

ISSN 0320-930X

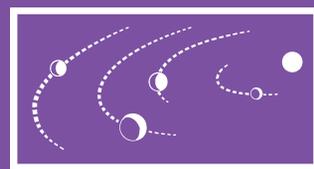
Том 57, Номер 5

Сентябрь - Октябрь 2023



АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК

Исследования Солнечной системы



www.sciencejournals.ru



СОДЕРЖАНИЕ

Том 57, Номер 5, 2023

К 90-летию со дня рождения Михаила Яковлевича Марова	391
Результаты наземных испытаний телевизионной системы посадочной платформы КА ЭкзоМарс-2022 <i>Н. Ф. Абрамов, И. В. Полянский, С. А. Прохорова, Я. Д. Эльяшев</i>	393
Внутреннее строение Венеры на основе модели PREM <i>D. O. Amorim, T. B. Гудкова</i>	403
Внутреннее строение мантии Луны: согласование геохимических и геофизических моделей <i>О. Л. Кусков, Е. В. Кронрод, В. А. Кронрод</i>	415
Поиск признаков сублимационно-пылевой активности астероидов примитивных типов вблизи перигелия <i>В. В. Бусарев, Е. В. Петрова, М. П. Щербина, С. Ю. Кузнецов, М. А. Бурлак, Н. П. Иконникова, А. А. Савелова, А. А. Белинский</i>	439
Современный уровень знаний об объектах, сближающихся с Землей <i>Г. И. Кохирова, П. Б. Бабаджанов</i>	458
О влиянии сближений с планетами на величину эффекта Ярковского в динамике астероидов <i>А. А. Мартюшева, А. В. Мельников</i>	479

УДК 541.11

К 90-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ МИХАИЛА ЯКОВЛЕВИЧА МАРОВА

DOI: 10.31857/S0320930X23050092, EDN: EDYOTO

28 июля 2023 года исполнилось 90 лет со дня рождения Михаила Яковлевича Марова, академика РАН, доктора физико-математических наук, профессора, заведующего отделом Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, с 1980 г. Главного редактора журнала РАН “Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы” (“Solar System Research”) – выдающегося советского и российского ученого, одного из инициаторов и организаторов отечественных космических исследований.

М.Я. Маров родился в Москве. В 1958 г. с отличием окончил Механический факультет Московского высшего технического училища (МВТУ, в настоящее время Московский государственный технический университет – МГТУ) им. Н.Э. Баумана. До 1962 г. был сотрудником ОКБ-1 (в настоящее время – Ракетно-космическая корпорация им. С.П. Королёва “Энергия”); закончил аспирантуру Института физики атмосферы АН СССР и защитил кандидатскую диссертацию (1964 г.). Долгие годы работал в Институте прикладной математики АН СССР и РАН (с 1967 г. – был заведующим отделом физики планет). В 1970 г. защитил докторскую диссертацию “Физическая структура атмосферы Венеры”. В 1990 г. избран членом-корреспондентом АН СССР, а в 2008 – академиком РАН. С 2008 года он – заведующий Отделом планетных исследований и космохимии Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН.

В первые десятилетия космической эры Михаил Яковлевич работал с М.В. Келдышем и С.П. Королёвым, был ученым секретарем Междудементального научно-технического Совета по космическим исследованиям при АН СССР, тесно сотрудничал с легендарным Королёвским Советом главных конструкторов. Он принимал непосредственное участие в подготовке и проведении исследований Луны, Марса и Венеры автоматическими межпланетными станциями, внес большой вклад в осуществление первых в мире посадок советских космических аппаратов на поверхность Марса. В начале 1970-х годов стал одним из инициаторов перехода к исследованиям Венеры, обеспечивавших исторические достижения в серии последовавших проектов, “Венера-4”–“Венера-14” и “ВеГа”. Исследования, проведенные на поверхности планеты, включая съемки панорам поверхности и анализ образцов грунта Венеры, по сей

день остаются уникальными. В дальнейшем М.Я. Маров активно сотрудничал в проектах “ВеГа” и “Фобос”, работал в NASA над проектами исследования Марса. В настоящее время он занимается перспективами детального изучения Луны. Под руководством М.Я. Марова проведено множество первопроходческих научных экспериментов, от прямых измерений параметров атмосферы Марса и Венеры до исследования теплового режима и динамики атмосферы, освещенности поверхности, структуры и свойств облаков Венеры. Достижения и результаты его исследований планет Солнечной системы получили широкое мировое признание.

Наряду с уникальными экспериментальными исследованиями Луны и планет, М.Я. Маров выполнил широкий круг теоретических исследований. Им внесен фундаментальный вклад в разработку теоретических основ аэрономии, механики турбулентных многокомпонентных реагирующих газов и неоднородных многофазных сред, в изучение неравновесных кинетических процессов, в исследование ряда актуальных проблем планетологии и космогонии, в создание новых методов математического моделирования планет и комет, а также их газовых оболочек, в изучение миграционно-столкновительных процессов в планетных системах.

М.Я. Маров является автором и соавтором более 300 статей в рецензируемых научных журналах и 20 отечественных и зарубежных монографий, среди них “Физика планеты Венера”, М.: Наука, 1974; “Космические исследования”, М.: Наука, 1981; “Планеты Солнечной системы”, 2-е изд., М.: Наука, 1986; “Введение в планетную аэрономию”, М.: Наука, 1987; “Mechanics of turbulence of multicomponent gases”, 2001; “Nonequilibrium Processes in the Planetary and Cometary Atmospheres: Theory and Applications”, Kluwer Academic Publishers, 1997 и др.

Михаил Яковлевич ведет активную педагогическую и научно-организационную работу. Он является 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. Он – академик Международной академии космонавтики, является членом Британ-

ского Королевского астрономического общества, избирался Президентом Отделения планетных наук Международного астрономического союза, много лет возглавлял Рабочую группу по космическому наследию Комитета Всемирного Наследия (WHC) ЮНЕСКО. Активно способствует распространению научных знаний.

Выдающийся вклад М.Я. Марова в развитие космических исследований и его научные заслуги признаны и оценены государством и мировым научным сообществом. Михаил Яковлевич является лауреатом Ленинской и Государственной премий СССР, Демидовской премии. Он 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 награжден Орденами Трудового Красного Знамени, Почета, Дружбы, Александра Невского и многими медалями. В 2016 г. Михаилу Яковлевичу присуждена Золотая ме-

даль им. М.В. Келдыша РАН “За выдающиеся научные работы в области прикладной математики механики, а также теоретических исследований по освоению космического пространства”.

Михаил Яковлевич принадлежит к школе великого ученого нашей страны, академика Мстислава Всеволодовича Келдыша, достойным продолжателем дела которого он стал. Преданность науке является естественной сущностью, яркой чертой характера и целью всей его творческой жизни.

Михаил Яковлевич по-прежнему активно работает в области теоретических исследований и продолжает принимать участие в крупных космических проектах, показывая достойный пример новым поколениям молодых ученых.

От всей души поздравляем нашего дорогого Главного редактора Михаила Яковлевича Марова с юбилеем и желаем ему крепкого здоровья, активной творческой деятельности и новых научных достижений.

Редакционная коллегия

УДК 629.787:621.397

РЕЗУЛЬТАТЫ НАЗЕМНЫХ ИСПЫТАНИЙ ТЕЛЕВИЗИОННОЙ СИСТЕМЫ ПОСАДОЧНОЙ ПЛАТФОРМЫ КА ЭКЗОМАРС-2022

© 2023 г. Н. Ф. Абрамов^а, *, И. В. Полянский^а, С. А. Прохорова^а, Я. Д. Эльяшев^а

^аИнститут космических исследований РАН, Москва, 117997 Россия

*e-mail: abramov.n2@mail.ru

Поступила в редакцию 31.08.2022 г.

После доработки 27.02.2023 г.

Принята к публикации 03.03.2023 г.

В работе представлены результаты наземной отработки телевизионной системы посадочной платформы (ТСПП-ЭМ) из состава комплекса научной аппаратуры космического аппарата (КА) ЭкзоМарс-2022, в рамках которой были проведены проверки функционирования в разных режимах, выполнены измерения характеристик и калибровки камер. В ходе испытаний в ИКИ РАН был получен фотоматериал с каждой камеры КАМ-О/ЭМ. При этом камеры были установлены на стенде, имитирующем посадочную платформу КА ЭкзоМарс-2022 в полном масштабе. Кроме этого, были отдельно проведены измерения важнейших характеристик камер: угловое поле зрения по горизонтали и вертикали, дисторсия, фокусное расстояние, разрешающая способность, динамический диапазон, коэффициент виньетирования, абсолютная чувствительность.

Ключевые слова: ТСПП-ЭМ, дистанционные съемки, ЭкзоМарс-2022, Марс, панорамная съемка, видеосъемка, телевизионная система, наземные испытания

DOI: 10.31857/S0320930X23040011, **EDN:** RDSDTF

ВВЕДЕНИЕ

В мире в последние 20 лет наблюдается ошеломительный рост числа программ, посвященных исследованию Марса. В основе этих программ лежат разработка, испытания и последующий запуск к Марсу специального исследовательского оборудования. Среди наиболее известных – посадка марсоходов Mars Exploration Rover (MER), Curiosity, Perseverance и платформы InSight. Очередным важным шагом стала разработка космического аппарата (КА) ЭкзоМарс-2022 (совместный проект ГК Роскосмос и Европейского космического агентства, ESA), состоящего из двух модулей: перелетного и десантного. Десантный модуль содержит марсоход и посадочную платформу (см. рис. 1), оснащенную научными приборами для исследования Марса. Цель миссии – это исследование поверхности и подповерхностного слоя в непосредственной близости к месту посадки, проведение геологических проб с целью обнаружения жизни в прошлом и в настоящем (Vago и др., 2017; Zelenyi и др., 2015).

Экспедиция ЭкзоМарс-2022 состоит из трех основных этапов:

- этап выведения и перелета составного КА;
- этап спуска–посадки десантного модуля на поверхность Марса;
- этап работы на поверхности Марса.

Этап работы на поверхности Марса включает в себя 3 фазы:

- фаза функционирования посадочной платформы на поверхности Марса до съезда марсохода;
- фаза съезда марсохода с посадочной платформы;
- фаза функционирования посадочной платформы на поверхности Марса после съезда марсохода.

В последние годы, с учетом увеличения числа и объема научных задач, особо актуальным стало создание нового поколения телевизионных систем для дистанционных фото- и видеосъемки небесных тел. Это потребовало от разработчиков использования принципиально других конструкторских решений и создания новых алгоритмов функционирования приборов. Решение задачи получения визуальных изображений является практически обязательным для любой космической миссии, связанной с дистанционными контактами исследованиями поверхностей планет и других небесных тел с помощью автоматических посадочных станций, что не стало исключением и для КА ЭкзоМарс-2022 благодаря установке телевизионной системы ТСПП-ЭМ на посадочную платформу (Абрамов и др., 2018).

Оптико-физические характеристики телевизионных систем в значительной степени опреде-

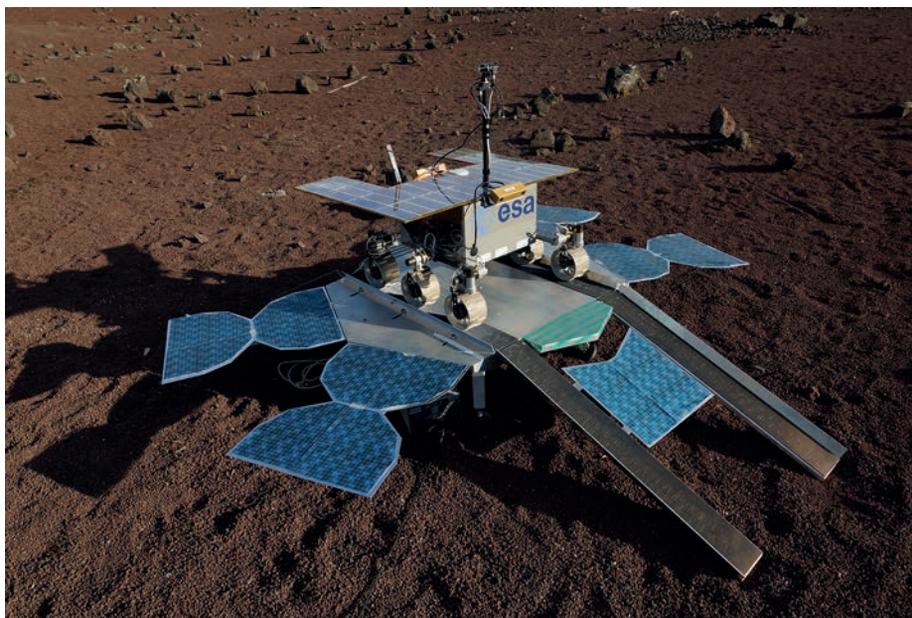


Рис. 1. Посадочная платформа КА ЭкзоМарс-2022 (с раскрытыми солнечными панелями и трапом для марсохода), на которую устанавливается ТСПП-ЭМ. https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2015/11/Egress_test_rover_in_CNES_Mars_Yard

ляют качество целевой информации – фото- и видеоматериалов. Поэтому большое внимание было уделено калибровке и исследованию оптико-физических характеристик ТСПП-ЭМ в рамках наземной отработки.

НАЗНАЧЕНИЕ И ЗАДАЧИ ТСПП-ЭМ

Телевизионная система ТСПП-ЭМ предназначена для установки на посадочную платформу КА ЭкзоМарс-2022 и эксплуатации в составе комплекса научной аппаратуры во время посадки и на поверхности планеты Марс с целью решения задач научного и прикладного характера путем регистрации фото- и видеоинформации. ТСПП-ЭМ представляет собой комплекс из четырех оптико-электронных камер (КАМ-О/ЭМ) и вычислительного устройства БСД/ЭМ, предназначенного для формирования цифровых изображений окружающей обстановки и объектов, находящихся в пределах поля зрения камер, с сохранением полученной информации для последующей передачи по радиоканалу на наземные пункты приема данных или ретрансляторы.

В ходе работы ТСПП-ЭМ во время посадки на Марс и на его поверхности предусмотрено выполнение следующих основных научных задач:

- регистрация цветных статических изображений поверхности и атмосферы Марса (во время и после посадки КА ЭкзоМарс-2022) в видимой области оптического диапазона электромагнитных волн;

- проведение цветной видеосъемки приповерхностных и атмосферных процессов, в том числе исследование пылевой экзосферы Марса;

- измерение спектральных яркостей (цветности) окружающих объектов на трех длинах волн: 0.45, 0.55 и 0.65 мкм;

- формирование круговой панорамы поверхности Марса вокруг места посадки КА ЭкзоМарс-2022 и построение видеоряда панорам;

- исследование окружающей обстановки на поверхности Марса в диапазоне горизонтальных углов до 360°;

- анализ отражательных/цветовых характеристик участка посадки КА ЭкзоМарс-2022;

- геоморфологический анализ участка посадки КА ЭкзоМарс-2022;

- поддержка других научных экспериментов путем регистрации изображений или видеопоследовательностей.

В ТСПП-ЭМ реализован ряд новых решений, в том числе в части алгоритмического обеспечения, которые позволят получить важную информацию по основным направлениям исследований. В отличие от предыдущих миссий, в которых построение панорамы осуществлялось путем последовательной съемки отдельных секторов одной камерой, установленной на поворотной платформе, а спектральная информация получалась последовательной сменой светофильтров, в данном эксперименте предусматривается одновременное получение панорамы в цвете четырьмя стационарными камерами, обеспечивающими

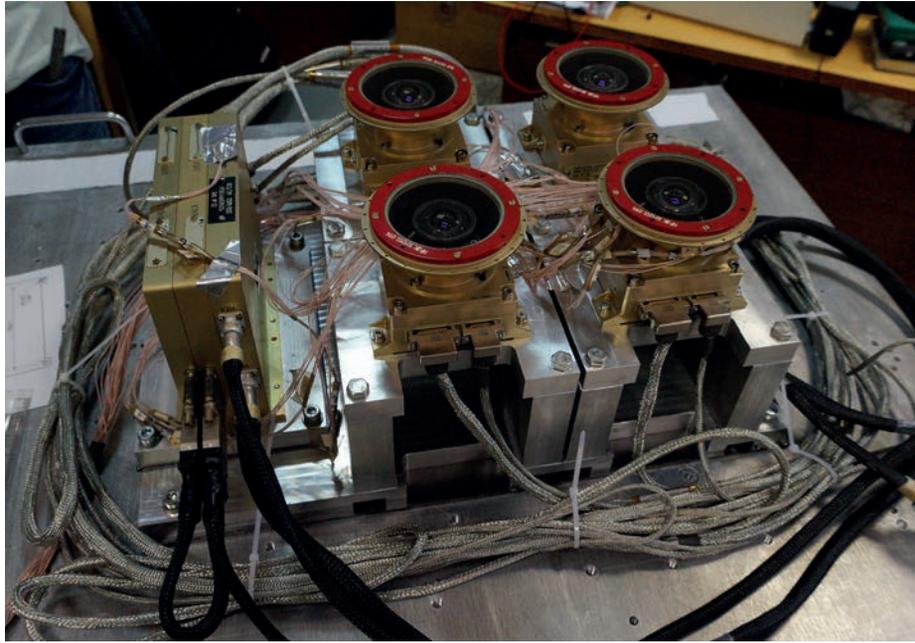


Рис. 2. Блок сбора данных БСД/ЭМ (слева), четыре камеры КАМ-О/ЭМ (справа) и межблочные кабели, входящие в состав ТСПП-ЭМ, на испытаниях в ИКИ РАН.

полный круговой обзор. Это позволит на значительно лучшем качественном уровне исследовать динамические атмосферные процессы, в частности, процессы переноса пыли и пылевые бури.

Эксперимент запланирован в той части Марса (долина Оксия), где до сих пор не проводились исследования с посадочных модулей и роверов (Mandon и др., 2021). В сочетании с высоким качеством фото- и видеосъемок можно с уверенностью сказать, что телевизионный эксперимент может дать новые данные о структуре и составе поверхности, свойствах почвы, атмосферных характеристиках в районе посадки и, в сочетании с данными других экспериментов, — новую информацию по фундаментальным проблемам исследования Марса, в частности, его геологии, истории, климата и др.

Высокое пространственное разрешение камер ТСПП-ЭМ открывает возможность получения резких изображений мелких элементов, таких, как камни, песок, позволит обнаружить изменения рельефа, пылевое покрытие и другие особенности породы и почвы, важные для установления происхождения поверхностных элементов. Таким образом, ТСПП-ЭМ может определить как локальные особенности рельефа, так и общую картину местности.

КОНСТРУКЦИЯ ТСПП-ЭМ

ТСПП-ЭМ, установленная на испытательной оснастке, представлена на рис. 2.

БСД/ЭМ представляет собой резервированную вычислительно-управляющую машину с набором информационных интерфейсов и энерго-независимой памятью для хранения данных, реализованную в виде моноблока. К основным функциям устройства относятся коммутация питания и управление работой четырех камер на различных этапах работы КА ЭкзоМарс-2022, прием, сжатие и передача данных для трансляции на Землю, а также расширенные пользовательские функции обработки изображений и управления файловой системой накопителя данных.

БСД/ЭМ отличается большим объемом энергонезависимой памяти, что позволяет сохранять в нем необходимые массивы фото- и видеоданных до передачи в блок БИП КА ЭкзоМарс-2022.

Камеры КАМ-О/ЭМ предназначены для установки на внешних незатененных участках корпуса КА ЭкзоМарс-2022 с целью получения обзорных изображений окружающей обстановки в пределах поля зрения с целью формирования круговой замкнутой панорамы в режиме фото- и видеосъемки. Полученные камерами изображения в виде цифрового потока передаются в БСД/ЭМ. Основные технические характеристики КАМ-О/ЭМ приведены в табл. 1.

В КАМ-О/ЭМ используется малоформатный широкоугольный объектив, специально разработанный для ТСПП-ЭМ с фокусным расстоянием $f = 4.8$ мм, угловым полем зрения $115^\circ \times 115^\circ$ и относительным отверстием $D : f = 1 : 8$.

Таблица 1. Основные характеристики КАМ-О/ЭМ

Характеристика	Значение
Угловое поле зрения, угл. град	115 × 115
Число рабочих пикселей	2048 × 2048
Относительное отверстие объектива	1 : 8
Выходная разрядность квантования, бит, не менее	8
Цветность	RGB
Максимальный темп съемки, не менее	1 кадр/с
Динамический диапазон одиночного кадра, дБ	60
ГРИП (глубина резко изображаемого пространства) при диаметре кружка нерезкости, равном 1.6 диагонали пикселя датчика изображения, м, не менее	от 1.0 до ∞
Разрешающая способность, не хуже	65 (пар линий)/мм

Таблица 2. Форматы изображений, получаемых при работе с камерами

Ширина × высота, пиксель	Бинирование	Разрядность, бит	Цветность	Объем в памяти, Мбит
2048 × 512	Нет	12	RGB	16
1024 × 1024	2 × 2	14	Монохром	16
1024 × 1024	2 × 2	14	RGB	16
2048 × 2048	Нет	12	RGB	64

Фотоматрица является высоко интегрированным микроэлектронным прибором, предназначенным для регистрации оптического изображения и передачи его в виде цифровых видеоданных на внешние устройства. По разработанной в ИКИ РАН методике каждая фотоматрица проходит процедуру настройки перед установкой в прибор.

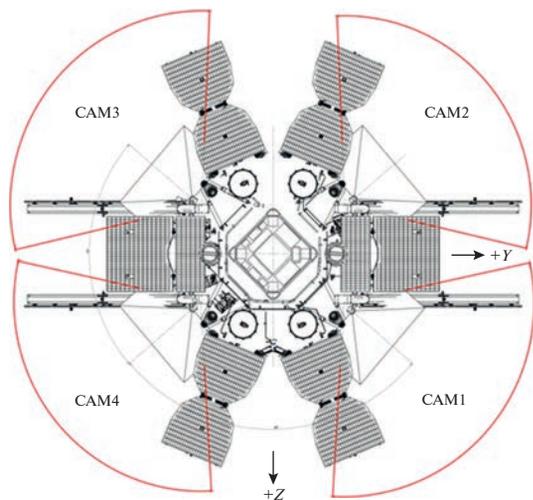


Рис. 3. Горизонтальные поля зрения камер ТСПП-ЭМ, установленных на посадочной платформе КА ЭкзоМарс-2022.

По сравнению с камерами, использованными в других миссиях, КАМ-О/ЭМ имеет матрицу большего разрешения, а также большое поле зрения, что позволит получить изображения значительно лучшего качества.

Для повышения частоты съемки при посадке в камерах реализовано бинирование кадра, при котором размер изображения уменьшается в 4 раза. Форматы изображений, получаемые с камер ТСПП-ЭМ, приведены в табл. 2.

Из конструктивных особенностей также важно отметить, что в азимутальной плоскости оптические оси всех четырех камер (КАМ-О/ЭМ) разнесены на 90°, что позволяет обеспечить полный обзор линии горизонта за счет перекрывающихся полей зрения камер (рис. 3). Камеры размещены на краях посадочной платформы в непосредственной близости от внешнего контура на специальных кронштейнах (рис. 4).

НАЗЕМНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТСПП-ЭМ

Для подтверждения работоспособности ТСПП-ЭМ в ИКИ РАН была проведена серия испытаний, как отдельных камер, так и всей системы в целом. Описанные в настоящей статье испытания были направлены на подтверждение геометрических и радиометрических характеристик камер, так как именно эти характеристики определяют качество изображений, передаваемых ТСПП-ЭМ (Эльяшев и др., 2015).

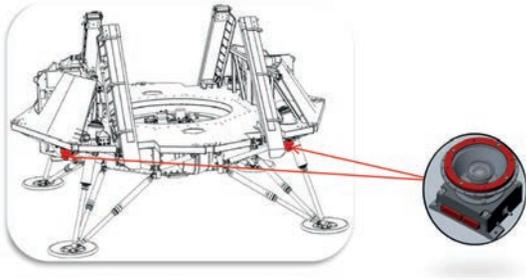


Рис. 4. Расположение камер КАМ-О/ЭМ прибора ТСПП-ЭМ на посадочной платформе КА ЭкзоМарс-2022 и увеличенный вид одной из них (две камеры выделены красным и отмечены стрелками; остальные две камеры симметрично расположены на противоположной стороне и не показаны).

В ходе испытаний были проверены следующие характеристики камер:

- поле зрения;
- разрешающая способность;
- глубина резко изображаемого пространства (ГРИП);
- коэффициент неравномерности чувствительности камер по полю зрения;
- абсолютная чувствительность камер;
- динамический диапазон камер;
- дисторсия камер.

ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛЯ ЗРЕНИЯ И РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КАМ-О/ЭМ

Проверка поля зрения проводилась при помощи поворотного стола. Напротив камеры устанавливалась мишень, имеющая четко выраженную отметку в центре (рис. 5). Поворотный стол вращался так, чтобы отметка попадала на край кадра (рис. 6). Разница в показаниях угла поворота стола и есть угловое поле зрения объектива. Для всех камер КАМ-О/ЭМ поле зрения по горизонтали и вертикали составило 112° .

Для определения разрешающей способности камер использовалась та же мишень Siemens Star. Она представляет собой 60 или 120 радиальных черных штрихов на белом фоне. При съемке такой мишени, на определенном расстоянии от центра черные полосы начинают сливаться вместе и уже нельзя различить визуально две отдельные полосы (рис. 7). Измерив толщину штрихов на этом расстоянии, можно вычислить разрешающую способность в парах линий/пиксель, а разделив эту величину на размер пикселя перейти к общепринятым парам линий/мм. Предельная разрешающая способность этой матрицы составляет около 90 пар линий/мм. Однако, так как матрица цветная и на ее пиксели нанесены цвет-

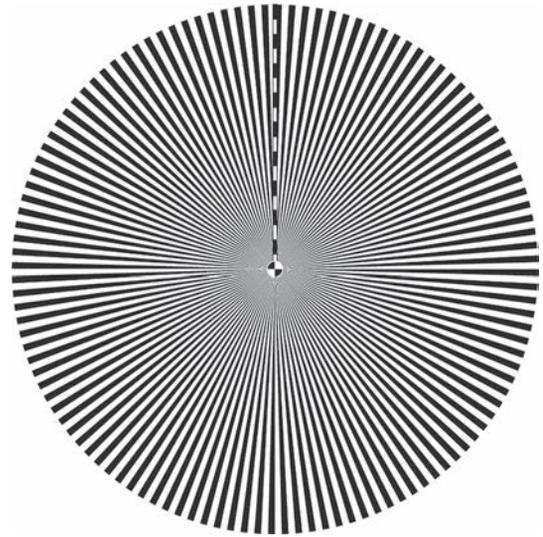


Рис. 5. Мишень Siemens Star, использовавшаяся для определения разрешающей способности камер в пределах поля зрения.

ные светофильтры (байеровский фильтр, рис. 8), то предельная разрешающая способность уменьшается примерно в $\sqrt{2}$ раз, т.е. до 65 пар линий/мм.

Разрешающая способность по мишени Siemens Star определяется следующим образом:

- измеряется радиус области в пикселях, где штрихи неразличимы;
- ширина штрихов на указанном расстоянии вычисляется согласно формуле:

$$S = 2\pi r / N, \quad (1)$$

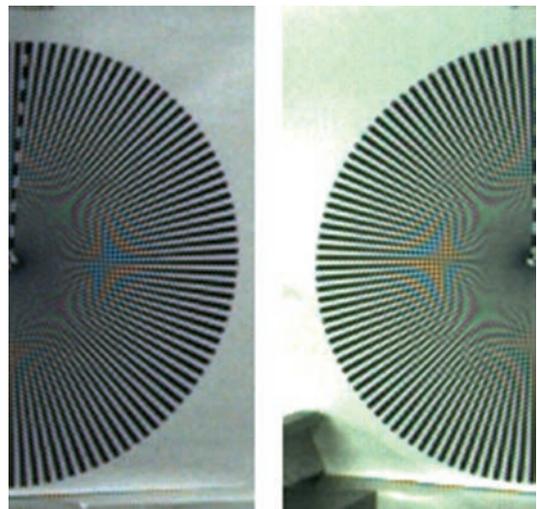


Рис. 6. Фрагменты кадров при крайних положениях мишени.

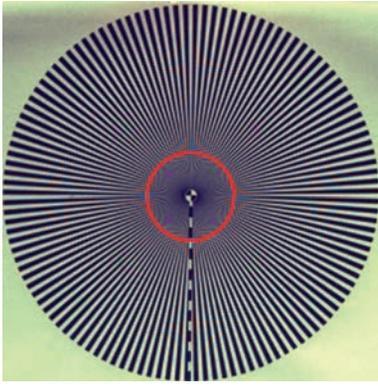


Рис. 7. Изображение мишени Siemens Star на расстоянии 1 м. Красным кругом показана область, где штрихи неразличимы.

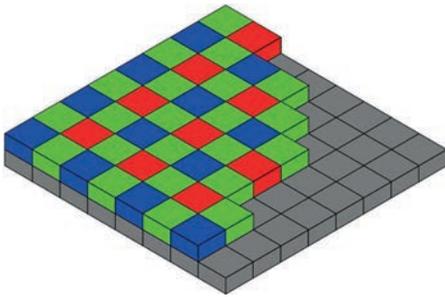


Рис. 8. Фильтр Байера на матрице камер.



Рис. 9. Изображение границы, по которой проводилось измерение разрешающей способности по удаленному объекту.

где r – измеренный радиус; N – число штрихов в мишени;

• разрешающая способность вычисляется согласно формуле:

$$R = 1/(Sp), \quad (2)$$

где p – размер пикселя и дается в парах линий/мм.

Измерения при помощи мишени Siemens Star показали, что разрешающая способность камер находится на уровне 70 пар линий/мм.

Также была измерена разрешающая способность по резкой границе удаленного объекта путем измерения функции размытия границы (Edge Spread Function), по которой можно вычислить функцию передачи модуляции (МТФ). Для проверки была выбрана контрастная граница удаленного здания. Измерения показали те же результаты, что и измерения по мишени. В качестве удаленного объекта была выбрана резкая граница дома, находящегося на расстоянии более 400 м (рис. 9).

Глубина резко изображаемого пространства (ГРИП) определяется как диапазон расстояний, при которых кружок рассеяния не превышает 1.6 диагонали пикселя. Формула для вычисления ближней и дальней границ ГРИП:

$$\begin{cases} R_1 = \frac{Rf^2}{f^2 - Kfz + KRz}, \\ R_2 = \frac{Rf^2}{f^2 + Kfz - KRz} \end{cases}, \quad (3)$$

где R_1 – дистанция до передней границы резко изображаемого пространства; R – дистанция фокусировки; R_2 – дистанция до задней границы резко изображаемого пространства; f – фокусное расстояние объектива в метрах; K – знаменатель геометрического относительного отверстия объектива или диафрагменное число; z – диаметр кружка нерезкости или допустимый кружок рассеяния.

По формуле вычисления ближней и дальней границ ГРИП (3) с учетом того, что на расстоянии 2.5 м и на удаленных объектах кружок рассеяния значительно меньше 1.6 диагонали пикселя, получается, что ближняя граница ГРИП лежит не дальше 0.5 м, а дальняя граница находится в бесконечности. Это значит, что при поле зрения 112° градусов и формате матрицы 2048×2048 пикселей, камеры имеют угловое разрешение во всем наблюдаемом пространстве около $4'$, или 3.5 мм на расстоянии 3 м.

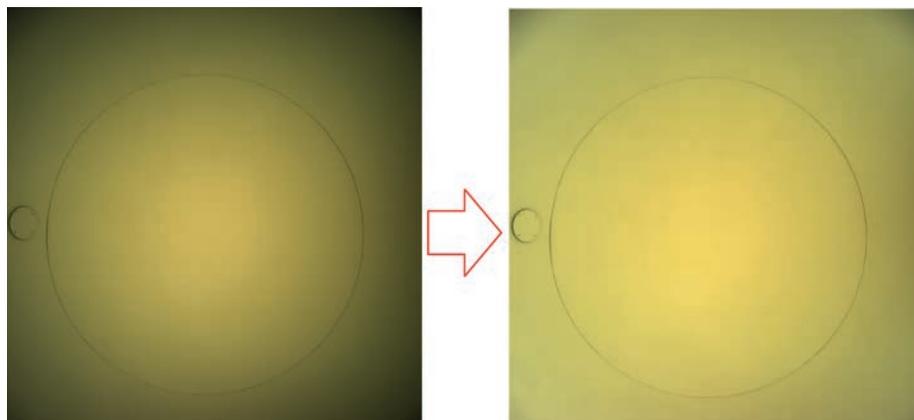


Рис. 10. Результат коррекции неравномерности освещенности по полю зрения.

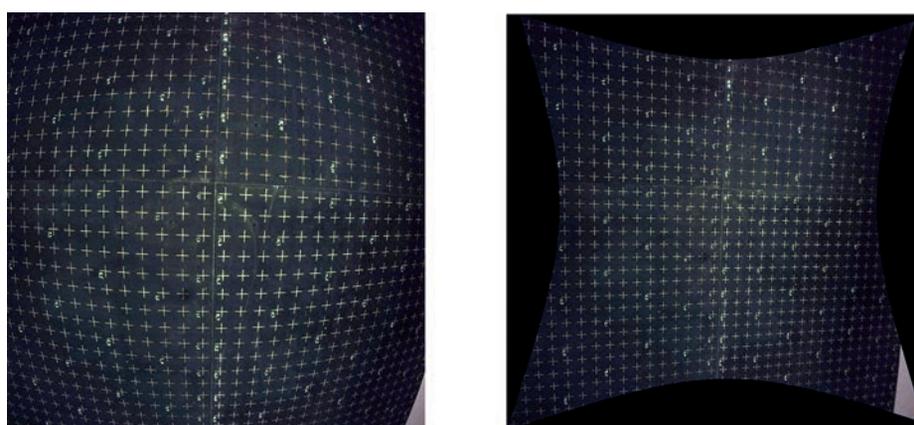


Рис. 11. Исходное изображение стенда и геометрически скорректированное изображение.

ИЗМЕРЕНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ, АБСОЛЮТНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА КАМ-О/ЭМ

Немаловажным параметром камер является неравномерность чувствительности по полю зрения. Широкопольные объективы имеют сильное падение освещенности на краях и для получения равномерных по всему полю зрения кадров необходимо знать степень этого падения освещенности. Для измерения этой неравномерности использовалась калиброванная интегрирующая сфера. Такая сфера дает равномерную освещенность по всему полю зрения, соответственно падение яркости на полученном кадре и будет искомым неравномерностью освещенности. Измерения показали, что яркость в углу кадра составляет около 15% от яркости в центре кадра, что соответствует расчетам. По полученным кадрам были составлены полиномы коррекции, которые будут применяться при обработке полученных

изображений для компенсации этой неравномерности (рис. 10).

Использовавшаяся интегрирующая сфера была откалибрована, т.е. была известна ее спектральная яркость в абсолютных величинах. Также были известны спектральная чувствительность матрицы в каждом из каналов и спектральное пропускание объективов. Путем некоторых математических операций, зная эти параметры и измерив яркость реального изображения сферы на камере, мы получили коэффициенты абсолютной чувствительности камер, которые затем использовались для расчета требуемых времен экспонирования. Так же эти камеры теперь могут быть использованы для фотометрии снимаемой сцены.

Еще одним параметром, определяющим качество получаемых изображений, является динамический диапазон камер. Упрощенно, динамический диапазон определяется как отношение яркости самого светлого объекта, различимого камерой, к яркости самого темного объекта, все еще различимого на фоне шумов. Для КАМ-О/ЭМ самым яр-



Рис. 12. Камеры КАМ-О/ЭМ (4 шт.) прибора ТСПП-ЭМ на стенде, имитирующем посадочную платформу КА Экзо-Марс-2022 в ходе испытаний в ИКИ РАН.

ким объектом является уровень около 4095 градаций АЦП (фотоматрицы оснащены 12-битным АЦП), а темновой шум у них находится на уровне 5.5 градаций АЦП. Таким образом, принимая, что объект становится различимым, когда его яркость равна величине шума, мы находим, что динамический диапазон камер составляет около 750 (или 57.5 дБ).

ИЗМЕРЕНИЕ ДИСТОРСИИ КАМЕР КАМ-О/ЭМ

В задачи ТСПП-ЭМ входит составление круговой панорамы вокруг аппарата. Для этой задачи необходимо провести геометрическую калибровку камер, которая связывает реальные углы с координатами на матрице. Из-за большого поля зрения камер изображения имеют сильные искажения на краях, не позволяющие без дополнительных калибровок вычислить направление на объект на изображении. Калибровка проводилась в фотограмметрическом программном обеспечении PhotoMod. Для калибровки использовался стенд с равномерными метками (рис. 11). Видно, что изображение имеет форму “подушки” и требует серьезных корректировок. В качестве модели дисторсии была принята формула физической дисторсии (4).

$$\begin{aligned}
 x_{corr} &= x - k_1 x r^2 - k_2 x r^4 - k_3 x r^6 - \\
 &\quad - P_1(2x^2 + r^2) - 2P_2 xy - b_1 x - b_2 y, \\
 y_{corr} &= y - k_1 y r^2 - k_2 y r^4 - k_3 y r^6 - \\
 &\quad - P_2(2y^2 + r^2) - 2P_1 xy - a_1 x - a_2 y, \\
 r^2 &= x^2 + y^2.
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

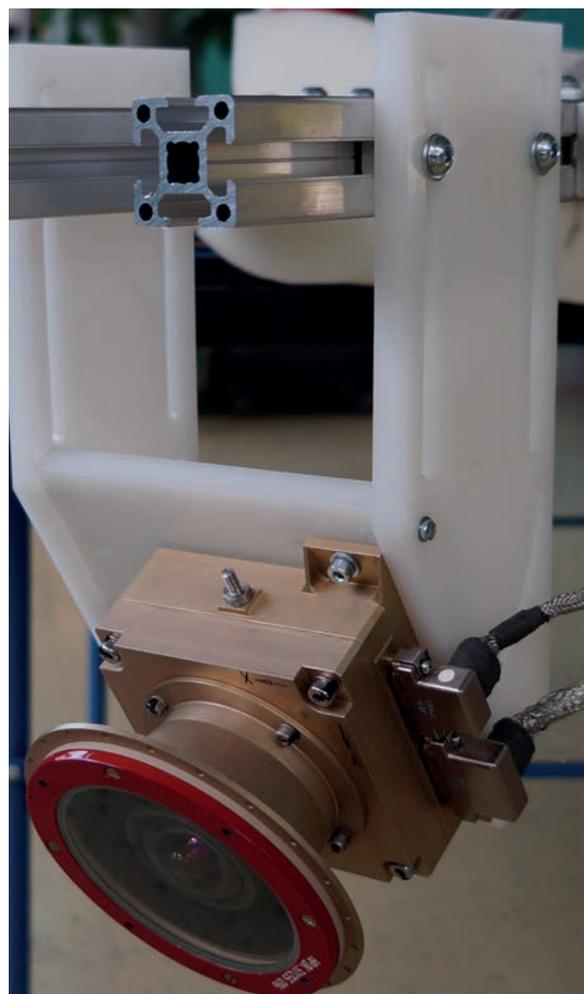


Рис. 13. Одна из камер КАМ-О/ЭМ прибора ТСПП-ЭМ на стенде, имитирующем посадочную платформу КА ЭкзоМарс-2022 в ходе испытаний в ИКИ РАН.



Рис. 14. Кадры, полученные ТСПП-ЭМ во время функциональных испытаний.



Рис. 15. Итоговая панорама, полученная в результате соединения четырех кадров ТСПП-ЭМ.

После коррекции изображение становится “плоским” и координаты на нем напрямую связаны с угловым направлением на объекты (рис. 11). Такие изображения уже можно использовать для решения фотограмметрических задач, например, для построения круговой панорамы и построения трехмерной модели рельефа вокруг аппарата.

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТСПП

После проверки всех характеристик камер были проведены комплексные функциональные испытания. В этой статье приводятся результаты сборки панорамного изображения, однако полные функциональные испытания включали в себя множество других проверок. В них входили проверки работоспособности во всех режимах, начиная с предполетной проверки, заканчивая посадкой на Марс и работой на его поверхности, различные испытания надежности, температурные и вакуумные испытания и многое другое.

Для получения изображений был разработан и изготовлен стенд, имитирующий посадочную платформу КА ЭкзоМарс-2022 в части расположения мест камер (рис. 12).

Стенд соответствовал как линейным, так и угловым размерам посадочных мест КА ЭкзоМарс-2022. На рис. 13 показана одна из камер, размещенных под углами в 32.5° .

Стенд был установлен на крыше ИКИ РАН и была произведена одновременная съемка окружающего пространства всеми четырьмя камерами КАМ-О/ЭМ. В ходе обработки кадров была устранена неравномерность чувствительности каждой камеры. Также были проведены цветокоррекция, гамма-коррекция яркости и другие стандартные операции. Полученные изображения (рис. 14) были геометрически скорректированы и при помощи специализированного ПО склеены в панораму (рис. 15). Небольшие перепады яркости между кадрами обуславливаются тем, что при обработке не была учтена абсолютная чувствительность камер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе наземных испытаний было подтверждено, что оптико-физические характеристики ТСПП-ЭМ позволят успешно выполнить задачи научной миссии.

Использованные при разработке конструкторские, технологические и программные решения обеспечивают для ТСПП-ЭМ:

- полный круговой обзор камерами;
- получение резких изображений во всем интервале расстояний;
- получение цветовой информации;

- широкий динамический диапазон для съемки как освещенных, так и затененных участков поверхности;

- достижения компромисса между размером изображения (с учетом узкой ширины полосы пропускания радиоканала) и его качеством за счет использования оптимального алгоритма сжатия изображения.

С учетом чрезвычайной востребованности качественной фото- и видеоинформации открываются перспективы использования ТСПП-ЭМ для исследования также и других небесных тел в составе будущих космических аппаратов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абрамов Н.Ф., Воронков С.В., Никитин А.В., Полянский И.В., Фори А.А. Обеспечение дистанционных телевизионных съемок на посадочной платформе космического аппарата “ЭкзоМарс-2020” // Современные

проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 6. С. 188–200.

Эляшев Я.Д., Бессонов Р.В., Полянский И.В., Прохорова С.А., Жуков Б.С. Алгоритмы работы съемочных камер служебной телевизионной системы космического аппарата “Луна-Глоб” // Сб. тр. конф. “Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов”. Москва. 2015. С. 181–206.

Mandon L., Bowen A.P., Quantin-Nataf C., Bridges J.C., Carter J., Pan L., Beck P., Dehouck E., Volat M., Thomas N., Cremonese G., Tornabene L.L., Thollot P. Morphological and spectral diversity of the clay-bearing unit at the ExoMars landing site Oxia Planum // *Astrobiology*. 2021. V. 21. № 4. P. 464–480.

Vago J.L., Westall F., Pasteur Instrument Teams, et al. Habitability on early Mars and the search for biosignatures with the ExoMars Rover // *Astrobiology*. 2017. V. 17. № 6. P. 471–510.

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.

УДК 523.42

ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ ВЕНЕРЫ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ PREM

© 2023 г. Д.О. Amorim^{a, *}, Т. В. Гудкова^{b, **}

^aМосковский физико-технический университет, Москва, Россия
^bИнститут физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

*e-mail: amorim.dargilan@gmail.com

**e-mail: gudkova@ifz.ru

Поступила в редакцию 15.02.2023 г.

