.1045t$	$-1.4106-0.1240t$
		16.689 суток	λ_{54}	$-0.1455+1.5076t$	$-1.0971-0.1713t$
		137.352 лет	Ω_{L53}	$-0.4401+0.7576t$	$0.1985+0.3278t$
	$\Delta(I\sigma)_{II}$	559.876 лет	Ω_{L54}	$-555.9966-196.5872t$	$494.8124+163.3462t$
		137.352 лет	Ω_{L53}	$54.2386+27.2710t$	$-19.5596+69.7886t$
		11.862 лет	λ_5	$-1.1051-4.2078t$	$2.9924-1.9101t$
		30.219 лет	Ω_{L52}	$1.1234+10.2639t$	$-0.1216+0.4778t$
		15.11 лет	J7	$0.2219+0.7103t$	$0.8228+5.3319t$
		5.931 лет	J8	$-0.4233-2.1163t$	$-0.0614-0.5769t$
	$ \bar{\Lambda} _{II}$	11.862 лет	λ_5	$-28.2460-6.5182t$	$110.0456-0.5336t$
		559.876 лет	Ω_{L54}	$-9.0263-3.7558t$	$7.5280-0.3924t$
		5.931 лет	J8	$-3.9711-0.2908t$	$1.1631-0.4959t$
		16.754 суток	D_{54}	$-0.0094-0.1045t$	$1.4107+0.1239t$
		16.689 суток	λ_{54}	$0.1455-1.5077t$	$1.0971+0.1713t$
		137.352 лет	Ω_{L53}	$0.5745-0.6407t$	$-0.2758-0.3607t$

В табл. 4–5 t – динамическое барицентрическое время (TDB) измеряется в юлианских тысячелетиях (tjy) (365250 сут.) от эпохи J2000.0; Ω_{L51} , Ω_{L52} , Ω_{L53} , Ω_{L54} – долготы восходящих узлов орбит галилеевых спутников Юпитера на плоскости Лапласа (средней орбиты этих спутников эпохи J2000.0) от их пересечения с неподвижным эк-

ватором Земли ICRF эпохи J2000.0; λ_5 – средняя долгота Юпитера; λ_{51} , λ_{52} , λ_{53} , λ_{54} – средние юпитероцентрические долготы Ио (J1), Европы (J2), Ганимеда (J3), и Каллисто (J4), соответственно; $D_{51} = \lambda_{51} - \lambda_5 + 180^\circ$, $D_{52} = \lambda_{52} - \lambda_5 + 180^\circ$, $D_{53} = \lambda_{53} - \lambda_5 + 180^\circ$, $D_{54} = \lambda_{54} - \lambda_5 + 180^\circ$ – средние элонгации от Солнца Ио (J1), Европы (J2), Ганимеда (J3),

и Каллисто (J4), соответственно. Средняя долгота Юпитера взята из работы (Brumberg, Bretagnon, 2000), средние долготы и долготы восходящих узлов галилеевых спутников Юпитера взяты из статьи (Archinal и др., 2018):

$$\begin{aligned} J_a &= 99^\circ.360714 + 4850^\circ.4046 T, \\ J_b &= 175^\circ.895369 + 1191^\circ.9605 T, \\ J_c &= 300^\circ.323162 + 262^\circ.5475 T, \\ J_d &= 114^\circ.012305 + 6070^\circ.2476 T, \\ J_e &= 49^\circ.511251 + 64^\circ.3000 T, \\ \lambda_5 &= 34^\circ.35 + 3034^\circ.91 T, \\ J_8 &= 113^\circ.35 + 6070^\circ.0 T, \\ \lambda_{51} &= W_1 = 200^\circ.39 + 7432434^\circ.04 T, \\ \Omega_{L51} &= J_3 = 283^\circ.90 + 4850^\circ.7 T, \\ \lambda_{52} &= W_2 = 36^\circ.02 + 3702711^\circ.78 T, \\ \Omega_{L52} &= J_4 = 355^\circ.80 + 1191^\circ.3 T, \\ J_7 &= 352^\circ.25 + 2382^\circ.6 T, \\ \lambda_{53} &= W_3 = 44^\circ.06 + 1837850^\circ.64 T, \\ \Omega_{L53} &= J_5 = 119^\circ.90 + 262^\circ.1 T, \\ \lambda_{54} &= W_4 = 259^\circ.51 + 787883^\circ.39 T, \\ \Omega_{L54} &= J_6 = 229^\circ.80 + 64^\circ.3 T, \end{aligned}$$

где T — динамическое барицентрическое время (TDB) измеряется в юлианских столетиях (сjy) (36525 дней) от эпохи J2000.0.