После доработки 27.02.2023 г.

Принята к публикации 06.03.2023 г.

Построены модели внутреннего строения Венеры с широким диапазоном толщины коры (30–70 км) и радиуса ядра (2800–3500 км). Анализ полученных значений давления в центре планеты позволяет заключить, что наличие твердого внутреннего ядра маловероятно, если состав и температурный профиль Венеры соответствуют земному. Для учета неупругости недр Венеры при расчете приливных чисел Лява и угла запаздывания приливного горба применена реология Андраде. Сравнение экспериментальных значений числа Лява k_2 с модельными дает радиус ядра Венеры в диапазоне 3100–3500 км. Показано, что для определения характерной вязкости мантии Венеры ключевым фактором служит определение угла запаздывания приливного горба: значения 0.9° соответствуют низкой вязкости и высокой температуре, а 0.4° – высокой вязкости и низкой температуре, поэтому планируемые измерения приливных параметров и момента инерции планеты в миссиях VERITAS и EnVision смогут наложить ограничения на распределение вязкости и температуры в недрах Венеры.

Ключевые слова: Венера, модели внутреннего строения, вязкоупругость, приливные числа Лява, реология Андраде, угол запаздывания приливного горба

DOI: 10.31857/S0320930X23040023, **EDN:** RDSNQR

ВВЕДЕНИЕ

Процессы, происходящие в мантиях и ядрах планет, тесно связаны с их эволюцией (O'Rourke и др., 2023). Несмотря на то, что Венера и Земля похожи по таким параметрам, как масса и радиус, эволюционное развитие планет происходило по разным сценариям, и Венера остается одной из самых загадочных планет. Для понимания причин различия эволюционных процессов необходимо знание внутреннего строения Венеры.

В данной работе, мы предполагаем, что Венера и Земля близки по химическому составу, что не противоречит современным представлениям. Поэтому при построении модели внутреннего строения Венеры имеет смысл в качестве начального приближения (базовой модели) использовать параметры модели Земли PREM (Preliminary reference Earth model) (Dziewonski, Anderson, 1981), наиболее часто используемой модели в качестве первого приближения для построения региональных и трехмерных современных моделей Земли. PREM – это сферически симметричная модель Земли, в которой приведены распределения по радиусу плотности, скоростей сейсмических волн, упругих моделей (модуля сжатия K и

модуля сдвига μ), давления, ускорения силы тяжести и других физических величин.

Обычно, при построении модели внутреннего строения планеты опираются на данные о топографии и гравитационном поле: масса, средний радиус, момент инерции, и приливное число Лява k_2 . В отсутствие сейсмических данных, момент инерции является одним из основных ограничений на радиальное распределение плотности в модели. Определение момента инерции требует измерения скорости прецессии, и сложность заключается в том, что значение постоянной прецессии очень мало $\sim 2 \times 10^{-5}$ (Жарков, Гудкова, 2019). Недавно, по измерениям с Земли при помощи двух радиотелескопов, расположенных в США, и с использованием оценок скорости прецессии, для Венеры было получено единственное экспериментальное значение полярного момента инерции, которое составляет 0.337 ± 0.024 (Margot и др., 2021). Скорость прецессии оси вращения Венеры планируется определить в миссии EnVision (Rosenblatt и др., 2021). В настоящее время достаточно большая погрешность измерений момента инерции не позволяет наложить строгие

ограничения на модели внутреннего строения планеты.

Величины, которые позволяют контролировать как распределение плотности, так и распределение упругих параметров в недрах планеты — это приливные числа Лява. Числа Лява (Love, 1909) характеризуют: насколько поверхность планеты смещается под воздействием приливных сил (число h); и как изменяется гравитационное поле планеты вследствие перераспределения в ней массы из-за действия приливных сил (число k). По данным наблюдений вариаций гравитационного поля Венеры на КА Magellan и Pioneer Venus Orbiter известно значение приливного числа Лява $k_2 = 0.295 \pm 0.066$ (Konopliv, Yoder, 1996), которое измерено по солнечному приливу на Венере (период составляет 58.4 дня). Из-за недостаточной точности оценки интервала значений приливного числа Лява k_2 и отсутствия данных о вязкости в ее недрах продолжается обсуждение вопроса о том, находится ли ядро планеты в жидком или твердом состоянии, и имеется ли внутреннее твердое ядро (Dumoulin и др., 2017). Несмотря на достаточно высокую погрешность измерения, значение числа Лява k_2 , как будет показано ниже, позволяет наложить некоторые ограничения на модели внутреннего строения Венеры.

При интерпретации величины k_2 имеются определенные сложности, так как требуются знания о неупругих свойствах недр Венеры. Значение k_2 измерено при периоде приливной волны 58.4 дня и зависит от неупругости недр. При построении модели внутреннего строения рассчитывается упругое значение k_2 , поэтому необходим учет реологии недр на периоде приливной деформации.

Вопрос о распределении вязкости очень сложный, и не до конца решен даже для Земли. Оценки вязкости для Венеры принимаются по порядку величины такие же, как и для ядра и мантии Земли. Для расплавленного внешнего ядра Земли оценка вязкости $\eta \ll 10^8$ Па с, по данным о поглощении продольных сейсмических волн. Если бы вязкость была порядка 10^8 Па с, то при прохождении через ядро P -волны были бы ослаблены намного сильнее, чем это наблюдается по данным сейсмологии (Жарков, 2013). Теоретические оценки, приведенные в (Жарков, 2012), показывают, что вязкость во внешнем ядре должна быть меньше, чем 0.1 Па с. Это значение используется во многих работах, и для расчета вязкоупругого числа Лява вязкостью во внешнем ядре обычно пренебрегают (например, Xiao и др., 2020), так как вязкость в мантии намного порядков выше.

Для идеально упругого тела вязкость равна бесконечности, и среда не обладает свойством те-

кучести. В реальности, среда не идеальна, из-за наличия точечных и линейных дефектов в твердых поликристаллах, они обладают способностью к медленным неупругим деформациям, при этом вязкость среды сильно зависит от температуры. Современные исследования (например, Nairig и др., 2010; Čížková и др., 2012) дают значения вязкости в верхней мантии $\sim 10^{20}$ Па с, в переходной зоне $\sim 10^{21}$ – 10^{22} Па с, а в нижней $\sim 10^{22}$ – 10^{23} Па с. В литосфере Земли вязкость меняется в пределах от 10^{17} – 10^{24} Па с в зависимости от глубины и региона (Bills и др., 1994; Yaolin, Jianling, 2008). Ниже мы применим эти оценки для распределения вязкости в недрах Венеры.

Ряд моделей внутреннего строения Венеры был построен с использованием параметрической модели Земли PEM (Dziewonski и др., 1975) как базовой (Zharkov и др., 1981; Жарков, Засурский, 1982; Козловская, 1982; Yoder, 1995; Mosquet и др., 2011; Aitta, 2012). В работе (Жарков, Засурский, 1982) было отмечено, что за исходное уравнение состояния для Венеры разумно взять уравнение состояния для Земли, так как это позволяет автоматически учитывать распределение температуры в недрах планеты, которое, скорее всего, близко к геотерме на глубинах больше 200 км.

Вопрос о мощности коры Венеры пересматривается в сторону уменьшения по анализу последних данных гравитационного поля и топографии (Jiménez-Díaz и др., 2015; O'Rourke, Kogenaga, 2015; Yang и др., 2016). В работе (Гудкова, Жарков, 2020) были построены модели внутреннего строения Венеры на основе моделей Земли PEM для различных толщин коры (30–100 км) при плотности 2800 кг/м^3 , при этом плотность мантии как функция давления $\rho_m(p)$ задавалась введением коэффициента A : $\rho_m(p) = A\rho_{m0}(p)$, где $\rho_{m0}(p)$ — уравнение состояния для Земли. Для выполнения условия сохранения массы планеты: если ядро большое (радиус 3400–3500 км), то мантия должна быть “облегченной” ($A < 1$), и наоборот, если ядро маленькое (радиус 2800–2900 км), то мантия должна быть “утяжеленной” ($A > 1$). Состав мантии меняется в результате изменения молярной доли железа по отношению к магнию. При коэффициенте A , меньшем единицы, содержание железа в мантийных силикатах меньше, чем в принятой базовой модели. Ниже мы будем использовать такой же подход.

На Земле существует слой пониженной вязкости из-за приближения температуры к температуре плавления, это учтено в модели Земли PREM, и в данной работе мы предполагаем наличие такого слоя и в недрах Венеры. Неопределенности в распределении температуры в недрах Венеры (Steinberger и др., 2010; Armann, Tackley, 2012)

Таблица 1. Данные наблюдений для Венеры (M_3 – масса Земли, R_3 – радиус Земли)

Параметры	Значения параметров	Ссылки
Масса M_0 , кг	$4.8669 \times 10^{24} = 0.815M_3$	Steinberger и др., 2010
Средний радиус R , км	$6050.9 = 0.95R_3$	Steinberger и др., 2010
Средняя плотность ρ_0 , кг/м ³	5241.9	
I/M_0R^2	0.337 ± 0.024	Margot и др., 2021
k_2	0.295 ± 0.066	Konopliv, Yoder, 1996
Давление на поверхности	9.3 МПа	Steinberger и др., 2010

оставляют открытым вопрос о том, является ли ядро Венеры жидким или твердым. В работах (Dumoulin и др., 2017; Shah и др., 2022) было показано, что на основании имеющихся на сегодняшний день данных нельзя исключить возможность твердого внутреннего ядра у Венеры. Тем не менее, как и во многих современных моделях, в этой работе мы предполагаем, что ядро полностью расплавлено. Результаты, полученные ниже, оправдывают такое предположение.

План статьи следующий. Сначала будут рассмотрены упругие модели внутреннего строения Венеры на основе модели Земли PREM. Затем, с использованием реологии Андраде, построены модели с учетом вязкоупругости в недрах Венеры, и продемонстрировано, как это влияет на значения модельных чисел Лява. В заключении обсуждаются возможные ограничения на распределение вязкости и температуры в модели внутреннего строения Венеры после уточнения момента инерции, чисел Лява и измерения угла запаздывания приливного горба в планируемых миссиях VERITAS (Cascioli и др., 2021) и EnVision (Rosenblatt и др., 2021).

МОДЕЛИ ВНУТРЕННЕГО СТРОЕНИЯ ВЕНЕРЫ

Упругие модели

Данные наблюдений, используемые при построении моделей внутреннего строения Венеры, приведены в таблице: масса M_0 , средний радиус R , средняя плотность ρ_0 , безразмерный момент инерции I/M_0R^2 , приливное число Лява k_2 и давление на поверхности планеты. Масса Венеры составляет 81% от массы Земли, а радиус на 320 км меньше. Средняя плотность Венеры меньше, чем у Земли, а момент инерции больше. Это указывает на то, что вещество в недрах Венеры менее сжато.

Расчет моделей внутреннего строения планет основан на использовании уравнения для массы и уравнения гидростатического равновесия (см., например, Жарков, Трубицын, 1980). В безраз-

мерных переменных $x = r/R$, $m = M(r)/M_0$, $\rho = \rho(r)/\rho_0$, $p = p(r)/p_0$, где $p_0 = \frac{GM_0^2}{4\pi R^4}$, $\rho_0 = \frac{3M_0}{4\pi R^3}$ система уравнений принимает вид:

$$\frac{dm}{dx} = 3x^2\rho(p), \quad \frac{dp}{dx} = -3\frac{m}{x^2}\rho(p). \quad (1)$$

Граничные условия при этом имеют вид:

$$m(1) = 1, \quad m(0) = 0, \quad p(1) = 9.9013 \times 10^{-5}. \quad (2)$$

Система уравнений содержит уравнение состояния вещества $\rho = \rho(p)$, которое для Венеры неизвестно. За базовое распределение плотности в модели Венеры примем уравнение состояния из модели Земли PREM. Полученный профиль плотности должен удовлетворять безразмерному моменту инерции планеты I/M_0R^2 .

Плотность коры считаем постоянной и равной 2800 кг/м³. Аналогично работе (Гудкова, Жарков, 2020), плотность в мантии как функция давления $\rho_m(p)$ задается введением коэффициента A : $\rho_m(p) = A\rho_{m0}(p)$, где $\rho_{m0}(p)$ – уравнение состояния по модели внутреннего строения Земли PREM.

Состав ядра Венеры, также, как и состав мантии, может не совпадать с составом ядра Земли. Для изменения плотности ядра вводится коэффициент B : $\rho_c(p) = B\rho_{c0}(p)$, где $\rho_c(p)$ – плотность в ядре Венеры, $\rho_{c0}(p)$ – уравнение состояния ядра для модели Земли PREM. Варьируемые параметры задачи – радиус ядра, толщина коры и коэффициенты A и B . Коэффициент A подбирается так, чтобы модельная масса совпадала с наблюдаемой. Модель внутреннего строения контролируется по значению безразмерного момента инерции I/M_0R^2 . Единственное экспериментальное значение момента инерции 0.337 ± 0.024 (Margot и др., 2021) имеет достаточно высокую погрешность измерений, что не позволяет наложить сильные ограничения на модель внутреннего строения планеты. Еще одна величина, которая позволяет контролировать распределение плот-

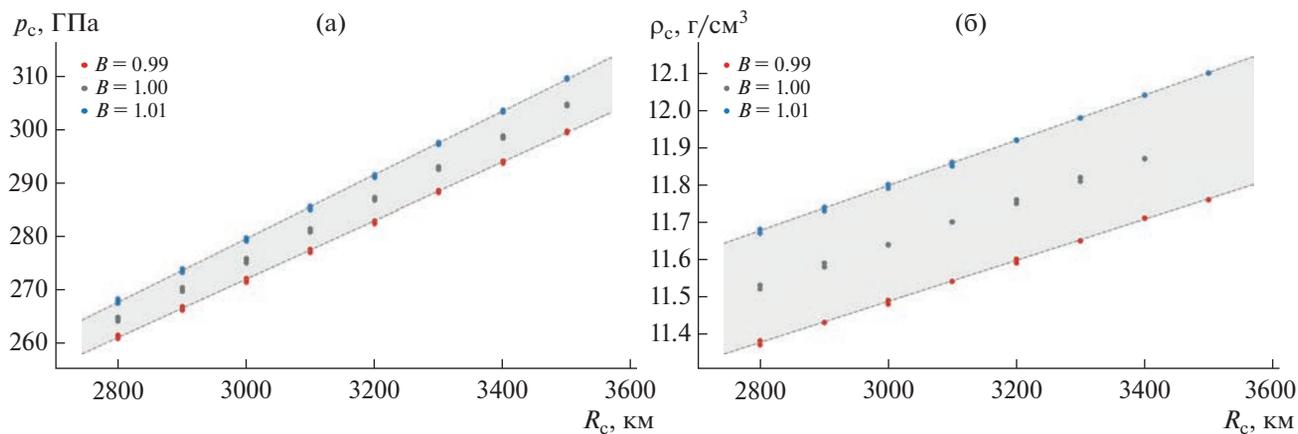


Рис. 1. Модельные значения физических параметров в центре Венеры в зависимости от радиуса ядра R_c для диапазона параметра $B = 0.99, 1.0, 1.01$: давление p_c (а), плотность ρ_c (б).

ности и упругих параметров в недрах планеты — это приливное число Лява k_2 .

Система расчета приливных чисел Лява, часто называемая “системой y_{in} ”, это шесть уравнений первого порядка с граничными условиями на поверхности планеты и на границе ядро–мантия (в случае жидкого ядра) или в центре (в случае твердого ядра) (Alterman и др., 1959; Молоденский, 2001). Обычно, система сводится к безразмерным переменным и решается методом Рунге–Кутты четвертого порядка (см., например, Michel, Voy, 2022).

Построены 72 упругие модели внутреннего строения Венеры для значений коры в интервале 30–70 км, и радиуса ядра в интервале 2800–3500 км. Модели разбиты на три группы по параметру B ($B = 1$, уравнение состояния ядра совпадает с земным; $B = 1.01$, вещество в ядре Венеры на 1% тяжелее земного; $B = 0.99$, вещество в ядре Венеры на 1% легче земного). Введем следующее обозначение для моделей внутреннего строения Венеры в зависимости от заданных параметров: (толщина коры в км, параметр B , радиус ядра в км). Например, модель (50, 0.99, 3200) — модель с толщиной коры 50 км, $B = 0.99$ и радиусом ядра 3200 км.

Результаты моделирования без учета неупругости недр Венеры представлены на рис. 1–4. В моделях прослеживаются следующие закономерности: 1) в моделях с маленьким ядром (2800–2900 км) мантия заметно тяжелее земной, а в моделях с большим ядром (3400–3500 км) — заметно легче; 2) при увеличении радиуса ядра давление и плотность в центре планеты увеличиваются; 3) при увеличении радиуса ядра момент инерции планеты уменьшается; 4) в моделях с толстой корой (70 км) мантия слегка тяжелее, а момент инерции несколько меньше, чем в моделях с тон-

кой корой (30 км); 5) при увеличении параметра B параметр A и момент инерции уменьшаются, а давление в центре планеты увеличивается.

На рис. 1 показана зависимость давления p_c и плотности ρ_c в центре планеты от радиуса ядра, параметра B и толщины коры. Модельные значения давления (рис. 1а) находятся в интервале 260–310 ГПа. Для сравнения: в центре Земли давление достигает 363 ГПа, а на границе внутреннего ядра — 328 ГПа (Dziewonski, Anderson, 1981). Это говорит о том, что даже в моделях с очень большим ядром давление в центре Венеры не достигает значений, при которых происходит кристаллизация расплава в земных условиях. Следовательно, присутствие твердого внутреннего ядра маловероятно, при условии одинакового состава и распределения температуры в недрах Земли и Венеры. В работе (Dumoulin и др., 2017) были построены модели Венеры с внутренним твердым ядром, при этом использовалось экспериментально полученное уравнение состояния чистого железа, которое может кристаллизоваться в условиях недр Венеры. Однако сложно представить, что в ядре Венеры нет примесей легких элементов, которые, в свою очередь, уменьшают температуру плавления, поэтому можно сделать вывод, что, скорее всего, у Венеры нет твердого внутреннего ядра. Видно, что плотность в центре планеты (рис. 1б) растет с увеличением радиуса ядра и коэффициента B . Отношение ρ_c для моделей с $B = 1.01$ к ρ_c для моделей с $B = 1.0$, оказалось больше, чем 1.01, что связано с тем, что при увеличении B увеличивается давление в ядре, что приводит к дополнительному сжатию вещества.

На рис. 2 приведены значения безразмерного момента инерции в зависимости от радиуса ядра, параметра B и толщины коры. Пунктирные ли-

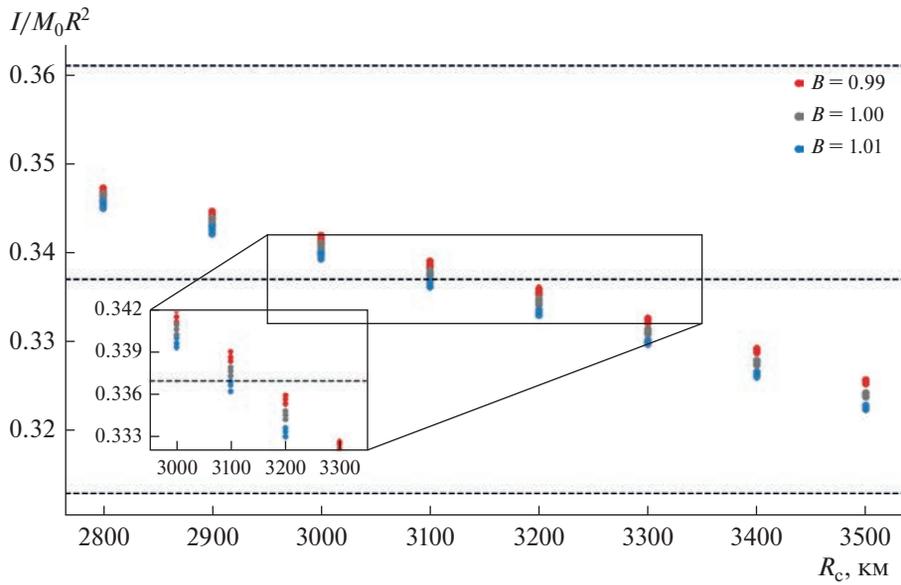


Рис. 2. Модельные значения безразмерного момента инерции $I/M_0 R^2$ в зависимости от радиуса ядра R_c для диапазона параметра $B = 0.99, 1.0, 1.01$. Пунктирные линии показывают разброс допустимых значений безразмерного момента инерции.

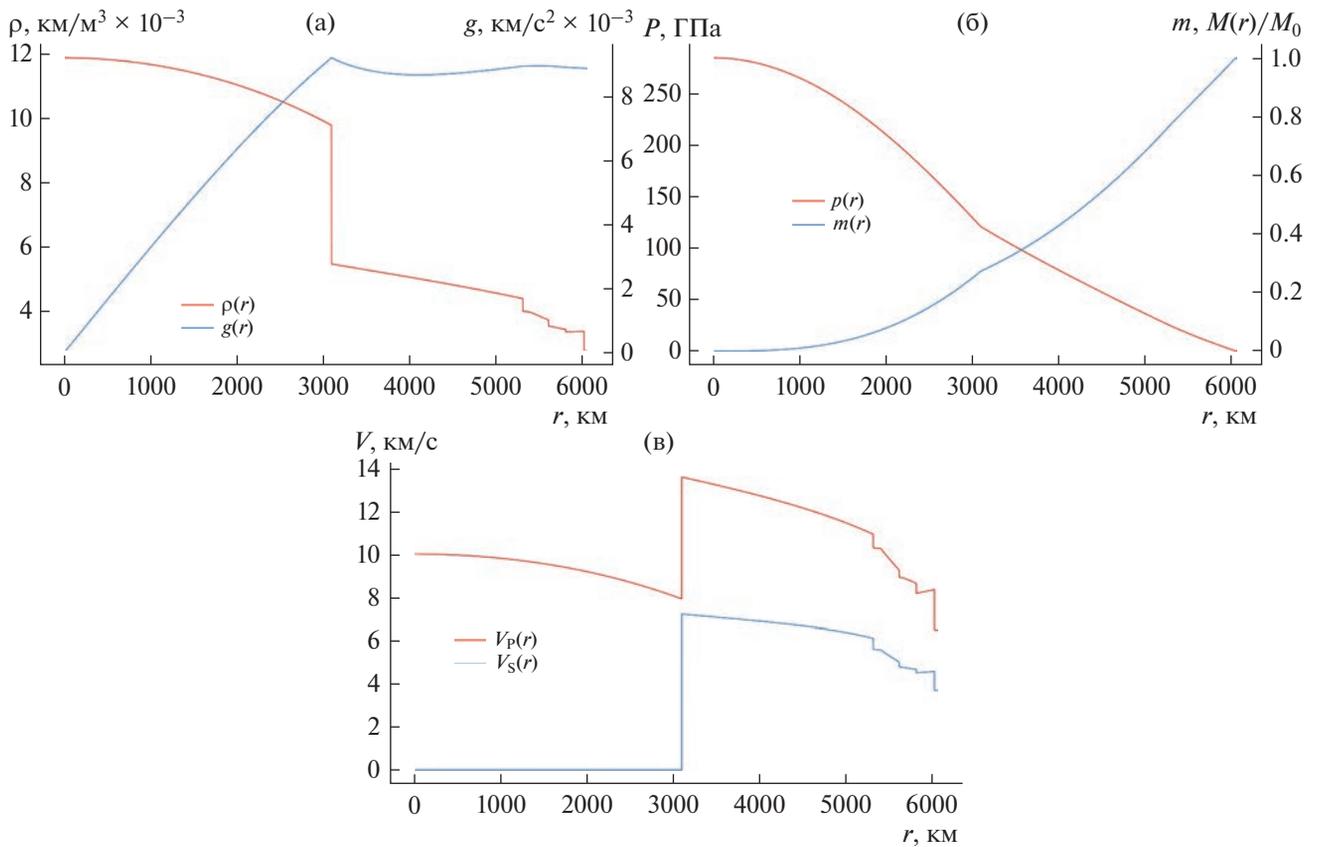


Рис. 3. Распределения физических параметров как функция радиуса для модели Венеры (30, 1.01, 3100) (толщина коры 30 км, параметр $B = 1.01$ – вещество в ядре Венеры на 1% тяжелее земного, радиус ядра 3100 км): плотность ρ и гравитационное ускорение g (а), давление p и относительная масса m (б), и скорости продольных и поперечных волн V_p и V_s (в).

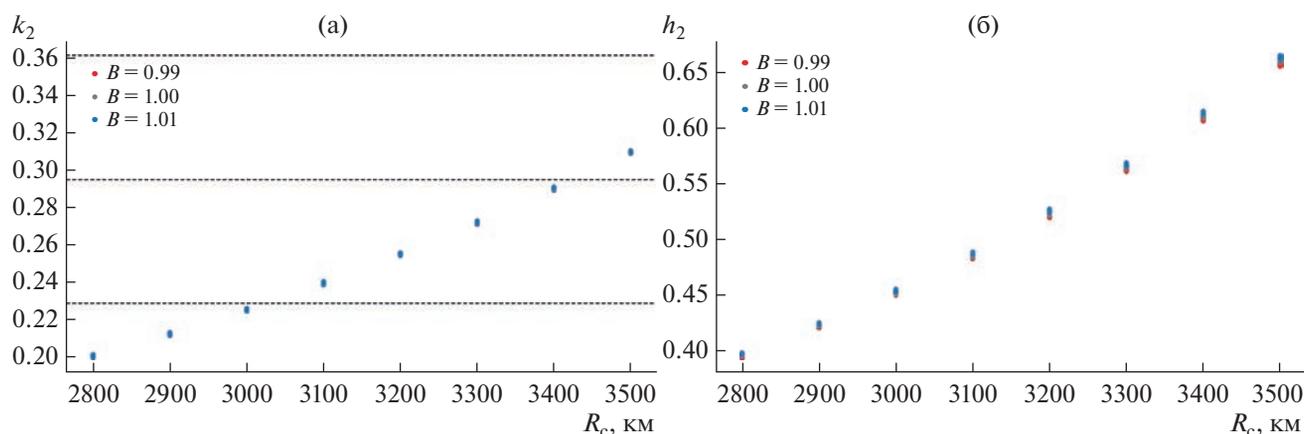


Рис. 4. Модельные упругие числа Лява в зависимости от радиуса ядра R_c для ряда моделей Венеры с параметром $B = 0.99, 1.0$ и 1.01 : k_2 (а) и h_2 (б). Горизонтальные штриховые линии показывают полосу допустимых наблюдений значений числа Лява k_2 .

нии выделяют область допустимых значений безразмерного момента инерции: 0.337 ± 0.024 (Maggot и др., 2021). Видно, что все модели попадают в допустимую область с запасом, но ближе всего к центральному значению 0.337 находятся модели с радиусом ядра 3000 – 3200 км, и модели с радиусом ядра 3300 км и $B = 0.99$ (большое, но “легкое” ядро). Для модели $(30, 1.01, 3100)$ момент инерции точно равен 0.337 . Для этой модели на рис. 3 показано распределение плотности, скоростей продольных и поперечных волн, гравитационного ускорения, массы и давления, как функция радиуса. Из-за того, что погрешность измерения момента инерции Венеры достаточно большая, нельзя отбросить какие-либо из рассчитанных выше моделей. Выше было отмечено, что еще одним критерием служит сравнение модельных значений приливного числа Лява k_2 с величиной, полученной из наблюдений. Несмотря на достаточно высокую погрешность, значение числа Лява позволяет наложить некоторые ограничения на модели внутреннего строения Венеры.

Рис. 4 демонстрирует зависимость значений упругих чисел Лява k_2 (рис. 4а) и h_2 (рис. 4б) от радиуса ядра Венеры для диапазона изменений параметра B . Наблюдается сильная зависимость числа h_2 от радиуса ядра, при этом толщина коры и параметр B , слабо влияют на результат. Штриховые линии на рис. 4а выделяют область допустимых значений числа Лява k_2 . Модели с маленьким ядром (2800 – 3000 км) находятся вне области допустимых значений k_2 (рис. 4а) и могут быть исключены, а модели с радиусом ядра 3300 – 3500 км ближе всего к центральному значению k_2 . Этот результат не очень хорошо согласуется со значениями, которые были выбраны при отборе моделей по моменту инерции.

При решении системы “ y_{in} ” для расчета приливных чисел Лява считалось, что планета является идеально упругим телом, что не соответствует реальности. В работах (Жарков, 2012; Dumoulin и др., 2017; Гудкова, Жарков, 2020) было показано, что учет неупругости недр необходим при вычислении приливных чисел Лява. Построенные выше модели внутреннего строения Венеры являются упругими, а в диссипативной среде, какой являются недра Венеры, модуль сдвига μ и приливное число Лява планеты k_2 являются функциями частоты. Без учета реологии, полученные модельные значения числа Лява k_2 занижены. Для того чтобы использовать k_2 как ограничение при построении моделей внутреннего строения Венеры, ниже, при расчете модельных приливных чисел Лява, будет учтена неупругость планеты.

Влияние вязкоупругости

Известно, что затухание механических колебаний земных недр происходит из-за отклонения материала от идеальной упругости по отношению к сдвиговым напряжениям, и рассеяние механической энергии связано именно с релаксацией модуля сдвига μ (Жарков, 2013). Распределение модуля сдвига в недрах Земли зависит от частоты, т.е. $\mu = \mu(r, \omega)$ и учет частотной зависимости приводит к заметному понижению модуля сдвига при переходе от сейсмических периодов ~ 1 с к периодам ~ 10 мин. Частота солнечной приливной волны на Венере соответствует периоду, равному ~ 58.4 дня ($\approx 5 \times 10^6$ с). Числа Лява приблизительно обратно пропорциональны модулю сдвига, следовательно, их значения должны увеличиваться при переходе от упругой модели к неупругой.

Выше, для расчета чисел Лява были использованы распределения модулей упругости в модели PREM для периода 1 с (Dziewonski, Anderson, 1981), т.е. в расчетах использовался “упругий модуль сдвига”. Для учета неупругости необходимо выбрать подходящую реологическую модель поведения мантийного вещества.

Для описания вязкоупругого поведения коры Земли обычно применяется реология Максвелла, которая дает хорошие результаты при изучении постледниковых поднятий. Реологическое тело Максвелла можно представить как последовательное соединение упругого тела Гука с линейно-вязким телом Ньютона. На коротких периодах материал, описываемый моделью Максвелла, ведет себя как твердое тело, а на длинных (при медленных процессах, характерное время которых значительно превышает время Максвелла, представляющее собой отношение коэффициента вязкости к упругому модулю сдвига) – как вязкий. Модуль сдвига, в свою очередь, меняется от высокочастотного значения $\mu(\infty)$ до низкочастотного – статического значения $\mu(0)$. В реологии Максвелла модуль сдвига и параметр Ляме λ становятся комплексными величинами, и зависят от частоты внешнего воздействия ω и от вязкости среды η по формулам (Peltier, 1974):

$$\tilde{\mu} = \frac{\mu}{1 - i \frac{\mu}{\omega\eta}}, \quad \tilde{\lambda} = K - \frac{2}{3}\tilde{\mu}. \quad (3)$$

Реология Максвелла использовалась для учета неупругости в недрах Венеры в работе (Xiao и др., 2020), в которой получено, что приливные числа Лява значительно отклоняются от своего упругого значения только при значениях вязкости в мантии меньше чем 10^{18} Па с. Применение реологии Максвелла для рассчитанных выше моделей внутреннего строения Венеры дало аналогичные результаты. Это означает, что даже если вязкость в мантии Венеры на порядок меньше вязкости в мантии Земли, то влияние неупругости на числа Лява пренебрежимо мало. Однако в работах (Dumoulin и др., 2017; Гудкова, Жарков, 2020) было показано, что k_2 заметно увеличивается при переходе от упругой модели к неупругой. Причина расхождения результатов заключается в использовании различных реологических моделей.

Реология Максвелла оказывается менее пригодной для сейсмических и приливных периодов. Экспериментальные результаты (см., например, Gribb, Cooper, 1998; Jackson, Faul, 2010; Jackson, 2015) показывают, что реология Максвелла плохо описывает поведение оливинов и других минералов, присутствующих как в мантии Земли, так и в других телах Солнечной системы. Для описания

поведения планетных тел предлагаются более сложные реологии, такие как реология Андраде, которая сейчас активно используется во многих работах по исследованию планет и спутников, особенно когда рассматриваются приливные взаимодействия (Castillo-Rogez и др., 2011; Bierson, Nimmo, 2016; Dumoulin и др., 2017; Renaud, Henning, 2018; Bagheri и др., 2022). Авторы этих работ пришли к выводу, что реология Андраде намного лучше описывает поведение мантийного вещества в планетах по сравнению с реологией Максвелла. Поэтому ниже мы будем использовать реологию Андраде для учета неупругости в недрах Венеры.

При описании вязкоупругой реологии Андраде, комплексный модуль сдвига $\tilde{\mu}$ равен $1/\tilde{J}$, где \tilde{J} называется “комплексная податливость материала” (complex compliance) и задается формулой (Castillo-Rogez и др., 2011)

$$\tilde{J}(\chi) = J \left[1 + (i\tau_M\chi)^{-\alpha} \Gamma(1 + \alpha) \right] - \frac{i}{\eta\chi}, \quad (4)$$

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

Параметр Андраде α лежит в интервале 0.2–0.5 (Gribb, Cooper, 1998; Castillo-Rogez и др., 2011; Dumoulin и др., 2017), хотя для мантийного вещества часто используется $\alpha \approx 0.3$. Ниже примем значения $\alpha = 0.2$ и $\alpha = 0.5$ как предельные случаи, таким образом, будет перекрыт интервал возможных значений k_2 и h_2 для каждой модели.

На основе анализа распределения вязкости в недрах Земли, при расчете чисел Лява k_2 и h_2 для моделей с реологией Андраде, примем два пробных распределения вязкости в недрах Венеры:

1. Распределение с низкой вязкостью:

- вязкость коры 10^{21} Па с,
- вязкость верхней мантии 10^{19} Па с,
- вязкость нижней мантии 10^{21} Па с,

2. Распределение с высокой вязкостью:

- вязкость коры 10^{23} Па с,
- вязкость верхней мантии 10^{21} Па с,
- вязкость нижней мантии 10^{23} Па с.

Вязкость ядра принимается равной нулю.

Толщина коры и параметр B слабо влияют на числа Лява по сравнению с радиусом ядра, поэтому числа Лява k_2 и h_2 с учетом вязкоупругости будут рассчитаны только для моделей с толщиной коры 30 км и параметром $B = 1.0$ (30, 1.00, 2800–3500) для двух случаев распределения вязкости в недрах Венеры (случай высокой и низкой вязкости), и для двух значений параметра α : $\alpha = 0.2$ и

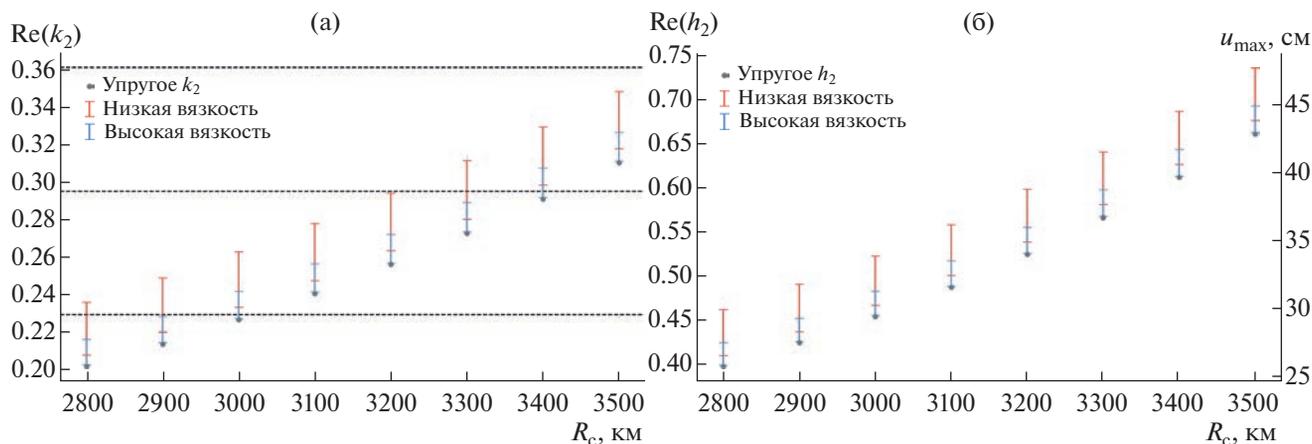


Рис. 5. Модельные значения вещественной части неупругих чисел Лява в зависимости от радиуса ядра R_c для ряда моделей Венеры с параметром $B = 0.99, 1.0$ и 1.01 : $Re(k_2)$ (а) и $Re(h_2)$ (б). Горизонтальные штриховые линии показывают полосу допустимых наблюдений значений числа Лява k_2 .

$\alpha = 0.5$. Это оправдано тем, что неопределенность в распределении вязкости и параметра α сильнее влияет на результат, чем толщина коры и коэффициент B .

Интервалы значений вязкости и параметра α приводят к большому разбросу возможных значений чисел Лява для каждой тестовой модели внутреннего строения. При $\alpha = 0.5$, k_2 и h_2 с учетом неупругости всего на 0.2–3% больше, чем упругие значения. При $\alpha = 0.2$ отличие составляет 5–17% для рассмотренных профилей вязкости. Если вязкость в нижней мантии Венеры меньше 10^{21} Па с, то числа Лява с учетом неупругости получаются на 20% больше, чем значения для упругой модели.

Значения вещественной части чисел Лява k_2 и h_2 для моделей (30, 1.00, 2800–3500) с учетом вязкоупругости в зависимости от радиуса ядра показаны на рис. 5. Модели с маленьким ядром (2800–2900 км) попадают в интервал данных наблюдений для k_2 (0.229–0.361) только при низких значениях вязкости и параметре α , близком к 0.2, но даже так, они находятся на краю допустимого интервала, и поэтому эти модели можно считать менее вероятными. Для выбора оптимальной модели необходимо более точное измерение k_2 и лучшее понимание того, какое значение параметра α больше соответствует поведению мантийного вещества. Тем не менее из рис. 5а видно, что если вязкость низкая, то предпочтительнее модели с радиусом ядра 3100–3400 км, а если вязкость высокая, то с ядром 3200–3500 км. Так как вязкость экспоненциально убывает с увеличением температуры, то большое ядро свидетельствует о “холодной мантии”, а среднее ядро — о “горячей мантии”.

Рассмотрим совместно ограничения на рассчитанные модели внутреннего строения Венеры по числу Лява k_2 и моменту инерции I/M_0R^2 (рис. 6). Определим вероятность модели с числом Лява k_2 и моментом инерции I/M_0R^2 , как

$$p = \exp\left(-\frac{(k_2 - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2} - \frac{\left(\frac{I}{M_0R^2} - \mu_2\right)^2}{2\sigma_2^2}\right), \quad (5)$$

где $\mu_1 = 0.295$, $\sigma_1 = 0.033$, $\mu_2 = 0.337$, $\sigma_2 = 0.024$. Согласно (Konopliv, Yoder, 1996) интервал для допустимых значений $k_2 = 0.295 \pm 0.066$ соответствует погрешности 2σ , поэтому $\sigma_1 = 0.033$.

Сплошные линии на рис. 6 показывают вероятность моделей. Из рис. 6 можно сделать следующие выводы: если вязкость мантии Венеры высокая, то модели с радиусом ядра в интервале 3200–3500 км более вероятны; если вязкость мантии Венеры низкая, то более вероятны модели с радиусом ядра в интервале 3100–3400 км.

Как было отмечено выше, число Лява h_2 характеризует радиальное смещение поверхности из-за приливного воздействия. Если на планету массой m_1 и радиуса R действует приливный потенциал W со стороны тела массой m_2 , находящегося на расстоянии d от планеты, то вторая гармоника W_2 приливного потенциала W при разложении по многочленам Лежандра вычисляется по формуле

$$\begin{aligned} W_2(\varphi) &= -\frac{Gm_1 m_2}{R m_1} \left(\frac{R}{d}\right)^3 P_2(\cos \varphi) = \\ &= V_0 \frac{m_2}{m_1} \left(\frac{R}{d}\right)^3 P_2 \cos(\varphi), \end{aligned} \quad (6)$$

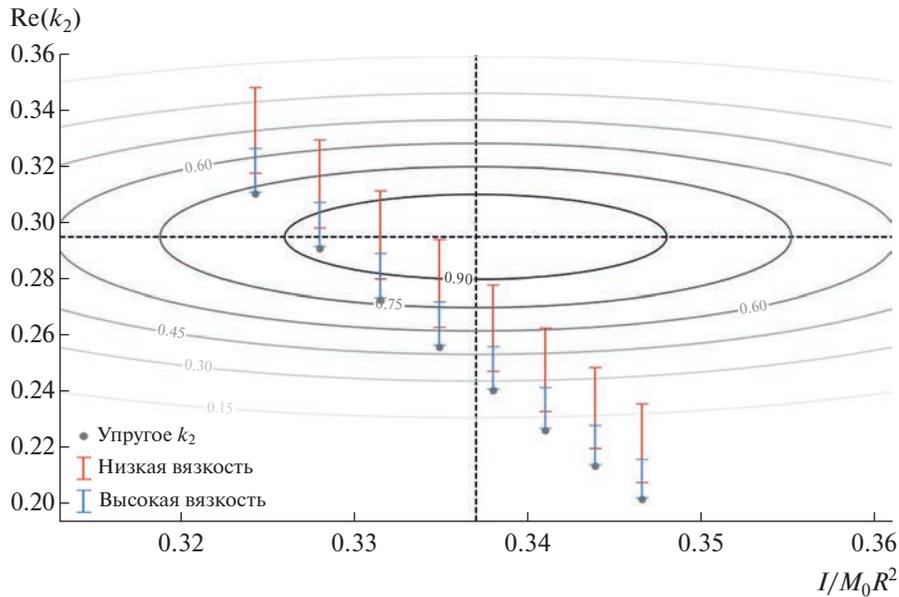


Рис. 6. Безразмерный момент инерции I/M_0R^2 и число Лява k_2 (для упругих моделей и неупругих моделей с высокой и низкой вязкостью). Пунктирные линии отмечают $I/M_0R^2 = 0.337$ и $k_2 = 0.295$. Сплошные линии показывают вероятность моделей.

где G – гравитационная постоянная, φ – широта, V_0 – гравитационный потенциал на невозмущенной поверхности.

Максимальное радиальное смещение u_{\max} поверхности тогда равно

$$u_{\max} = \frac{3}{2} h_2 R \frac{m_2}{m_1} \left(\frac{R}{d} \right)^3. \quad (7)$$

На рис. 5б для модельных чисел Лява h_2 с учетом неупругости приведено соответствующее радиальное смещение поверхности Венеры из-за приливного воздействия u_{\max} в сантиметрах. Значения h_2 находятся в интервале 0.4–0.75, что соответствует радиальному смещению поверхности на 25–50 см. Согласно (Cascioli и др., 2021), миссия VERITAS планирует измерить радиальное смещение поверхности Венеры с точностью до ~10 см. Это небольшая точность, однако измерение h_2 с такой точностью сможет наложить ограничение на распределение параметров в недрах Венеры.

Приливный сдвиг фазы

Из-за неупругости недр планеты деформация ее фигуры при приливном взаимодействии отстает или опережает на некоторый угол линию, соединяющую центры двух тел: планеты и тела, вызывающего приливное воздействие. Угол запаздывания приливного горба (или сдвиг фазы) в радианах определяется как

$$\varepsilon \approx 1/2Q = \frac{\text{Im}(k_2)}{2|k_2|} \quad \text{или} \quad \varepsilon \approx \frac{\text{Im}(h_2)}{2|h_2|}, \quad (8)$$

где Q – добротность планеты.

Таким образом, величина угла запаздывания приливного горба может быть использована для определения вязкости планеты: чем больше угол запаздывания, тем материал менее вязкий, выше значения числа Лява и больше величина деформации. Модельные значения угла запаздывания для рассмотренных моделей приведены на рис. 7. Два набора моделей отличаются по значению вязкости на два порядка, и их можно различить по измерению угла запаздывания. Разница между углами запаздывания для k_2 и h_2 мала по сравнению с разбросом, вызванным неопределенностью параметра Андраде α . Угол запаздывания для моделей с высокой вязкостью примерно в два раза меньше, чем для моделей с низкой вязкостью. Наблюдается тенденция уменьшения угла запаздывания при переходе от моделей с маленьким ядром к моделям с большим ядром.

Согласно (Rosenblatt и др., 2021; Cascioli и др., 2021), в миссиях EnVision и VERITAS в конце 20-х–начале 30-х годов, угол запаздывания будет измерен с точностью до ~0.1°. Это поможет определить среднюю вязкость мантии Венеры с точностью до порядка величины. Если сдвиг фазы окажется выше 0.9°, то вязкость мантии низкая, а если окажется ниже 0.4°, то вязкость высокая.

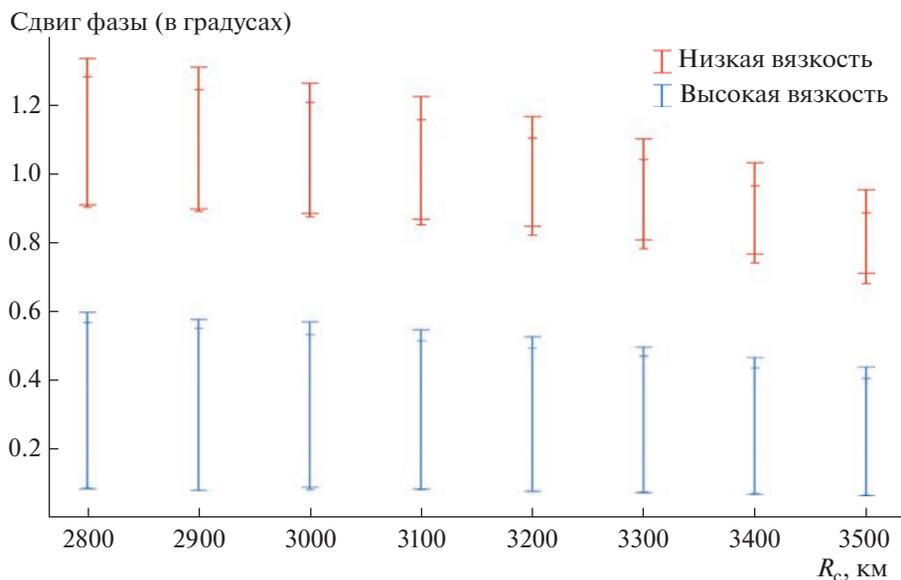


Рис. 7. Угол запаздывания приливного горба (сдвиг фазы) ϵ в градусах для моделей внутреннего строения Венеры с высокой и низкой вязкостью в зависимости от радиуса ядра R_c .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Широкая полоса допустимых значений k_2 , неопределенность момента инерции и отсутствие измерений диссипативного фактора приводят к тому, что в настоящее время нельзя точно определить радиус ядра, состав мантии и профиль температуры Венеры. В данной работе на основе модели Земли PREM построены 72 модели внутреннего строения Венеры, в которых варьируются толщина коры от 30 до 70 км, радиус ядра от 2800 до 3500 км. Рассмотрены случаи низкой, средней и высокой плотности вещества в мантии и ядре по сравнению с составом базовой модели. Для модели (30, 1.01, 3100) приведены профили давления, плотности, скоростей сейсмических волн, упругих модулей и гравитационного ускорения. Анализ полученных результатов и их сравнение с экспериментальными данными позволили сделать некоторые выводы о мантии и ядре Венеры.

Давление в центре планеты значительно меньше (на десятки ГПа), чем давление на границе внутреннего ядра Земли. Один из важных выводов состоит в том, что присутствие твердого внутреннего ядра для Венеры маловероятно и возможно только в случае, если ядро Венеры содержит значительно меньше легких элементов по сравнению с ядром Земли.

К сожалению, точность измерения момента инерции 0.337 ± 0.024 (Margot и др., 2021) пока не достаточно высока, чтобы наложить сильные ограничения на модель внутреннего строения Венеры. Для всех рассчитанных моделей значения момента инерции лежат в интервале от 0.323 до

0.347, что согласуется с измеренным значением. Показано, что без учета неупругости недр получаются заниженные модельные значения приливного числа Лява k_2 . Для описания неупругости недр Венеры была принята реологическая модель Андраде. При этом числа Лява становятся комплексными величинами и их значения увеличиваются по сравнению с упругими значениями. В моделях с высокой вязкостью мантийного вещества, это различие составляет более 7%, а в моделях с низкой вязкостью — 17%. Представления о строении Венеры сильно зависят от того, какой из рассмотренных случаев имеет место.

Совместный анализ модельных значений момента инерции и вязкоупругого числа Лява k_2 позволяет сделать следующие выводы: маловероятны модели Венеры с радиусом ядра меньше 3000 км; если вязкость мантии высокая, то радиус ядра лежит в интервале 3200–3500 км; если вязкость мантии низкая, то радиус ядра 3100–3400 км.

Из-за большой погрешности в измерениях момента инерции и числа Лява k_2 пока нельзя провести выбор между моделями с радиусом ядра 3100 и 3500 км. Также помехой в уточнении радиуса служит неопределенность параметра Андраде α в реологической модели поведения недр.

Рассчитан угол запаздывания приливного горба для построенных моделей. Его значение пока не измерено, но если оно окажется выше 0.9° , то можно уверенно говорить о достаточно низкой вязкости мантии Венеры (по сравнению с Землей); если ниже 0.4° — вязкость мантии высокая. Оценка вязкости, в свою очередь, предоставляет

ценную информацию о распределении температуры в недрах Венеры.

Создатели космических аппаратов VERITAS и EnVision обещают предоставить очень точные измерения момента инерции (1.4%), числа Лява (0.3%) и угла запаздывания приливного горба (0.1°) (Cascioli и др., 2021; Rosenblatt и др., 2021), с помощью которых можно будет провести довольно точные оценки радиуса ядра и средней вязкости мантии. Это поможет полностью охарактеризовать внутреннее строение Венеры и, тем самым, больше узнать об эволюции “близнеца” Земли.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гудкова Т.В., Жарков В.Н. Модели внутреннего строения землеподобной Венеры // *Астрон. вестн.* 2020. Т. 54. № 1. С. 24–32. (Gudkova T.V., Zharkov V.N. Models of the internal structure of the Earth-like Venus // *Sol. Syst. Res.* 2020. V. 54. № 1. P. 20–27.)
- Жарков В.Н. Физика земных недр. М.: ОООНаука и образование, 2012. 386 с.
- Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. Элементарное введение в планетную и спутниковую геофизику. М.: ООО Наука и образование, 2013. 414 с.
- Жарков В.Н., Трубицын В.П. Физика планетных недр. М.: Наука, 1980. 448 с.
- Жарков В.Н., Засурский И.Я. Физическая модель Венеры // *Астрон. вестн.* 1982. Т. 16. С. 18–28. (Zharkov V.N., Zaslurskii I.Ya. A physical model of Venus // *Sol. Syst. Res.* 1982. V. 16. P. 14–22.)
- Жарков В.Н., Гудкова Т.В. О параметрах землеподобной модели Венеры // *Астрон. вестн.* 2019. Т. 53. № 1. С. 3–6. (Zharkov V.N., Gudkova T.V. On parameters of the Earth-like model of Venus // *Sol. Syst. Res.* 2019. V. 53. P. 1–4.)
- Козловская С.В. Внутреннее строение Венеры и содержание железа в планетах земной группы // *Астрон. вестн.* 1982. Т. 16. № 1. С. 3–17. (Kozlovskaya S.V. The internal structure of Venus and the iron content in the terrestrial planets // *Sol. Syst. Res.* 1982. V. 16. № 1. P. 1–14.)
- Молоденский М.С. Гравитационное поле, фигура и внутреннее строение Земли. М.: Наука, 2001. 569 с.
- Aitta A. Venus' internal structure, temperature and core composition // *Icarus.* 2012. V. 218. P. 967–974.
- Alterman Z., Jarosch H., Pekeris C.L. Oscillations of the Earth // *Proc. Roy. Soc. London. Ser. A: Math. and Phys. Sci.* 1959. V. 252. № 1268. P. 80–95.
- Armann M., Tackley P. Simulating the thermochemical magmatic and tectonic evolution of Venus' mantle and lithosphere: Two-dimensional models // *J. Geophys. Res.: Planets.* 2012. V. 117. id. E12003. <https://doi.org/10.1029/2012JE004231>.
- Bagheri A., Efroimsky M., Castillo-Rogez J., Goossens S., Plesa A.-C., Rambaux N., Walterová M., Khan A., Giardini D. Tidal insights into rocky and icy bodies: An introduction and overview // *Adv. Geophys.* 2022. V. 63. P. 231–320.
- Biersen C.J., Nimmo F. A test for Io's magma ocean: Modeling, tidal dissipation with a partially molten mantle // *J. Geophys. Res.: Planets.* 2016. V. 121. № 11. P. 2211–2224.
- Bills B.G., Currey D.R., Marshall G.A. Viscosity estimates for the crust and upper mantle from patterns of lacustrine shore line deformation in the eastern great basin // *J. Geophys. Res.: Solid Earth.* 1994. V. 99. № B11. P. 22059–22086.
- Cascioli G., Hensley S., De Marchi F., Breuer D., Durante D., Racioppa P., Iess L., Mazarico E., Smrekar S.E. The determination of the rotational state and interior structure of Venus with VERITAS // *Planet. Sci. J.* 2021. V. 2. P. 220–231.
- Castillo-Rogez J.C., Efroimsky M., Lainey V. The tidal history of Japetus: Spin dynamics in the light of a refined dissipation model // *J. Geophys. Res.: Planets.* 2011. V. 116. id. E9.
- Čížková H., van den Berg A.P., Spakman W., Matyska C. The viscosity of Earth's lower mantle inferred sinking speed of subducted lithosphere // *Phys. Earth and Planet. Inter.* 2012. V. 200. P. 56–62.
- Dumoulin C., Tobie G., Verhoeven O., Rambaux N. Tidal constraints on the interior of Venus // *J. Geophys. Res.: Planets.* 2017. V. 122. № 6. P. 1338–1352.
- Dziewonski A.M., Hales A.L., Lapwond E.R. Parametrically simple Earth models consistent with geophysical data // *Phys. Earth and Planet. Inter.* 1975. V. 10. P. 12–48.
- Dziewonski A.M., Anderson D.L. Preliminary reference earth model // *Phys. Earth and Planet. Inter.* 1981. V. 25. № 4. P. 297–356.
- Gribb T.T., Cooper R.F. Low-frequency shear attenuation in polycrystalline olivine: Grain boundary diffusion and the physical significance of the Andrade model for viscoelastic rheology // *J. Geophys. Res.: Solid Earth.* 1998. V. 103. № B11. P. 27267–27279.
- Harig C., Zhong S., Simons F.J. Constraints on upper mantle viscosity from the flow-induced pressure gradient across the Australian continental keel // *Geochem., Geophys., Geosyst.* 2010. V. 11. id. Q06004. <https://doi.org/10.1029/2010GC00303>
- Jackson I. Properties of rock and minerals—physical origins of anelasticity and attenuation in rock // *Treatise on Geophysics (Second Edition)*. Amsterdam: Elsevier, 2015. V. 2. P. 539–571.
- Jackson I., Faul U.H. Grain size-sensitive viscoelastic relaxation in olivine: Towards a robust laboratory-based model for seismological applications // *Phys. Earth and Planet Inter.* 2010. V. 183. P. 151–164.
- Jiménez-Díaz A., Ruiz J., Kirby J.F., Romeo I., Tejero R., Capote R. Lithospheric structure of Venus from gravity and topography // *Icarus.* 2015. V. 260. P. 215–231.
- Konopliv A.S., Yoder C.F. Venusian k_2 tidal love number from Magellan and PRO tracking data // *Geophys. Res. Lett.* 1996. V. 23. № 14. P. 1857–1860.
- Love A.E.H. The yielding of the Earth to disturbing forces // *Proc. Roy. Soc. London. Ser. A. Containing Papers of*

- a Mathematical and Physical Character. 1909. V. 82. № 551. P. 73–88.
- Margot J.-L., Campbell D.B., Giorgini J.D., Jao J. S., Snedeker L.G., Ghigo F.D., Bonsall A.* Spin state and moment of inertia of Venus // *Nature Astronomy*. 2021. V. 5. № 7. P.676–683.
- Michel A., Boy J.P.* Viscoelastic love numbers and long-period geophysical effects // *Geophys. J. Intern.* 2022. V. 228.№ 2. P. 1191–1212.
- Mocquet A., Rosenblatt P., Dehant V., Verhoeven O.* The deep interior of Venus, Mars, and the Earth: A brief review and the need for planetary surface-based Measurements // *Planet. and Space Sci.* 2011. V. 59. P. 1048–1061.
- O'Rourke J.G., Korenaga J.* Thermal evolution of Venus with argon degassing // *Icarus*. 2015. V. 260. P. 128–140.
- O'Rourke J.G., Wilson C. F., Borrelli M.E., Byrne P.K., Dumoulin C., Ghail R., Gulcher A.J.P., Jacobson S.A., Korablev O., Spohn T., Way M.J., Weller M., Westall F.* Venus, the Planet: Introduction to the evolution of Earth's sister planet // *Space Sci. Rev.* 2023. V. 219. id. 10.
- Peltier W.R.* The impulse response of a Maxwell Earth // *Rev. Geophys.* 1974. V. 12. № 4. P.649–669.
- Renaud J.P., Henning W.G.* Increased tidal dissipation using advanced rheological models: implications for Io and tidally active exoplanets // *Astrophys. J.* 2018. V. 857. № 2. id.98.
- Rosenblatt P., Dumoulin C., Marty J.-C., Genova A.* Determination of Venus' interior structure with EnVision // *Remote Sens.* 2021. V. 13. id. 1624.
- Shah O., Helled R., Alibert Y., Mezger K.* Possible chemical composition and interior structure models of Venus inferred from numerical modeling // *Astrophys. J.* 2022. V. 926. id. 217 (20 p.)
- Steinberger B., Werner S., Torsvik T.* Deep versus shallow origin of gravity anomalies, topography and volcanism on Earth, Venus and Mars // *Icarus*. 2010. V. 207. P. 564–577.
- Xiao C., Li F., Yan J.-G., Hao W.-F., Harada Y., Ye M., Barriot J.-P.* Inversion of Venus internal structure based on geodetic data // *Res. Astron. and Astrophys.* 2020. V. 20. № 8. id. 127 (15 p.)
- Yang A., Huang J., Wei D.* Separation of dynamic and isostatic components of the Venusian gravity and topography and determination of the crustal thickness of Venus // *Planet. and Space. Sci.* 2016. V. 129. P. 24–31.
- Yaolin S.H.I., Jianling C.A.O.* Lithosphere effective viscosity of continental China // *Earth Sci. Frontiers*. 2008. V. 15. № 3. P.82–95.
- Yoder C.* Venus's free obliquity // *Icarus*.1995. V. 117. P. 250–286.
- Zharkov V.N., Kozlovskaya S.V., Zasurskii I.Ya.* Interior structure and comparative analysis of theterrestrial planets // *Adv. Space. Res.* 1981. V. 1. P. 117–129.

УДК 539.172.3:523.681

ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ МАНТИИ ЛУНЫ: СОГЛАСОВАНИЕ ГЕОХИМИЧЕСКИХ И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

© 2023 г. О. Л. Кусков^а, *, Е. В. Кронрод^а, В. А. Кронрод^а

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

*e-mail: ol_kuskov@mail.ru

Поступила в редакцию 24.02.2023 г.

После доработки 27.03.2023 г.

Принята к публикации 23.04.2023 г.

Существуют серьезные противоречия между геофизическими и геохимическими классами моделей химического состава и внутреннего строения Луны, связанные с оценкой распространенности основных оксидов. Поиск потенциального консенсуса между моделями осуществлен на основе совокупности геофизических и геохимических данных методом Монте-Карло по схеме марковских цепей в сочетании с методом минимизации свободной энергии Гиббса. Исследовано влияние химического состава и минералогии нескольких концептуальных моделей на внутреннее строение Луны. Рассмотрены два класса моделей химического состава — модели E с земными значениями Al_2O_3 и CaO и модели M с более высоким их содержанием, а также два класса наиболее популярных геохимических моделей, TWM (Taylor Whole Moon) и LPUM (Lunar Primitive Upper Mantle), с содержанием ~45 мас. % SiO_2 , но с различными концентрациями тугоплавких оксидов и FeO. В обоих классах E-, M-моделей мантия Луны обогащена кремнеземом (~50 мас. % SiO_2) и FeO (11–13 мас. %, Mg# 79–81) по отношению к валовому составу силикатной Земли (BSE, ~45 мас. % SiO_2 , ~8 мас. % FeO, Mg# 89). Столь высокие концентрации SiO_2 и FeO становятся определяющими факторами для понимания особенностей минеральной, скоростной и плотностной структуры мантии Луны. Для E- и M-моделей и геохимических моделей TWM и LPUM рассчитаны скорость звука и плотность стабильных фазовых ассоциаций. Для моделей типов E и M получено хорошее согласие скоростей P- и S-волн с данными сейсмического зондирования по программе КА Apollo, что поддерживает идею кремнезем-обогащенной (оливин-пироксенитовой) верхней мантии. В отличие от верхней мантии Земли, доминирующим минералом верхней мантии Луны является низкокальциевый ортопироксен, а не оливин. Напротив, скорости звука кремнезем-ненасыщенных составов как обогащенных FeO и Al_2O_3 (TWM), так и обедненных (LPUM) моделей не соответствуют сейсмическим сигнатурам. Термодинамически обоснованные ограничения на химический состав, минералогии и физические характеристики мантии на основе E- и M-моделей позволяют устранить некоторые противоречия между геохимическими и геофизическими классами моделей внутреннего строения Луны. Одновременное обогащение закисным железом и кремнеземом трудно примирить с гипотезой образования Луны в результате мегаимпакта из вещества примитивной мантии Земли или из вещества ударного тела (тел) хондритового состава. Ограничения на лунные концентрации FeO и SiO_2 , вероятно, соответствуют родительским телам некоторых ахондритов.

Ключевые слова: Луна, мантия, внутреннее строение, химический состав, мегаимпакт, ахондриты

DOI: 10.31857/S0320930X23050043, **EDN:** OKTESA

ВВЕДЕНИЕ

Система Земля–Луна занимает особое место среди тел Солнечной системы. Ее происхождение и динамическая история — одна из фундаментальных проблем естествознания, а проблема образования Луны играет центральную роль в современных сценариях формирования спутников в Солнечной системе. Ключевая для геохимии и геофизики проблема химического состава и внутреннего строения Луны важна не только сама по себе, но оказывается тесно связанной с ранней эволюцией тел Солнечной системы, причем гео-

химические данные становятся решающими в системе существующих ограничений при доказательстве любой концепции происхождения Луны. Химический (элементный и изотопный) состав силикатной порции Луны должен рассматриваться в качестве фундаментального геохимического критерия при тестировании космогонических моделей ее происхождения. Несмотря на то, что измерения показывают высокую степень изотопного сходства между лунными и земными породами, принципиальный вопрос о сходстве и/или различии состава силикатных оболочек Земли

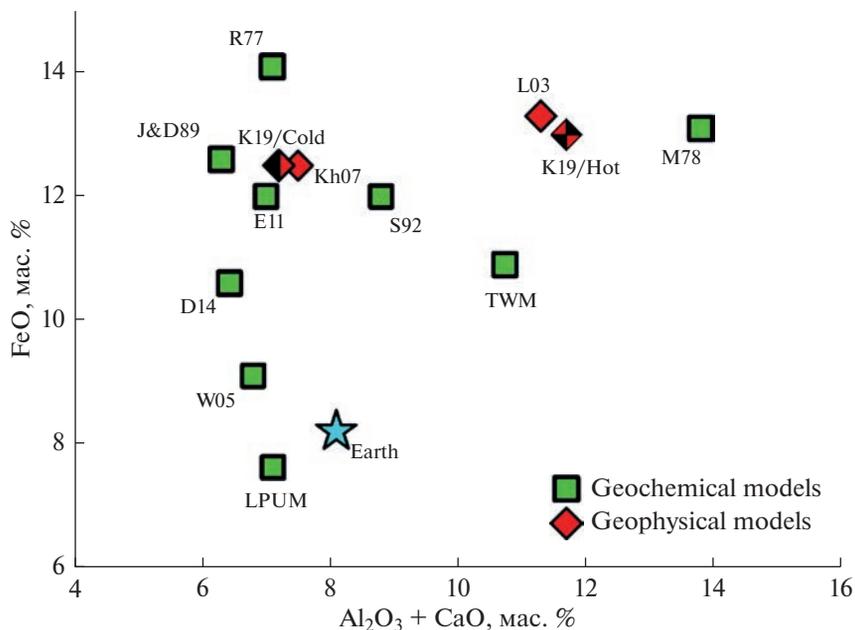


Рис. 1. Геохимические и геофизические модели валового состава Луны (кора + мантия) по литературным данным в сравнении с составом силикатной порции Земли (звезда, McDonough, Sun, 1995). R77 = Ringwood, 1977; M78 = Morgan и др., 1978; TWM = Taylor, 1982; J&D89 = Jones, Delano, 1989; S92 = Snyder и др., 1992; L03 = Lognonné и др., 2003; W05 = Warren, 2005; LPUM = Longhi, 2006; Kh07 = Khan и др., 2007; E11 = Elkins-Tanton и др., 2011; D14 = Dauphas и др., 2014; K19Cold/Hot – оценки состава для холодных (Cold) и горячих (Hot) моделей Луны (Kuskov и др., 2019).

(BSE = Bulk Silicate Earth) и ее спутника Луны (BSM = Bulk Silicate Moon) до сих пор остается предметом острой дискуссии в геохимической и геофизической литературе (Галимов, 1995; 2019; Кронрод, Кусков, 2011; Кусков и др., 2018; Lognonné и др., 2003; Warren, 2005; Wiczorek и др., 2006; Taylor и др., 2006; Longhi, 2006; Khan и др., 2006a; 2006b; Taylor, Wiczorek, 2014; Dauphas и др., 2014; Pahlevan, 2018; Kronrod и др., 2022; Yang и др., 2022).

Основные противоречия между геофизическими и геохимическими классами моделей состава Луны связаны с оценкой распространенности основных оксидов (рис. 1) – закисного железа, кремнезема и тугоплавких элементов (Al, Ca), в том числе содержания оксида алюминия, которое коррелирует с распространенностью радиоактивных элементов, что становится критически важным для моделей термической эволюции, внутреннего строения и формирования Луны (Keilm, Langseth, 1977; Warren, Rasmussen, 1987; Taylor и др., 2006; Khan и др., 2007; Laneuville и др., 2013; Кронрод и др., 2014; Dauphas и др., 2014; Dauphas, 2017; Taylor, Wiczorek, 2014; Hauri и др., 2015; Галимов, 2019; Wu и др., 2020; Schwinger, Breuer, 2022). Различия в модельных составах приводят к разным выводам не только о процессах, происходящих во время аккумуляции планет земной группы и Луны, но и о гипотезах формирования системы Земля–Луна, в том числе широко рас-

пространенной, хотя и не общепринятой ударной модели происхождения Луны в результате столкновения Земли с небесным телом размером порядка Марса, получившим название Theia (Сук, Stewart, 2012; Svetsov и др., 2012; Hartmann, 2014; Asphaug, 2014; Rufu и др., 2017; Галимов, 2019; Canup и др., 2021; Маров, Ипатов, 2023).

Следует иметь в виду, что ограничения на содержания основных оксидов (Jones, Delano, 1989; Warren, 2005) являются модельно-зависимыми в геохимическом отношении, поскольку межэлементные отношения Si, Mg и Al в Луне предполагаются хондритовыми, несмотря на то, что отношения Mg/Si и Al/Si заметно различаются среди метеоритов (Jones, Palme, 2000; Taylor и др., 2006). Менее произвольный путь их определения состоит в использовании комплекса геофизических данных (Kuskov, 1997; Kuskov, Kronrod, 1998; Lognonné и др., 2003; Khan и др., 2006a, 2006b; Gagnepain-Beuneix и др., 2006; Kuskov и др., 2014). Также отмечается, что ограничения на валовые концентрации FeO (и Mg#) из совокупности геофизических свойств меньше всего зависят от модельного подхода (Jones, Palme, 2000). С другой стороны, геофизические модели Луны являются модельно-зависимыми в сейсмическом отношении – их достоверность во многом определяется интерпретацией сейсмических границ в мантии и степенью надежности сейсмологической информации (Na-

katuma, 1983; Khan и др., 2007; Weber и др., 2011; Garcia и др., 2011; 2019).

Геофизические модели Луны, основанные на математической обработке сейсмических, гравитационных и электромагнитных данных, полученных на космических аппаратах (Луна, Apollo, Clementine, Lunar Prospector, Lunar Reconnaissance Orbiter, Kaguya, Chang-E, Chandrayaan), существенно уточнили численные характеристики внутреннего строения и динамической фигуры Луны (безразмерные моменты инерции, коэффициенты упругости, скоростные и плотностные свойства), привели к уточнению значений толщины и плотности коры, обнаружению ядра и наличия частично расплавленного слоя на границе мантии с ядром. Дистанционные исследования, измерения теплового потока, инверсия объемных волн и долгопериодных данных электромагнитного зондирования в сочетании с расчетами фазовых равновесий позволяют построить геофизические модели внутреннего строения Луны (Keihm, Langseth, 1977; Nakamura, 1983; Hood, Jones, 1987; Mueller и др., 1988; Lognonné и др., 2003; Khan и др., 2006a; 2006b; Gagnepain-Beyneix и др., 2006; Laneuville и др., 2013; Гудкова, Раевский, 2013; Karato, 2013; Williams и др., 2001; 2014; Weber и др., 2011; Wiczorek и др., 2013; Garcia и др., 2011; 2019; Matsumoto и др., 2015; Schwinger, Breuer, 2022), но дают лишь косвенную информацию о степени дифференциации Луны, физических свойствах и химии ядра, термальном состоянии, химическом и минеральном составе мантии.

Геохимические модели, основанные на петрологических экспериментах, изотопной систематике, анализе стекол, лунных пород и метеоритов, хондритовых отношениях Mg/Si, Al/Si, Mg/Al, MgO/FeO, MgO/SiO₂ и масс-балансовых соотношениях, дают информацию о составе коры, распространенности летучих, сидерофильных и радиоактивных элементов, минералогии мантии при равновесной и/или фракционной кристаллизации лунного магматического океана (Ringwood, Essene, 1970; Jones, Delano, 1989; Snyder и др., 1992; Warren, 2005; Longhi, 2006; Wiczorek и др., 2006; Shearer и др., 2006; Taylor и др., 2006; Demidova и др., 2007; Dauphas и др., 2014; Sakai и др., 2014; Elkins-Tanton и др., 2011; Taylor, Wiczorek, 2014; Charlier и др., 2018; Elardo и др., 2011; Wu и др., 2020; Johnson и др., 2021; Jing и др., 2022; Schmidt, Kraetli, 2022), но представляют слабые ограничения на химический состав (концентрации породообразующих оксидов, играющих ключевую роль в эволюции Луны и влияющих на количество минеральных фаз — плагиоклаза, оливина, пироксенов, граната) и физические свойства мантии, равно как и в отношении ее дифференциации, связанной с глубиной магматического океана.

В геохимической литературе часто рассматриваются две предельные модели состава Луны, на которых основаны многие экспериментальные исследования (Elardo и др., 2011; Charlier и др., 2018; Johnson и др., 2021; Jing и др., 2022): модель LPUM (Lunar Primitive Upper Mantle), имеющая концентрации тугоплавких оксидов и FeO, близкие к земным (Longhi, 2006), и модель TWM (Taylor Whole Moon), обогащенная (относительно земной мантии) FeO и тугоплавкими оксидами примерно на 50% (Taylor, 1982; Taylor и др., 2006). На основе анализов морских базальтов с 16–25% FeO (здесь и далее все концентрации оксидов выражены в мас. %), содержание FeO в TWM оценивается в 11–13%. Обе модели имеют ~45% SiO₂, но по содержанию Al₂O₃ и FeO различаются в 1.5 раза (рис. 1), т.е. в отношении их распространенности нет консенсуса.

Исходя из изотопной идентичности ряда элементов (кислород, кремний, титан, хром и другие), различные авторы принимают *ad hoc*, что распространенности SiO₂ также одинаковы для Земли и Луны (Taylor, 1982; Longhi, 2006; Dauphas и др., 2014; Hauri и др., 2015). Отсутствие прямой информации о веществе недр Луны, в том числе о валовом содержании SiO₂, привело к вариациям модельных составов от обогащенных оливином (Taylor, 1982; Jones, Delano, 1989; Khan и др., 2006b; Longhi, 2006; Elkins-Tanton и др., 2011) до преимущественно пироксенитовых (Ringwood, Essene, 1970; Kuskov, 1997; Khan и др., 2006a; Prissel, Gross, 2020; Moriarty и др., 2021b). Интерпретация результатов китайской миссии Chang'E-4 позволяет говорить об обнаружении пироксенита мантийного происхождения (Hu и др., 2019; Moriarty и др., 2021a). Профили скоростей сейсмических волн в верхней мантии (Nakamura, 1983; Lognonné и др., 2003; Gagnepain-Beyneix и др., 2006) оказываются наиболее совместимыми с ортопироксен-содержащими породами (Kuskov и др., 2019). Концентрации оксидов в мантии существенно влияют на момент инерции и среднюю плотность Луны (FeO), пропорции граната (Al₂O₃), оливина и пироксена (SiO₂), сейсмические свойства мантии (FeO, Al₂O₃, SiO₂).

Противоречивые выводы в отношении распространенности основных оксидов (рис. 1) свидетельствуют о необходимости дальнейших исследований и побуждают нас подойти к переоценке валового состава Луны на основе совместной инверсии интегрального набора, напрямую не связанных, гравитационных (селенофизических), сейсмических и геохимических параметров с тем, чтобы получить согласованную модель химического состава и внутреннего строения мантии Луны, т.е. модель, в известном смысле наилучшим образом удовлетворяющую всей совокупности входных параметров. Частичное ре-

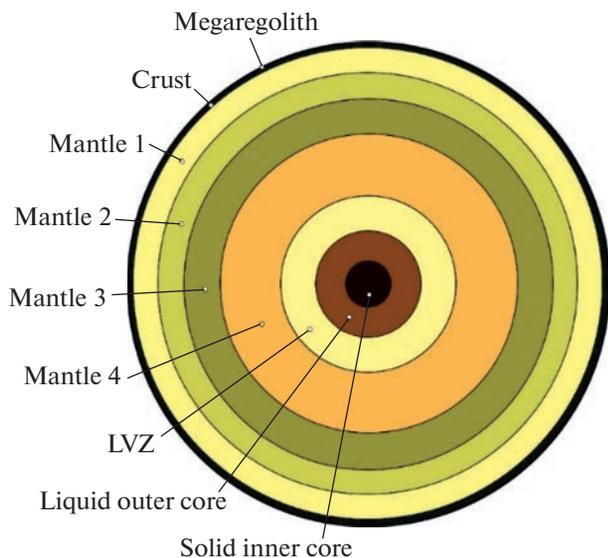


Рис. 2. Схематическая девятислойная модель Луны. Границы слоев в мантии расположены на глубинах 34 км (средняя толщина коры), 250, 500, 750 и ~1250 км (Lognonné и др., 2003; Gagnepain-Beuñeix и др., 2006; Wiczorek и др., 2013). Твердое внутреннее и жидкое внешнее ядро, перекрыто частично расплавленной зоной (LVZ), толщина которой может иметь неопределенность в несколько десятков километров (Weber и др., 2011). Двухслойная по химическому составу мантия подразделена на четыре слоя (Gagnepain-Beuñeix и др., 2006): верхняя мантия (Mantle 1 = M1, диапазон глубин 34–250 км), средняя мантия (Mantle 2 = M2, 250–500 км + Mantle 3 = M3, 500–750 км) и нижняя мантия (Mantle 4 = M4), расположенная на глубинах от 750 км до границы с LVZ, толщина нижней мантии определяется в результате решения обратной задачи.

шение этой проблемы обсуждается в наших недавних публикациях (Кусков и др., 2018; Kuskov и др., 2019; Kronrod и др., 2022). В данном исследовании мы базируемся на этих работах и ключевых выводах из ранее полученных результатов, дополненных новыми данными, приводим необходимые детали процедуры инверсии и основные положения моделей состава и термального состояния Луны. Кроме того, в связи с новой информацией по моделям внутренней структуры Луны (García и др., 2019) появилась возможность прямого сравнения физических характеристик геохимических и геофизических моделей. Основная задача состоит в том, чтобы связать полученные геохимические модели с фазовыми равновесиями для расчета физических свойств, которые можно сравнить с геофизическими наблюдениями, и на этой общей основе получить новые и существенные ограничения на валовый состав мантии Луны.

Дешифровка геофизических данных в терминах химического состава (концентраций основных оксидов) осуществляется на основе байесовского формализма с применением алгоритма Монте-

Карло по схеме марковских цепей в сочетании с методом минимизации свободной энергии Гиббса в рамках системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{TiO}_2-\text{CaO}-\text{FeO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ (NaTiCFMAS). Рассматривается вязкоупругая сферически симметричная модель Луны (рис. 2), дифференцированной на оболочки в результате частичного плавления первоначально однородного тела – модель магматического океана (LMO, Lunar Magma Ocean). Отличительная особенность постановки задачи состоит во включении геохимических параметров силикатной порции Луны в качестве наблюдаемых величин, которые, наряду с геофизическими параметрами, участвуют в расчете функции правдоподобия (Kronrod и др., 2022). Для этого использованы ограничения на валовый состав Луны (кора + мантия): модели с земными значениями CaO и Al_2O_3 (модели E) и модели с более высоким содержанием тугоплавких оксидов (модели M). На основе заданных селенофизических и сейсмических параметров исследовано влияние теплового режима на химический состав, минералогию и физические свойства мантии. С этой задачей сопряжено выявление специфических черт сходства и/или различия в составах силикатных порций Земли и ее спутника и поиск потенциального консенсуса между геофизическими и геохимическими моделями Луны. Для этого проведено сравнение минералогии и физических характеристик моделей типов E/M и двух классов концептуальных геохимических моделей TWM и LPUM с данными сейсмического зондирования по программе КА Apollo.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ, ФАКТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ, МЕТОД РЕШЕНИЯ

Модель Луны состоит из девяти слоев (Gagnepain-Beuñeix и др., 2006; Wiczorek и др., 2013; García и др., 2019; Weber и др., 2011): мегареголит, анортозитовая кора, четырехслойная мантия, переходный слой пониженных скоростей/вязкости на границе мантии с ядром (low-velocity/low-viscosity zone, LVZ), внешнее жидкое ядро и твердое внутреннее ядро (рис. 2). В соответствии с гипотезой магматического океана допускается, что процесс эволюции LMO сопровождался конвективным перемешиванием, приводящим к смешению составов верхних оболочек, в то время как нижняя примитивная мантия, соответствующая валовому составу силикатной Луны, не подвергалась дифференциации. Таким образом, рассматривается модель мантии двухслойной по химическому составу, но четырехслойной в сейсмическом отношении (Gagnepain-Beuñeix и др., 2006).

Для процедуры инверсии в качестве основных граничных условий задаются следующие селенофизические и сейсмические параметры: масса

(7.3463×10^{22} кг), средний радиус (1737.151 км), безразмерный момент инерции ($MOI = I_S = (I/MR^2) = 0.393112 \pm 0.000012$), число Лява второго порядка $k_2 = 0.02422 \pm 0.00022$ (Williams и др., 2014), коэффициенты добротности с периодом месяц $Q_m = 38 \pm 4$ и с периодом год $Q_a = 41 \pm 9$ (Williams, Voggs, 2015), а также времена пробега сейсмических волн (Lognonné и др., 2003). Ряд других параметров – состав и физические свойства коры, температура, толщины коры, слоев верхней и средней мантии – зафиксированы. В качестве геохимических условий использованы ограничения на валовый состав силикатной порции Луны: модели E с земными значениями CaO и Al₂O₃ и модели M – с более высоким содержанием тугоплавких оксидов (Kuskov и др., 2019; Kronrod и др., 2022). В полной постановке дополнительно определяется внутренняя структура центральной области Луны: толщина и физические свойства LVZ, скорости и радиусы жидкого внешнего и твердого внутреннего ядра (Кусков и др., 2021; Kronrod и др., 2022). Задача решается с помощью байесовского подхода с применением алгоритма Монте-Карло по схеме марковских цепей (Markov chain Monte Carlo, МСМС) (Khan и др., 2007; Matsumoto и др., 2015).

Времена пробега сейсмических волн, принятые по (Lognonné и др., 2003), включали 177 P-волн и

125 S-волн из 59 источников (24 глубокофокусных и 8 приповерхностных лунотрясений, 19 метеороидных и 8 искусственных воздействий). Момент инерции и масса Луны определены с высокой точностью (Williams и др., 2014). Наибольшая неопределенность содержится в сейсмических наблюдениях (Lognonné и др., 2003). Проведенные численные эксперименты (Kronrod и др., 2022) показали, что удовлетворительное согласование геохимических и сейсмических ограничений наблюдается при утроенной ошибке $\sigma_{\tau_n} = 3 \times \sigma_{\tau_nL}$ относительно данных (Lognonné и др., 2003). Для всех параметров проявляется нормальное, либо близкое к таковому, распределение. Все результаты расчетов приведены с ошибкой $\sigma_{\tau_n} = 3 \times \sigma_{\tau_nL}$. Для расчетов чисел Лява используется программный код (Kamata и др., 2015).

В дифференцированных слоях мантии концентрации основных оксидов являются параметрами модели, по ним (на каждой итерации в цепочке) рассчитываются упругие параметры (модули сжатия и сдвига) и плотность, которые, в свою очередь, участвуют в расчетах времен пробега и в конечном итоге в расчете функции правдоподобия ($LHF = L(m)$), которая в данной постановке записывается в виде (Matsumoto и др., 2015; Kronrod и др., 2022):

$$L(m) \propto \exp \left(- \frac{(d_{obs}^{mass} - d_{cal}^{mass}(m))^2}{2\sigma_{mass}^2} - \frac{(d_{obs}^{MOI} - d_{cal}^{MOI}(m))^2}{2\sigma_{MOI}^2} - \frac{(d_{obs}^{k_2} - d_{cal}^{k_2}(m))^2}{2\sigma_{k_2}^2} \right) \times$$

$$\times \exp \left(- \frac{(d_{obs}^{Q_a} - d_{cal}^{Q_a}(m))^2}{2\sigma_{Q_a}^2} - \frac{(d_{obs}^{Q_m} - d_{cal}^{Q_m}(m))^2}{2\sigma_{Q_m}^2} - \sum_{n=1}^{302} \frac{(d_{obs}^{\tau_n} - d_{cal}^{\tau_n}(m))^2}{2\sigma_{\tau_n}^2} \right) \times$$

$$\times \exp \left(- \frac{(d_{obs}^{Al_{bulk}} - d_{cal}^{Al_{bulk}}(m))^2}{2\sigma_{Al_{bulk}}^2} - \frac{(d_{obs}^{Fe_{bulk}} - d_{cal}^{Fe_{bulk}}(m))^2}{2\sigma_{Fe_{bulk}}^2} \right),$$

где d_{obs} , $d_{cal}(m)$, σ , τ_n обозначают наблюдаемые данные, данные, рассчитанные по модели m , погрешность наблюдаемых данных и n -е время пробега сейсмических волн, соответственно. Валовые концентрации Al₂O₃ и FeO обозначены как (Al_{bulk}) и (Fe_{bulk}).

Функция правдоподобия показывает меру отклонения теоретических значений от наблюдаемых с учетом того, что невязка между расчетными и экспериментально определенными величинами не превышает заданной погрешности. Решение для искомых параметров определяется из их апостериорного распределения. Пространство параметров опробовано с помощью 21×10^6 итераций МСМС с десятью параллельными цепочками.

Длина каждой цепочки составляет 3 млн образцов, из которых первые 30% отбрасываются при обработке. В результате решения обратной задачи получаем наиболее вероятный диапазон искомых параметров, наилучшим образом удовлетворяющих совокупности геофизических и геохимических ограничений.

Расчеты равновесных фазовых ассоциаций, химического состава фаз и физических свойств каждой зоны мантии осуществляются методом минимизации свободной энергии Гиббса с учетом уравнения состояния Ми–Грюнайзена–Дебая в рамках системы NaTiCFMAS, детально изложенного в (Kuskov и др., 1989, 2014; Кусков и др., 2011). В качестве независимых компонен-

тов приняты оксиды в сухой системе, образующие фазы постоянного и переменного состава: α - β -кварц, коэсит, минералы группы Al_2SiO_5 , плагиоклаз, железо-магнезиальные оливин (Ol), шпинель (Sp) и ильменит (Ilm) – бинарные растворы, гранат (Grt, пироп-альмандин-гроссуляр), ортопироксен (Orx, 5-компонентный раствор) и клинопироксен (Crx, 6-компонентный раствор, включающий жадеитовый минал). Рассматривается сухая мантия (Hu и др., 2021), причем предполагается, что двухвалентное железо является преобладающей формой железа в мантии Луны, поскольку для восстановительных условий лунных недр фугитивность кислорода близка или ниже буфера железо-вюстит (Wieczorek и др., 2006). При заданных P - T условиях результаты расчета содержат самосогласованную информацию о фазовых ассоциациях (минеральных фазах, их соотношениях и индивидуальных химических составах), плотности, модулях сжатия и сдвига, скоростях P - и S -волн. Для фиксированного химического состава влияние на плотность и обе скорости изменение температуры на $\pm 100^\circ C$ не превышает ± 0.02 г/см³, ± 0.07 км/с для V_p и ± 0.04 км/с для V_s . Упругие свойства оцениваются с помощью осреднения Фойгта–Реусса–Хилла. Распределение давления определяется приближенным уравнением $P = P_0 \{1 - [(R - H)/R]^2\}$, где $P_0 \sim 5$ ГПа – давление в центре Луны, $R \sim 1738$ км – радиус, H – глубина.

МОДЕЛЬ ВНУТРЕННЕГО СТРОЕНИЯ ЛУНЫ

Внутреннее строение Луны определяется термическим режимом, составом ее оболочек и магматической историей.