Поскольку масса Солнца является доминирующей в Солнечной системе, одна из частей вектора угловой скорости геодезического вращения относительно барицентра Солнечной системы $\bar{\sigma}_{SSB}$ для планет, имеющих спутники, и их спутников является результатом их орбитального движения вокруг SSB. Юпитер и его спутники находятся в среднем на одном расстоянии от Солнца и движутся относительно него в среднем с одной скоростью. Вследствие этого величины их геодезического вращения, вызванного влиянием Солнца, подобно величинам геодезического вращения Земли и Луны (Пашкевич, 2016), должны быть достаточно близки между собой. Подтверждения этому можно увидеть в значениях геодезической прецессии в долготе нисходящего узла экватора исследуемого тела $\Delta\psi_I$ для всех исследуемых тел (табл. 2), которые являются близкими по величине, и в значениях коэффициентов периодических членов с аргументом λ_5 геодезической нутации в $\Delta\psi_{II}$ и $\Delta\tau_{II}$ (табл. 4), которые в соответствующих коэффициентах тоже достаточно близки друг другу.

На Юпитер его спутники оказывают малое влияние, поэтому величины коэффициентов его

геодезического вращения при вековых составляющих (табл. 2) и периодических (табл. 4) составляющих с аргументом λ_5 в $\Delta\psi$ и $\Delta\tau$, соответственно, близки друг к другу. Для Юпитера влияние от Солнца является основным, что отражается в доминирующей величине его геодезической прецессии в долготу $\Delta\psi_I$ (табл. 2) над аналогичными величинами в других углах Эйлера.

Геодезическое вращение спутников Юпитера определяется не только Солнцем, но и Юпитером. Таким образом, другая часть вектора угловой скорости геодезического вращения относительно SSB $\bar{\sigma}_{SSB}$ для планет, имеющих спутники, и их спутников является результатом их орбитального движения вокруг барицентра спутниковой системы планеты. Из-за близости галилеевых спутников к Юпитеру, ее вклад является основным для них и отображается для каждого спутника в значении геодезического вращения в угле его собственного вращения $\Delta\phi_I$ (табл. 2), которое является доминирующей величиной над аналогичными величинами в других углах Эйлера. В то же время величины полного геодезического вращения галилеевых спутников Юпитера $\Delta\tau$ и $|\bar{\Lambda}|$ значительно превосходят аналогичные величины геодезического вращения Юпитера. Поэтому величины их коэффициентов в $\Delta\psi_I$ и $\Delta\tau_I$ при вековых составляющих (табл. 2) заметно отличаются друг от друга. Это связано с тем, что из-за близкого к ним расстояния Юпитер оказывает большее влияние на их геодезическое вращение, чем Солнце на Юпитер.

Обращение галилеевых спутников вокруг двух барицентров JSB и SSB отражается в появлении для каждого спутника двух доминирующих гармоник с аргументом D_{sj} ($j=1, 2, 3, 4$ — номер спутника) и следующей за ней по величине гармоники с аргументом λ_5 в их углах геодезической нутации $\Delta\tau_{II}$ и $|\bar{\Lambda}|_{II}$ (табл. 4), соответственно.

У Юпитера в этих углах доминирует гармоника с аргументом λ_5 , отражающая его обращение вокруг SSB, поскольку, как уже было сказано, его спутники оказывают малое влияние. Для вектора угловой скорости геодезического вращения исследуемого спутника относительно JSB $\bar{\sigma}_{JSB}$ гармоника с аргументом D_{sj} в этих углах на два порядка меньше. В них доминирует гармоника с аргументом λ_5 . Это указывает на то, что в периодических членах геодезического вращения исследуемых тел всегда преобладают внешние возмущения. Таким в периодических членах геодезического вращения исследуемого тела относительно плоскости средней орбиты исследуемого спутника эпохи J2000.0 и JSB является возмущение от Солнца, а в периодических членах геодезического вращения исследуемого тела

относительно плоскости средней орбиты Юпитера эпохи J2000.0 и SSB для галилеевых спутников на первом месте становится возмущение от Юпитера, а затем от Солнца.

Из табл. 2 и 3 видно, что для всех исследуемых спутников абсолютная величина вектора углового поворота геодезического вращения тела относительно средней орбиты исследуемого спутника эпохи J2000.0 и JSB $|\bar{\Lambda}_{JSB}|_{II}$ больше абсолютной величины вектора углового поворота геодезического вращения тела относительно плоскости средней орбиты Юпитера эпохи J2000.0 и SSB $|\bar{\Lambda}_{SSB}|_{II}$. Следовательно, для всех исследуемых спутников абсолютная величина вектора угловой скорости геодезического вращения $|\bar{\sigma}_{JSB}|$ больше абсолютной величины вектора угловой скорости геодезического вращения $|\bar{\sigma}_{SSB}|$.

Из табл. 2 и 3 видно, что величина геодезического вращения спутников Юпитера убывает с увеличением их расстояния от Юпитера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном исследовании на примере Юпитера и его галилеевых спутников (Ио, Европы, Ганимеда и Каллисто) показано различие векторов угловой скорости геодезического вращения в зависимости от выбора координатной системы отсчета. Так, абсолютная величина вектора угловой скорости геодезического вращения исследуемого спутника относительно барицентра Солнечной системы SSB не совпадает с абсолютной величиной аналогичного вектора исследуемого спутника относительно барицентра спутниковой системы планеты JSB. В результате были определены значения векторов угловой скорости геодезического вращения галилеевых спутников Юпитера относительно SSB и относительно JSB. На их основе впервые вычислены наиболее существенные вековые (табл. 2 и 3) и периодические (табл. 4 и 5) члены геодезического вращения: а) Юпитера и его галилеевых спутников в углах Эйлера, в возмущающих членах физической либрации и в абсолютной величине вектора углового поворота геодезического вращения исследуемого тела относительно SSB и плоскости средней орбиты Юпитера эпохи J2000.0; б) галилеевых спутников Юпитера в возмущающих членах физической либрации и в абсолютной величине вектора углового поворота геодезического вращения исследуемого тела относительно JSB и средней орбиты исследуемого спутника эпохи J2000.0. Для их вычисления использовался модифицированный авторами метод, разработанный в статье (Пашкевич, 2016), который применим для изучения

любых тел Солнечной системы, имеющих долгосрочные эфемериды. Благодаря комментариям в работе (Baland и др., 2023) Пашкевичем была найдена и исправлена ошибка в знаке в формуле редукции (Пашкевич, 2016), в ней $-\varepsilon_*$, нужно заменить на ε_* , в результате исправленная формула (3) имеет следующий вид:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{pmatrix} = r(\gamma_* \mathbf{B}) p(\varepsilon_*) r(\gamma_0 \gamma_*) p(\varepsilon_0) r(\Delta) \begin{pmatrix} \sigma_X \\ \sigma_Y \\ \sigma_Z \end{pmatrix}.$$

Для всех исследуемых спутников абсолютная величина вектора угловой скорости геодезического вращения относительно средней орбиты исследуемого спутника эпохи J2000.0 и JSB $|\bar{\sigma}_{JSB}|$ больше абсолютной величины вектора угловой скорости геодезического вращения относительно плоскости средней орбиты Юпитера эпохи J2000.0 и SSB $|\bar{\sigma}_{SSB}|$.