Кора

По геологическим данным предполагается, что лунная кора сложена в основном материковыми породами, а доля морских базальтов невелика. В ранних работах средняя толщина коры в местах посадки КА Apollo-12, -14, -16 с учетом гравиметрических и топографических данных оценивалась около 60, 55 км на видимой и 67 км на невидимой стороне (Nakamura, 1983; Neumann и др., 1996; Wieczorek и др., 2006). В связи с усовершенствованием методов анализа сейсмической информации, полученной на КА Apollo, и появлением новых данных, полученных на КА GRAIL, по гравитационному полю и топографии Луны появились более надежные оценки мощности и плотности коры (Lognonné и др., 2003; Wieczorek и др., 2013), согласно которым средняя толщина анортозитовой коры может варьироваться в пределах 34–43 км. Уменьшение толщины коры в 1.5–2 раза подразумевает и одновре-

менное уменьшение валового содержания оксида алюминия в Луне, что дает дополнительную аргументацию сторонникам одинаковой распространенности тугоплавких элементов в Луне и Земле (Longhi, 2006; Dauphas и др., 2014). Содержание Al_2O_3 составляет 28–32% для верхней коры, 25–29% для нижней и 18–25% для самого нижнего слоя мафической коры (Wieczorek и др., 2006; Taylor, Wieczorek, 2014), что близко к оценке 27% Al_2O_3 для всей коры и результатам определения содержания Al_2O_3 в лунных метеоритах (Demidova и др., 2007). Здесь принято, что кора состоит из слоя мегареолита толщиной 1 км и собственно коры толщиной 34 км. В мегареолите и коре средние величины сейсмических скоростей приняты по Weber и др. (2011).

Модели магматического океана

Часто предполагается, что формирование Луны происходило при аккреции материала, выброшенного во время гигантского столкновения крупного тела (или тел) с протоземлей (Asphaug, 2014; Canup и др., 2021), в результате которого на заключительной стадии аккреции внешний слой Луны был расплавлен из-за выделения большого количества тепла. Вопрос о степени плавления остается одним из ключевых в отношении термальной и магматической эволюции Луны. Ранняя дифференциация с выделением анортозитовой коры толщиной около 40 км и возраст пород привели к гипотезе широкомасштабного плавления и послужили основой модели магматического океана, под которым обычно понимается внешняя оболочка толщиной не менее нескольких сотен километров (Wieczorek и др., 2006; Shearer и др., 2006; Elkins-Tanton и др., 2011; Longhi, 2006). Комплементарность спектров редкоземельных элементов в морских и материковых породах считается надежным подтверждением модели магматического океана (Demidova и др., 2007). Оценки толщины LMO, основанные на физико-химических моделях и геофизической информации, охватывают интервал глубин от верхних ~ 500 км до частичного (600–1000 км) или полного плавления спутника (Solomon, 1986; Kirk, Stevenson, 1989; Snyder и др., 1992; Shearer и др., 2006; Elkins-Tanton и др., 2011; Elardo и др., 2011; Sakai и др., 2014; Charlier и др., 2018; Maurice и др., 2020). Это один из основных нерешенных вопросов магматической эволюции Луны, ибо от ответа на него зависит состав мантии и существование нижней примитивной мантии.

Концепция LMO является ключевым элементом для обобщенного понимания магматических процессов, которые могут быть повсеместными в эволюции планет земной группы (Wieczorek и др., 2006; Shearer и др., 2006; Moriarty и др., 2021a). Кристаллизация LMO привела к образованию

последовательности кумулятивных слоев, сложенных различными минералогическими ассоциациями, и сопровождалась образованием легкой анортозитовой коры, под которой находился тонкий слой Ti-обогащенных кумулатов, а на больших глубинах — мощный слой пироксен-оливиновых кумулатов. Предполагается, что в определенных условиях в этих слоях возникает инверсия плотности. В результате происходит общемантийный овертон (overtorn), обусловленный кристаллизацией плотных Ti-обогащенных кумулатов (Snyder и др., 1992; Hess, Parmentier, 1995; Elkins-Tanton и др., 2011). Детали этого процесса находятся в стадии обсуждения.

Независимо от начальной глубины, кристаллизация LMO в течение сотен миллионов лет привела к дифференциации силикатной порции Луны (Elkins-Tanton и др., 2011; Maurice и др., 2020). Глубины LMO порядка 500 км хорошо согласуются с экспериментальными данными по кристаллизации лунных базальтов и пикритовых стекол (Ringwood, Essene, 1970), в то время как глубины менее 400 км не находят подтверждения с геохимических позиций, поскольку при валовом содержании Al_2O_3 в Луне около 4–6% меньшая глубина проплавления не в состоянии обеспечить наблюдаемое содержание Al_2O_3 (~27%) в коре (Elkins-Tanton и др., 2011). В ряде исследований существование глобального разрыва на глубине 500 км (Nakamura, 1983) поставлено под сомнение (Lognonné и др., 2003; Khan и др., 2007). С другой стороны, наличие LMO толщиной более 700–800 км привело бы к образованию слишком толстой коры (Elkins-Tanton и др., 2011). В работе (Solomon, 1986) на основе анализа термоупругих напряжений показано отсутствие признаков крупномасштабного расширения или сжатия Луны за последние 4 млрд лет, что не согласуется с концепцией обширного плавления. В работах по кристаллизации силикатных расплавов (Charlier и др., 2018) и изменению объемных эффектов при дифференциации Луны (Kirk, Stevenson, 1989) глубина магматического океана оценивается в 600 км. Другие авторы, исследуя схему термохимической эволюции конвектирующего магматического океана, увеличивают глубину проплавления до 800 км (Hess, Parmentier, 1995) и 1000 км (Elkins-Tanton и др., 2011). С другой стороны, эксперименты по металл-силикатному распределению сидерофильных элементов, моделирующие формирование ядра, предполагают обеднение мантии Ni и Co, что требует достижения экстремальных температур (>2600 K) и приводит к модели полностью расплавленной Луны в результате гигантского удара (Steenstra и др., 2020). Хотя модели глобального LMO не исключены (Elardo и др., 2011), имеющиеся данные по тектонической активности Луны противоречат полному плавлению Луны (Solomon, 1986; Kirk, Stevenson,

1989; Watters и др., 2012) и предполагают наличие недифференцированной нижней мантии, что согласуется с петролого-геофизической информацией (Lognonné, 2005; Gagnepain-Beyneix и др., 2006; Elkins-Tanton и др., 2011; Charlier и др., 2018), в соответствии с которой толщина LMO составляет 700–800 км, а на больших глубинах находится недифференцированная нижняя (первичная) мантия, не затронутая процессами частичного плавления.

Обработка экспериментов, выполненных на КА Apollo, допускает зональное строение Луны с границей кора-мантия, промежуточными границами на глубинах ~250 и 500 км, а также существование разрыва на глубине около 750 км, где происходит резкое изменение скоростей сейсмических волн (Lognonné, 2005; Gagnepain-Beyneix и др., 2006). Можно полагать, что граница на глубине 750 км маркирует подошву LMO, отражающую переход от кумулатов к недифференцированной примитивной мантии, не затронутой процессами частичного плавления. В контексте парадигмы LMO структура кумулата, минералогия и физические свойства мантии во многом определяются химическим составом силикатной порции Луны, глубиной магматического океана и тепловым режимом.

Мантия

Поскольку образцы глубинного вещества Луны отсутствуют, то информация о составе и структуре мантии может быть получена только из косвенных источников, таких как анализ базальтов и вулканических стекол, а также на основе совокупности геофизических данных. Сейсмические эксперименты на КА Apollo и петрологические модели, не всегда равнозначные по детальности и часто взаимно не согласованные, допускают зональное строение мантии и указывают на стратификацию Луны по минеральному составу, что обычно связывают с затвердеванием LMO (Shearer и др., 2006; Elkins-Tanton и др., 2011; Elardo и др., 2011; Charlier и др., 2018; Johnson и др., 2021; Jing и др., 2022).

Концепция LMO использована здесь в качестве дополнительного петрологического ограничения на состав мантии в виде масс-балансовых соотношений для концентраций основных оксидов (см. уравнение (2)). Предполагается, что состав нижней мантии, не затронутой процессами частичного плавления, должен быть идентичен современному составу равномерно перемешанных вышележащих оболочек (коры, верхней и средней мантии), образовавшихся в результате дифференциации LMO вплоть до глубины ~750 км, которая соответствует сейсмическому разрыву (Lognonné, 2005; Gagnepain-Beyneix и др., 2006), с учетом того, что толщина LMO более 700–800 км

привела бы к образованию слишком массивной коры (Elkins-Tanton и др., 2011). Эта граница, представляющая химический раздел, отражающий переход от кумулатов к недифференцированной нижней мантии, маркирует подошву LMO. Из этого следует, что состав примитивной нижней мантии, идентичный составу магматического океана, должен отражать валовый состав силикатной Луны. Дифференциация до 750 км подразумевает, что алюминий, находящийся в коре, был экстрагирован из равномерно перемешанных верхних оболочек, т.е. вошел в состав коры лишь из дифференцированной оболочки Луны.

Ранее были получены ограничения на химический состав трехслойной мантии (Kuskov и др., 2019). Однако результаты показали, что на глубинах 250–750 км составы мантийных резервуаров могут частично перекрываться. Поэтому в данном исследовании мы сосредоточились на обсуждении химически двухслойной модели мантии, сейсмически разделенной на четыре слоя (рис. 2) с фиксированными границами на глубинах 34, 250, 500 и 750 км (Gagnepain-Beuñeix и др., 2006). Заметим, однако, что фактическое положение и резкость границ остаются все еще под вопросом (Nakamura, 1983; Lognonné, 2005; Gagnepain-Beuñeix и др., 2006; Khan и др., 2007).

Подразделение мантии для моделей E и M принято следующим (рис. 2): верхняя мантия (Mantle 1, 34–250 км) и средняя мантия (Mantle 2, 250–500 км + Mantle 3, 500–750 км). Слой примитивной нижней мантии, простирающийся от подошвы LMO на глубине от 750 км до границы с LVZ, обозначен как Mantle 4. Толщина этого слоя определяется в результате решения обратной задачи. Если процесс эволюции LMO сопровождался конвективным перемешиванием, то это привело к смешению составов верхней и средней мантии, в то время как вещество нижней мантии оставалось в недифференцированном состоянии. То есть, как отмечалось выше, рассматривается модель двухслойной по химическому составу четырехслойной в сейсмическом отношении мантии. В соответствии с этим будем считать, что *a priori* неизвестный химический состав трех верхних слоев мантии, будучи одинаковым, $C_{M1} = C_{M2} = C_{M3}$ ($C(\text{Mantle 1}) = C(\text{Mantle 2}) = C(\text{Mantle 3})$), является параметром, то есть изменяется на каждой итерации в расчете.

При заданных условиях состав недифференцированной нижней мантии $C_{M4} = C(\text{Mantle 4}) = \text{BSM}$ ($C_{M1,2,3} \neq C_{M4}$), идентичный составу LMO и отражающий валовый состав BSM, параметром не является, зависит от концентраций оксидов, найденных в вышележащих оболочках (коре и трех верхних слоях мантии), и находится из масс-балансовых соотношений (2) с учетом заданных ограничений. Условия, характеризующие баланс

концентраций в системе NaTiCFMAS для модели дифференциации первоначально однородной по составу Луны на кору, верхнюю и среднюю зоны мантии относительно первичной недифференцированной мантии, записываются в виде (Kronrod, Kuskov, 2011):

$$C_{M4} = [(\rho VC)_{\text{cr}} + (\rho VC)_{M1} + (\rho VC)_{M2} + (\rho VC)_{M3}] / [(\rho V)_{\text{cr}} + (\rho V)_{M1} + (\rho V)_{M2} + (\rho V)_{M3}], \quad (2)$$

$$(C = \text{MgO, FeO, Al}_2\text{O}_3).$$

Здесь ρ , V , C – плотность, объем, концентрации оксидов (мас. %), C_{M1} , C_{M2} , C_{M3} , C_{M4} – диапазоны концентраций оксидов в системе NaTiCFMAS в слоях M1/M2/M3/M4, соответственно. Индексы cr, M1, M2 и M3 соответствуют коре, верхней мантии (M1) и двум зонам средней мантии (M2 + M3), а M4 соответствует недифференцированной нижней мантии, химический состав которой рассчитывается из (1). Концентрация SiO_2 не является параметром, поскольку система NaTiCFMAS нормируется на 100%, а $\text{CaO} \sim 0.8 \text{Al}_2\text{O}_3$.

В соответствии с постановкой задачи уравнение (2) означает, что химический состав современной нижней мантии, не затронутой процессами частичного плавления и дифференциации, и равный составу равномерно перемешанных вышележащих оболочек (коры, верхней и средней мантии), находится из условий баланса концентраций оксидов в мантийных оболочках и соответствия рассчитываемых физических свойств данным наблюдений. Скачки состава и физических свойств допускаются лишь на границах зон. В каждой зоне мантии состав, физические свойства и температура считаются постоянными и равными значениям в некоторых средних точках по глубине в сочетании с естественным требованием отсутствия инверсии плотности. Толщина нижней мантии определяется в ходе расчетов, т.е. глубина границы нижняя мантия–LVZ также является параметром.

Исходя из современного уровня знаний и геохимических противоречий между концептуальными моделями TWM и LPUM (рис. 1), модели Луны по валовому содержанию оксида алюминия ($C(\text{Al}_2\text{O}_3)$) можно разделить на два типа (Kuskov и др., 2019; Kronrod и др., 2022): модели E (земного типа) $3.5 \leq C_E(\text{Al}_2\text{O}_3) \leq 4.5\%$ ($\text{Al}_2\text{O}_3 \sim 1 \times \text{BSE}$) и модели M, обогащенные тугоплавкими оксидами $4.5 \leq C_M(\text{Al}_2\text{O}_3) \leq 7.7\%$ ($\text{Al}_2\text{O}_3 \sim 1\text{--}1.7 \times \text{BSE}$) по сравнению с BSE. Из рис. 1 видно, что за исключением оценки Warren, 2005; Longhi, 2006) валовое содержание FeO в Луне находится в пределах $11 \leq C(\text{FeO}) \leq 14\%$. Для обеих E- и M-моделей BSM средние значения геохимических параметров приняты в качестве наблюдаемых величин при расчете функции правдоподобия:

$$\begin{aligned} C_E(\text{Al}_2\text{O}_3) &= 4.05 \pm 0.36\%, \\ C_M(\text{Al}_2\text{O}_3) &= 5.91 \pm 0.39\%, \\ C_{E,M}(\text{FeO}) &= 12.25 \pm 1.33\%. \end{aligned} \quad (3)$$

При моделировании состава мантии потенциальные концентрации оксидов в рамках системы NaTiCFMAS задавались в интервалах (мас. %):

$$\begin{aligned} 24 \leq \text{MgO} \leq 45\%, \quad 40 \leq \text{SiO}_2 \leq 55\%, \\ 8 \leq \text{FeO} \leq 15\%, \quad 0.1 \leq \text{CaO}, \quad \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 6\%, \end{aligned} \quad (4)$$

причем концентрации Al_2O_3 и CaO связаны хондритовой зависимостью $\text{CaO} \sim 0.8 \text{Al}_2\text{O}_3$ (Ringwood, Essene, 1970), а концентрации других оксидов фиксированы на уровне 0.05% для Na_2O и 0.2% для TiO_2 (Warren, 2005; Snyder и др., 1992; Dauphas и др., 2014).

Температура

Температура — один из самых неопределенных и дискуссионных параметров лунных недр. Термические модели, основанные на измерении поверхностного теплового потока, распространности радиоактивных элементов, решении стационарной тепловой задачи, инверсии сейсмических и электромагнитных данных, показывают заметные расхождения в оценках температуры (Keiham, Langseth, 1977; Warren, Rasmussen, 1987; Khan и др., 2006а; 2006б; Karato, 2013; Laneuville и др., 2013; Кронрод и др., 2014; Kuskov и др., 2014; Kawamura и др., 2017; Garcia и др., 2019; Schwinger, Breuer, 2022), что связано с недостатком данных по распределению и мощности источников энергии в коре и мантии.

На рис. 3 при фиксированной температуре $T_{150} = 600^\circ\text{C}$ на глубине 150 км (Kuskov, Kronrod, 1998; Kuskov и др., 2014) приведены термальные профили в интервале T_1-T_5 , от самых низких температур, соответствующих холодным селенотермам T_1/T_2 , до самых высоких температур, соответствующих горячим селенотермам T_4/T_5 , со сдвигом 100–200°C, что позволяет оценить влияние вариаций температуры на скорость звука и плотность. При фиксированном составе изменение температуры от самой холодной до самой горячей селенотермы ($\Delta T = 285^\circ\text{C}$ при 3.4 ГПа/750 км) приводит к следующим изменениям параметров $V_P(T_1) - V_P(T_5) = 0.12$ км/с, $V_S(T_1) - V_S(T_5) = 0.1$ км/с и около 0.04 г/см³ для плотности. Средние температурные градиенты изменяются от ~0.41°C/км для профиля T_1 до ~0.88°C/км для профиля T_5 , что соответствует изменениям температуры на глубине 1000 км от 950 до 1350°C. Такие вариации температуры вполне примеряются с существованием глубоких лунотрясений, которые предполагают хрупкое состояние нижней мантии (Kawamura и др., 2017). Все температур-

ные профили намного ниже солидуса пироксениновой или перидотитовой мантии (Ringwood, Essene 1970; Hirschmann, 2000).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Е- и М-модели. Влияние температуры на химический состав мантии

Вероятностные распределения концентраций Al_2O_3 , FeO и MgO в моделях Е и М в двухслойной по химическому составу мантии, удовлетворяющие совокупности заданных ограничений, представлены на рис. 4 (Kronrod и др., 2022). Изображения на каждой панели показывают вариации концентраций (C) оксидов вдоль селенотерм T_1-T_5 ; в нижней мантии (Mantle 4) на глубине 1000 км диапазон температур изменяется от 950 до 1350°C (см. рис. 3). Подчеркнем, что при оценке влияния температуры на химический состав следует иметь в виду, что самые горячие селенотермы T_4-T_5 в верхней мантии и самые холодные селенотермы T_1-T_2 в нижней мантии маловероятны.

В поведении геохимических параметров есть тенденции, которые заслуживают специального обсуждения. Концентрации оксидов достаточно стабильны в мантийных резервуарах (Mantle 1–3 и Mantle 4) и зависят от теплового состояния в диапазоне T_1-T_5 с небольшим уменьшением $C(\text{FeO})$ и увеличением $C(\text{MgO})$ и $C(\text{Al}_2\text{O}_3)$ с повышением температуры. Для всех удачных моделей Е и М $C(\text{FeO})$ и $C(\text{MgO})$ в верхней и средней мантии (Mantle 1–3) и в нижней мантии (Mantle 4) достаточно близки. Наиболее высокие температуры, соответствующие селенотерме T_5 , приводят к появлению на гистограммах дополнительных пиков. В диапазоне селенотерм T_3-T_4 ($<T_5$) $C(\text{FeO})$ оценивается в $12.5 \pm 0.5\%$ и $C(\text{MgO}) \sim 28 \pm 1\%$ для моделей Е, и $11.6 \pm 0.5\%$ и $\sim 25 \pm 1\%$ для моделей М (рис. 4).

Для моделей Е с ростом температуры от холодных до горячих селенотерм вероятные вариации $C(\text{Al}_2\text{O}_3)$ в слоях Mantle 1–3 находятся в интервале от ~2.5 до ~3.5–4%, а в слое Mantle 4 от ~4 до ~5%. Аналогично, для М-моделей в слоях Mantle 1–3 $C(\text{Al}_2\text{O}_3)$ изменяются от ~4.5 до ~5%, а в нижней мантии (Mantle 4 = BSM) от ~5.5 до ~6.5%. Таким образом, из рис. 4 видна тенденция постепенного увеличения содержания Al_2O_3 в мантии Луны как с повышением температуры, так и с ростом давления — от верхней и средней мантии к нижней мантии. Однако для обоих типов моделей наблюдаются отклонения геохимических параметров от нормального распределения при $T \geq T_4 \sim 1250^\circ\text{C}$ в нижней мантии. Дальнейшее повышение температуры приводит к еще более значительному расхождению решения в виде дополнительных пиков на гистограммах концентраций

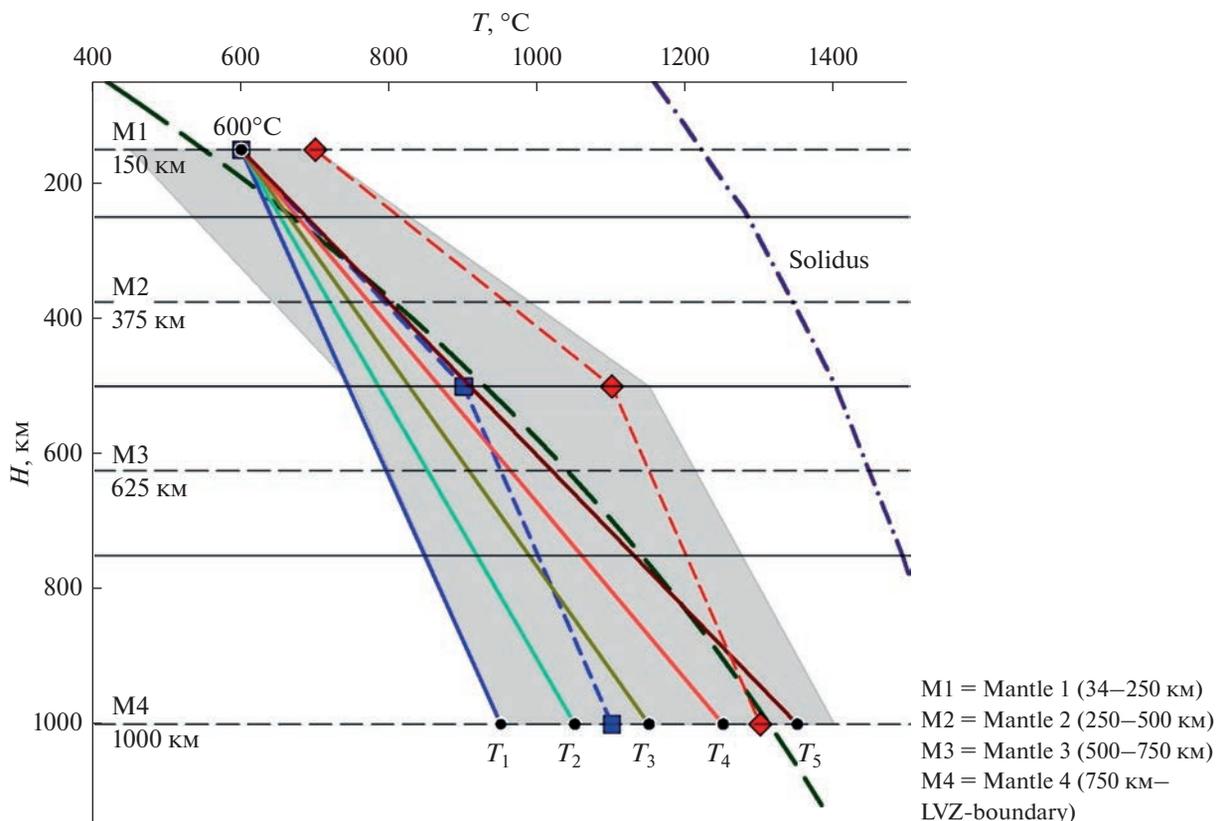


Рис. 3. Допустимые диапазоны температур в мантии Луны по сейсмическим, термическим и электромагнитным данным (Khan и др., 2006a; 2006b; Laneuville и др., 2013; Kuskov и др., 2019; Karato, 2013; Kawamura и др., 2017; Garcia и др., 2019; Kronrod и др., 2022). Линии с короткими штрихами с квадратными и ромбовидными символами – профили для холодных и горячих селенотерм (Kuskov и др., 2019). Линия с длинными штрихами – профиль температуры из работы (Кусков, Кронрод, 2009). Сплошные линии – рассматриваемые в данной работе профили температур на средних глубинах мантийных резервуаров с фиксированной $T = 600^\circ\text{C}$ в верхней мантии на глубине 150 км. Линейные профили температуры: T_1 : $T_{150\text{ км}} = 600^\circ\text{C}$, $T_{375\text{ км}} = 690^\circ\text{C}$, $T_{625\text{ км}} = 795^\circ\text{C}$, $T_{1000\text{ км}} = 950^\circ\text{C}$; T_2 : $T_{150\text{ км}} = 600^\circ\text{C}$, $T_{375\text{ км}} = 720^\circ\text{C}$, $T_{625\text{ км}} = 850^\circ\text{C}$, $T_{1000\text{ км}} = 1050^\circ\text{C}$; T_3 : $T_{150\text{ км}} = 600^\circ\text{C}$, $T_{375\text{ км}} = 745^\circ\text{C}$, $T_{625\text{ км}} = 905^\circ\text{C}$, $T_{1000\text{ км}} = 1150^\circ\text{C}$; T_4 : $T_{150\text{ км}} = 600^\circ\text{C}$, $T_{375\text{ км}} = 770^\circ\text{C}$, $T_{625\text{ км}} = 960^\circ\text{C}$, $T_{1000\text{ км}} = 1250^\circ\text{C}$; T_5 : $T_{150\text{ км}} = 600^\circ\text{C}$, $T_{375\text{ км}} = 800^\circ\text{C}$, $T_{625\text{ км}} = 1020^\circ\text{C}$, $T_{1000\text{ км}} = 1350^\circ\text{C}$. Горизонтальными сплошными линиями обозначены предполагаемые границы мантийных резервуаров на глубинах 250, 500 и 750 км (Gagnepain-Beuneix и др., 2006). Штрих-пунктирная линия – солидус перидотита по Hirschmann (2000). Остальные обозначения см. на рис. 2.

Al_2O_3 , особенно для E-моделей, тогда как для M-моделей наблюдается более равномерное распределение геохимических параметров. В предлагаемой формулировке модели Луны верхняя граница температуры в нижней мантии составляет $\sim 1200 \pm 50^\circ\text{C}$, что является промежуточной температурой между холодной и горячей моделями термального состояния Луны (рис. 3).

Основные геохимические характеристики моделей типов E и M

Все удачные модели E и M в двух химически различных слоях мантии (рис. 4) группируются вокруг 11–13% FeO, причем вне зависимости от используемого метода инверсии и входных геофизических данных (Khan и др., 2007; Кусков и др., 2018), что указывает на надежность этого

результата. Отметим, что по данным фото-геологического анализа северной части бассейна Южный полюс–Эйткен древнейшие материалы дна бассейна содержат 11–14.5 мас. % FeO (Ivanov и др., 2018). Напротив, геохимические и космохимические оценки BSM показывают широкий разброс: от 7.6% FeO (Longhi, 2006) до 13–14% FeO (Morgan и др., 1978; Taylor и др., 2006). Содержание MgO в слое Mantle 4 (= BSM) составляет 24–30% для моделей M и E, что выше, чем 22% MgO (Lognonné и др., 2003), но ниже 31–35% MgO (Кронрод, Кусков, 2011; Khan и др., 2007). Mg 79–81 совпадает с рядом геохимических и геофизических оценок (Snyder и др., 1992; Taylor и др., 2006; Khan и др., 2007; Kuskov и др., 2019), но значительно меньше Mg# 87 (Warren, 2005), позже пересмотренного до Mg# 85 (Dauphas и др., 2014).

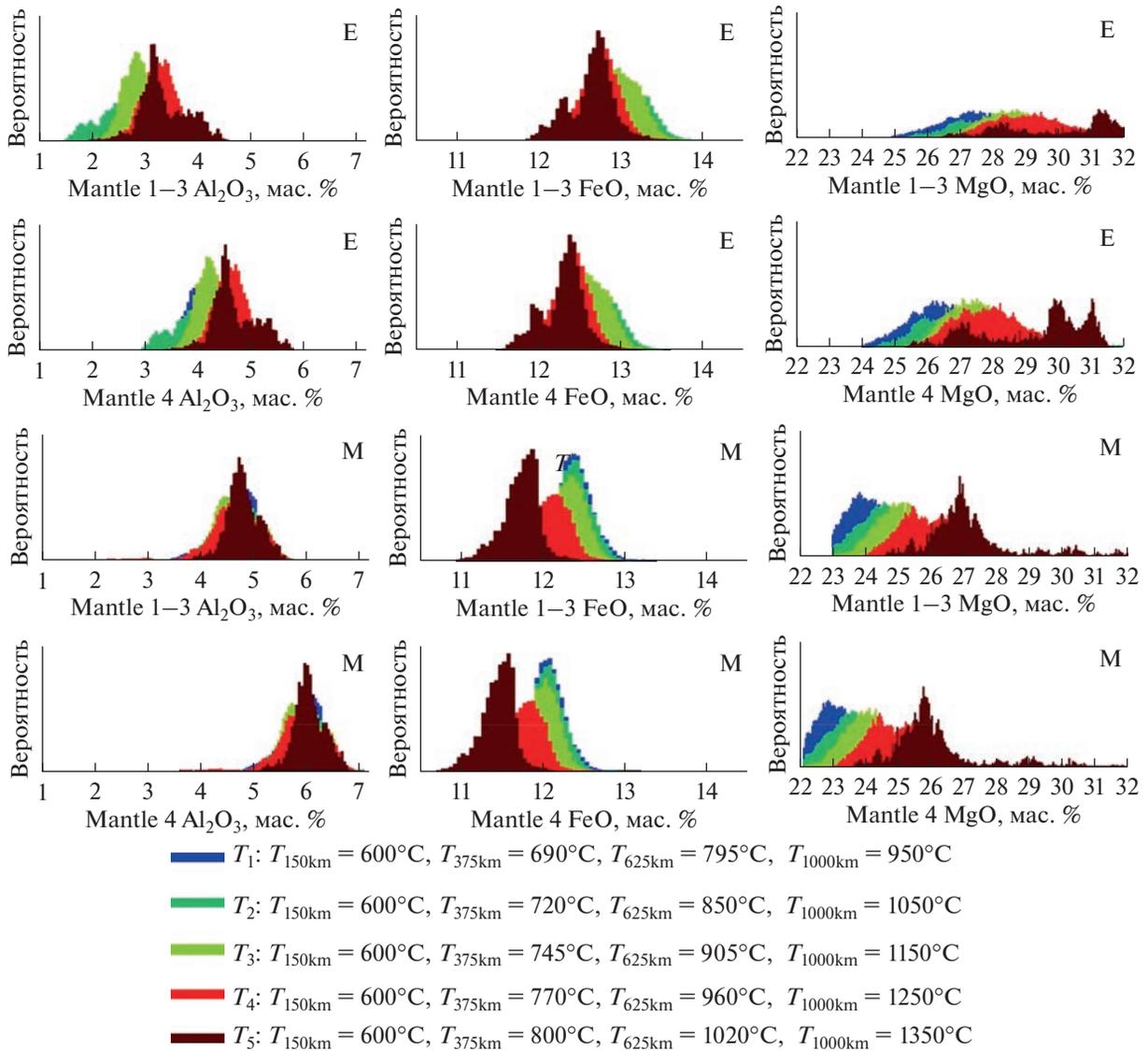


Рис 4. Апостериорная вероятность распределения геохимических параметров (концентраций Al_2O_3 , FeO , MgO) для моделей E и M вдоль селенотерм T_1 – T_5 в двухслойной по химическому составу мантии Луны, модифицировано по (Kronrod и др., 2022).

Нижняя мантия (Mantle 4 = BSM) обогащена глиноземом от $4.5 \pm 0.5\%$ (модель E) до $5.9 \pm 0.5\%$ (модель M) по сравнению с однородным составом верхней и средней мантии (рис. 4). Используя соотношение $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3 \sim 0.8$, получаем содержание $\text{CaO} \sim 3.6\%$ для модели E и 4.7% для модели M. В работе (Wu и др., 2020) на основании измерений изотопного состава кальция в лунных метеоритах содержание CaO оценивается в 4.26 – 6.48% для BSM, что соответствует модели M, но выше, чем для модели E и BSE $\sim 3.5\%$ (McDonough, Sun, 1995). Столь высокое содержание тугоплавких элементов подразумевает, что глубинная мантия содержит гранат, пироксен с низким содержанием Ca и оливин (Wu и др., 2020), что дает независи-

мое подтверждение нашим результатам. Увеличение содержания Al в нижней мантии приводит к увеличению доли граната (что согласуется с (Johnson и др., 2021)) по отношению к шпинели и ортопироксену с минеральным составом $\text{Pu}_{70}\text{Alm}_{23}\text{Gr}_7$ (модель E) и $\text{Pu}_{71}\text{Alm}_2\text{Gr}_7$ (модель M), и может достигать ~ 10 – 15% . Валовое содержание оксида алюминия для модели E составляет $\text{Al}_2\text{O}_3 \sim 1.0 \times \text{BSE}$ и $\sim 1.3 \times \text{BSE}$ для модели M (рис. 4). Глобальная инверсия геофизических данных также дает неоднозначные результаты (Khan и др., 2006a; 2006b; Кронрод, Кусков, 2011; Lognonné и др., 2003).

Довольно неожиданный результат получен в отношении наиболее распространенного оксида –

Таблица 1. Композиционные модели Луны. Валовый состав Земли (BSE) показан для сравнения

Модель	Состав							
	MgO	FeO	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	Na ₂ O	TiO ₂	Mg#
LPUM (Longhi, 2006)	38.55	7.67	3.96	3.20	46.40	0.05	0.17	90.0
TWM (Taylor, 1982)	33.00	11.00	6.15	4.60	44.85	0.09	0.31	84.0
E-модели								
E(Mantle 1–3)	30.00	13.00	3.00	2.40	51.35	0.05	0.20	80.4
M-модели								
M(Mantle 1–3)	27.00	12.50	5.00	4.00	51.25	0.05	0.20	79.4
BSE (McDonough, Sun, 1995)	38.06	8.14	4.52	3.52	45.20	0.36	0.20	89.0

Примечание: $Mg\# = 100 \times [(Mg/(Mg + Fe^{2+}))]$. $CaO/Al_2O_3 \sim 0.8$. Значения нормированы на 100 мас. %.

SiO₂. Для моделей E и M содержание SiO₂ в мантийных зонах оценивается на уровне $\geq 50\%$, что следует из рис. 4 при нормировании оксидов до 100% с учетом $CaO/Al_2O_3 \sim 0.8$. Этот результат противоречит геохимическим оценкам, согласно которым распространенность SiO₂ $\sim 45\%$ в BSM обычно предполагается такой же, как и в BSE (Ringwood, 1977; Taylor, 1982; Longhi, 2006; Dauphas и др., 2014). В следующих разделах мы обсудим этот вопрос более подробно.

Сравнительный анализ физических характеристик геохимических и геофизических моделей

Предыдущее обсуждение показывает, что существуют фундаментальные несовместимости как между геофизическими и геохимическими классами моделей внутреннего строения Луны, так и внутри обоих классов. В этом разделе мы рассмотрим принципиальный вопрос – возможен ли консенсус между геохимическими и геофизическими моделями. Для этого проведем сравнение физических характеристик моделей E и M и двух классов наиболее популярных моделей TWM (Taylor, 1982) и LPUM (Longhi, 2006) с земным содержанием SiO₂, но с концентрациями Al₂O₃ и FeO, отличающимися в 1.5 раза (табл. 1), с геофизическими моделями.

Химические составы моделей E и M (рис. 4) были выведены из совокупности гравитационных и сейсмических ограничений. Момент инерции и масса Луны определены с беспрецедентной точностью (Williams и др., 2014). Наибольшая неопределенность содержится в интерпретации данных сейсмических наблюдений (Lognonné и др., 2003). Обновленные модели были недавно предложены в работе (García и др., 2019), в которой рассмотрены три независимых метода параметризации и инверсии для определения внутренней структуры Луны на основе геодезических наблюдений и набора данных по временам пробега P- и S-волн по программе КА Apollo (Nunn

и др., 2020). В результате представлены три модели внутренней структуры Луны: G19_M1, G19_M2 и G19_M3 (García и др., 2019), которые приняты в качестве референтных моделей для сравнения с физическими характеристиками моделей E и M и LPUM и TWM (рис. 5, 6).

Расчеты показывают, что в отношении тугоплавких оксидов мантия, вероятно, стратифицирована с более высокими концентрациями Al₂O₃ и CaO в нижней мантии по сравнению с вышележащими оболочками (Kuskov и др., 2019; Kronrod и др., 2022). Однако выше отмечалось, что для обеих моделей E и M значения концентраций основных оксидов в слоях Mantle 1–3 и Mantle 4 в значительной степени перекрываются в диапазоне как холодных, T₁–T₂, так и горячих, T₃–T₅, селенотерм, характерных для различных глубин (рис. 4). Кроме того, следует иметь в виду, что сейсмические данные в нижней мантии наименее надежны. В связи с этим рассмотрим далее лишь химически гомогенные слои, которые обозначены как E_Mantle 1–3 и M_Mantle 1–3, содержание SiO₂ в которых составляет не менее 50%. Усредненные значения концентраций оксидов для моделей E и M, извлеченные из инверсий, которые следует рассматривать в качестве приближенных из всего полученного спектра (рис. 4), приведены в табл. 1, наряду с концептуальными (изохимическими) моделями TWM и LPUM.

Составы моделей E и M заметно отличаются от моделей TWM и LPUM, равно как и от модели BSE (табл. 1). Содержание MgO ниже, чем в моделях TWM/LPUM и BSE, а содержание SiO₂ выше на $\sim 5\%$. Магнезиальное число Mg# 80 согласуется с рядом геохимических и геофизических оценок (Snyder и др., 1992; Khan и др., 2006a; 2006b; Kuskov и др., 2019), но меньше, чем Mg# 84 в модели TWM и значительно меньше, чем Mg# 90 в модели LPUM и Mg# 89 в модели BSE (McDonough, Sun, 1995).

Расчитанные скорости P- и S-волн (V_P , V_S) и плотность (ρ) фазовых ассоциаций моделей E и M

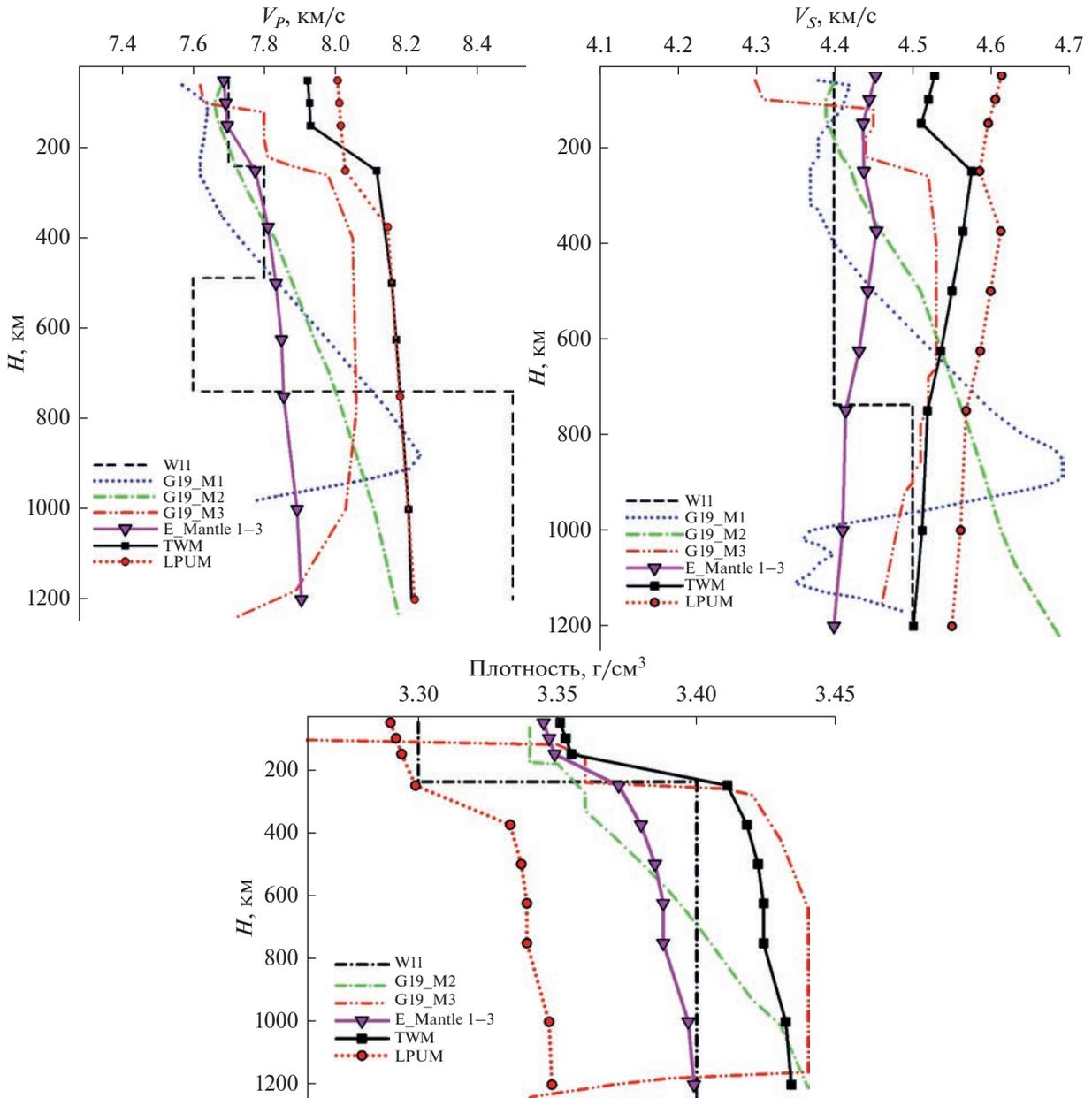


Рис. 5. Профили скоростей P - и S -волн (V_P , V_S) и плотности в мантии Луны для моделей E (E_Mantle 1–3), TWM и LPUM вдоль селенотермы T_4 в сравнении с профилями геофизических моделей (García и др., 2019): G19_M1 (пунктирная синяя линия), G19_M2 (штрих-пунктирная зеленая линия), G19_M3 (штрих-пунктир-пунктирная оранжевая линия). Штриховая черная линия – модель Weberg и др. (2011).

и LPUM и TWM сопоставлены с моделями (García и др., 2019), что позволяет дать более строгие ограничения на внутреннее строение мантии Луны. Расчеты фазового состава и физических свойств моделей вдоль температурного профиля T_4 (рис. 3), который представляет среднее между холодными и горячими селенотермами, приведены в табл. 2 и на рис. 5 и рис. 6. Селенотерма T_4 должна удовлетворять условию уменьшения градиента температуры с глубиной $(dT/dH)_{i+1} < (dT/dH)_i$, чтобы избежать инверсии плотности по глубине. Для T_4

приняты градиенты $dT/dH = 0.763^\circ\text{C}/\text{км}$ в интервале глубин до 750 км, $0.5^\circ\text{C}/\text{км}$ на глубинах 750–1000 км и $0.4^\circ\text{C}/\text{км}$ на глубинах 1000–1200 км в соответствии с анализом, согласно которому $0.40 < dT/dH < 0.60^\circ\text{C}/\text{км}$ на глубинах 750–1200 км (Kuskov и др., 2019).

Модели в основном отличаются по соотношению минеральных фаз (табл. 2). В самой верхней части мантии при $P < 1.3$ ГПа (< 250 км) и 600–700°C фазовые ассоциации моделей E и M содержат Ol, Орх, Срх, Sp и незначительное количество

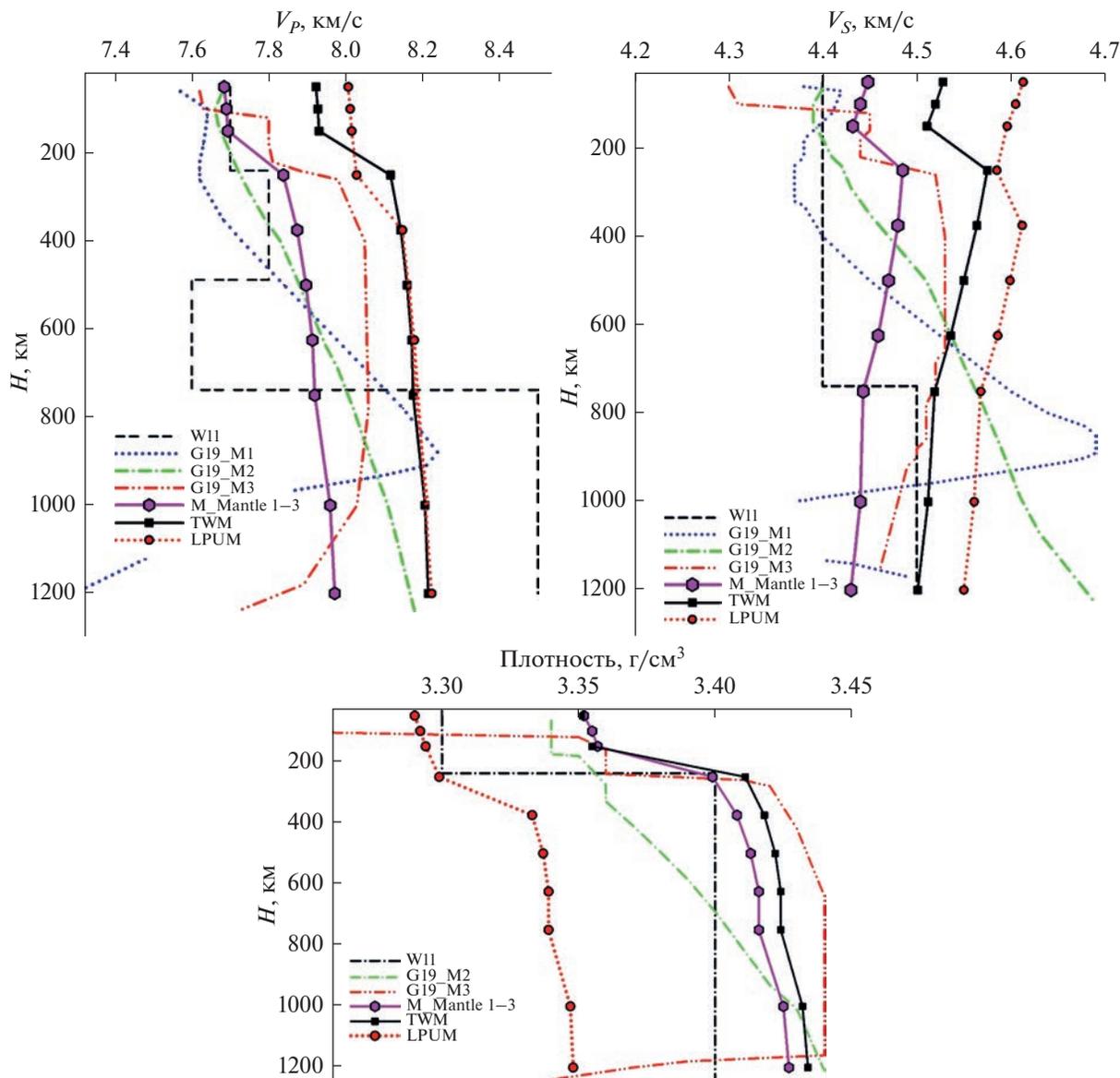


Рис. 6. Профили скоростей P - и S -волн (V_p , V_s) и плотности в мантии Луны для моделей М (M_Mantle 1–3), TWM и LPUM вдоль селенотермы T_4 в сравнении с профилями геофизических моделей (García и др., 2019): G19_M1 (пунктирная синяя линия), G19_M2 (штрих-пунктирная зеленая линия), G19_M3 (штрих-пунктир-пунктирная оранжевая линия). Штриховая черная линия – модель Weber и др. (2011).

Пм. Плагноклаз стабилен при $P < 0.3$ ГПа и температурах выше 500°C , что соответствует наблюдениям (Nazarov и др., 2011; Wittmann и др., 2018), а при более высоких давлениях плагноклаз исчезает с появлением клинопироксена. Шпинель исчезает с появлением граната при ~ 1.34 ГПа (табл. 2). На глубинах 150–300 км вдоль фазового перехода шпинель–гранат наблюдается небольшое повышение в значениях V_p , V_s и ρ (рис. 5 и рис. 6). Вариации $V_{p,s}$ на фазовом переходе шпинель–гранат зависят от содержания Al_2O_3 в петрологической модели. Увеличение содержания оксида алюминия в модели приводит к увеличению доли

граната по отношению к шпинели и ортопироксену; фазовые переходы на глубинах ниже 250–300 км не обнаружены (табл. 2).

На рис. 5 и рис. 6 приведены физические свойства моделей Е и М, TWM и LPUM вдоль селенотермы T_4 в сопоставлении с сейсмическими сигналами G19_M1/M2/M3. Можно видеть, что в верхней и средней мантии на глубинах 50–500 км скорости P - и S -волн Е- и М-моделей находятся в диапазоне скоростей (García и др., 2019). Оба модельных класса отражают сейсмические свойства богатой кремнеземом мантии с $\sim 50\%$ SiO_2 (табл. 1), основными минералами которой являются низ-

Таблица 2. Фазовый состав (мол. %) и физические свойства моделей вдоль селенотермы T_4

Состав	Модель			
	Е-модели E(Mantle 1–3)	М-модели M(Mantle 1–3)	LPUM	TWM
0.83 ГПа (~150 км)/600°C				
Ol	11.0 (Fo ₈₂)	3.2 (Fo ₈₂)	39.4 (Fo ₉₂)	32.2 (Fo ₈₈)
Orx	74.0	70.6	36.8	30.5
Срх	12.8	22.1	19.9	30.8
Sp	1.9	3.8	3.6	6.0
Gar	0	0	0	0
Ilm	0.3	0.3	0.3	0.5
ρ , г/см ³	3.349	3.357	3.294	3.355
V_P , км/с	7.696	7.694	8.016	7.931
V_S , км/с	4.437	4.432	4.596	4.511
K_S , ГПа	110.46	110.81	118.88	120.00
G , ГПа	65.92	65.94	69.58	68.27
1.34 ГПа (~250 км)/676°C				
Ol	13.6 (Fo ₈₂)	7.9 (Fo ₈₄)	39.8 (Fo ₉₂)	46.8 (Fo ₈₉)
Orx	72.1	65.5	34.9	11.3
Срх	12.0	22.0	21.9	33.9
Sp	0	0	3.1	0
Gar	2.0	4.3	0	7.4
Ilm	0.3	0.3	0.3	0.6
ρ , г/см ³	3.372	3.399	3.299	3.411
V_P , км/с	7.775	7.838	8.029	8.117
V_S , км/с	4.458	4.485	4.585	4.575
K_S , ГПа	114.48	117.64	120.24	129.52
G , ГПа	67.01	68.38	69.36	71.37
3.38 ГПа (~750 км)/1058°C				
Ol	13.8 (Fo ₈₂)	8.0 (Fo ₈₃)	48.8 (Fo ₉₂)	47.7 (Fo ₈₈)
Orx	74.9	65.5	21.2	1.3
Срх	8.5	21.2	25.2	42.2
Sp	0	0	0	0
Gar	2.5	5.0	4.5	8.2
Ilm	0.3	0.3	0.3	0.6
ρ , г/см ³	3.388	3.416	3.339	3.424
V_P , км/с	7.855	7.920	8.183	8.176
V_S , км/с	4.415	4.443	4.568	4.519
K_S , ГПа	120.95	124.38	130.66	135.67
G , ГПа	66.03	67.43	69.69	69.92

Примечание: оливин – Ol, ортопироксен – Орх, клинопироксен – Срх, гранат – Gar, шпинель – Sp, ильменит – Ilm. K_S и G – модули сжатия и сдвига.

ко-кальциевый ортопироксен (~70 мол. %, Fs_{16}) с подчиненным количеством оливина Fa_{17} (табл. 2). Такое количество SiO_2 соответствует оливин-содержащей пироксенитовой мантии (табл. 2). Скорости P - и S -волн моделей Е и М в верхней мантии близки, но с ростом давления различия возрастают из-за разного содержания граната. В обеих моделях скорости P -волн в нижней мантии выше, чем в верхней и средней мантии, и монотонно возрастают в результате увеличения количества граната, что также отражается на профилях плотности, в то время как скорости S -волн, вероятно, остаются практически постоянными во всех слоях мантии (4.4–4.5 км/с) или незначительно уменьшаются с глубиной в результате влияния температуры, нарастающей быстрее, чем давление.

Сейсмические модели G19_M1, G19_M2 и G19_M3 ведут себя менее консервативно. Из рис. 5 и рис. 6 следует, что скорости P - и S -волн моделей Е (Mantle 1–3) с земными концентрациями тугоплавких оксидов и модели М (Mantle 1–3), обогащенные Al_2O_3 , хорошо согласуются с сейсмическими ограничениями до 500 км. Невозможно отдать предпочтение какой-либо из этих моделей. На глубинах 500–750 км $V_{p,s}$ для моделей Е и М выше, чем $V_{p,s}$ из (Gagnepain-Beuneix и др., 2006; Weber и др., 2011), но ниже, чем в инверсиях (Matsumoto и др., 2015; Garcia и др., 2019).

На глубинах >750 км фазовые ассоциации моделей Е и М состоят из оливина, ортопироксена, клинопироксена и граната (табл. 2), что подтверждается экспериментами (Johnson и др., 2021; Jing и др., 2022). Скорости P - и S -волн этих фазовых ассоциаций, независимо от содержания тугоплавких элементов (рис. 5, 6), плохо согласуются с сейсмическими данными (Garcia и др., 2019). Или, наоборот, сейсмические модели (Garcia и др., 2019) не соответствуют термодинамическим расчетам. Это может быть связано как с непригодностью обеих Е- и М-моделей для этих глубин, так и с неоднозначностью геофизических моделей G19_M2/M3 и особенно G19_M1, в которых наблюдаются труднообъяснимые зоны повышенных и пониженных скоростей P - и S -волн. Ниже 750 км наблюдается заметный разброс среди моделей (Garcia и др., 2019). Вследствие этого мы не можем ни подтвердить, ни опровергнуть возможность существования моделей с практически однородным химическим составом от границы с корой до предполагаемой границы с LVZ. Модель G19_M3, которая получена минимизацией энергии Гиббса, а не посредством инверсии сейсмических данных, характеризуется значительно более высокими скоростями P - и S -волн во всем диапазоне глубин 100–1000 км (рис. 5, 6).

Профили скоростей геохимических моделей TWM и LPUM оказываются за пределами V_p и V_s

моделей G19_M1/M2/M3 во всем интервале глубин верхней и средней мантии, в то время как в нижней мантии сравнение невозможно из-за сильного разброса данных (Garcia и др., 2019). Плотность увеличивается при одновременном увеличении содержания FeO и Al_2O_3 в моделях (табл. 2). Из рис. 5 и рис. 6 видно хорошее соответствие плотности моделей Е и М и TWM с плотностью моделей G19_M2/M3. Напротив, плотность модели LPUM (4% Al_2O_3 и 7.7% FeO) не соответствует геофизическим инверсиям.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Мантия Луны содержит заметно меньше FeO , чем канонические геохимические модели (Wagner, 2005; Longhi, 2006). Один из основных выводов, который можно сделать из рис. 4, состоит в том, что для обеих Е- и М-моделей концентрации FeO ~ 11–13% и значения $Mg\#$ 79–81 в мантии, слабо зависящие от температуры, находятся в довольно узких пределах, что обусловлено заданными геофизическими параметрами и космохимическими условиями формирования Луны. Кроме того, это, вероятно, связано с тем, что скоростные и плотностные вариации при изменении содержания FeO имеют антикорреляционный характер: увеличение $C(FeO)$ в составе породы увеличивает ее плотность, но приводит к уменьшению сейсмических скоростей. Узкий коридор концентраций FeO хорошо согласуется с геофизическими инверсиями (Khan и др., 2006a; 2006b; Schwinger, Breuer, 2022), но резко отличается от петролого-геохимических и космохимических оценок 7.6–14% FeO (Longhi, 2006; Morgan и др., 1978), равно как и от FeO ~ 8% и $Mg\#$ 89 в BSE (рис. 1).

Относительно распространенности тугоплавких элементов в мантии Луны существует неясность (рис. 1). Из рис. 4 следует увеличение содержания Al_2O_3 в мантии с повышением температуры – от холодных до горячих селенотерм. Содержание Al_2O_3 составляет 3–4% в моделях Е и LPUM, но 5–6% в моделях М и TWM. Увеличение $C(Al_2O_3)$ в мантии приводит к увеличению доли граната с глубиной, достигающей порядка 10–15%, что согласуется с экспериментами (Jing и др., 2022), которые показывают, что гранат кристаллизуется в глубокой мантии на заключительных стадиях равновесной кристаллизации LMO.

Геофизические оценки распространенности Al_2O_3 составляют 4–4.5% (Khan и др., 2007) и 6.4% (Lognonné и др., 2003), что, наряду с нашими определениями, противоречит геохимическим наблюдениям 2–3% (Taylor, Wicczorek, 2014), основанным на данных миссии GRAIL и относительному содержанию пироксена и оливина в мантии. Рациональное объяснение дихотомии по Al_2O_3 может состоять в том, что имеющихся сей-

смических данных недостаточно для получения надежных оценок распространенности Al_2O_3 в Луне. Также остается дихотомия и в вопросе о сходстве и/или различии лунного и земного вещества в отношении тугоплавких элементов. На глубинах 50–500 км скорости P - и S -волн в моделях Е и М, независимо от содержания оксида алюминия (и температуры), соответствуют инверсиям G19_M1/M2/M3 (рис. 5, 6). В интервале глубин 500–750 км такое соответствие нарушается. В нижней мантии на глубинах 750–1200 км скорости звука Е- и М-моделей не поддерживаются, но и не отвергаются геофизическими моделями из-за большого разброса сейсмических данных (Weber и др., 2011; Garcia и др., 2019).

Помимо содержания Al_2O_3 , существует еще одна нерешенная проблема. Возникает вопрос, насколько хорошо мы знаем состав Луны в отношении распространенности SiO_2 ? Если в материковой коре содержания SiO_2 44–46% определены достаточно надежно (Taylor, 1982; Demidova и др., 2007; Khan и др., 2007), то в мантии они неизвестны. Обычно постулируется, что концентрация кремнезема в BSM составляет ~45%, как и в BSE (Ringwood, 1977; Taylor, 1982; Longhi, 2006; Dauphas и др., 2014; Sakai и др., 2014; Nauri и др., 2015). В работе (Warren, 2005) на основании отношений MgO/SiO_2 и MgO/FeO и с учетом отношения MgO/Th содержание SiO_2 оценивается в 46–48%. Предполагается, что в силикатной порции Марса с хондритовым отношением CaO/Al_2O_3 содержится 45.5% SiO_2 (Yoshizaki, McDonough, 2020), что идентично составу BSE. В связи с тем, что влияние SiO_2 на скорость звука в мантии плохо изученный вопрос, концентрация оксида кремния становится определяющим фактором для химии, минералогии и внутреннего строения Луны.

Можно видеть, что модели TWM и LPUM имеют более высокие скорости звука по сравнению с Е- и М-моделями (рис. 5, 6). Это связано с тем, что более низкие содержания SiO_2 приводят к более высоким значениям скоростей P - и S -волн в мантии. В классах моделей TWM и LPUM с ~45% SiO_2 (табл. 1) основным минералом лунной мантии будет оливин с преобладанием форстеритового минала (табл. 2), который имеет более высокие модули сжатия и сдвига по сравнению с энстатитовой составляющей в пироксенах при почти одинаковой плотности форстерита и энстатита (Kuskov, 1997). Однако значительное количество оливина в фазовых ассоциациях TWM и LPUM противоречит инверсиям (Garcia и др., 2019). Скорости звука геохимических моделей, как обогащенных FeO и Al_2O_3 (TWM), так и обедненных (LPUM), находятся за пределами скоростей P - и S -волн моделей G19_M1/M2/M3; $V_{P,S}$ (TWM) и $V_{P,S}$ (LPUM) оказываются значительно

выше во всем диапазоне мантийных глубин. Очевидно, это связано не столько с разным содержанием FeO и Al_2O_3 в этих геохимических моделях, сколько с меньшим содержанием SiO_2 и с более высоким содержанием высокоскоростного оливина в фазовых ассоциациях TWM и LPUM по сравнению с моделями Е и М (табл. 2). Таким образом, сравнение V_P и V_S двух наиболее популярных моделей TWM и LPUM с геофизическими сигнатурами свидетельствует о том, что оливин не является существенным компонентом лунной мантии.

Примечательной особенностью химии и минералогии модельных классов Е и М с ~50% SiO_2 является то, что мантия Луны, вероятно, должна состоять в основном из пироксенита с преобладанием ортопироксена и с подчиненным количеством других минералов (табл. 2). Профили скоростей P - и S -волн этих композиционных моделей хорошо согласуются с результатами референтных моделей (Garcia и др., 2019) до ~500 км (рис. 5, 6). Отметим, что независимая инверсия данных сейсмического (Lognonné и др., 2003) и электромагнитного (Khan и др., 2006a) зондирования дает 50–53% SiO_2 для состава мантии, что соответствует полученным здесь результатам.

Две геофизические модели G19_M2/M3 дают ограничения на плотностную структуру мантии до глубин 1160 км, ниже которых плотность G19_M3 уменьшается – нефизический результат (рис. 5, 6). Плотности моделей Е и М с 11–13% FeO попадают в интервалы плотности G19_M2/M3: модель Е до глубин 500–600 км, модель М до 750–1000 км. Для этих моделей плотность в интервале глубин 150–750 км изменяется от 3.35 до 3.41 г/см³ (табл. 2), поскольку плотность гранат-содержащей мантии значительно выше плотности оливин-пироксенитовых смесей. Плотность TWM с более высоким содержанием FeO (11%) и Al_2O_3 (6%) по сравнению с LPUM попадает в диапазон моделей М2 и М3. Напротив, класс моделей типа LPUM с земным содержанием FeO ~8% и Al_2O_3 ~4% имеет плотность фазовых ассоциаций на 2–3% ниже, чем модели Е и М и TWM и геофизические ограничения.

Вариации концентраций $C(FeO)$ и изменение состава от обедненного тугоплавкими элементами (LPUM) до более фертильного вещества (TWM, Е-, М- модели) оказывают нетривиальное влияние на сейсмические свойства и плотность пород, в частности, из-за зависимости модуля сдвига от содержания FeO в породе. Рост $C(FeO)$ приводит к уменьшению модуля сдвига и V_S , но одновременно к увеличению плотности породы. Рост $C(Al_2O_3)$ приводит к изменению пропорции фаз и увеличению доли граната, обладающего более высокими значениями плотности и модулей сжатия и сдвига по сравнению с оливином и пи-

роксеном. Одновременное возрастание $C(\text{FeO})$ и $C(\text{Al}_2\text{O}_3)$ компенсирует изменение скоростей из-за уменьшения модуля сдвига минералов, увеличения доли граната и возрастания плотности породы (Кусков и др., 2011; Kuskov и др., 2014). Кроме того, фертилизация сопровождается изменением пропорции фаз, например, уменьшением доли ортопироксена и увеличением доли граната с глубиной.

Из рис. 5 и рис. 6 следует, что на глубинах до ~600–750 км скорости P - и S -волн E - и M -моделей находятся в пределах, а геохимических моделей TWM/LPUM за пределами G19_M1/M2/M3. Вполне удовлетворительное соответствие значений ($V_{P,S}$) в моделях E и M моделям G19_M1/M2/M3 поддерживает концепцию обогащенной кремнеземом мантии для моделей E до 500 км, а для моделей M вплоть до глубин 600–800 км, вероятно, маркирующих подошву ЛМО. Оценки мощности ЛМО на основе геохимических и геофизических соображений охватывают интервал глубин от верхних 500 км до частичного или полного плавления Луны, но окончательный консенсус до сих пор не достигнут (Shearer и др., 2006; Elkins-Tanton и др., 2011; Sakai и др., 2014; Jing и др., 2022).

Сравнительный анализ физических свойств E - и M -моделей и сейсмических инверсий (García и др., 2019) не позволяет привести доводы в пользу однородной или стратифицированной мантии с химической границей на глубинах 500–750 км. Однако E - и M -модели уточняют тренды физических свойств и в сочетании с геофизическими данными устанавливают более жесткие пределы для химического состава верхней и средней мантии на уровне 11–13% FeO и ~50% SiO_2 . Во всех случаях доминирующим минералом пироксеновой мантии является низко-кальциевый ортопироксен, а не оливин. Независимо от температуры и обилия тугоплавких элементов соответствие скоростей звука в моделях E и M и инверсиях G19_M1/M2/M3 позволяет исключить обедненную SiO_2 и богатую оливином лунную мантию на глубинах от 50 до 500 км.

Возникает вопрос, действительно ли ортопироксен является доминирующим минералом верхней и средней мантии Луны, а оливин лишь второстепенный компонент? Как следует из наших результатов, большое количество SiO_2 и высокое содержание Orx в моделях E и M является геохимическим следствием инверсии сейсмических и селенофизических данных. Однако нельзя исключать, что из-за недостатка данных по сейсмическим источникам в глубоких горизонтах мантии (Lognonné и др., 2003; García и др., 2019) результаты инверсии приводят к переоценке вклада SiO_2 и недооценке вклада MgO в нижней мантии на глубинах 750–1200 км. Поэтому осторожнее будет относить наши результаты к верх-

ним частям мантии Луны, что подтверждается петрологическими и геохимическими наблюдениями (Ringwood, Essene, 1970; Hu и др., 2019; Li и др., 2019; Lemelin и др., 2019; Moriarty и др., 2021a; 2021b).

Моделирование тепловой эволюции ЛМО и отсутствие обогащенных оливином обнажений в бассейне Южный полюс–Эйткен (SPA) также привело к предположению, что мантия Луны скорее обогащена низкокальциевым пироксеном, а не оливином (Elkins-Tanton, Bercovici, 2014; Melosh и др., 2014; Dhingra, 2018; Moriarty и др., 2021a; 2021b). Стоит отметить, что относительно богатая ортопироксеном мантия астероида 4 Веста подтверждается наблюдениями с борта КА Dawn (например, Toplis и др., 2013). Интересно сравнить полученные нами данные с результатами китайского КА Chang'E-4, совершившего мягкую посадку в кратере ВанКармен (VonKármán), лежащем внутри бассейна SPA. В работе (Hu и др., 2019) на основе спектральных наблюдений с борта лунохода Yutu-2 сообщается о преобладании ортопироксенового материала в мантии. В работе (Lemelin и др., 2019) на основе минералогического анализа внутренних колец в лунных ударных бассейнах по данным миссии Kaguya обнаружено, что содержание пироксена с низким содержанием Ca уменьшается с долей корового компонента, что предполагает его преимущественно мантийное происхождение.

Поскольку различие в содержаниях FeO и SiO_2 между Землей и Луной столь существенно, то возникает вопрос о причине обогащения Луны закисным железом и кремнеземом и связанный с этим вопрос о механизме формирования спутника Земли. Динамические модели формирования Луны противоречивы. Каждая из них (отделения от Земли, захвата, формирования Луны из роя тел, обращающихся вокруг Земли, мегаимпакта, макроимпактов, образования Луны путем фрагментации разрезанного протопланетного сгущения, столкновения двух сгущений и их объединения) в той или иной степени вносит определенные аргументы в решение проблемы (Рускол, 1997; Ringwood, 1977; Čuk, Stewart, 2012; Галимов, 2019; Hartmann, 2014; Canup и др., 2021; Svetsov и др., 2012; Reufer и др., 2012; Rufu и др., 2017; Hossain и др., 2019; Маров, Ипатов, 2023). Однако в целом ни одна из них не дает удовлетворительного объяснения особенностям лунной геохимии как в отношении главных элементов, так и из-за отсутствия адекватного решения проблемы обеднения летучими и сидерофильными элементами, и совмещения изотопной идентичности ряда элементов — O , Si , Cr , Ti (Dauphas и др., 2014; Галимов, 2019; Nielsen и др., 2021), хотя некоторые высокоточные анализы ряда лунных литологий предполагают, что Земля и Луна имеют разные изотопные составы кислорода (Cano и др., 2020).

В обзорах (Hartmann, 2014; Asphaug, 2014; Canup и др., 2021) обсуждаются несколько современных сценариев формирования Луны. Наибольшую популярность приобрела гипотеза мегаимпакта (giant impact), которая стала доминирующей парадигмой в теоретической планетологии, подобно теории инфляции в космологии или вымирания динозавров в результате падения астероида. Согласно канонической модели мегаимпакта (Canup, 2019; 2021), Луна образовалась в результате столкновения Земли с небесным телом Theia размером порядка Марса, причем большая часть лунного вещества получена из материала ударника. В этом случае Луна в изотопном отношении должна отражать вещество Theia. Эта гипотеза удовлетворяет ограничениям на массы ядер Луны (1–3%) и Земли (~33%), но сталкивается с определенными трудностями, прежде всего геохимического характера (Taylor и др., 2006; Pahlevan, 2018; Галимов, 2019; Yang и др., 2022), поскольку ударное тело, образовавшееся в своем изотопном резервуаре Солнечной системы, имело бы изотопный состав, отличный от земного и, следовательно, состав лунных и земных образцов должен быть также различным. Однако измерения показывают высокую степень изотопного сходства между лунными и земными породами, т.е. изотопные составы вещества Земли и гипотетической протопланеты Theia по целому ряду элементов очень близки (Armstrong и др., 2012; Dauphas и др., 2014; Nielsen и др., 2021). Сходство изотопного состава лунных и земных образцов было бы проще всего объяснить, если бы в результате мегаимпакта Луна образовалась из мантии протоземли (Ringwood, 1977; Cuk, Stewart, 2012) или земного магматического океана, предположительно имеющего более высокое содержание FeO, чем BSE (Hosono и др., 2019), что противоречит предсказаниям канонической модели, согласно которой Луна в основном состоит из материала мантии ударника, а остальная часть из ядра ударника и мантии протоземли.

Существуют противоречивые взгляды на вещественный состав Theia, зависящие от механизма формирования в протопланетном диске, в том числе образования этого тела внутри орбиты Земли, равно как и в пределах или за пределами орбиты Юпитера (Desch, Robinson, 2019). Сходство стабильных изотопов, таких как O, Cr, Ti и V (Yang и др., 2022), предполагает, что BSM имеет тот же изотопный состав, что и BSE, поскольку Луна формировалась из материалов протоземли и ударного тела, состав которого, предположительно, может варьировать от вещества восстановленных энстатитовых хондритов, обыкновенных хондритов и вплоть до окисленного вещества, подобного углистым хондритам. Достоинства и недостатки этих предположений, связанные с использованием разных изотопных систем и с меха-

низмом формирования (Луна преимущественно произошла из мантии ударника и/или протоземли, или сценарий макроимпактов) широко обсуждаются (Wade, Wood, 2016; Dauphas, 2017; Budde и др., 2019; Desch, Robinson, 2019; Nielsen и др., 2021; Yang и др., 2022). Одно из предпочтительных объяснений близости изотопных составов состоит в том, что ударное тело предположительно относилось к семейству энстатитовых метеоритов (Wade, Wood, 2016; Dauphas, 2017; Desch, Robinson, 2019; Nielsen и др., 2021). Однако остается неясным, как это может сочетаться с тем, что энстатитовые хондриты практически лишены FeO, несмотря на довольно изощренные способы доказательства, например, относительно окисленная (~10.7% FeO) мантия протоземли, но сильно восстановленное вещество (~0.3% FeO) ударника, похожее на состав мантии Меркурия (Wade, Wood, 2016) или, напротив, ~15% FeO для Theia и ~5% FeO для протоземли (Desch, Robinson, 2019). Кроме того, энстатитовые хондриты не соответствуют полученным ограничениям на содержание SiO₂. Эти работы важны для понимания изотопной идентичности земных и лунных пород, но не решают проблему, поскольку термодинамически обоснованные ограничения на распространенность FeO и SiO₂ в Луне трудно примирить с гипотезами такого рода.

В таком случае, в соответствии с принципом бритвы Оккама, приходится предполагать, что лунное вещество унаследовано в основном от одного массивного тела или в результате последовательности столкновений нескольких более мелких тел (Svetsov и др., 2012; Rufu и др., 2017; Canup и др., 2021), обогащенных FeO и SiO₂, и изотопный состав которых сопоставим с земным. Сходство изотопного состава Земли и Луны (одно из важнейших ограничений) и отличие от других тел Солнечной системы, вероятно, можно объяснить тем, что образующее Луну крупное ударное тело или множество более мелких тел в основном формировались из общего изотопного резервуара во внутренней Солнечной системе (Dauphas и др., 2014; 2017; Hauri и др., 2015; Wu и др., 2020; Nielsen и др., 2021). Однако природу тел трудно оценить с помощью изотопной систематики, так как изотопная идентичность не означает идентичность в их химическом составе.

Не делая далеко идущих обобщений, предположим, что Луна могла быть сформирована при столкновении протоземли с объектом, похожим на родительские тела ахондритов. Среди всех известных классов метеоритов (хондритов, примитивных ахондритов и ахондритов) указанные ограничения на лунные концентрации FeO и SiO₂ в большей степени соответствуют ахондритам (Jarosewich, 1990; Lodders, 1998), принадлежащим к группе метеоритов HED (говардиты, эвкриты и

диогениты/howardites-eucrites-diogenites), которые, вероятно, являются ударными выбросами с астероида 4 Веста, и к группе метеоритов SNC (шерггититы, наклиты и шассиниты/shergottites-nakhlites-chassignites), предположительно выбитых с Марса. Обе группы метеоритов демонстрируют разнообразие изотопного и элементного состава. В работе (Macke и др., 2011) измерена плотность 96 образцов из 56 метеоритов HED и 15 образцов из 10 метеоритов SNC. Средняя плотность зерен для всей популяции метеоритов находится в диапазоне 3.25–3.36 г/см³, что соответствует плотности вещества верхней мантии Луны с поправкой на *P-T* условия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены два класса концептуальных геохимических моделей TWM и LPUM с земным содержанием SiO₂, но с разными концентрациями Al₂O₃ и FeO, и два класса моделей E и M, выведенных инвертированием набора геофизических данных. Количественное сопоставление геофизических и геохимических параметров позволяет установить термодинамически обоснованные ограничения на химический состав, минералогию, скоростную и плотностную структуру мантии и получить физически непротиворечивые решения о внутреннем строении Луны. Основные выводы заключаются в следующем.

1. Для моделей E и M наблюдается общая тенденция увеличения/уменьшения геохимических параметров Al₂O₃, FeO и MgO в зависимости от распределения температуры с глубиной. Концентрации оксидов достаточно стабильны в слоях мантии и группируются вокруг 11–13% FeO (Mg# 79–81) с небольшим уменьшением *C*(FeO) с повышением температуры. Силикатная порция Луны обогащена FeO (FeO ~ 1.5 × BSE) и обеднена MgO по отношению к BSE (FeO ~ 8% и Mg# 89).

2. Для E-моделей валовая распространенность оксида алюминия в Луне (кора + мантия) составляет Al₂O₃ ~ (0.9–1.1) × BSE, а для M-моделей может находиться в интервале (1.2–1.4) × BSE. Обе модели предполагают присутствие 10–15% граната в глубинной мантии. Принципиально важный для геохимии Луны и мантии Земли вопрос о сходстве и/или различии их состава в отношении распространенности тугоплавких элементов остается дискуссионным и требует дальнейших исследований.

3. Примечательная особенность обеих композиционных E- и M-моделей заключается в том, что мантия Луны обогащена кремнеземом (~50% SiO₂) по отношению к каноническим моделям TWM (44.8%), LPUM (46.4%) и BSE (45.2%), что не учитывалось в предыдущих полувековых исследованиях Луны. Столь высокая распространенность

SiO₂ определяет специфику минералогии и сейсмических свойств Луны, но не подтверждает преобладание оливина в мантии. Наиболее надежный результат можно отнести к верхним оболочкам мантии, состоящим в основном из оливин-содержащего пироксенита, в котором преобладающим минералом является низко-кальциевый ортопироксен, а не оливин. Высокая пироксеновость мантии является геохимическим следствием инверсии сейсмических и селенофизических данных в модели химического состава

4. E- и M-модели с концентрациями ~50% SiO₂ и 11–13% FeO определяют особенности минеральной, скоростной и плотностной структуры мантии Луны. Профили скоростей *P*- и *S*-волн обеих моделей, независимо от содержания тугоплавких элементов, хорошо согласуются с данными сейсмического зондирования по программе КА Apollo, что поддерживает идею кремнезем-обогащенной (оливин-пироксенитовой) мантии по крайней мере на глубинах до ~500 км, и подтверждается петролого-геохимическими данными, полученными на КА Chang'E и Kaguya. Напротив, скорости звука кремнезем-ненасыщенных составов (~45% SiO₂) как обогащенных FeO и Al₂O₃ (TWM), так и обедненных (LPUM) не соответствуют сейсмическим сигнатурам. Кроме того, модели с земным содержанием FeO ~ 8% и Al₂O₃ ~ 4% (LPUM) имеют плотность фазовых ассоциаций значительно ниже геофизических ограничений.

5. Использование только изотопных данных и обнаружение изотопной идентичности лунных и земных образцов по целому ряду элементов не дают удовлетворительных сценариев формирования Луны и являются недостаточным средством для выявления сходства или различия строительных блоков Земли и Луны, основанных на веществе хондритов, что предполагает необходимость рассмотрения дополнительных объектов, вероятно, близких к родительским телам некоторых ахондритов. В любом случае одновременное обогащение Луны закисным железом и кремнеземом должно приводить к дополнительным ограничениям на состав ударного тела (или тел) при анализе космогонических концепций происхождения Луны и моделировании физических, динамических и космохимических процессов формирования системы Земля–Луна.

Авторы признательны К. Matsumoto за плодотворное сотрудничество. Авторы выражают благодарность Т.В. Гудковой за компетентную и конструктивную рецензию.

Работа выполнена в рамках бюджетной темы Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Галимов Э.М. Проблема происхождения Луны. Основные направления геохимии. К 100-летию со дня рождения А.П. Виноградова / Ред. Галимов Э.М. М.: Наука, 1995. С. 8–43.
- Галимов Э.М. Особые черты геохимии Луны и Земли, определяемые механизмом образования системы Земля–Луна (Доклад на 81-й Международной метеоритной конференции, Москва, июль 2018) // Геохимия. 2019. Т. 64 (8). С. 762–776.
- Гудкова Т.В., Раевский С.Н. О структуре собственных колебаний Луны // Астрон. вестн. 2013. Т. 47. С. 13–20. (Gudkova T.V., Raevskiy S.N. Spectrum of the free oscillations of the Moon // Sol. Syst. Res. 2013. V. 47. P. 11–19.)
- Кронрод В.А., Кусков О.Л. Моделирование химического состава и размеров ядра луны инверсией сейсмических и гравитационных данных // Физика Земли. 2011. № 8. С. 62–80.
- Кронрод В.А., Кронрод Е.В., Кусков О.Л. Ограничения на тепловой режим и содержание урана в Луне по сейсмическим данным // Докл. РАН. 2014. Т. 455. № 6. С. 698–702.
- Кусков О.Л., Кронрод В.А. Геохимические ограничения на модели состава и теплового режима Луны по сейсмическим данным // Физика Земли. 2009. № 9. С. 25–40.
- Кусков О.Л., Кронрод Е.В., Кронрод В.А. Геохимические ограничения на “холодные” и “горячие” модели внутреннего строения Луны: 1. Валовый состав // Астрон. вестн. 2018. Т. 52. С. 481–494. (Kuskov O.L., Kronrod E.V., Kronrod V.A. Geochemical constraints on the cold and hot models of the Moon’s interior: 1. Bulk composition // Sol. Syst. Res. 2018. V. 52. P. 467–479.) <https://doi.org/10.1134/S0038094618060047>
- Кусков О.Л., Кронрод В.А., Прокофьев А.А. Термическая структура и мощность литосферной мантии Сибирского кратона по данным сверхдлинных сейсмических профилей Кратон и Кимберлит // Физика Земли. 2011. № 3. С. 3–23.
- Кусков О.Л., Кронрод Е.В., Matsumoto Koji, Кронрод В.А. Физические свойства и внутреннее строение центральной области Луны // Геохимия. 2021. Т. 66. № 11. С. 972–992. <https://doi.org/10.31857/S0016752521110066>
- Маров М.Я., Инатов 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.
- Рускол Е.Л. Происхождение системы Земля–Луна. М.: ОИФЗ РАН, 1997. 16 с.
- Armstrong R.M.G., Georg R.B., Williams H.M., Halliday A.N. Silicon isotopes in lunar rocks: Implications for the Moon’s formation and the early history of the Earth // Geochim. et Cosmochim. Acta. 2012. V. 77. P. 504–514.
- Asphaug E. Impact origin of the Moon? // Annu. Rev. Earth and Planet. Sci. 2014. V. 42. P. 551–578.
- Budde G., Burkhardt C., Kleine T. Molybdenum isotopic evidence for the late accretion of outer Solar System material to Earth // Nature Astron. 2019. V. 3. P. 736–741.
- Cano E.J., Sharp Z.D., Shearer C.K. Distinct oxygen isotope compositions of the Earth and Moon // Nature Geosci. 2020. V. 13. P. 270–274.
- Canup R.M. Lunar origin by giant impact: An evolving legacy of Apollo // 50th Lunar and Planet. Sci. Conf. 2019 (LPI Contrib. № 2132). P. 2044.
- Canup R.M., Righter K., Dauphas N., Pahlevan K., Ćuk M., Lock S.J., Stewart S.T., Salmon J., Ruffy R., Nakajima M., Magna T. Origin of the Moon. In: New Views on the Moon II. arXiv:2103.02045v1 [astro-ph.EP]. 2021.
- Charlier B., Grove T.L., Namur O., Holtz F. Crystallization of the lunar magma ocean and the primordial mantle-crust differentiation of the Moon // Geochim. et Cosmochim. Acta. 2018. V. 234. P. 50–69. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2018.05.006>
- Ćuk 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.
- Dauphas N., Burkhardt C., Warren P.H., Fang-Zhen T. Geochemical arguments for an Earth-like Moon-forming impactor // Phil. Trans. Roy. Soc. A. 2014. V. 372. 20130244. <https://doi.org/10.1098/rsta.2013.0244>
- Dauphas N. The isotopic nature of the Earth’s accreting material through time // Nature. 2017. V. 541. P. 521–524.
- Demidova S.I., Nazarov M.A., Lorenz C.A., Kurat G., Brandstätter F., Ntaflou Th. Chemical composition of lunar meteorites and the lunar crust // Petrology. 2007. V. 15. P. 386–407.
- Desch S.J., Robinson K.L. A unified model for hydrogen in the Earth and Moon: No one expects the Theia contribution // Geochemistry. 2019. V. 79. id. 125546.
- Dhingra D. The new Moon: Major advances in lunar science enabled by compositional remote sensing from recent missions // Geosciences. 2018. V. 8 (12). 498. <https://doi.org/10.3390/geosciences8120498>
- Elardo S.M., Draper D.S., Shearer C.K., Jr. Lunar magma ocean crystallization revisited: Bulk composition, early cumulate mineralogy, and the source regions of the highlands Mg-suite // Geochim. et Cosmochim. Acta. 2011. V. 75. P. 3024–3045.
- Elkins-Tanton L.T., Bercovici D. Contraction or expansion of the Moon’s crust during magma ocean freezing? // Phil. Trans. Roy. Soc. A. 2014. V. 372. 20130240. <https://doi.org/10.1098/rsta.2013.0240>
- Elkins-Tanton L.T., Burgess S., Yin Q.-Z. The lunar magma ocean: Reconciling the solidification process with lunar petrology and geochronology // Earth and Planet. Sci. Lett. 2011. V. 304. P. 326–336.
- Gagnepain-Beyneix J., Lognonné P., Chenet H., Lombardi D., Spohn T. A seismic model of the lunar mantle and constraints on temperature and mineralogy // Phys. Earth and Planet. Inter. 2006. V. 159. P. 140–166.
- Garcia R.F., Gagnepain-Beyneix J., Chevrot S., Lognonné P. Very preliminary reference Moon model // Phys. Earth and Planet. Inter. 2011. V. 188. P. 96–113.
- Garcia R.F., Khan A., Drilleau M., Margerin L., Kawamura T., Sun D., Wiczorek M.A., Rivoldini A., Nunn C., Weber R.C., Marusiak A.G., Lognonné P., Nakamura Y., Zhu P. Lunar seismology: An update on interior structure models //