Полученные аналитические значения для геодезического вращения Юпитера и его галилеевых спутников могут быть использованы для численного исследования их вращения в релятивистском приближении, а также для оценки влияния релятивистских эффектов на орбитально-вращательную динамику тел экзопланетных систем. На примере тел Солнечной системы данное исследование показало, что величина геодезического вращения может быть существенной не только у объектов, которые вращаются вокруг сверхмассивных релятивистских центральных тел, но и у тел с малым расстоянием до менее массивного центрального тела, например, у спутников планет-гигантов в экзопланетных системах. В Солнечной системе одними из таких объектов являются галилеевы спутники Юпитера. В частности, величина геодезической прецессии галилеевых спутников Юпитера (для которых Юпитер является менее массивным возмущающим центральным телом, чем Солнце) находится в пределах от $-32''.2$ за тысячу лет до $-1342''.0$ за тысячу лет (табл. 2 и 3), что от 100 до 4300 раз больше, чем у Юпитера ($-0''.3$ за тысячу лет), вращающегося вокруг своего более массивного центрального тела (Солнца).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абалакин В.К. Основы эфемеридной астрономии. М.: Наука, 1979. 448 с.
- Вуллард Э. Теория вращения Земли вокруг центра масс. М.: Физматгиз, 1963. 144 с.
- Жаров В.Е. Сферическая астрономия. Фрязино, 2006. 480 с.

- Пашкевич В.В. Геодезическое (релятивистское) вращение тел Солнечной системы // Вестн. СПбГУ. Сер. 1. 2016. Т. 3 (61). Вып. 3. С. 506–516.
- Суслов Г.К. Теоретическая механика. Москва-Ленинград: ОГИЗ, 1946. 655с.
- Archinal B.A., Acton C.H., A'Hearn M.F., Conrad A., Consolmagno G.J., Duxbury T., Hestroffer D., Hilton J.L., Kirk R.L., Klioner S.A., and 8 co-authors. Report of the IAU Working Group on Cartographic Coordinates and Rotational Elements: 2015 // Celest. Mech. and Dyn. Astron. 2018. V. 130. № 22. P. 21–46.
https://doi.org/10.1007/s10569-017-9805-5
- Baland R.-M., Hees A., Yseboodt M., Bourgoïn A., Le Maistre S. Relativistic contributions to the rotation of Mars // Astron. and Astrophys. 2023. V. 670. id. A29. (15 p.)
https://doi.org/10.1051/0004-6361/202244420
- Brumberg V.A., Bretagnon P. Kinematical relativistic corrections for Earth's rotation parameters // Proc. IAU Colloq. 180. U.S. Naval Observatory, 2000. P. 293–302.
- de Sitter W. On Einstein's theory of gravitation and its astronomical consequences // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 1916. № 77. P. 155–184.
https://doi.org/10.1093/mnras/77.2.155
- Eroshkin G.I., Pashkevich V.V. Geodetic rotation of the Solar system bodies // Artificial Satellites. 2007. V. 42. № 1. P. 59–70.
https://doi.org/10.2478/v10018-007-0017-1
- Fukushima T. Geodesic nutation // Astron. and Astrophys. 1991. V. 244. № 1. P. L11–L12.
- Giorgini J.D., Chodas P.W., Yeomans D.K. Orbit uncertainty and close-approach analysis capabilities of the Horizons On-Line Ephemeris System // AAS/Division for planetary sciences meeting in New Orleans. LA. Nov 26. 2001 – Dec 01. 2001. Abstracts #33.
- Jenkins G.M., Watts D.G. Spectral analysis and its applications. San Francisco, Cambridge, London, Amsterdam: Holden-day, 1969. 525 p.
- Kopeikin S., Efroimsky M., Kaplan G. Relativistic Celestial Mechanics in the Solar System. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2011. 894 p.
DOI:10.1002/9783527634569
- Ma C., Arias E.F., Eubanks T.M., Fey A.L., Gontier A.-M., Jacobs C.S., Sovers O.J., Archinal B.A., Charlot P. The international celestial reference frame as realized by very long baseline interferometry // Astron. J. 1998. V. 116. P. 516–546.
DOI: 10.1086/300408
- Pashkevich V.V., Vershkov A.N. Geodetic precession of the Sun, Solar system planets, and their satellites // Artificial Satellites. 2022. V. 57. № 1. P. 77–109.
DOI:10.2478/arsa-2022-0005
- Park R.S., Folkner W.M., Williams J.G., Boggs D.H. The JPL Planetary and Lunar Ephemerides DE440 and DE441 // Astron. J. 2021. V. 161. id. 105. (15 p.).
https://doi.org/10.3847/1538-3881/abd414
- Press William H., Flannery Brian P., Teukolsky Saul A., Vetterling William T. Numerical recipes: The art of scientific computing. Cambridge, New York, New Rochelle, Melbourne, Sydney: Cambridge Univ. Press, 1986. 20+818 p.