- Space Sci. Rev. 2019. V. 215. id. 50.
<https://doi.org/10.1007/s11214-019-0613-y>
- Hartmann W.K. The giant impact hypothesis: past, present (and future?) // *Phil. Trans. Roy. Soc. A*. 2014. V. 372. P. 20130249.
- Hauri E.H., Saal A.E., Rutherford M.J., Van Orman J.A. Water in the Moon's interior: Truth and consequences // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2015. V. 409. P. 252–264.
- Hess P.C., Parmentier E.M. A model for the thermal and chemical evolution of the Moon's interior: Implications for the onset of mare volcanism // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1995. V. 134. P. 501–514.
- Hirschmann M.M. Mantle solidus: Experimental constrain and the effects of peridotite composition // *Geochem. Geophys. Geosystem*. 2000. V. 1. 2000GC000070.
- Hood L.L., Jones J.H. Geophysical constraints on lunar bulk composition and structure: A reassessment // *J. Geophys. Res.* 1987. V. 92E. P. 396–410.
- Hosono N., Karato S., Makino J., Saitoh T.R. Terrestrial magma ocean origin of the Moon // *Nature Geoscience*. 2019. V. 12. P. 418–423.
<https://doi.org/10.1038/s41561-019-0354-2>
- Hu X., Ma P., Yang Y., Zhu M.-H., Jiang T., Lucey P.G., Sun L., Zhang H., Li C., Xu R., He Z., Lin H., Huang C., Sun Y. Mineral abundances inferred from in situ reflectance measurements of Chang'E-4 landing site in South Pole-Aitken basin // *Geophys. Res. Lett.* 2019. V. 46. P. 9439–9447.
- Hu S., He H., Ji J., Ji J., Lin Y., Hui H., Anand M., Tartèse R., Yan Y., Hao J., Li R., Gu L., Guo Q., He H., Ouyang Z. A dry lunar mantle reservoir for young mare basalts of Chang'E-5 // *Nature*. 2021.
<https://doi.org/10.1038/s41586-021-04107-9>
- 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.
- Jarosewich E. Chemical analyses of meteorites: A compilation of stony and iron meteorite analyses // *Meteoritics*. 1990. V. 25. P. 323–337.
- Jing J.-J., Lin Y., Knibbe J.S., van Westrenen W. Garnet stability in the deep lunar mantle: Constraints on the physics and chemistry of the interior of the Moon // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2022. V. 584. id. 117491.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117491>
- Johnson T.E., Morrissey L.J., Nemchin A.A., Gardiner N.J., Snape J.F. The phases of the Moon: modelling crystallisation of the lunar magma ocean through equilibrium thermodynamics // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2021. V. 556. id. 116721.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116721>
- Jones J.H., Delano J.W. A three-component model for the bulk composition of the Moon // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 1989. V. 53. P. 513–527.
- Jones J.H., Palme H. Geochemical constraints on the origin of the Earth and Moon. *Origin of the Earth and Moon* / Eds: Canup R.M. Tucson: Univ. Arizona Press, 2000. P. 197–216.
- Kamata S., Matsuyama I., Nimmo F. Tidal resonance in icy satellites with subsurface oceans // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2015. V. 120. P. 1528–1542.
- Karato S.-I. Geophysical constraints on the water content of the lunar mantle its implications for the origin of the Moon // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2013. V. 384. P. 144–153.
- Kawamura T., Lognonné P., Nishikawa Y., Tanaka S. Evaluation of deep moonquake source parameters: Implication for fault characteristics and thermal state // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2017. V. 122. P. 1487–1504.
- Keihm S.J., Langseth M.G. Lunar thermal regime to 300 km // *Proc. 8th Lunar Sci. Conf.* 1977. P. 499–514.
- Kirk R.L., Stevenson D.J. The competition between thermal contraction and differentiation in the stress history of the Moon // *J. Geophys. Res.* 1989. V. 94. P. 12133–12144.
- Khan A., Connolly J.A.D., Olsen N., Mosegaard K. Constraining the composition and thermal state of the Moon from an inversion of electromagnetic lunar day-side transfer functions // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2006a. V. 248. P. 579–598.
- Khan A., MacLennan J., Taylor S.R., Connolly J.A.D. Are the Earth and the Moon compositionally alike? Inferences on lunar composition and implications for lunar origin and evolution from geophysical modeling // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2006b. V. 111. E05005.
<https://doi.org/10.1029/2005JE002608>
- Khan A., Connolly J.A.D., MacLennan J., Mosegaard K. Joint inversion of seismic and gravity data for lunar composition and thermal state // *Geophys. J.* 2007. V. 168. P. 243–258.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03200.x>
- Kronrod E., Matsumoto K., Kuskov O.L., Kronrod V., Yamada R., Kamata S. Towards geochemical alternatives to geophysical models of the internal structure of the lunar mantle and core // *Adv. Space Sci.* 2022. V. 69. P. 2798–2824.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.01.012>
- Kuskov O.L. Constitution of the Moon: 4. Composition of the mantle from seismic data // *Phys. Earth and Planet. Inter.* 1997. V. 102. P. 239–257.
[https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(96\)03259-1](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(96)03259-1)
- Kuskov O.L., Kronrod V.A. Constitution of the Moon: 5. Constraints on composition, density, temperature, and radius of a core // *Phys. Earth and Planet. Inter.* 1998. V. 107. P. 285–306.
- Kuskov O.L., Fabrichnaya O.B., Galimzyanov R.F., Truskinovsky L.M. Computer simulation of the phase diagram for the MgO–SiO₂ system at P–T parameters of the mantle transition zone // *Phys. Chem. Minerals*. 1989. V. 16. P. 442–454.
- Kuskov O.L., Kronrod V.A., Kronrod E.V. Thermo-chemical constraints on the interior structure and composition of the lunar mantle // *Phys. Earth and Planet. Inter.* 2014. V. 235. P. 84–95.
<https://doi.org/10.1016/j.pepi.2014.07.011>
- Kuskov O.L., Kronrod V.A., Kronrod E.V. Thermo-chemical constraints on the lunar bulk composition and the structure of a three-layer mantle // *Phys. Earth and Planet. Inter.* 2019. V. 286. P. 1–12.
<https://doi.org/10.1016/j.pepi.2018.10.011>
- Laneuville M., Wiczorek M.A., Breuer D., Tosi N. Asymmetric thermal evolution of the Moon // *J. Geophys.*

- Res.: Planets. 2013. V. 118. P. 1435–1452.
<https://doi.org/10.1002/jgre.20103>
- Lemelin M., Lucey P.G., Miljkovic K., Gaddis L.R., Hare T., Ohtake M.* The compositions of the lunar crust and upper mantle: Spectral analysis of the inner rings of lunar impact basins // *Planet. and Space Sci.* 2019. V. 165. P. 230–243.
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2018.10.003>
- Li C., Liu D., Liu B., Ren X., Liu J., He Z., Zuo W., Zeng X., Xu R., Tan X., Zhang X., Chen W., Shu R., Wen W., Su Y., Zhang H., Ouyang Z.* Chang'E-4 initial spectroscopic identification of lunar far-side mantle-derived materials // *Nature*. 2019. V. 569. P. 378–382.
<https://doi.org/10.1038/s41586-019-1189-0>
- Lognonné P.* Planetary seismology // *Annu. Rev. Earth and Planet.* 2005. V. 33. P. 571–604.
- Lognonné P., Gagnepain-Beyneix J., Chenet H.* A new seismic model of the Moon: Implications for structure, thermal evolution and formation of the Moon // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2003. V. 211. P. 27–44.
- Longhi J.* Petrogenesis of picritic mare magmas: Constraints on the extent of early lunar differentiation // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 2006. V. 70. P. 5919–5934.
- Macke R.J., Britt D.T., Consolmagno G.J.* Density, porosity, and magnetic susceptibility of achondritic meteorites // *Meteorit. and Planet. Sci.* 2011. V. 46. P. 311–326.
- Matsumoto K., Yamada R., Kikuchi F., Kamata S., Ishihara Y., Iwata T., Hanada H., Sasaki S.* Internal structure of the Moon inferred from Apollo seismic data and selenodetic data from GRAIL and LLR // *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42. № 18. P. 7351–7358.
<https://doi.org/10.1002/2015GL065335>
- Maurice M., Tosi N., Schwinger S., Breuer D., Kleine T.* A long-lived magma ocean on a young Moon // *Sci. Adv.* 2020. V. 6 (28). id. eaba8949.
- McDonough W.F., Sun S.-S.* The composition of the Earth // *Chem. Geol.* 1995. V. 120. P. 223–253.
- Melosh H.J., Kendall J., Johnson B.C., Bowling T., Horgan B., Lucey P.G., Taylor G.J.* The Moon's upper mantle: mostly opx, not olivine? // *45th Lunar and Planet. Sci. Conf.* 2014. P. 2505.
- Morgan J.W., Hertogen J., Anders E.* The Moon: composition determined by nebula processes // *Moon and Planets.* 1978. V. 18. P. 465–478.
- Moriarty D.P., Dygert N., Valencia S.N., Watkins R.N., Petro N.E.* The search for lunar mantle rocks exposed on the surface of the Moon // *Nature Commun.* 2021a. V. 12. P. 1–11.
<https://doi.org/10.1038/s41467-021-24626-3>
- Moriarty D.P., Watkins R.N., Valencia S.N.* Evidence for a stratified upper mantle preserved within the South Pole–Aitken Basin // *J. Geophys. Res.: Planets.* 2021b. V. 121. id. e2020JE006589.
- Mueller S., Taylor G.J., Phillips R.J.* Lunar composition: A geophysical and petrological synthesis // *J. Geophys. Res.* 1988. V. 93. P. 6338–6352.
- Nakamura Y.* Seismic velocity structure of the lunar mantle // *J. Geophys. Res.* 1983. V. 88. P. 677–686.
- Nazarov M.A., Aranovich L.Y., Demidova S.I., Ntaflou T., Brandstätter F.* Aluminous enstatites of lunar meteorites and deep-seated lunar rocks // *Petrology.* 2011. V. 19. P. 1–13.
- Neumann G.A., Zuber M.T., Smith D.E., Lemoine F.G.* The lunar crust: global structure and signature of major basins // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. P. 16841–16863.
- Nielsen S.G., Bekaert D.V., Auro M.* Isotopic evidence for the formation of the Moon in a canonical giant impact // *Nature Commun.* 2021. V. 12. id. 1817.
<https://doi.org/10.1038/s41467-021-22155-7>
- Nunn C., Garcia R.F., Nakamura Y., Marusiak A.G., Kawamura T., Sun D., Margerin L., Weber R., Drilleau M., Wieczorek M.A., Khan A., Rivoldini A., Lognonne P., Zhu P.* Lunar seismology: A data and instrumentation review // *Space Sci. Rev.* 2020. V. 216. id. 89.
<https://doi.org/10.1007/s11214-020-00709-3>
- Pahlevan K.* Telltale tungsten and the Moon // *Nat. Geosci.* 2018. V. 11. P. 16–18.
- Prissel T.C., Gross J.* On the petrogenesis of lunar troctolites: New insights into cumulate mantle overturn and mantle exposures in impact basins // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2020. V. 551. id. 116531.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116531>
- Reufer A., Meier M.M.M., Bentz W., Wieler R.* A hit-and-run giant impact scenario // *Icarus.* 2012. V. 221. P. 296–299.
- Ringwood A.E.* Basaltic magmatism and the bulk composition of the Moon. I. Major and heat-producing elements // *The Moon.* 1977. V. 16. P. 389–423.
<https://doi.org/10.1007/BF00577901>
- Ringwood A.E., Essene E.* Petrogenesis of Apollo 11 basalts, internal constitution and origin of the Moon // *Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf.* 1970. V. 1. P. 769–799.
- Rufu R., Aharonson O., Perets H.B.* A multiple-impact origin for the Moon // *Nature Geosci.* 2017.
<https://doi.org/10.1038/NGEO2866>
- Sakai R., Nagahara H., Ozawa K., Tachibana S.* Composition of the lunar magma ocean constrained by the conditions for the crust formation // *Icarus.* 2014. V. 229. P. 45–56.
- Schmidt M.W., Kraettli G.* Experimental crystallization of the lunar magma ocean, initial selenotherm and density stratification, and implications for crust formation, overturn and the bulk silicate Moon composition // *J. Geophys. Res.: Planets.* 2022. V. 127. id. e2022JE007187.
- Schwinger S., Breuer D.* Employing magma ocean crystallization models to constrain structure and composition of the lunar interior // *Phys. Earth and Planet. Inter.* 2022. V. 322. id. 106831.
<https://doi.org/10.1016/j.pepi.2021.106831>
- Shearer C.K., Hess P.C., Wieczorek M.A., Pritchard M.E., Parmentier E.M., Borg L.E., Longhi J., Elkins-Tanton L.T., Neal C.R., Antonenko I., Canup R.M., Halliday A.N., Grove T.L., Hager B.H., Lee D.C., Wiechert U.* Thermal and magmatic evolution of the Moon // *Rev. Mineral. Geochem.* 2006. V. 60. P. 365–518.
- Snyder G.A., Taylor L.A., Neal C.R.* A chemical model for generating the source of mare basalts: Combined equilibrium and fractional crystallization of the lunar magma sphere // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 1992. V. 56. P. 3809–3823.
- Solomon S.C.* On the early thermal state of the Moon / *Origin of the Moon* / Eds Hartmann W.K., Phillips R.J., Taylor G.J. Houston, TX: LPI, 1986. P. 435–452.

- Steenstra E.S., Berndt J., Klemme S., Fei Y., van Westrenen W.* A possible high-temperature origin of the Moon and its geochemical consequences // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2020. V. 538. id. 116222.
- Svetsov V.V., Pechernikova G.V., Vityazev A.V.* A model of Moon formation from ejecta of macroimpacts on the Earth // *43rd Lunar and Planet. Sci. Conf.* 2012. id. 1808.
- Taylor S.R.* *Planetary Science: A Lunar Perspective.* Houston: Lunar Planet. Inst., 1982. 481 p.
- Taylor S.R., Taylor G.J., Taylor L.A.* The Moon: A Taylor perspective // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 2006. V. 70. P. 594–598.
- Taylor G.J., Wieczorek M.A.* Lunar bulk chemical composition: a post-Gravity Recovery and Interior Laboratory reassessment // *Phil. Trans. Roy. Soc. A.* 2014. V. 372. P. 20130242.
- Toplis M.J., Mizzon H., Monnereau M. et al.* Chondritic models of 4-Vesta: Implications for geochemical and geophysical properties // *Meteorit. and Planet. Sci.* 2013. V. 48. P. 2300–2315.
<https://doi.org/10.1111/maps.12195>
- Wade J., Wood B.J.* The oxidation state and mass of the Moon-forming impactor // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2016. V. 442. P. 186–193.
- Warren P.H.* “New” lunar meteorites: implications for composition of the global lunar surface, lunar crust, and the bulk Moon // *Meteorit. and Planet. Sci.* 2005. V. 40. P. 477–506.
- Warren P.H., Rasmussen K.L.* Megaregolith insulation, internal temperatures and bulk uranium content of the Moon // *J. Geophys. Res.* 1987. V. 92. P. 3453–3465.
- Watters T.R., Robinson M.S., Banks M.E., Tran T., Denevi B.W.* Recent extensional tectonics on the Moon revealed by the Lunar Reconnaissance Orbiter Camera // *Nat. Geosci.* 2012. V. 5. P. 181–185.
<https://doi.org/10.1038/NGEO1387>
- Weber R.C., Lin P., Garnero E.J., Williams Q., Lognonné P.* Seismic detection of the lunar core // *Science.* 2011. V. 331. P. 309–312.
<https://doi.org/10.1126/science.1199375>
- Wieczorek M.A., Jolliff B.J., Khan A., Pritchard M.E., Weiss B.J., Williams J.G., Hood L.L., Richter K., Neal C.R., Shearer C.K., McCallum I.S., Tompkins S., Hawke B.R., Peterson C., Gillis J.J., Bussey B. et al.* The constitution and structure of the lunar interior // *Rev. Mineral. Geochem.* 2006. V. 60. P. 221–364.
- Wieczorek M.A., Neumann G.A., Nimmo F., Kiefer W.S., Taylor G.J., Melosh H.J., Phillips R.J., Solomon S.C., Andrews-Hanna J.C., Asmar S.W., Konopliv A.S., Lemoine F.G., Smith D.E., Watkins M.M., Williams J.G., Zuber M.T.* The crust of the Moon as seen by GRAIL // *Science.* 2013. V. 339. P. 671–675.
<https://doi.org/10.1126/science.1231530>
- Williams J.G., Boggs D.H.* Tides on the Moon: theory and determination of dissipation // *J. Geophys. Res.: Planets.* 2015. V. 120. P. 689–724.
<https://doi.org/10.1002/2014JE004755>
- Williams J.G., Boggs D.H., Yoder C.F., Ratcliff J.T., Dickey J.O.* Lunar rotational dissipation in solid body and molten core // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. P. 27933–27968.
<https://doi.org/10.1029/2000JE001396>
- Williams J.G., Konopliv A.S., Boggs D.H., Park R.S., Yuan D-N., Lemoine F.G., Goossens S., Mazarico E., Nimmo F., Weber R.C., Asmar S.W., Melosh H.J., Neumann G.A., Phillips R.J., Smith D.E., Solomon S.C., Watkins M.M., Wieczorek M.A., Andrews-Hanna J.C., Head J.W., Kiefer W.S., Matsuyama I., McGovern P.J., Taylor G.J., Zuber M.T.* Lunar interior properties from the GRAIL mission // *J. Geophys. Res.: Planets.* 2014. V. 119. P. 1546–1578.
<https://doi.org/10.1002/2013JE004559>
- Wittmann A., Korotev R.L., Jolliff B.L., Carpenter P.K.* Spinell assemblages in lunar meteorites Graves Nunataks 06157 and Dhofar 1528: Implications for impact melting and equilibration in the Moon’s upper mantle // *Meteorit. and Planet. Sci.* 2018. V. 54. P. 379–394.
<https://doi.org/10.1111/maps.13217>
- Wu W., Xu Y.-G., Zhang Z.-F., Li X.* Calcium isotopic composition of the lunar crust, mantle, and bulk silicate Moon: A preliminary study // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 2020. V. 270. P. 313–324.
<https://doi.org/10.1016/j.gca.2019.12.001>
- Yang Z., Wang G., Xu Y., Zeng Y., Zhang Z.* A review of the lunar ^{182}Hf - ^{182}W isotope system research // *Minerals.* 2022. V. 12. P. 759.
<https://doi.org/10.3390/min12060759>
- Yoshizaki T., McDonough W.F.* The composition of Mars // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 2020. V. 273. P. 137–162.
<https://doi.org/10.1016/j.gca.2020.01.011>

УДК 523.44

ПОИСК ПРИЗНАКОВ СУБЛИМАЦИОННО-ПЫЛЕВОЙ АКТИВНОСТИ АСТЕРОИДОВ ПРИМИТИВНЫХ ТИПОВ ВБЛИЗИ ПЕРИГЕЛИЯ

© 2023 г. В. В. Бусарев^{a, b, *}, Е. В. Петрова^c, М. П. Щербина^{a, b}, С. Ю. Кузнецов^d, М. А. Бурлак^a, Н. П. Иконникова^a, А. А. Савелова^e, А. А. Белинский^a

^aМГУ им. М.В. Ломоносова, Астрономический ин-т им. П.К. Штернберга (ГАИШ МГУ), Москва, Россия

^bИнститут астрономии РАН (ИНАСАН), Москва, Россия

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

^dМГУ им. М.В. Ломоносова, Факультет космических исследований, Москва, Россия

^eМГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, Москва, Россия

*e-mail: busarev@sai.msu.ru

Поступила в редакцию 27.02.2023 г.

После доработки 30.03.2023 г.

Принята к публикации 28.04.2023 г.

С декабря 2021 г. по февраль 2022 г. в Кавказской горной обсерватории (КГО) ГАИШ МГУ на 0.6-метровом полуавтоматическом телескопе RC600 проведена *UBVRI*-фотометрия доступных для наблюдений 29 астероидов Главного пояса примитивных типов, находившихся вблизи перигелийных расстояний. Наблюдения, обработка и анализ этих данных проводились с целью поиска предполагаемой сублимационно-пылевой активности астероидов при максимальных подсолнечных температурах. В число решаемых задач входило также сравнение физических и динамических параметров активных и неактивных астероидов. Основным результатом является обнаружение значительных спектральных признаков квазидновременной сублимационно-пылевой активности шести астероидов примитивных типов Главного пояса – 145 Адеоны, 302 Клариссы, 322 Фео, 435 Эллы, 690 Вратиславии и 779 Нины (у 302 Клариссы, 322 Фео, 435 Эллы, 690 Вратиславии – впервые), что составляет ~21% от общего числа тел, включенных в данную наблюдательную программу. Вероятные спектральные проявления активности с меньшей интенсивностью были впервые обнаружены еще у пяти астероидов: 424 Грации, 751 Фаины, 762 Пулковой, 778 Теобальды и 859 Бузареа. Сублимационно-пылевая активность 145 Адеоны и 779 Нины вблизи перигелия нами зарегистрирована уже в третий раз на протяжении последних 10 лет, что соответствует примерно трем периодам обращения этих астероидов вокруг Солнца. Рассматриваются причины наличия астероидных семейств у пяти из перечисленных астероидов. Обсуждаются общие процессы и условия, которые могли и/или могут влиять на относительное количество объектов с квазидновременной сублимационно-пылевой активностью среди астероидов примитивных типов.

Ключевые слова: астероиды, *UBVRI*-фотометрия, химико-минеральный состав вещества, льды H₂O и CO₂, сублимационно-пылевая активность

DOI: 10.31857/S0320930X23050018, **EDN:** OCGFJC

ВВЕДЕНИЕ

Проблема активности астероидов возникла около 25 лет назад, когда в Главном поясе астероидов (ГПА) были обнаружены несколько небольших объектов, проявивших временную кометоподобную активность. На прямых снимках этих тел были зарегистрированы характерные кометные хвосты, поэтому их назвали “кометами Главного пояса” (Hsieh, Jewitt, 2006; Hsieh, 2009). Тогда предположили, что это, возможно, – потерявшие активность ядра комет из семейства Юпитера, которые попали в ГПА под влиянием гравитационных резонансов (Hsieh, Nighipour, 2016). Но, несмотря на тщательные поиски, общее чис-

ло тел, имевших явные признаки кометной активности в момент обнаружения, пока не превышает десяти, а остальные 2–3 десятка, с более слабыми проявлениями активности, являются известными астероидами Главного пояса (см., например, Chandler и др., 2018; Hsieh и др., 2018; Jewitt, Hsieh, 2022). В связи с этим следует подчеркнуть, что наиболее многочисленная популяция астероидов Главного пояса (составляющая по некоторым оценкам до ~75% ГПА), – это тела примитивных типов с низкотемпературной минералогией, преимущественно входящие в таксономические (спектральные) классы C, B, F, и G, которым, как считается, соответствуют углистые

хондриты, имеющие признаки водных изменений. Анализ спектральных характеристик и оценка минералогии этих астероидов (см., например, Gaffey и др., 1989; 2002), моделирование процессов их формирования (см., например, Zolensky и др., 1989; McSween Jr. и др., 2002), а также изучение углистых хондритов (см., например, Bradley, 2006; Alexander и др., 2018 и ссылки там же), свидетельствуют о формировании их родительских тел в ранней Солнечной системе в окрестности “линии льда H_2O ” или за ее пределами. Поэтому весьма вероятно, что большинство астероидов ГПА перечисленных примитивных типов потенциально может проявлять сублимационно-пылевую активность (СПА) при условии наличия в их недрах ледяных залежей. Остановимся на этом более подробно в разделе “Дискуссия”.

Как показали недавние космические исследования астероидов С-типа 1 Церера на КА Dawn (NASA) и 162173 Рюгу на КА Hayabusa-2 (см., например, Schorghofer, 2016; Sugita и др., 2019), реголит астероидов примитивных типов состоит из очень мелких частиц, имеет высокую пористость и крайне низкую теплопроводность, а его толщина может достигать нескольких метров или даже больше. В таком случае время “выживания” льдов (в основном H_2O по причине более высокой летучести CO_2) (см., например, Fanale, Salvail, 1989; Longhi, 2005) может достигать ~4 млрд лет (Schorghofer, 2008, 2016). Можно также предполагать, что локальные обнажения подповерхностных ледяных залежей или выбросы ледяных материалов регулярно возникают на поверхности таких астероидов в результате ударных событий, происходящих в ГПА с высокой частотой и имеющих широкий спектр энергий. Основным признаком регулярных и массовых ударных событий в ГПА являются связанные с ним устойчивые пылевые пояса, обнаруженные по данным КА IRAS (Sykes и др., 1989; Veeder, Tedesco, 1992). Высокая вероятность ударных событий в ГПА также подтверждается результатами недавних модельными расчетами (Шустов и др., 2022). Еще одним регулярным и массовым фактором воздействия на астероиды являются солнечная вспышечная (в электромагнитном диапазоне, чаще всего в рентгеновском) и эруптивная (выброс вещества в виде плазмы) активность, которые приводят к образованию ударных МГД-волн в солнечном ветре, способных отрывать от поверхности астероидов и приводить в движение мельчайшие наэлектризованные частицы реголита и формировать из них пылевую экзосферу, приобретающую в моменты прохождения ударных волн форму короткого кометного хвоста, вытянутого в антисолнечном направлении (Бусарев, 2018; Busarev и др., 2021). Возможны и другие процессы, которые приводят к пылевой активности астероидов (см., например, Jewitt, 2012 и ссылки там же), но они являются более

экзотическими и/или имеют более низкую вероятность.

Поиски СПА (под этим термином мы понимаем образование газовых потоков при сублимации водяного льда, увлекающих мелкую пыль субмикронных размеров и формирующих разреженную пылевую экзосферу тела, удерживаемую его гравитационным полем) астероидов примитивных типов Главного пояса, связанной с их низкотемпературным происхождением и предполагаемым наличием подповерхностных ледяных слоев, были нами начаты около 10 лет назад (Busarev и др., 2015). Использование спектрофотометрии низкого разрешения позволило обнаружить СПА сразу четырех астероидов: 145 Адеоны, 704 Интерамнии, 779 Нины и 1474 Бейры (Busarev и др., 2015; Бусарев и др., 2016). Последующие наблюдения (включая рассматриваемые здесь) дважды подтвердили СПА вблизи перигелия 145 Адеоны и 779 Нины и, повторно, 704 Интерамнии (Busarev и др., 2015; 2018; Бусарев и др., 2019). Таким образом, имеются признаки периодичной у перигелия и/или имеющую большую длительность СПА некоторых астероидов примитивных типов, на поверхности которых могут возникать обнажения ледяных материалов, возможно, по причине их близости к поверхности. Целью данной статьи является представление и обсуждение результатов поиска новых астероидов примитивных типов в Главном поясе с признаками СПА, а также изучение вызывающих ее причин.

НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ИХ АНАЛИЗ

Нами выполнены новые *UBVRI*-наблюдения 29 астероидов примитивных типов в Главном поясе, находившихся вблизи перигелия в декабре 2021 г.—феврале 2022 г. Для этого был использован телескоп RC600 (0.6 м) в Кавказской горной обсерватории (КГО) ГАИШ МГУ (высота 2112 м над уровнем моря). Телескоп работает в полуавтоматическом режиме и оснащен фотометром Andor (iKON-L DZ-936N-BV; ПЗС-матрица 2048×2048 элементов; размер пикселя 13.5 мкм) с набором *UBVR_cI_c*-светофильтров системы Джонсона—Козинса и ПЗС-матрицей, охлаждаемой до -60°C . Эффективные длины волн *UBVR_cI_c*-светофильтров — соответственно 355.9, 427.0, 543.9, 656.6 и 804.1 нм — определялись по интегральной формуле для средней взвешенной величины $\lambda_{\text{эф}}$ с учетом функции спектрального пропускания $R(\lambda)$ каждого из них (см., например, Bessell, 2005; Мионов, 2008):

$$\lambda_{\text{эф}} = \frac{\int R(\lambda)\lambda d\lambda}{\int R(\lambda)d\lambda}. \quad (1)$$

Таблица 1. Эффективные длины волн $\lambda_{эф}$ и полуширины $\Delta\lambda$ установленных светофильтров $UBVR_cI_c$ и результирующей фотометрической системы $U'B'V'R'_cI'_c$, а также их относительные различия

Эффективные длины волн и полуширины (нм)	<i>U</i>	<i>B</i>	<i>V</i>	<i>R_c</i>	<i>I_c</i>
$\lambda_{эф}$	355.9	427.0	543.9	656.6	804.1
$\Delta\lambda$	61.7	95.8	99.8	155.4	167.8
	<i>U'</i>	<i>B'</i>	<i>V'</i>	<i>R'_c</i>	<i>I'_c</i>
$\lambda'_{эф}$	366.3	436.5	544.8	653.5	797.1
$ (\lambda'_{эф} - \lambda_{эф})/\lambda_{эф} $	0.029	0.022	0.002	0.005	0.009
$\Delta\lambda'$	42.9	89.3	100.3	153.7	163.4
$ (\Delta\lambda - \Delta\lambda')/\Delta\lambda $	0.305	0.068	0.005	0.011	0.026

В табл. 1 представлены полуширины (FWHM) и эффективные длины волн установленных на телескопе RC600 $UBVR_cI_c$ -светофильтров (рис. 1а) и эти же параметры, рассчитанные для всей фотометрической системы $U'B'V'R'_cI'_c$ (рис. 1в), включая квантовую эффективность (КЭ) ПЗС-матрицы (рис. 1а), прозрачность входного окна камеры (ОК) (рис. 1а) и модельную медианную спектральную прозрачность атмосферы для КГО (СПКГО) ГАИШ (рис. 1б).

СПКГО была рассчитана (Kornilov и др., 2016) с помощью пакета программ для численного моделирования переноса излучения в земной атмосфере в зависимости от высоты обсерватории над уровнем моря, сезонного содержания в атмосфере водяного пара и ряда других параметров (Emde и др., 2016). Как видно (рис. 1б и 1в), на фотометрические полосы R_c и I_c оказывают влияние сильные теллурические полосы O_2 (A-band) и H_2O (Kucisz, 2005).

Как следует из табл. 1, относительные различия эффективных длин волн $UBVR_cI_c$ и $U'B'V'R'_cI'_c$ составляют соответственно 0.029, 0.022, 0.002, 0.005 и 0.009, а относительные отличия полуширин полос (FWHM) – соответственно 0.305, 0.068, 0.005, 0.011 и 0.026. Поскольку последние больше по величине, их можно принять за предельные погрешности измеряемых интенсивностей света от объектов при их пересчете во внеатмосферную систему.

Табл. 2 и 3 содержат перечень рассматриваемых 29 астероидов и их основные физические, динамические и наблюдательные параметры. В табл. 3 также приведены сведения о звездах солнечного типа, использованных при обработке данных.

Методика обработки данных

Для обнаружения пылевой активности астероидов нами применялась методика, основанная на дифференциальной $UBVR_cI_c$ -фотометрии этих тел и непременных стандартных звезд солнечного типа с целью определения отражательной способности астероидов на эффективных длинах волн светофильтров. Общепринятый в спектрофотометрии метод расчета отражательной способности астероида (или спектра отражения) как безатмосферного небесного тела выражается следующей формулой (см., например, Бусарев, 1999):

$$\rho(\alpha, \lambda) = k I_a(\alpha, \lambda) p(\lambda)^{-\delta M} / I_3(\lambda), \quad (2)$$

где $I_a(\lambda)$ и $I_3(\lambda)$ – монохроматические интенсивности света, регистрируемого на приемнике, от астероида и непременной звезды – солнечного аналога (заменяющей в первом приближении Солнце), из которых исключен фон неба; α – фазовый угол астероида, $p(\lambda)$ – функция спектральной прозрачности земной атмосферы, рассчитанная для данной наблюдательной ночи; $\delta M = M_a - M_3$ – разность воздушных масс, соответствующих астероиду и стандартной звезде; k – некоторый постоянный коэффициент.

В отличие от спектрофотометрии, при $UBVRI$ -фотометрии в формуле (2) использовались не монохроматические, а интегральные интенсивности света от объектов в фотометрических полосах. Кроме того, как уже отмечалось, несколько менялись полуширины самих фотометрических полос и значения $\lambda_{эф}$ (см. табл. 1) под влиянием спектральной чувствительности ПЗС-матрицы и функции спектральной прозрачности земной атмосферы (включая эффекты от теллурических полос). Но, с учетом деления интенсивности света от астероида на аналогичную величину от звезды солнечного типа (для определения отражательной способности астероида), такие изменения в

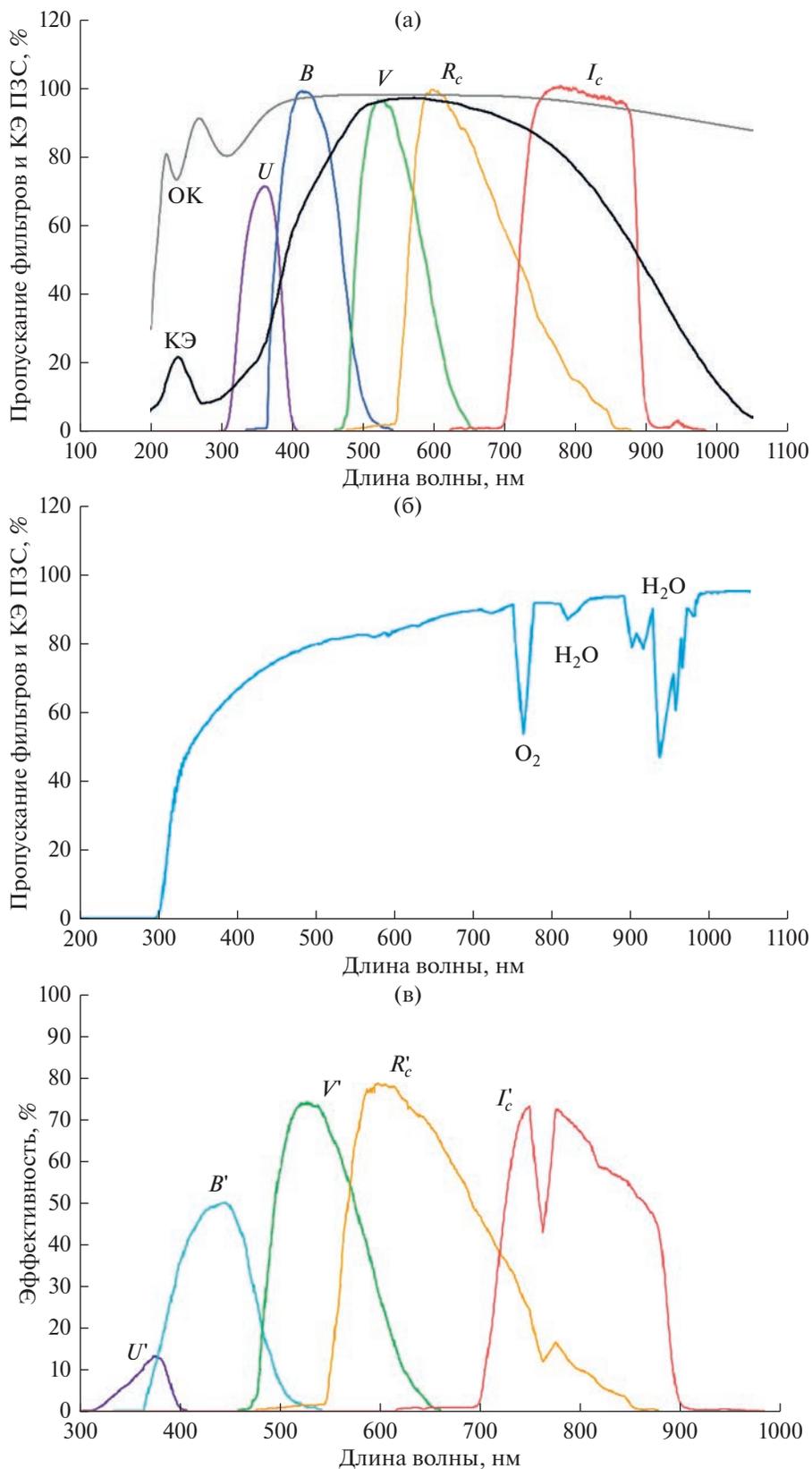


Рис. 1. Спектральные характеристики фотометра телескопа RC600, модельной спектральной прозрачности земной атмосферы для КГО (СПКГО) и всей фотометрической системы: (а) – спектральные характеристики используемых $UBVR_cI_c$ -светофильтров, квантовая эффективность (КЭ) ПЗС-матрицы и прозрачность входного окна камеры (ОК); (б) – модельная медианная СПКГО; (в) – результирующие спектральные характеристики используемой фотометрической системы $U'B'V'R'_cI'_c$.

Таблица 2. Физические и динамические параметры астероидов

Номер	Название	Спектр. класс Толена	Спектр. класс SMASSII	Геометр. альbedo	Диаметр (км)	Большая полуось орбиты (а. е.)	Эксцентриситет орбиты	Перигелийное расстояние (а. е.)	Наличие семейства, (название и число членов)
91	Эгана	CP	Ch	0.048	103.402	2.590	0.107121	2.313	–
98	Ианта	CG	Ch	0.029	132.788	2.688	0.187465	2.184	–
106	Диона	G	Cgh	0.044	207.869	3.180	0.159383	2.674	–
145	<u>АДЕОНА</u>	C	Ch	0.061	127.783	2.671	0.146710	2.280	Adeona (6279)
212	Медея	DCX	–	0.0465	136.12	3.116	0.102909	2.796	–
257	Силезия	SCTU	Ch	0.0545	72.66	3.118	0.112244	2.769	–
302	<u>КЛАРИССА</u>	F	–	0.0524	38.53	2.406	0.110197	2.141	Clarissa (664)
322	<u>ФЕО</u>	X	X	0.089	69.855	2.782	0.244701	2.101	Phaео (335)
398	Адмета	–	C	0.054	49.771	2.738	0.223934	2.125	–
424	ГРАЦИЯ	C	–	0.027	102.565	2.774	0.109163	2.472	–
435	<u>ЭЛЛА</u>	DCX	–	0.118	34.792	2.449	0.154892	2.070	–
521	Бриксия	C	Ch	0.073	107.227	2.743	0.278496	1.980	–
626	Нотбурга	CX	Xc	0.032	73.236	2.574	0.241884	1.952	–
659	Нестор	XC	–	0.035	112.320	5.166	0.116690	4.563	–
690	<u>ВРАТИСЛАВИЯ</u>	CPF	–	0.0604	134.65	3.149	0.176809	2.592	–
705	Эрминия	X	C	0.031	132.261	2.924	0.051088	2.775	–
751	ФАИНА	C	Ch	0.027	113.699	2.551	0.151115	2.166	–
762	ПУЛКОВА	F	–	0.040	147.343	3.154	0.106967	2.818	–
778	ТЕОБАЛЬДА	F	–	0.079	55.317	3.179	0.256195	2.366	Theobalda (3185)
779	<u>НИНА</u>	–	X	0.157	80.572	2.664	0.227025	2.059	–
859	БУЗАРЕА	C	–	0.031	65.417	3.226	0.110093	2.872	–
916	Америка	C	–	0.0530	33.23	2.365	0.236585	1.805	–
934	Тюрингия	–	Ch	0.047	53.714	2.749	0.215947	2.156	–
1001	Гауссия	PC	–	0.041	72.711	3.209	0.122298	2.818	–
1115	Сабауда	C	–	0.044	75.907	3.099	0.173958	2.561	–
1189	Теренция	–	Ch	0.042	59.246	2.931	0.111807	2.604	Terentia (421)
1235	Шоррия	CX	–	–	–	1.910	0.154585	1.615	–
1295	Дефлотта	c	–	0.046	47.407	3.390	0.124333	2.970	–
1448	Линдбладия	CX	–	0.0378	20.65	2.373	0.185703	1.932	–

Примечания: названия астероидов с обнаруженной СПА выделены заглавными буквами и подчеркнуты; названия астероидов, подозреваемых в активности, выделены заглавными буквами без подчеркивания; данные, приведенные в столбцах 3, 4, 5, 6, 7, 8 и 9, взяты с сайта <https://ssd.jpl.nasa.gov/>, а в столбце 10 – согласно Novaković и др., 2022 (<http://asteroids.matf.bg.ac.rs/fam/families/afp.fam.summary>).

основном компенсируются благодаря их мультипликативному характеру. Также важно подчеркнуть, что при проведении наблюдений воздушные массы абсолютного большинства объектов не превышали 1.3, за исключением нескольких, с воздушными массами до 1.5 (см. табл. 3). Кроме того, все обсуждаемые наблюдения выполнены в зимний период, при наиболее высокой прозрачности земной атмосферы вблизи КГО ГАИШ.

Как видно из табл. 3, фазовые углы астероидов в моменты наблюдений были не более 20° и, как следует из результатов лабораторных модельных измерений (см., например, Sanchez и др., 2012), не могли заметно повлиять на форму аппроксимированных спектров отражения. Поэтому для упрощения расчетов по формуле (2) предпола-

лось, что в указанном диапазоне фазовых углов $I_a(\alpha, \lambda) \approx I_a(\lambda)$.

Итак, нами соблюдалась следующая последовательность операций: (а) коррекция равномерности чувствительности (плоского поля) регистрирующей ПЗС-матрицы, а также учет темновых токов и шумов считывания сигнала; (б) последовательная регистрация во всех светофильтрах интенсивностей света от астероида и ближайшей к нему по координатам звезды G-типа как солнечного аналога (отсутствие переменности такой звезды контролировалось по базам данных); (в) определение значений функции спектральной прозрачности земной атмосферы $p(\lambda)$ на эффективных длинах волн светофильтров путем сравнения интенсивностей света от стандартной звезды ($I_1(\lambda)$ и $I_2(\lambda)$) на двух разных воздушных массах ($M1$ и $M2$):

Таблица 3. Наблюдательные параметры астероидов и звезд

Дата	УТ сред. (час:мин:с)	Геоцентр. расстояние (а. е.)	Гелиоцентр. расстояние (а. е.)	Наклонение орбиты (град)	Фазовый угол (град)	Звезд. величина (V^m)	Воздушн. масса астероида	Стандарт, звезда G-типа	Воздушн. масса звезды
91 ЭГИНА									
2022 01 05	01:58:58	1.5880	2.3905	2.103	16.7797	12.691	1.245	HD 107515	1.191
2022 02 12	23:04:30	1.4389	2.4255		1.0997	11.788	1.216	HD 107515	1.209
98 ИАНТА									
2022 02 25	23:34:58	1.2201	2.1846	15.576	7.8358	11.585	1.283		
	23:37:17	1.2201	2.1846		7.8363	11.585	1.289	HD 107515	1.188
	23:41:53	1.2201	2.1846		7.8375	11.585	1.306		
106 ДЮНА									
2021 12 16	22:39:07	1.8086	2.7732	4.576	4.9734	11.531	1.259	Wolf 1059	1.052
145 АЛЕОНА									
2021 12 10	20:28:32	1.5092	2.4338	12.62	10.1364	11.698	1.195	Cl Melotte 201100	1.021
212 МЕДЕЯ									
2022 01 09	18:10:24	19886	2.8200	4.278	12.7261	12.886	1.047	HD 287324	1.217
257 СИЛЕЗИЯ									
2021 12 12	0:05:33	1.8166	2.7883	3.613	4.0649	13.362	1.171	Wolf 1059	1.038
302 КЛАРИССА									
	17:28:18	1.3144	2.1586	3.413	17.2185	14.314	1.060		
2022 01 09	17:35:01	1.3145	2.1586		17.2204	14.314	1.055	HD 287324	1.262
	17:45:18	1.3145	2.1586		17.2232	14.314	1.050		
322 ФЕО									
2021 12 11	18:47:19	1.3911	2.3491	8.045	7.2219	12.210	1109	Cl Melotte 201100	1.010
398 АДИМЕТА									
2021 12 11	01:22:37	1.4185	2.1760	9.553	20.6427	13.897	1.154	Wolf 1059	1.095
2022 02 12	22:21:47	1.3427	2.2726		10.8845	13.535	1.465	HD 107515	1.289
424 ГРАЦИЯ									
2022 01 06	02:33:23	1.8216	2.6087	8.221	15.5486	13.837	1.252	HD 107515	1.183
2022 02 12	23:48:46	1.6688	2.6480		3.4263	13.159	1.216	HD 107515	1.187
435 ЭЛЛА									
2021 12 07	20:53:15	1.3146	2.2377	1.816	11.5058	13.469	1.193		
	20:57:42	1.3146	2.2377		11.5071	13.469	1.200	HIP 14697	1.056
	21:04:17	1.3146	2.2377		11.5093	13.469	1.215		

Таблица 3. Продолжение

Дата	UT сред. (час:мин:с)	Геоцентр. расстояние (а. е.)	Гелиоцентр. расстояние (а. е.)	Наклонение орбиты (град)	Фазовый угол (град)	Звезд. величина (V^m)	Воздушн. масса астероида	Стандарт, звезда G-типа	Воздушн. масса звезды
521 Бриксия									
2021 12 11	19:46:32	1.0598	2.0243	10.582	7.7593	10.899	1.142	HD 285598	1.140
	19:47:59	1.0598	2.0243		7.7600	10.899	1.141		
	19:50:11	1.0598	2.0243		7.7607	10.899	1.141		
2021 12 16	20:18:38	1.0834	2.0311		10.2520	11.093	1.146	HD 287324	1.204
626 Нобурга									
2021 12 07	18:58:39	1.2555	2.0434	25.378	21.2777	12.326	1.052	BD + 40349	1.031
659 Нестор									
2021 12 07	19:46:47	4.0861	4.9341	4.522	6.3949	15.713	1.133	BD + 23331	1.102
690 ВРАТИСЛАВИЯ									
2021 12 10	20:03:14	18441	2.7692	11.244	8.5592	12.188	1.094	CI Melotte 201100	1.009
705 Эрминия									
2022 01 09	03:00:46	1.9850	2.7850	25.018	13.9748	13.000	1.143	HD 107515	1.200
51 ФАИНА									
2021 12 08	00:25:54	1.6802	2.4585	15.596	17.0965	12.840	1.031	Wolf 1059	1.039
	23:09:01	1.7505	2.5730		14.8028	12.942	1.467		
2022 02 15	23:12:34	1.7505	2.5730		14.8034	12.942	1.481	HD 107515	1.194
	23:17:48	1.7506	2.5730		14.8044	12.942	1.506		
762 ПУЛКОВА									
2021 12 13	02:49:26	1.9890	2.8579	13.097	11.1502	12.536	1.338	Wolf 1059	1.301
	21:27:58	2.1322	2.8272		16.5050	12.856	1.521		
2022 02 25	21:32:25	2.1327	2.8272		16.5056	12.856	1.544	HD 107515	1.276
	21:39:00	2.1323	2.8272		16.5067	12.856	1.585		
778 ТЕОБАЛЬДА									
2021 12 07	23:51:43	1.5708	2.3682	13.711	17.2617	13.553	1.024	Wolf 1059	1.038
	21:45:15	1.5671	2.4176		14.8203	13.510	1.259		
2022 02 15	21:49:07	1.5671	2.4176		14.8213	13.510	1.271	HD 107515	1.334
	21:54:52	1.5672	2.4177		14.8227	13.510	1.291		
779 НИНА									
2021 12 11	20:24:41	1.6369	2.5728	14.574	8.5445	11.729	1.032	CI Melotte 201100	1.021
	20:27:00	1.6369	2.5728		8.5452	11.729	1.034		
	20:30:35	1.6369	2.5728		8.5459	11.729	1.036		

Таблица 3. Продолжение

Дата	УТ сред. (час:мин:с)	Геоцентр. расстояние (а. е.)	Гелиоцентр. расстояние (а. е.)	Наклонение орбиты (град)	Фазовый угол (град)	Звезд. величина (V^m)	Воздушн. масса астероида	Стандарт, звезда G-типа	Воздушн. масса звезды
859 БУЗАРЕА									
2021 12 29	23:41:04	2.2239	3 0467	13.503	11.8857	14.655	1.017	Wolf 1059	1.064
	22:57:29	2.2636	3.1045		11.3062	14.713	1.286		
2022 02 25	23:02:06	2.2636	3.1045		11.3070	14.713	1.303	HD 107515	1.183
	23:09:05	2.2637	3.1045		11.3082	14.713	1.327		
916 Америка									
2021 12 16	00:45:59	1.2611	2.1835	11.095	11.8812	14.440	1.079	Wolf 1059	1.074
934 Тюрингия									
2021 12 11	23:28:54	1.3752	2.3172	14.081	9.2141	13.241	1.081	Wolf 1059	1.042
1001 Гауссия									
	18:44:11	2.0539	2 8823	9.315	12.4951	14.365	1 084		
2022 01 09	18:51:01	2.0539	2.8823		12.4966	14.365	1.086	HD 287324	1.205
	19:01:16	2.0540	2.8823		12.4987	14.365	1.091		
1115 Сабауда									
2021 12 13	02:17:01	1.7179	2.6029	15.285	11.7168	13.716	1.221	Wolf 1059	1.205
1189 Теренция									
2021 12 16	21:53:01	1.8022	2.7495	9.863	6.8655	13.998	1171	Wolf 1059	1.103
1235 Шоррия									
	00:36:26	1.0017	1.7849	25.002	26.0165	15.646	1.365		
2022 02 16	00:43:56	1.0018	1.7849		26.0170	15.646	1.383	HD 107515	1.215
	00:54:59	1.0018	1.7849		26.0178	15.646	1.416		
1295 Дефлогга									
	20:13:07	2.0848	3 0410	2.886	5.6825	15.196	1.150		
2022 02 18	20:19:43	2.0848	3.0410		5.6840	15.196	1.151	Wolf 1059	1.066
	20:32:19	2 0848	3 0410		5.6873	15.196	1.154		
1448 Лндлбладня									
	22:23:03	1.0636	1.9350	5.813	18.6507	15.414	1.328		
2022 02 15	22:30:52	1.0636	1.9350		18.6527	15.414	1.354	HD 107515	1.246
	22:42:27	1.0636	1 9350		18.6563	15.414	1.403		

Примечания: названия астероидов с обнурженной СПА выделены заглавными буквами и подчеркнуты, названия астероидов, ползреваемых в активности, выделены заглавными буквами без подчеркивания.

$$p(\lambda) = [I_2(\lambda)/I_1(\lambda)]^{1/(M_1-M_2)}; \quad (3)$$

(г) расчет отражательной способности астероида на пяти эффективных длинах волн светофильтров в соответствии со стандартной формулой (2) (следует подчеркнуть, что при такой методике величина отражательной способности астероида освобождается от влияния земной атмосферы); (д) нормировка отражательной способности астероида, рассчитанной во всех светофильтрах, на значение этого параметра в фильтре V ; и, наконец, (е) построение по этим данным кривой, являющейся нормированным аппроксимированным спектром отражения астероида (далее, условно, – “нормированный спектр отражения” или НСО).

Таким образом, средние *UBVRI*-значения спектральной прозрачности атмосферы определялись нами по формуле (3) для каждой наблюдательной ночи при наблюдениях стандартных звезд солнечного типа. Контроль кратковременной фотометрической стабильности (экстинкции) атмосферы в моменты наблюдений астероидов осуществлялся по ближайшим к ним непременным звездам (на общих ПЗС-кадрах) с помощью расчета и сравнения между собой трех последовательных аппроксимированных спектров каждой такой звезды (см. вставки на рис. 2 и 3). По совпадению этих спектров видно, что такие погрешности пренебрежимо малы.

Еще одним важным вопросом является точность совпадения распределений энергии в спектре Солнца и звезд G-типа, использованных в работе для расчета спектров отражения астероидов. Учитывая наибольшую информативность коротковолновой части спектра для поиска признаков активности астероидов, мы оценили эту точность по относительным отклонениям показателей цвета $B-V$ приведенных в табл. 3 звезд (по данным из базы Simbad, <http://simbad.cds.unistra.fr/simbad/sim-fbasic>) от показателя цвета Солнца (0.65). Проведенные расчеты показали, что указанные погрешности расчета НСО астероидов с явной активностью и подозреваемых в активности не выходят за пределы диапазона ошибок 1–3%.

Результаты наблюдений и их интерпретация

Основные физические и динамические параметры астероидов приведены в табл. 2, а наблюдательные параметры всех объектов – в табл. 3.

Нормированные аппроксимированные спектры отражения (НСО) астероидов 145 Адеоны, 302 Клариссы, 322 Фео, 435 Эллы, 690 Вратиславии и 779 Нины, имеющих явные признаки активности, представлены на рис. 2, а НСО астероидов 424 Грации, 751 Фаины, 762 Пулковой, 778 Теобальды и 859 Бузара, подозреваемых в ак-

тивности или с более слабыми проявлениями активности, – на рис. 3.

С целью выбора (в дальнейшем) более предпочтительного из двух возможных вариантов измерений (сериальных или несериальных), освещенность от астероида, регистрируемая на приемнике, в нашей работе измерялась одним из двух способов: (1) по данным, полученным в трех последовательных сериях, в каждой из которых измерения во всех светофильтрах осуществлялись последовательно по одному разу, а полученные при этом данные не усреднялись; либо (2) – по трем измерениям в каждом фильтре последовательно во всех светофильтрах, и в этом случае данные в каждом фильтре усреднялись. Различия в порядке измерений привели к несколько разным представлениям полученных результатов на графиках (см. рис. 2 и 3). В первом случае сериальные данные, отмеченные точками одного цвета на графиках, использовались для построения трех отдельных НСО. Во втором случае три измерения в каждом свето фильтре усреднялись, и по найденным средним значениям строился только один НСО. Таким образом, для каждого астероида на соответствующую дату на графике изображены либо три последовательных аппроксимированных спектра (при сериальных измерениях), либо один усредненный НСО (при несериальных измерениях). На основе сравнения двух вариантов расчета и представления данных наблюдений во многих полосах мы пришли к выводу, что метод сериальных измерений является более предпочтительным, так как при его использовании на результирующих графиках передается больше информации не только о форме, но и о динамике спектральных особенностей у активных астероидов. Как было показано в предшествующих публикациях (см., например, Busarev и др., 2021; Бусарев и др., 2022), подобные спектральные детали характеризуют состав и структуру пылевых частиц в экзосферах активных астероидов.

На вставках на каждом графике (см. рис. 2 и 3) также приведено по три нормированных аппроксимированных спектра одной или двух (при повторных наблюдениях некоторых астероидов) непременных стандартных звезд, которые использовались для контроля устойчивости спектральной прозрачности земной атмосферы. Но можно видеть, что в большинстве случаев спектры каждой такой звезды, выделенные разными цветами, сливаются в один спектр как признак хороших наблюдательных условий. Близкое совпадение аппроксимированных спектров стандартных звезд характеризует высокую точность измерений и расчета НСО рассматриваемых астероидов в целом.

Как следует из рис. 2, у астероидов 145 Адеоны, 302 Клариссы, 322 Фео, 435 Эллы, 690 Вратисла-

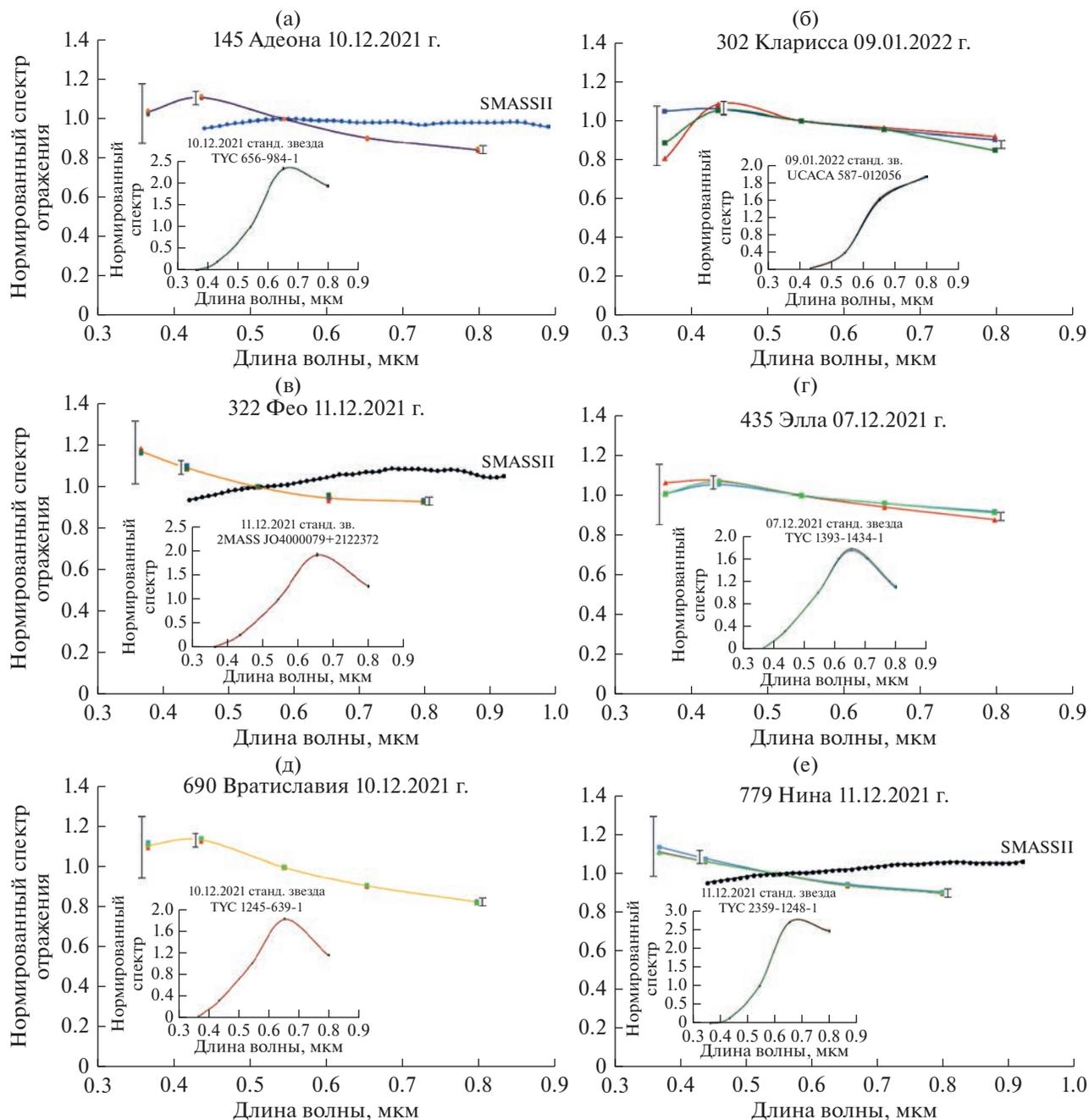


Рис. 2. Нормированные аппроксимированные спектры отражения астероидов с явными признаками активности: (а) – 145 Адеона, (б) – 302 Кларисса, (в) – 322 Фео, (г) – 435 Элла, (д) – 690 Вратиславия и (е) – 779 Нина. Даты наблюдений астероидов указаны на соответствующих рисунках. На графиках 145 Адеоны, 322 Фео и 779 Нины для сравнения приведены нормированные спектры отражения этих астероидов из базы данных SMASSII (<https://sb-napps.psi.edu/ferret/SimpleSearch/results.action#Asteroid%20145%20AdeonaEAR-A-10028-4-SBN0001/SMASSII-V1.0>), полученные в стандартных условиях (при отсутствии активности астероидов). На вставках графиков приведены спектры непременных стандартных звезд, которые использовались для контроля стабильности спектральной прозрачности земной атмосферы и оценки общей точности измерений. Предельные погрешности измерений (полученные при расчете FWHM полос фотометрической системы $U'V'R'_cI'_c$) приведены для фотометрических полос U' и I'_c . Для полос V' и R'_c они составляют менее 1% и поэтому не показаны.

вии и 779 Нины в течение одной ночи наблюдались отклонения НСО до $\sim 30\%$ в полосе U и до $\sim 20\%$ в полосе V по сравнению с их стандартными

спектральными характеристиками, в качестве которых использовались их спектры из базы данных SMASSII (в случае их наличия). Хотя погрешности

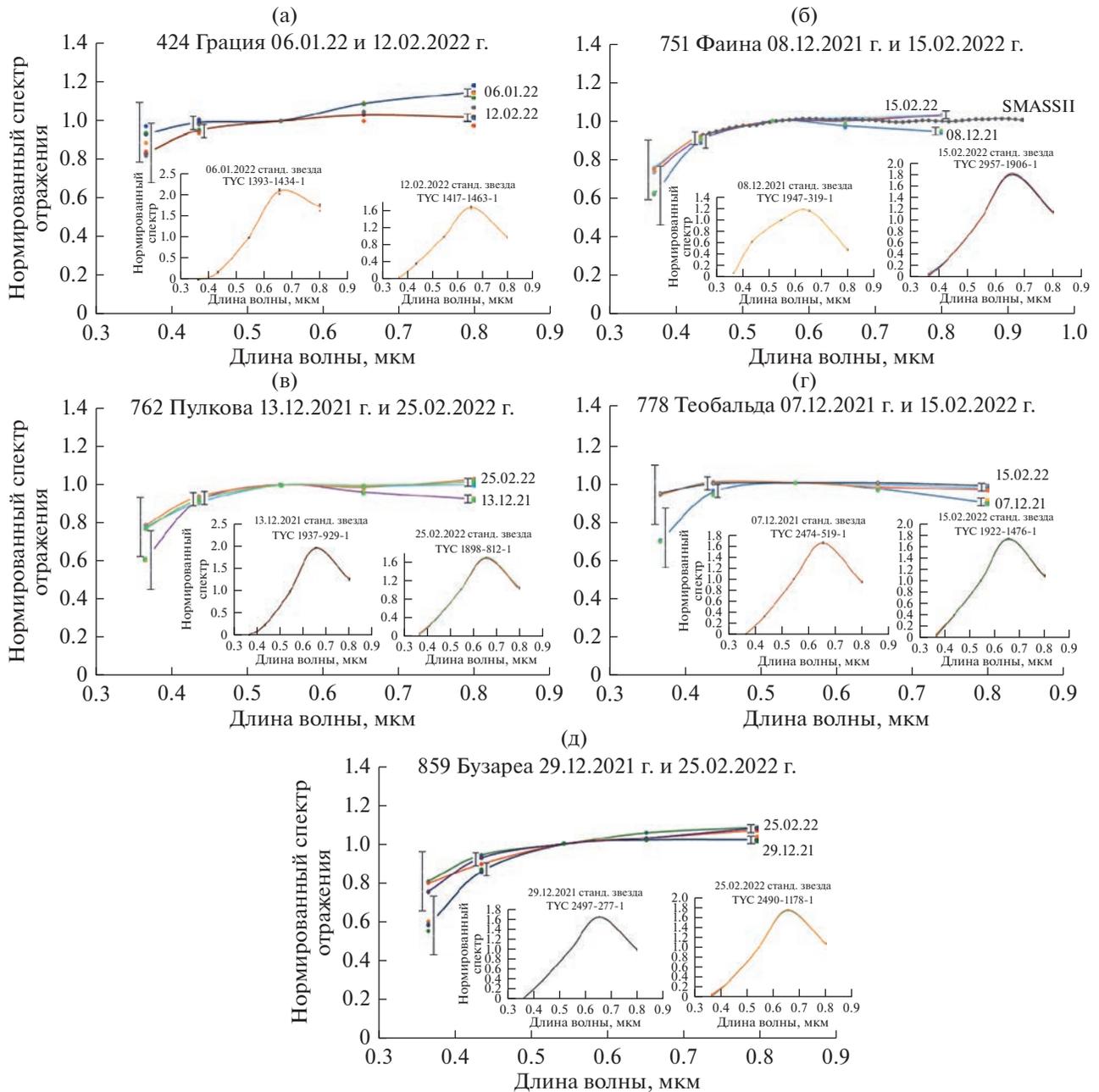


Рис. 3. Нормированные аппроксимированные спектры отражения астероидов с вероятными (более слабыми) признаками активности: (а) – 424 Грация, (б) – 751 Фаина, (в) – 762 Пулкова, (г) – 778 Теобальда, (д) – 859 Бузареа. Даты наблюдений астероидов указаны на соответствующих рисунках. На графике 751 Фаины для сравнения приведен нормированный спектр отражения этого астероида из базы данных SMASII (<https://sbnapps.psi.edu/ferret/SimpleSearch/results.action#Asteroid%20145%20AdeonaEAR-A-I0028-4-SBN0001/SMASII-V1.0>), полученный при отсутствии активности астероида. На вставках графиков изображены спектры непременных стандартных звезд, которые наблюдались одновременно с астероидами и использовались для контроля стабильности спектральной прозрачности земной атмосферы и оценки общей точности измерений. Предельные погрешности измерений приведены для фотометрических полос UB' и I_c' . Для полос V и R_c' они составляют менее 1% и поэтому не показаны.

получения SMASII-данных не приводятся (как и фазовые углы) (<https://sbnapps.psi.edu/ferret/SimpleSearch/results.action#Asteroid%20145%20AdeonaEAR-A-I0028-4-SBN0001/SMASII-V1.0>), но согласно их оригинальным публикациям (см.,

например, Bus, Binzel, 2002) общепринятой относительной точностью таких ПЗС-данных считаются ~1–2% в видимом диапазоне спектра и до ~3–4% вблизи коротковолновой и длинноволновой границ, а фазовые углы не превышают 20°–30°.

К сожалению, коротковолновая граница имеющихся SMASSII-данных находится вблизи ~ 0.44 мкм. Мы можем утверждать, что у полученных нами данных в полосах V' , R'_c и I'_c , достигается аналогичная или даже более высокая точность (см. табл. 1). В то же время рассматриваемые отклонения в спектрах активных астероидов в полосе B' на порядок превосходят, а в полосе U' сопоставимы с максимальными погрешностями, рассчитанными по вероятным изменениям полуширин этих полос. Предельные погрешности измерений (полученные при расчете FWHM полос фотометрической системы $U'B'VR'_cI'_c$) приведены на рис. 2 и 3 для фотометрических полос U' (31%), B' (7%) и I'_c (3%). Для полос V' и R'_c они составляют менее 1% и поэтому не показаны.

Для астероидов 302 Клариссы, 435 Эллы и 690 Вратиславии SMASSII-данные отсутствуют, но отрицательные градиенты их НСО близки к тем, которые наблюдались у астероидов 145, 322 и 779. Мы интерпретируем перечисленные особенности как явные признаки СПА и наличия пылевой экзосферы у всех шести астероидов. Общей спектральной деталью в НСО 145 Адеоны, 302 Клариссы, 435 Эллы и 690 Вратиславии является максимум рассеяния света с центральной длиной волны у 0.44–0.46 мкм (рис. 2).

У астероидов с менее выраженными признаками активности, или пока подозреваемых в активности, различия НСО (при сравнении данных для двух произвольных ночей) достигали ~ 15 –20%, причем более значительные в коротковолновой части спектра (рис. 3). Поскольку в данной группе астероидов SMASSII-данные имеются только для 751 Фаины (см. рис. 3б), то в качестве стандартных мы использовали усредненные нормированные спектры, которые характеризуют таксономические классы этих астероидов (Tholen, Vacuzzi, 1989) согласно классификации Толена (Tholen, 1989) (табл. 2). В рассматриваемой группе объектов следует выделить повышенную СПА астероида 424 Грация, о чем можно судить по общему разбросу точек на его НСО и одновременном отсутствии такого эффекта на спектрах контрольных звезд на вставках (рис. 3а). Кроме того, на НСО Грации, полученном 06.01.2022 г., найдены дополнительные подтверждения у астероида разреженной пылевой экзосферы в виде двух слабых максимумов рассеяния света у 0.44 и 0.64 мкм (рис. 3а), сходных по положению с более выраженными спектральными деталями, обнаруженными ранее в НСО других активных астероидов (Бусарев и др., 2016; 2019; Busarev и др., 2021). Как показывает численное моделирование рассеяния света на частицах сложной структуры, эти детали могут быть обусловлены интерференцией света при рассеянии на субмикронных составляющих

таких частиц в экзосфере (Busarev и др., 2021; Петрова, Бусарев, 2023). В то же время естественно ожидать, что в первую очередь в экзосферу выносятся очень мелкие частицы, меньше длины волны света. Их вклад в интенсивность рассеянного света должен существенно расти с уменьшением длины волны (так же, как и вклад газовой составляющей, но последний относительно невелик (Vokselée-Morvan и др., 2016)), что может изменить типичный для НСО рассматриваемых астероидов положительный градиент на отрицательный. Именно такие изменения мы и наблюдаем в спектрах на рис. 2 и 3.

На рис. 4 приведены примеры модельных спектров отражения B_{norm} (нормированных на длину волны 0.55 мкм) условного низкоальбедного астероида С-типа, окруженного пылевой экзосферой оптической толщины τ , состоящей из однородных полидисперсных субмикронных частиц эффективного радиуса R_{eff} при вариации v_{eff} . Представлены три варианта вещества частиц — лед H_2O , так называемые астрономические силикаты (их оптические характеристики были получены на основе синтеза результатов лабораторного и теоретического анализа деталей в ИК-спектре для того, чтобы обеспечить согласие с данными ряда астрономических наблюдений), и Mg–Fe силикаты (оливины) (обозначены как “ice”, “sil” и “oli”, соответственно). Значения их показателей преломления изменяются вдоль спектра согласно Warren, Brandt (2008), Li, Greenberg (1997) и Dorschner и др. (1995), соответственно. Подробности моделирования спектров отражения активных астероидов можно найти в статье Петровой и Бусарева (2023).

На рис. 4а видно, что модели для непоглощающего льда и слабопоглощающих астрономических силикатов отличаются слабо, а подъем коротковолновой части спектра естественно увеличивается с ростом τ , т.е. числа частиц. В отличие от этих веществ, у оливинов поглощение значительно растет на длинах волн короче 0.4 мкм, что приводит к подавлению яркости в УФ-диапазоне спектра экзосферы, содержащей такие частицы (рис. 4б). Широкое распределение частиц по размерам ожидаемо сглаживает детали спектра, обусловленные интерференцией при рассеянии на частицах близких размеров. Показана также модель для смеси лед + оливин (50% на 50% по числу частиц). Варьируя порцию поглощающих частиц, можно добиться наклона спектра, близкого к наблюдаемому у конкретного астероида, но однозначности в оценке этой порции нет, так как градиент зависит и от количества непоглощающих частиц (рис. 4а). Тем не менее сравнение этих модельных спектров со спектрами, измеренными у ряда астероидов, ясно свидетельствует о том, что они окружены рассеивающей экзосферой, где

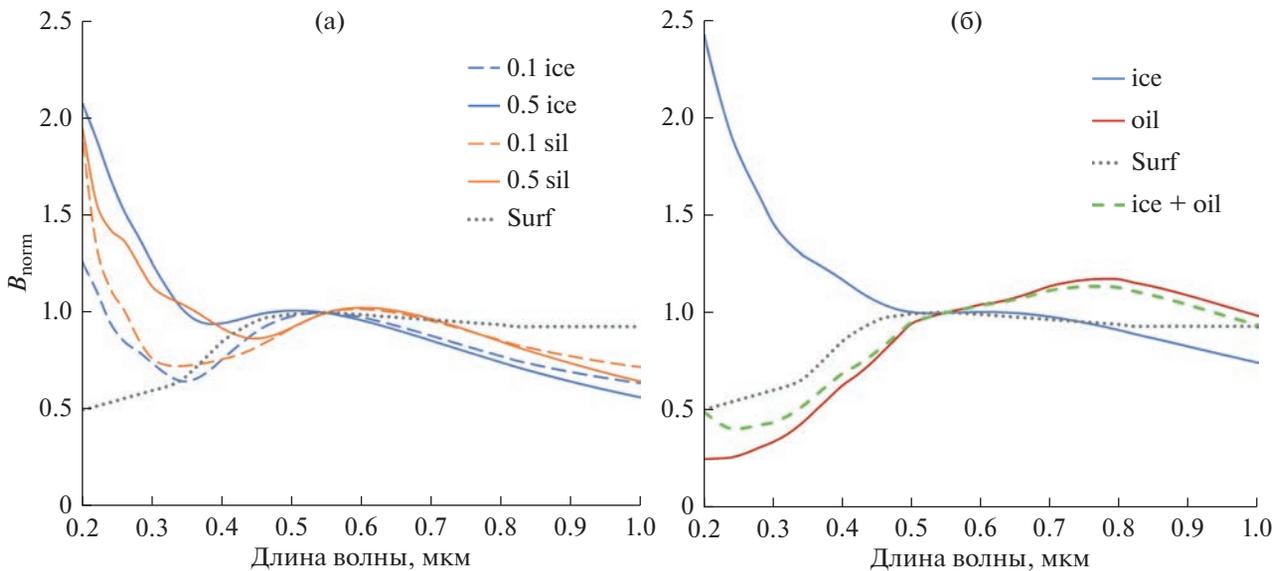


Рис. 4. Спектры яркости $V_{\text{погт}}$ условного низкоальбедного (0.07) астероида С-типа, окруженного пылевой экзосферой, на фазовом угле наблюдений 10° . Экзосфера состоит из сферических частиц указанного состава размером $R_{\text{eff}} = 0.1$ мкм при $v_{\text{eff}} = 0.02$ и $\tau = 0.1$ или 0.5 (а) и при $v_{\text{eff}} = 0.10$ и $\tau = 0.5$ (б). Принятый спектр поверхности астероида показан кривой “Surf”. Спектральный диапазон моделирования увеличен по сравнению с диапазоном наблюдательных данных, что позволяет расширить наши представления о рассматриваемом явлении.

присутствуют не (или слабо) поглощающие частицы с размерами меньше длины волны света.

Сравнение физических и динамических параметров активных и неактивных астероидов примитивных типов

Нами было проведено сравнение основных физических и динамических параметров активных и неактивных астероидов примитивных типов Главного пояса, включенных в данную наблюдательную программу, с целью поиска каких-либо общих различий, но они не были найдены. Возможны два варианта объяснения полученного результата: (1) заметных различий вообще нет, так как все рассматриваемые тела имеют примерно одинаковое происхождение; (2) различия есть, но для их обнаружения нужна более значимая статистическая выборка объектов. Для проверки второго предположения нами было проведено сравнение распределений параметров (большой полуоси орбиты, эксцентриситета, наклона орбиты и геометрического альbedo) астероидов, входящих в два крупных астероидных семейства, возглавляемых 24 Фемидой (12288 членов) и 145 Адеоной (6279 членов) (Nesvorný и др., 2015; Novaković и др., 2022), и самых крупных известных астероидов с номерами от 1 до 300. Учитывая, что нами была обнаружена СПА Адеоны (C(Ch)-типа) и Фемиды (C(B)-типа) (Busarev и др., 2015; 2021), можно предполагать, что если не все, то преобладающее число астероидов в обоих семей-

ствах относятся к близким примитивным типам и имеют низкотемпературную минералогию, а также потенциально могут содержать в недрах ледяные запасы H_2O и CO_2 . На основе такого сравнения оказалось, что астероиды семейств Адеоны и Фемиды заметно отклоняются по средним значениям перечисленных параметров от средних значений тех же параметров самых крупных астероидов, распределенных по всей зоне ГПА (рис. 5). Узкие диапазоны распределений перечисленных параметров семейств Фемиды и Адеоны характеризуют тесную динамическую связь астероидов в каждом из этих семейств, а близкие значения их геометрического альbedo (рис. 5г), вероятно, — сходство физико-минералогических свойств и, соответственно, P - T условий формирования их родительских тел. Это подтверждается очень близкими величинами альbedo самых крупных тел рассматриваемых семейств, которые у Адеоны и Фемиды равны соответственно 0.061 и 0.067 (табл. 2; https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=24). Но в то же время у этих семейств имеются значительные различия между средними значениями большой полуоси орбиты, наклона орбиты и диапазона распределения эксцентриситета (рис. 5).

Исходя из проведенного сравнения распределений основных динамических параметров и геометрического альbedo семейств Фемиды (4782 членов семейства) и Адеоны (2236 членов семейства) (<https://doi.org/10.26033/6cg5-pt13>), можно

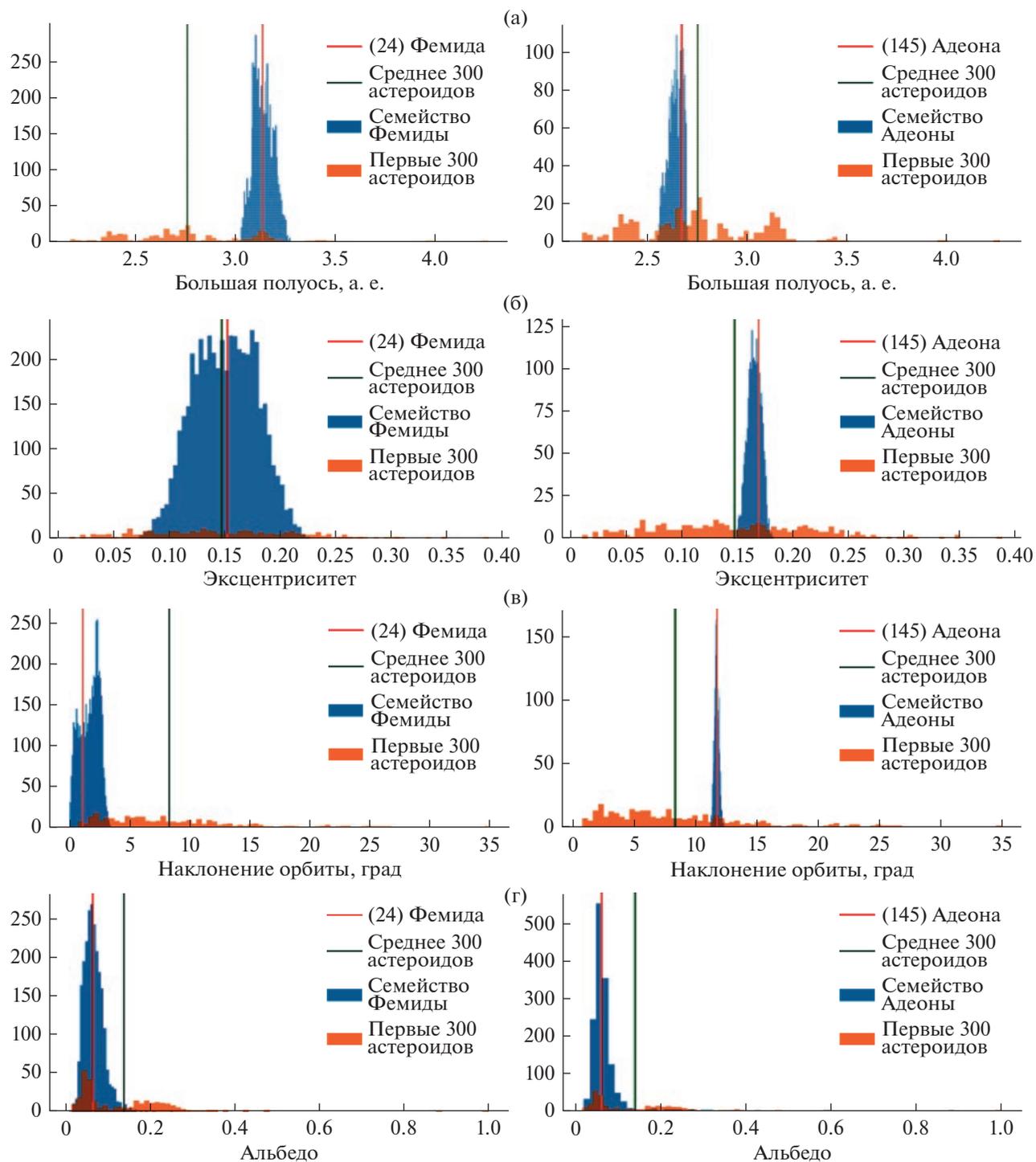


Рис. 5. На рисунке представлены построенные нами (согласно данным <https://doi.org/10.26033/6cg5-pt13>) для сравнения распределения основных динамических параметров и геометрического альbedo у астероидов семейств Фемиды (левая колонка графиков) и Адеоны (правая колонка графиков), а также аналогичных параметров у самых крупных 300 астероидов Главного пояса: (а) – большой полуоси орбиты, (б) – эксцентриситета, (в) – наклона орбиты и (г) – геометрического альbedo.

заклучить, что, несмотря на близость значений геометрического альbedo астероидов примитивных типов, входящих в эти семейства, динамиче-

ские различия между ними достаточно велики и характеризуют, вероятно, их специфическую динамическую историю.

*Анализ солнечной активности
в период наблюдений астероидов*

Нами также были изучены данные о солнечных корональных выбросах вещества (СМЕ) в период выполнения обсуждаемой наблюдательной программы, полученные на космической обсерватории SOHO (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/catalog_description.htm). С декабря 2021 г. до конца февраля 2022 г. общий уровень солнечной активности в основном был относительно низким, но имели место отдельные вспышки в рентгеновском диапазоне и связанные с ними СМЕ. В декабре 2021 г. (17.12.2021 г.) произошел только один корональный выброс типа “гало”, охватывающий полный азимутальный угол (до $\sim 360^\circ$), но с низкой суммарной кинетической энергией (СКЭ). В ожидаемое время прохождения ударной волны, вызванной этим СМЕ (на гелиоцентрических расстояниях астероидов в пределах 2–3 а. е., т.е. примерно через 10–12 дней после вспышки с учетом распространения ударной волны в плазме солнечного ветра со средней скоростью ~ 550 км/с (см., например, Vorovsky, 2020)), наблюдался только астероид 859 Бузареа (29.12.2021 г., рис. 3д), что могло вызвать заметное возрастание его НСО в коротковолновой части спектра. В январе 2022 г. произошли четыре корональных выброса типа “гало” (09.01.2022 г. – с низкой СКЭ, 12.01.2022 г. – с низкой СКЭ, 14.01.2022 г. – с СКЭ между низким и средним уровнями и 29.01.2022 г. – с СКЭ, превышающей средний уровень). Но в январский период в ожидаемые моменты прохождения в зоне ГПА ударных волн в солнечном ветре не наблюдался ни один астероид (табл. 3). В феврале, после ожидаемого прохождения в ГПА ударной волны, вызванной СМЕ от 29.01.2022 г., наблюдались астероиды 424 Грация (12.02.2022 г., рис. 3а), 751 Фаина (15.02.2022 г., рис. 3б) и 778 Теобальда (15.02.2022 г., рис. 3г), что, вероятно, вызвало повышение и заметные колебания в коротковолновой и длинноволновой частях НСО этих астероидов, которые видны на соответствующих графиках. Интересно отметить, что никаких изменений не было замечено в НСО других астероидов, наблюдавшихся в те же ночи: 398 Адметы, 1235 Шоррии, 1295 Дефлотты и 1448 Линдбладии, у которых не были обнаружены спектральные признаки СПА (табл. 3). Наконец, в феврале произошли два СМЕ на Солнце типа “гало” (11.02.2022 г. – с низкой СКЭ и 15.02.2022 г. – со средней СКЭ). Ударные волны от этих корональных выбросов (низкоскоростные от первого и более высокоскоростные от второго), возможно, привели к выбросу дополнительного количества пыли с поверхности в экзосферу у 762 Пулковой (25.02.2022 г., рис. 3в) и 859 Бузареа (25.02.2022 г., рис. 3д), что вызвало повышение их отражательной способности в коротковолновой и длинноволновой частях спектра. В то же время не были обнаружены никакие

изменения в НСО 98 Ианты, наблюдавшейся в ту же ночь, у которой отсутствовали также и признаки СПА (табл. 3).

Таким образом, на основе изучения наблюдательных результатов можно заключить, что на астероидах со значительными проявлениями активности (145, 302, 322, 435, 690 и 779) и с ее более слабыми проявлениями (424, 751, 762, 778 и 859) СПА была основным процессом, на который накладывались и усиливали его дополнительные эффекты от проходящих ударных волн, вызванных СМЕ. Поскольку азимутальный охват этих ударных волн был максимальным, можно предполагать, что они достигали всех рассматриваемых астероидов.

ДИСКУССИЯ

Еще раз отметим, что критериями для включения астероидов Главного пояса в общую наблюдательную программу были их низкотемпературные типы, значительные эксцентриситеты орбит (не менее 0.1) и близость к перигелийным расстояниям на интервале времени до трех месяцев. Целью программы было осуществление поиска объектов, проявляющих СПА при повышенных подсолнечных температурах. По нашим расчетам перепад подсолнечных температур между афелием и перигелием у астероидов примитивных типов ГПА с эксцентриситетами в интервале ~ 0.1 – 0.3 составляет от нескольких десятков до сотни градусов в зависимости от конкретных значений эксцентриситета и геометрического альбеда (Busarev и др., 2018). Очевидно, что основным условием для возникновения СПА таких астероидов являются ледяные залежи H_2O и с меньшей вероятностью CO_2 , которые должны быть достаточно близко к поверхности или даже находиться на самой поверхности (в случае их недавней экскавации или отсутствия верхнего слоя реголита, удаленного при ударном событии). Но некоторые специалисты не допускают даже самой возможности наличия ледяных слоев в недрах астероидов примитивных типов по причине отсутствия прямых подтверждений этого. Очевидно, что такие данные могут быть получены только с помощью зондирования недр астероидов космическими методами.

С помощью аналитических расчетов нами было показано (Busarev и др., 2003), что концентрация короткоживущего изотопа ^{26}Al (с периодом полураспада 0.72 млн лет) в Са-Al-включениях в силикатном веществе ранней Солнечной системы $^{26}Al/^{27}Al \sim 5 \times 10^{-5}$ (Wasserburg, Papanastassiou, 1982), соответствующая аналогичной величине в плоскости нашей Галактики, $^{26}Al/^{27}Al \sim 10^{-5}$ (Mahoney и др., 1984) была достаточной для накопления внутренней тепловой энергии, полного плав-

ления льда и образования внутреннего водного океана на каменно-ледяных телах с размерами более 200 км, сформировавшихся за границей образования льда H_2O . Водный океан с температурой $\sim 5^\circ C$ мог сохраняться на рассматриваемых телах под 10-километровой корой около нескольких миллионов лет до полного замерзания (Busarev и др., 2003). Эти результаты согласуются с публикациями других авторов (например, Prialnik, Bar-Nun, 1990). Наличие менее обильных короткоживущих изотопов, таких как ^{60}Fe , ^{41}Ca , ^{10}Be и др. (см., например, Goswami, 2004), а также сильные ударные события на некоторых каменно-ледяных телах могли привести к повышению их внутренней тепловой энергии и продлить время существования океана. Важно, что с учетом темпов физических и геохимических процессов в водной среде (см., например, Веселовский, 1955), периода времени в несколько миллионов лет достаточно для дифференциации (седиментации) вещества, образования слоев гидратированных силикатов и сложной органики.

С другой стороны, в соответствии с универсальным механизмом гравитационной “очистки” зон формирования больших планет от малых тел при достижении ими массы, равной нескольким массам Земли (например, Сафронов, 1969), весьма вероятно, что такие каменно-ледяные тела разбрасывались во всех направлениях Юпитером и другими планетами-гигантами, в том числе в ГПА (Busarev, 2022). Подобные тела, вероятно, стали родительскими телами астероидов примитивных типов и могли обеспечить доставку льдов и сложной органики не только в ГПА, но и на планеты земной группы, включая Землю (Busarev, 2012; Raymond, Izidoro, 2017; Takir и др., 2023).

Подтверждением перечисленных процессов в ранней Солнечной системе являются также наши наблюдательные результаты. Спектрофотометрическим и *UBVRI*-методами нами были обнаружены признаки СПА 21 астероида (1, 19, 24, 51, 52, 65, 102, 145, 177, 203, 266, 302, 322, 379, 383, 435, 449, 690, 704, 779, 1474) С, В, F, G и X-типов (Busarev и др., 2015; 2020; 2021; 2022; Бусарев и др., 2016; 2019; 2022; данная статья), с которыми согласуются результаты численного моделирования спектров отражения условного астероида примитивного типа (с геометрическим альбедо 0.07), окруженного разреженной экзосферой (с оптической плотностью < 0.5), состоящей из агрегатов пылевых субмикронных частиц разного состава (водяной лед, оливин и толины) (Busarev и др., 2021).

Важно также отметить, что у 145 Адеоны, 302 Клариссы и 322 Фео, входящих в число астероидов с явными признаками активности, а также у подозреваемой в активности 778 Теобальды

обнаружены динамические астероидные семейства (табл. 2, Novaković и др., 2022). Это можно интерпретировать как следствие в среднем более высокой хрупкости вещества астероидов примитивных типов, включающего льды, проявляющейся при ударах метеороидных тел, и, значит, — как косвенное подтверждение широкой распространенности ледяных залежей или слоев на рассматриваемых астероидах. С другой стороны, очевидно, что взаимные столкновения астероидов в ГПА и сильные метеороидные удары, вызывающие раскалывание крупных тел примитивного состава и образование у них семейств, приводят к худшей защищенности от космических факторов ледяных запасов на меньших телах и их быстрой потере.