УДК 541.11

ПАМЯТИ МИХАИЛА ЯКОВЛЕВИЧА МАРОВА

30 ноября, на 91-м году жизни, скончался выдающийся советский и российский ученый, главный редактор журнала “Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы” (“Solar System Research”), заведующий Отделом планетных исследований ГЕОХИ РАН, академик РАН, доктор физико-математических наук Михаил Яковлевич Маров.

Михаил Яковлевич стоял в ряду зачинателей и организаторов отечественных космических исследований. Он непосредственно участвовал в разработке и осуществлении советской космической программы исследований Луны, Венеры и Марса. Под его руководством осуществлены уникальные научные эксперименты — впервые в мире проведены прямые измерения параметров атмосфер Венеры и Марса, температур и давлений на поверхности этих планет, освещенности поверхности, исследованы тепловой режим и динамика атмосферы, структура и свойства облаков Венеры. Результаты этих работ использованы при решении сложнейшей задачи обеспечения работоспособности посадочных аппаратов “Венера” на поверхности планеты, что дало возможность передать на Землю панорамы ее поверхности и измерить состав пород. Эти достижения остаются уникальными и до сих пор непревзойденными.

Наряду с экспериментальными исследованиями Луны и планет, М.Я. Маров выполнил широкий круг теоретических исследований. Им внесен фундаментальный вклад в разработку теоретических основ аэронауки, механики турбулентных многокомпонентных реагирующих газов и неоднородных многофазных сред, изучение неравновесных кинетических процессов, исследование ряда актуальных проблем планетологии и космогонии, создание новых методов математического моделирования астрофизических объектов, изучение миграционно-столкновительных процессов в планетных системах.

Михаил Яковлевич — автор и соавтор более 300 статей в рецензируемых научных журналах и свыше 20 монографий в отечественных и зарубежных издательствах. Полученные им результаты способствовали более тесной интеграции космических исследований с механи-

кой, вычислительной математикой и науками о Земле.

Михаил Яковлевич вел активную педагогическую и научно-организационную работу. Он был профессором МГУ им. М.В. Ломоносова и Международного космического университета (ISU, Страсбург), членом Бюро Совета по космосу РАН, председателем Комиссии РАН по изучению научного наследия К.Э. Циолковского, заместителем председателя Научного совета РАН по астробиологии.

Выдающийся вклад М.Я. Марова в развитие космических исследований и его научные заслуги признаны и высоко оценены государством и мировым научным сообществом. Михаил Яковлевич являлся лауреатом Ленинской и Государственной премий СССР, Демидовской премии. Он был удостоен Международной Галаберовской премии по астронавтике, премии Международной академии астронавтики, премии Элвина Сиффа за пионерские исследования планет, диплома NASA за лидирующую роль в изучении Солнечной системы, медали Уильяма Нордберга КОСПАР за большой вклад в научные и прикладные исследования космоса. М.Я. Маров был награжден Орденами Трудового Красного Знамени, Почета, Дружбы, Александра Невского и многими медалями. В 2016 г. Михаилу Яковлевичу была присуждена Золотая медаль РАН им. М.В. Келдыша “За выдающиеся научные работы в области прикладной математики и механики, а также теоретических исследований по освоению космического пространства”.

На протяжении 43 лет, с 1980 г., Михаил Яковлевич Маров был бессменным главным редактором журнала “Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы” (“Solar System Research”). Благодаря его усилиям журнал стал ведущим научным изданием России в области планетных исследований.

Уход из жизни Михаила Яковлевича Марова — невосполнимая потеря не только для нашей редакции, но для всей отечественной науки. Благодарная память о нем навсегда сохранится в сердцах всех, кто имел счастье встречаться и работать с ним.

Редакционная коллегия