ВЫВОДЫ

Осуществление *UBVRI*-фотометрии (с декабря 2021 г. по февраль 2022 г.) доступных для наблюдений 29 астероидов примитивных типов Главного пояса, находившихся вблизи перигелийных расстояний, позволило обнаружить спектральные признаки квазисовременной СПА шести астероидов примитивных типов Главного пояса — 145 Адеоны, 302 Клариссы, 322 Фео, 435 Эллы, 690 Вратиславии и 779 Нины (у 302 Клариссы, 322 Фео, 435 Эллы и 690 Вратиславии — впервые), что составляет $\sim 21\%$ (или даже $\sim 40\%$, если учесть тела с более слабой СПА) от общего числа тел, включенных в данную программу. Активность 145 Адеоны и 779 Нины вблизи перигелия (и на значительном удалении от него (Busarev и др., 2015)) нами обнаружена уже в третий раз на протяжении последних 10 лет, что соответствует примерно трем периодам обращения этих астероидов вокруг Солнца. Для тел сходного происхождения (с учетом их таксономических типов), изучение которых выполнено в аналогичных наблюдательных условиях, — это значительные показатели. Полученные результаты можно рассматривать как указание на значительную распространенность льда H_2O на астероидах примитивных типов Главного пояса в виде подповерхностных залежей. Если это будет подтверждено на большем наблюдательном материале, то позволит с более высокой вероятностью утверждать об образовании большинства астероидов примитивных типов (или их родительских тел) за границей льда H_2O в ранней Солнечной системе.

Наиболее значительными и массовыми физическими факторами активации и поддержания процесса сублимации ледяных материалов на астероидах примитивных типов являются, вероятно, высокая частота ударных событий в ГПА (включая микрометеоритную переработку вещества), солнечная вспышечная и эруптивная активность, а также рост подсолнечной температуры

астероидов вблизи перигелия, способствующий удалению органических изолирующих покрытий, сформировавшихся при сублимации льдов, и возобновлению последнего процесса.

Можно предполагать, что семейства астероидов с большим количеством членов возглавляются телами примитивного состава, включающими ледяные слои, с пониженной прочностью и/или хрупкостью вещества. Это может быть одной из основных причин дробления родительских тел семейств при ударных событиях на большое количество фрагментов. В то же время меньшие тела в таких семействах должны быстрее терять ледяную компоненту вследствие ее худшей защищенности и теплоизоляции.

Авторы (Бусарев В.В., Петрова Е.В., Щербина М.П., Кузнецов С.Ю. и А.А. Савелова) выражают благодарность Российскому научному фонду за финансовую поддержку работы (грант РНФ 22-12-00115).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бусарев В.В.* Спектрофотометрия безатмосферных тел Солнечной системы // *Астрон. вестн.* 1999. Т. 33. С. 140–150. (*Busarev V.V.* Spectrophotometry of atmosphereless celestial bodies of the Solar system // *Sol. Syst. Res.* 1999. V. 33. P. 120–129.)
- Бусарев В.В., Барабанов С.И., Пузин В.Б.* Оценка состава вещества и обнаружение сублимационной активности астероидов 145 Адеоны, 704 Интерамнии, 779 Нины и 1474 Бейры // *Астрон. вестн.* 2016. Т. 50. № 4. С. 300–312. (*Busarev V.V., Barabanov S.I., Puzin V.B.* Material composition assessment and discovering sublimation activity on asteroids 145 Adeona, 704 Interamnia, 779 Nina, and 1474 Beira // *Sol. Syst. Res.* 2016. V. 50. № 4. P. 281–293.)
- Бусарев В.В.* Обнаружение влияния активности Солнца на сублимационную активность примитивных астероидов // *Сообщ. конф. “Астрономия-2018”*. Т. 2 / Ред. Обридо В.Н. М.: Изд. “Тривант”, 2018. С. 47–50.
- Бусарев В.В., Щербина М.П., Барабанов С.И., Ирсамбетова Т.Р., Кохирова Г.И., Хамроев У.Х., Хамитов И.М., Бикмаев И.Ф., Гумеров Р.И., Иртуганов Э.Н., Мельников С.С.* Подтверждение сублимационной активности примитивных астероидов Главного пояса 779 Нины, 704 Интерамнии и 145 Адеоны и ее вероятные спектральные признаки у 51 Немаузы и 65 Цибелы // *Астрон. вестн.* 2019. Т. 53. № 4. С. 273–290. (*Busarev V.V., Shcherbina M.P., Barabanov S.I., Irsambetova T.R., Kokhirova G.I., Khamroev U.Kh., Khamitov I.M., Bikmaev I.F., Gumerov R.I., Irtuganov E.N., Mel'nikov S.S.* Confirmation of the sublimation activity of the primitive Main-belt asteroids 779 Nina, 704 Interamnia, and 145 Adeona, as well as its probable spectral signs on 51 Nemausa and 65 Cybele // *Sol. Syst. Res.* 2019. V. 53. № 4. P. 261–77.)
- Бусарев В.В., Савелова А.А., Щербина М.П., Барабанов С.И.* Спектральные признаки одновременной сублимационной активности и появления пылевой экзосферы у 8 астероидов Главного пояса вблизи перигелия // *Астрон. вестн.* 2022. Т. 56. № 2. С. 92–108. (*Busarev V.V., Savelova A.A., Shcherbina M.P., Barabanov S.I.* Spectral signs of simultaneous sublimation activity and the appearance of a dust exosphere on eight asteroids of the Main belt near perihelion // *Sol. Syst. Res.* 2022. V. 56. № 2. P. 84–99.)
- Веселовский В.С.* Химическая природа горючих ископаемых. М.: Ин-т горного дела. Изд. Акад. наук СССР, 1955. 424 с.
- Миронов А.В.* Основы астрофотометрии. Практические основы высокоточной фотометрии и спектрофотометрии звезд. М.: Физматлит, 2008. 260 с.
- Петрова Е.В., Бусарев В.В.* О возможностях оценки свойств частиц в экзосфере активного астероида по деталям в УФ- и видимом диапазонах спектров отражения // *Астрон. вестн.* 2023. Т. 57. № 2. С. 166–180. <https://doi.org/10.31857/S0320930X23020068>
- Сафронов В.С.* Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. М.: Наука, 1969. 244 с. [NASA TTF-667 (Engl. transl.), 1972].
- Шустов Б.М., Золотарёв Р.В., Бусарев В.В., Щербина М.П.* Ударные события как возможный механизм активации сублимационно-пылевой активности астероидов Главного пояса // *Астрон. журн.* 2022. Т. 99. № 11. С. 1058–1071.
- Alexander C.M.O'D., McKeegan K.D., Altwegg K.* Water reservoirs in small planetary bodies: Meteorites, asteroids, and comets // *Space Sci. Rev.* 2018. V. 214. id. 36 (47 p.)
- Bessell M.S.* Standard photometric systems // *Annu. Rev. Astron. and Astrophys.* 2005. V. 43. P. 293–336.
- Bockelée-Morvan D., Crovisier J., Erard S., Capaccioni F., Leyrat C., Filacchione G., Drossart P., Encrenaz T., Biver N., de Sanctis M.-C., Schmitt B., Kührt E., Capria M.-T., Combes M., Combi M., Fougere N., Arnold G., Fink U., Ip W., Migliorini A., Piccioni G., Tozzi G.* Evolution of CO₂, CH₄, and OCS abundances relative to H₂O in the coma of comet 67P around perihelion from Rosetta/VIRTIS-H observations // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2016. V. 462 (Suppl. 1). P. S170–S183. <https://doi.org/10.1093/mnras/stw2428>
- Borovsky J.E.* What magnetospheric and ionospheric researchers should know about the solar wind // *J. Atmosph. Sol.-Terr. Phys.* 2020. V. 204. id. 105271 (16 p.)
- Bradley A.J.* The action of water // *Meteorites and the early Solar system II* / Eds: Lauretta D.S., McSween H.Y., Jr. Tucson: Univ. Arizona Press, 2006. P. 584–624.
- Bus S.J., Binzel R.P.* Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey. The observations // *Icarus.* 2002. V. 158. P. 106–145.
- Busarev V.V., Dorofeeva V.A., Makalkin A.B.* Hydrated silicates on Edgeworth-Kuiper objects – probable ways of formation // *Earth, Moon and Planets.* 2003. V. 92. P. 345–357.
- Busarev V.V.* A hypothesis on the origin of C-type asteroids and carbonaceous chondrites // *Asteroids, Comets, Meteors (ACM) 2012. Proc. Conf. May 16–20. 2012.* Niigata, Japan. LPI Contrib. № 1667. id. 6017. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1211/1211.3042.pdf>
- Busarev V.V., Barabanov S.I., Rusakov V.S., Puzin V.B., Kravtsov V.V.* Spectrophotometry of (32) Pomona, (145)

- Adeona, (704) Interamnia, (779) Nina, (330825) 2008 XE3, and 2012 QG42 and laboratory study of possible analog samples // *Icarus*. 2015. V. 262. P. 44–57.
- Busarev V.V., Makalkin A.B., Vilas F., Barabanov S.I., Scherbina M.P.* New candidates for active asteroids: Main-belt (145) Adeona, (704) Interamnia, (779) Nina, (1474) Beira, and near-Earth (162173) Ryugu // *Icarus*. 2018. V. 304. P. 83–94.
- Busarev V.V., Golubeva L.F., Petrova E.V., Shestopalov D.I.* Variability of the reflectance spectra of (1) Ceres and solar activity // The Eleventh Moscow Solar System Symposium (11MS3) 5–9 October 2020, Space Research Inst., Abstract № 11MS3-SB-09. P. 255–258.
- Busarev V.V., Petrova E.V., Irmambetova T.R., Shcherbina M.P., Barabanov S.I.* Simultaneous sublimation activity of primitive asteroids including (24) Themis and (449) Hamburga: Spectral signs of an exosphere and the solar activity impact // *Icarus*. 2021. V. 369. id. 114634 (18 p.)
- Busarev V.V.* Active asteroids of the Main Belt as probable relics of the formation processes of giant planets // Proc. VAK-2021 Conf. “Astronomy at the epoch of multimessenger studies”, SAI MSU, INASAN, Moscow, 2022. P. 215–219.
- Busarev V.V., Shcherbina M.P., Kuznetsov S.Yu., Ikonnikova N.P., Burlak M.A.* Only a quarter of newly observed primitive asteroids are active // The Thirteenth Moscow Solar System Symposium (13MS3), 2022, Space Research Inst., Abstract # 13MS3-SB-01. p. 244–246.
- Chandler C.O., Curtis A.M., Mommert M., Sheppard S.S., Trujillo C.A.* SAFARI: Searching asteroids for activity revealing indicators // *Publ. Astron. Soc. Pacif.* 2018. V. 130. id. 114502 (16 p.)
- Dorschner J., Begemann B., Henning T., Jaeger C., Mutschke H.* Steps toward interstellar silicate mineralogy. II. Study of Mg-Fe-silicate glasses of variable composition // *Astron. and Astrophys.* 1995. V. 300. P. 503–520.
- Emde C., Buras-Schnell R., Kylling A., Mayer B., Gasteiger J., Hamann U., Kylling J., Richter B., Pause Ch., Dowling T., Bugliaro L.* The libRadtran software package for radiative transfer calculations (version 2.0.1) // *Geosci. Model Dev.* 2016. V. 9. P. 1647–1672.
- Fanale F.P., Salvail J.R.* The water regime of asteroid (1) Ceres // *Icarus*. 1989. V. 82. P. 97–110.
- Gaffey M.J., Bell J.F., Cruikshank D.P.* Reflectance spectroscopy and asteroid surface mineralogy // *Asteroids II* / Eds: Binzel R.P., Gehrels T., Matthews M.S. Tucson: Univ. Arizona Press, 1989. P. 98–127.
- Gaffey M.J., Cloutis E.A., Kelley M.S., Reed K.L.* Mineralogy of asteroids // *Asteroids III* / Eds: W.F. Bottke Jr., Tucson: Univ. Arizona Press, 2002. P. 183–204.
- Goswami J.N.* Short-lived nuclides in the early Solar system: the stellar connection // *New Astron. Rev.* 2004. V. 48. P. 125–132.
- Hsieh H.H., Jewitt D.A.* Population of comets in the Main asteroid belt // *Science*. 2006. V. 312. P. 561–563.
- Hsieh H.H.* The Hawaii trails project: Comet-hunting in the Main asteroid belt // *Astron. and Astrophys.* 2009. V. 505. P. 1297–1310.
- Hsieh H.H., Haghighipour N.* Potential Jupiter-family comet contamination of the Main asteroid belt // *Icarus*. 2016. V. 277. P. 19–38.
- Hsieh H.H., Novaković B., Kim Y., Brassier R.* Asteroid family associations of active asteroids // *Astron. J.* 2018. V. 155. id. 96 (22 p.)
- Jewitt D.* The active asteroids // *Astron. J.* 2012. V. 143. id. 66 (14 p.)
- Jewitt D., Hsieh H.H.* The Asteroid-Comet Continuum // Chapter for the book *Comets III*, edited by K. Meech and M. Combi, University of Arizona Press. arXiv preprint arXiv:2203.01397, 2022 [astro-ph.EP]
- Kornilov V., Kornilov M., Vozjakova O., Shatsky N., Safonov B., Gorbunov I., Potanin S., Cheryasov D., Senik V.* Night-sky brightness and extinction at Mt Shatdzhatmaz // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2016. V. 462. P. 4464–4472.
- Kurucz R.L.* New atlases for solar flux, irradiance, central intensity, and limb intensity // *Mem. Soc. Astron. Italiana Suppl.* 2005. V. 8. P. 189–191.
- Li A., Greenberg J.M.* A unified model of interstellar dust // *Astron. and Astrophys.* 1997. V. 232. P. 566–584.
- Longhi J.* Phase equilibria in the system CO₂–H₂O I: New equilibrium relations at low temperatures // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 2005. V. 69. P. 529–539.
- Mahoney W.A., Ling J.C., Wheaton Wm.A., Jacobson A.S.* Discovery of ²⁶Al in the interstellar medium // *Astrophys. J.* 1984. V. 286. P. 578–585.
- McSween Jr H.Y., Ghosh A., Grimm R.E., Wilson L., Young E.D.* Thermal evolution models of asteroids // *Asteroids III* / Eds: W.F. Bottke Jr. Tucson: Univ. Arizona Press, 2002. P. 559–571.
- Nesvorný D., Brož M., Carruba V.* Identification and dynamical properties of asteroid families // *Asteroids IV* / Eds: Bottke W.F., DeMeo F.E., Michel P. Univ. Arizona Press, 2015. V. 29. P. 297–321.
- Novaković B., Vokrouhlický D., Spoto F., Nesvorný D.* Asteroid families: properties, recent advances, and future opportunities // *Celest. Mech. and Dyn. Astron.* 2022. V. 134 (4). id. 34 (60 p.)
<http://asteroids.matf.bg.ac.rs/fam/familymembers.php>.
- Prialnik D., Bar-Nun A.* Heating and melting of small icy satellites by the decay of ²⁶Al // *Astrophys. J.* 1990. V. 355. P. 281–286.
- Raymond S.N., Izidoro A.* Origin of water in the inner Solar System: Planetesimals scattered inward during Jupiter and Saturn’s rapid gas accretion // *Icarus*. 2017. V. 297. P. 134–148.
- Sanchez J.A., Reddy V., Nathues A., Cloutis E.A., Mann P., Hiesinger H.* Phase reddening on near-Earth asteroids: Implications for mineralogical analysis, space weathering and taxonomic classification // *Icarus*. 2012. V. 220. P. 36–50.
- Sykes M.V., Greenberg R., Dermott S.F., Nicholson P.D., Burns J.A.* Dust bands in the asteroid belt // *Asteroids II* / Eds: Binzel R.P., Gehrels T., Matthews M.S. Tucson: Univ. Arizona Press, 1989. P. 336–367.
- Schorghofer N.* The lifetime of ice on main belt asteroids // *Astrophys. J.* 2008. V. 682. P. 697–705.
- Schorghofer N.* Predictions of depth-to-ice on asteroids based on an asynchronous model of temperature, impact stirring, and ice loss // *Icarus*. 2016. V. 276. P. 88–95.

- Sugita S., Honda R., Morota T., Kameda S., Sawada H., Tatsu-
sumi E. and 117 co-authors.* The geomorphology, color,
and thermal properties of Ryugu: Implications for par-
ent-body processes // *Science*. 2019. V. 364. id.
eaaw0422 (11 p.)
- Takir D., Neumann W., Raymond S.N., Emery J.P., Tieloff M.*
Late accretion of Ceres-like asteroids and their implan-
tation into the outer Main belt // *Nature Astron.* 2023.
<https://doi.org/10.1038/s41550-023-01898-x>
- Tholen D.J.* Asteroid taxonomic classifications // *Asteroids
II* / Eds: Binzel R.P., Gehrels T., Matthews M.S. Tuc-
son: Univ. Arizona Press, 1989. P. 1139–1150.
- Tholen D.J., Barucci M.A.* Asteroid taxonomy // *Asteroids
II* / Eds: Binzel R.P., Gehrels T., Matthews M.S. Tuc-
son: Univ. Arizona Press, 1989. P. 298–315.
- Veeder G.J., Tedesco E.F.* Results from the IRAS Minor
Planet Survey // *The IRAS Minor Planet Survey. Final
Report PL-TR-92-2049* / Eds: *Tedesco E.F.* Massachu-
setts: Phillips Laboratory, 1992. P. 107–126.
- Warren S.G., Brandt R.E.* Optical constants of ice from the
ultraviolet to the microwave: A revised compilation // *J.
Geophys. Res.* 2008. V. 113. id. D14220.
<https://doi.org/10.1029/2007JD009744>
- Wasserburg G.J., Papanastassiou D.A.* Some short-lived nu-
clides in the early Solar system – a connection with the
placental ISM // *Essays in Nuclear Astrophysics* / Eds:
Barnes C.A., Clayton D.D., Schramm D.N. Cam-
bridge Univ. Press, 1982. P. 77–140.
- Zolensky M.E., Bourcier W.L., Gooding J.L.* Aqueous alter-
ation on the hydrous asteroids: Results of EQ3/6 com-
puter simulations // *Icarus*. 1989. V. 78. P. 411–425.

УДК 523.53

СОВРЕМЕННЫЙ УРОВЕНЬ ЗНАНИЙ ОБ ОБЪЕКТАХ, СБЛИЖАЮЩИХСЯ С ЗЕМЛЕЙ

© 2023 г. Г. И. Кохирова^а, *, П. Б. Бабаджанов^а

^аИнститут астрофизики Национальной академии наук Таджикистана, Душанбе, Республика Таджикистан

*e-mail: kokhirova2004@mail.ru

Поступила в редакцию 03.03.2023 г.

После доработки 20.04.2023 г.

Принята к публикации 25.04.2023 г.

Излагаются современные представления об объектах, сближающихся с Землей. В эту популяцию входят астероиды, сближающиеся с Землей (АСЗ), включая потенциально опасные астероиды, короткопериодические кометы, метеороидные рои, крупные спорадические метеороиды. Даются обзорные сведения о динамических и физических свойствах АСЗ и комет, имеющиеся в настоящее время. Найдено, что среди известных на текущий момент АСЗ почти 5% составляют угасшие ядра комет или их фрагменты. Внешне они не отличаются от истинных астероидов, однако значительно отличаются от них по динамическим и физическим свойствам. Следовательно, для их различения необходимо изучать и динамические, и физические параметры объектов. Показано, что некоторые известные метеороидные рои наряду с бесчисленным множеством мелких метеороидов содержат и крупные “угасшие” фрагменты кометных ядер, выявленные среди астероидов, сближающихся с Землей. Метеороидный рой и такие тела, принадлежащие ему, образуют астероидно-метеороидный комплекс. Приводятся наблюдательные и теоретические сведения, подтверждающие сложившийся современный уровень знаний об околоземных объектах.

Ключевые слова: комета, угасшая комета, астероид, метеороид, метеороидный рой, метеорный поток, околоземный объект, комплекс, орбита, эволюция

DOI: 10.31857/S0320930X23050031, **EDN:** TEXVDZ

ВВЕДЕНИЕ

Наряду с большими планетами в Солнечной системе движется множество более мелких тел. Популяция малых тел состоит из астероидов, комет и метеороидов, образованных в результате разрушения астероидов и комет. Астероиды представляют собой металлические и каменные тела без атмосферы, вращающиеся вокруг Солнца, имеющие относительно малые размеры, которые не позволили классифицировать их как планеты, и не проявляющие активности в виде выброса газа, пыли и метеороидов (Vorovicka, 2016). Огромное число астероидов располагается в Главном поясе астероидов (ГПА), расположенном между орбитами Марса и Юпитера на гелиоцентрическом расстоянии примерно от 2 до 4 а. е. (от 300 до 600 млн км). Размеры известных астероидов ГПА варьируются от самых больших – 1000 км в диаметре имеет Церера, ныне считающаяся карликовой планетой, – и до 1 м. Большинство астероидов Главного пояса следуют по слегка эллиптическим, устойчивым, низко наклоненным к плоскости эклиптики орбитам, вращаясь в том же направ-

лении, что и Земля, с периодом обращения вокруг Солнца от трех до десяти лет. К настоящему моменту число открытых астероидов составляет 1269092 (<https://minorplanetcenter.net/mpc/summary>, 2023).

В отличие от астероидов, кометы являются активными малыми телами. Whipple (1950; 1951; 1955) предложил модель ядра кометы как конгломерата замерзших газов (легкоплавких льдов) и пылевых частиц. При приближении комет к Солнцу газы начинают нагреваться, испаряться, потоки сублимирующих газов увлекают за собой пылевые частицы. Этот процесс приводит к образованию комы вокруг ядра и характерных хвостов комет. Данное определение предложено в начале 50-х гг. прошлого века и, хотя с тех пор получено много новых сведений и данных о кометах, модель Whipple в основном не утратила своей достоверности. В некоторой степени данная концепция отражена в спецификации комет, принятой Международным астрономическим союзом (МАС), а также поддержана результатами наземных и космических наблюдений. Согласно современным представлениям МАС утвердил следующее

Таблица 1. Статистика обнаруженных околоземных объектов

Дата	КСЗ	Атиры	Атоны	Аполлоны	Амуры	ПОА (более 1 км)	ПОА	АСЗ (более 1 км)	АСЗ (более 140 м)	АСЗ	ОЗО
21.03.2023	120	31	2467	17776	11249	151	2326	853	10411	31523	31643

определение комет. Твердое тело диаметром свыше 1 м, но менее размера карликовой планеты, двигающееся в межпланетном пространстве или поступающее из него и проявляющее активность в виде выделения газа, пыли или метеороидов, называется кометой (Borovicka, 2016). Число открытых комет, включая их фрагменты, составляет 3794 (<https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/>, 2022).

Согласно современным представлениям, астероиды и кометы являются реликтами первичного вещества, из которого 4.6 млрд лет назад образовалась Солнечная система. Их состав, внутренняя структура и температура испарения материала говорят о различных источниках их происхождения. Кроме того, имеется предположение, что часть астероидов могут быть телами, претерпевшими геохимическое воздействие, так называемый метаморфизм. Тем не менее вещество и комет, и некоторых астероидов, благодаря сравнительно малым массам объектов, сохранилось практически в первозданном виде и представляет собой первичный материал, из которого формировалась Солнечная система на ранних и последующих стадиях эволюции.

ОКОЛОЗЕМНЫЕ ОБЪЕКТЫ

Околоземные объекты (ОЗО) – это широкая категория малых тел, траектория которых может проходить в границах до 1.3 а. е. от Солнца (<https://cneos.jpl.nasa.gov/>). Земля имеет гелиоцентрическое расстояние примерно 1 а. е., и такие объекты могут находиться в пределах 0.3 а. е. от Земли. Однако нахождение в категории ОЗО не означает, что объекты действительно близки к Земле в любое конкретное время, это подразумевает только то, что их движение может время от времени приближать их к Солнцу и, возможно, к Земле. Большинство ОЗО можно наблюдать с помощью наземных радио- и оптических телескопов и на этой основе характеризовать их, кроме того, траектории некоторых ОЗО позволяют относительно легко направить к ним космические миссии. Изучение ОЗО обеспечивает репрезентативную выборку вещества Солнечной системы и его эволюцию, поскольку большинство из них переброшены во внутреннюю часть Солнечной системы из других регионов после миллионов лет гравитационного взаимодействия с планетами.

Согласно базам данных, популяцию околоземных объектов образуют астероиды, сближающиеся с Землей (АСЗ) и короткопериодические кометы, сближающиеся с Землей (КСЗ) (см., например, <https://cneos.jpl.nasa.gov>). Между тем, среди АСЗ отождествлено определенное количество угасших короткопериодических кометных ядер. Кроме того, в околоземном пространстве имеются метеороиды, как принадлежащие метеороидным роям, так и спорадические. Мы считаем, что угасшие короткопериодические кометные ядра и метеороидные рои, орбиты которых имеют перигелийные расстояния, удовлетворяющие условию менее 1.3 а. е., а также известные астероидно-метеороидные комплексы, состоящие из родственных роев и АСЗ, также можно рассматривать как неотъемлемую часть популяции ОЗО. Отметим, что у некоторых долгопериодических комет перигелийные расстояния составляют менее 1.3 а. е., однако из-за длительных периодов обращения в популяцию ОЗО они не включены.

К настоящему времени зарегистрировано 31643 околоземных объектов, статистика которых приведена в табл. 1. Статистические данные по обнаружению АСЗ приведены в виде диаграммы на рис. 1 (<https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/>, 2023). Как видно, общее число открытых АСЗ 31523, из них с размером свыше 140 м – чуть больше 10 тыс., свыше одного км – 853. Больше всего открыто тел с размерами от 30 до 100 м, затем тел – с диаметрами до 30 м.

АСТЕРОИДЫ, СБЛИЖАЮЩИЕСЯ С ЗЕМЛЕЙ

Астероидом, сближающимся с Землей (АСЗ), называется малая планета, движущаяся по орбите, которая под воздействием вековых возмущений может пересечь орбиту Земли и для нее перигелийное расстояние орбиты $q < 1.3$ а. е. В настоящее время известны четыре основные группы околоземных астероидов, названных в честь самых известных представителей каждой группы: Атира, Атон, Аполлон и Амур. Орбиты астероидов типа Атиры с афелийными расстояниями $Q < 0.983$ а. е. расположены в пределах земной орбиты. Такие малые тела трудно обнаружить, поскольку они могут наблюдаться только в утреннее или вечернее время, на элонгациях от Солнца, не превышающих 90° . С этим связано небольшое число от-

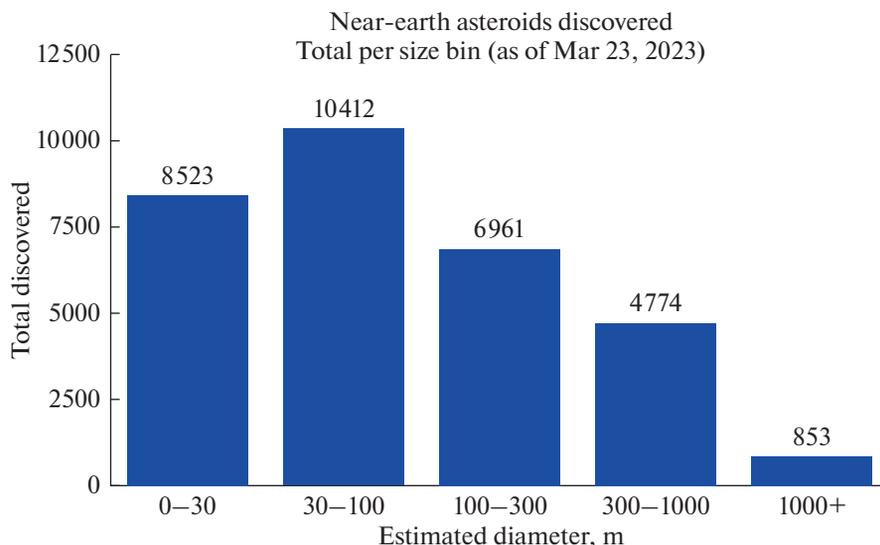


Рис. 1. Распределение числа обнаруженных АСЗ в зависимости от их оценочного размера (взято из: <https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/>, 2023).

крытых астероидов этой группы – 31, типичный представитель – астероид (163693) Атира. Атоны, для которых большая полуось орбиты $a < 1$ а. е. и афелийное расстояние $Q > 0.983$ а. е., пересекают орбиту Земли с периодом менее 1 г., астероид Ра-Шалом – типичный атон. Аполлоны, для которых $a > 1$ а. е. и перигелийное расстояние $q < 1.017$ а. е., пересекают орбиту Земли с периодом более 1 г., астероид Географос – типичный аполлон. Амуры, для которых $a > 1.0$ а. е. и $1.017 < q < 1.3$ а. е., пересекают орбиту Марса, но не вполне достигают орбиты Земли, астероид Эрос, являющейся целью космической миссии NEAR (Near Earth Asteroid Rendezvous), это типичный амур.

Среди АСЗ всех перечисленных групп имеются потенциально опасные астероиды (ПОА) (Potentially Hazardous Asteroids). К ним относят все астероиды, орбиты которых в настоящую эпоху сближаются с орбитой Земли до расстояний, меньших или равных 0.05 а. е. (около 7.5 млн км), и абсолютная звездная величина которых не превышает 22^m . Ограничение межорбитальных расстояний величиной 0.05 а. е. является до некоторой степени условным. Оно диктуется тем обстоятельством, что в таких пределах можно ожидать неточность определения минимального межорбитального расстояния, так называемого параметра MOID (Minimum Orbit Intersection Distance), для вновь открываемого астероида, а также его возможного изменения из-за разного рода возмущений в обозримом будущем. Ограничение по абсолютной звездной величине связано с тем, что при принятом значении альbedo 0.14 тела с абсолютной звездной величиной, превосходящей

22^m , имеют размеры менее 140 м. Столкновение таких тел с Землей в худшем случае способно вызвать лишь локальную катастрофу. На текущий момент открыто 2326 ПОА, среди которых 151 объект имеет размеры порядка 1 км и выше (табл. 1). Одним из самых известных ПОА является астероид группы Атона (99942) Апофиз, тесное сближение которого с Землей на расстоянии 0.00025 а. е. ожидается 13 апреля 2029 г. (<https://ssd.jpl.nasa.gov>, 2022). Группа ПОА потенциально может воздействовать на Землю, поэтому их траектории являются объектом пристального внимания наблюдателей и теоретиков и аккуратного отслеживания изменения их орбит в будущем. Характеристики их размеров, состава и структуры также являются весьма важными научными целями для астрономов.

Для определения размеров астероидов практикуются следующие методы: фотометрический, поляриметрический, радиолокационный, спекл-интерферометрический, транзитный и тепловой радиометрии; размеры избранных астероидов определены с помощью космических миссий. Каждый из имеющихся подходов имеет свои преимущества и недостатки, а также характеризуется соответствующей точностью. В радарных наблюдениях размеры можно оценить из наблюдаемых спектров мощности доплеровского эхо-сигнала; доплеровская полоса пропускания является функцией некоторых параметров, включая проекционный диаметр цели. В радарных наблюдениях сначала определяется диаметр, а затем с использованием найденного размера вычисляется альbedo. Радиолокационные наблюдения и наблюдения покрытия звезд астероидом (транзит-

ный метод) обеспечивают наиболее точные величины диаметров.

Размеры АСЗ (диаметры) по оптическим наблюдениям могут быть получены только приблизительно из расчетной абсолютной величины астероида (H) и предполагаемой отражательной способности, или альbedo. Поэтому, оперируя размерами, необходимо учитывать, что это только их оценки. Абсолютная звездная величина H , являющаяся мерой средней яркости астероида (<https://cneos.jpl.nasa.gov>, 2023), находится из измерений его видимой звездной величины в разное время, когда он наблюдался на разных расстояниях от Солнца и Земли и при разных фазовых углах. Кроме того, поскольку фактическая геометрическая фигура астероида обычно неизвестна, предполагается, что он просто сферический. Как правило, неизвестна и средняя отражательная способность (альbedo) астероидов. Для астероидов ГП Pravec и др. (2012) показали, что между альbedo и таксономическим спектральным классом астероидов существует некоторая (приблизительная) корреляция. Но поскольку таксономический класс большинства АСЗ неизвестен, то для оценки их размеров используется предполагаемое среднее альbedo 14%. При таком предположении сферический АСЗ с размером в 1 км соответствует значению $H = 17.75^m$.

Среди известных к настоящему времени ОЗО 31 523 являются астероидами, сближающимися с Землей (табл. 1). Самый крупный АСЗ (1036) Ганимед имеет диаметр 41 км, у двух других – (433) Эроса и (3552) Дон Кихота – диаметр равен 20 км, размеры большинства астероидов не превышают 1 км. До 2005 г. самым маленьким околоземным астероидом являлся 9-метровый астероид 1991 ВА из группы Аполлона, однако с усовершенствованием наблюдательной техники этот порог пройден, и сегодня открыты АСЗ с гораздо меньшими размерами (до 1 м). Свыше 10 тыс. открытых АСЗ имеют размеры более 140 м. Считается, что в целом существует около 1000 АСЗ с размером более 1 км и примерно 15 тыс. с размером более 140 м. Поскольку уже обнаружено более 90% околоземных объектов с размером более 1 км (табл. 1), проект NASA “NEO Search Program” (https://cneos.jpl.nasa.gov/about/search_program.html, 2022) в настоящее время сосредоточен на обнаружении остальных тел популяции ОЗО с размером более 140 м.

Большинство астероидов имеют неправильную форму. Это связано с их небольшими размерами и малым гравитационным полем, мощности которого достаточно для удерживания материала в целом, но не хватает, чтобы придать объекту круглую форму.

Данные наблюдений показывают, что периоды вращения астероидов зависят от их размеров, в среднем, скорости осевого вращения АСЗ такие же, как и астероидов Главного пояса аналогичных размеров. Приведем больше сведений о периодах вращения астероидов, полученных по оптическим наблюдениям, с использованием кривых блеска.

В работе (Harris, Burns, 1979) показано, что периоды вращения больших астероидов ($D > 30\text{--}40$ км) соответствуют распределению Максвелла. Pravec и Harris (2000) проанализировали выборку из 984 АСЗ и подтвердили, что распределение периодов вращения астероидов с диаметром $D \geq 40$ км является максвелловским с достоверностью 99%, при этом отметив, что эта гипотеза может быть отвергнута с достоверностью 95%.

Для средних ($10 < D \leq 40$ км) и малых ($D < 10$ км) астероидов показано, что распределение их периодов вращения не является максвелловским (Pravec, Harris, 2000). В данном диапазоне размеров показано существование значительных популяций астероидов как медленно, так и быстро вращающихся. Установлено, что избыток медленных астероидов присутствует при скоростях вращения ниже ≈ 0.8 об./сут, а группа быстро вращающихся астероидов занимает диапазон скоростей вращения > 7 об./сут (Pravec, Harris, 2000).

Pravec и др. (2007) также показали, что астероиды размером от нескольких сотен метров до примерно 10 км имеют спиновый предел и их периоды выше ≈ 2.2 ч, только небольшое количество объектов диаметрами менее 100 м вращаются гораздо быстрее, с периодами порядка 10 мин и менее.

Анализируя наблюдательные данные, Kwiatkowski и др. (2010) пришли к заключению, что все объекты диаметром более 1 км имеют периоды более 2.2 ч, в то время как АСЗ размерами менее 150 м демонстрируют гораздо более быстрое вращение с периодами всего несколько минут или даже меньше. Для 79 таких АСЗ получен средний период 0.25 ч (15 мин).

Приведем еще одну интерпретацию наблюдательных данных. Betzler, Borges (2012) пришли к заключению о существовании спинового барьера для астероидов диаметром от сотен метров до 10 км и с периодом вращения около 2.2 ч. Отсутствие значительного количества астероидов с периодами менее 2.2 ч связано с низкой степенью внутреннего сцепления этих объектов.

Вращение АСЗ характеризуется двумя особенностями, которые пока что не обнаружены среди астероидов Главного пояса. Первая – среди АСЗ малых размеров (метры—десятки метров) обнаружены объекты со сверхбыстрым осевым враще-

нием, у которых периоды вращения составляют от одной до 20 мин. Ясно, что такие тела должны быть монолитными фрагментами, а не структурами типа груды камней. Вторая особенность – обнаружено несколько объектов со сложным вращением; они вращаются не вокруг главной оси инерции (т.е. вокруг наиболее короткой оси), сохраняя момент максимальным, а энергию – минимальной, как это имеет место у подавляющего большинства астероидов. Это так называемые “кувыркающиеся” астероиды (Pravec и др., 2005). По-видимому, такие АСЗ претерпели недавние столкновения с другими астероидами.

Радарные наблюдения показывают, что поверхности АСЗ в целом более шероховатые, чем поверхности астероидов Главного пояса (Rozitis и др., 2018). Это вполне естественно, поскольку астероиды Главного пояса гораздо более крупные и их гравитационное поле способно частично сглаживать неровности поверхности. Поверхности большинства АСЗ покрыты слоем реголита – раздробленного вещества с размерами частиц от микрона до сантиметра с низкой теплопроводностью (см., например, Gundlach, Blum, 2013). Об этом, в частности, свидетельствуют данные наземных телескопических наблюдений и прямых снимков поверхностей двух АСЗ – (433) Эроса и (25143) Итокавы – с космических аппаратов NEAR-Shoemaker и Hayabusa (Veverka и др., 2001; Küppers, 2002; Matsumoto и др., 2022; Brisset и др., 2020; Saito и др., 2006). Измерения тепловой эмиссии АСЗ показали, что тепловая инерция их поверхностей в 11 раз больше, чем для лунной поверхности (Gundlach, Blum, 2013). Это означает, что реголит АСЗ более крупнозернистый, чем лунный и, вероятнее всего, более крупнозернистый, чем реголит больших по размерам астероидов Главного пояса (Gundlach, Blum, 2013).

Прямые изображения одного из крупнейших АСЗ (433) Эрос, полученные с космического аппарата NEAR-Shoemaker в 2000–2001 гг., показали, что его поверхность покрыта большим числом кратеров разных размеров и отдельно лежащих камней (Küppers, 2002; Charman и др., 2002). На астероиде (101955) Бенну посредством наблюдений с КА OSIRIS-Rex также обнаружено большое число кратеров (Ballouz и др., 2020a). Наземные радарные наблюдения показывают, что даже небольшие АСЗ с диаметром около 3 км кратерированы так же сильно, как и более крупные астероиды Главного пояса (Ballouz и др., 2020a; Charman и др., 2002). Однако и здесь имеются исключения, почти нет кратеров на астероиде (25143) Итокава, при этом поверхность покрыта множеством больших валунов (Saito и др., 2006), что является од-

ним из доводов в пользу структуры тела типа “кучи щебня” (“rubble-pile”) (Fujiwara и др., 2006).

Население АСЗ является репрезентативным для всех типов астероидов, находящихся в ГПА. Поэтому, для объяснения физических свойств АСЗ, в частности, их минералогии, можно применить имеющиеся сведения в целом для астероидов. Наши знания о составе астероидов получены по трем основным каналам: дистанционные наблюдения с помощью наземных и космических средств; данные, полученные с КА, как осуществивших забор вещества астероидов, так и с помощью приборов, позволяющих исследовать состав астероида на пролетных траекториях; с помощью лабораторных исследований метеоритов и установления связи астероидов с метеоритными аналогами. Астероиды делятся на разные типы в зависимости от их альbedo, состава, полученного из спектральных особенностей в их отраженном солнечном свете, и предполагаемого сходства с известными типами метеоритов. Большинство астероидов попадают в следующие три основных категории (Gradie и др., 1989). С-тип (углеродистый), очень темный с альbedo 0.03–0.09 (как для кометных ядер), включает более 75% известных астероидов. Считается, что относительное содержание тяжелых элементов в этих астероидах близко к солнечному. Астероиды С-типа населяют внешние районы Главного пояса. S-тип (кремнистый), относительно яркий с альbedo 0.10–0.22, составляет около 17% известных астероидов. Астероиды S-типа доминируют во внутреннем регионе ГПА. М-тип (металлический), относительно яркий с альbedo 0.10–0.18, включает многие остальные известные астероиды. Астероиды этого класса состоят из магнезиально-железистых силикатов с включениями никелистого железа. Астероиды М-типа населяют среднюю часть ГПА. Имеющиеся к настоящему моменту таксономические классификации астероидов имеют гораздо больше категорий, позволяющих провести более тонкое разделение наблюдаемой минералогии астероидов, к примеру, классификация Толена (Tholen, 1989), SMASS II классификация (Bus, Binzel, 2002). Однако приведенные здесь три типа являются основополагающими и, в принципе, охватывают все возможные комбинации минералогического состава, установленного из вышеприведенных источников.

В результате лабораторных исследований пыли с АСЗ (25143) Итокава, собранной и доставленной на Землю посредством КА Hayabusa, и в соответствии с распространенной таксономической классификацией, астероид был отнесен к астероидам S-типа. Астероиды этого типа отличаются низким содержанием общего железа, их ме-

Таблица 2. Средние плотности и пористость метеоритных типов

Метеоритный тип	Минералогическая плотность, г/см ³	Средняя объемная плотность, г/см ³	Средняя пористость, %
Обыкновенные хондриты типа H	3.84	3.40	11.5
Обыкновенные хондриты типа L	3.75	3.34	10.8
Обыкновенные хондриты типа LL	3.56	3.19	10.4
Ахондриты	3.20	2.97	7.0
Углистые хондриты CI	2.27	2.12	11.0
Углистые хондриты CM	2.71	2.21	12.0
Углистые хондриты CR	3.11	3.15	6.0
Углистые хондриты CV	3.51	3.10	11.0
Углистые хондриты CO	3.69	3.11	16.0

теоритным аналогом являются обычные хондриты с низким содержанием металлов (Nakamura и др., 2011).

Из исследований метеоритов обнаружено, что самые распространенные из них, известные как обыкновенные хондриты, состоят из мелких зерен породы и, вероятно, не претерпели изменений с периода формирования Солнечной системы. С другой стороны, железо-каменные метеориты, по-видимому, являются остатками более крупных тел, которые когда-то были расплавлены и в них более тяжелые металлы и более легкие породы разделены на разные слои. Ведется научная дискуссия о том, являются ли одни из наиболее распространенных астероидов S-типа источником обыкновенных хондритов. Спектральные данные предполагают, что астероиды S-типа могут быть телами, претерпевшими геохимическое воздействие, так называемый метаморфизм. Если S-тип не связан с обыкновенными хондритами, то должен быть другой их исходный источник. Если они связаны между собой, то нужно объяснить, почему они спектрально не похожи. Связь между астероидами и метеоритами требует дальнейших исследований.

Измерения объемной плотности астероидов вместе с данными по минералогической плотности аналогичных метеоритов могут дать представление о пористости и внутренней структуре астероидов. В последние годы был проведен ряд измерений объемной плотности астероидов посредством космических аппаратов, наземных наблюдений, теоретических моделей и сравнения их с метеоритами. Оказалось, что объемная плотность большинства астероидов существенно ниже минералогической плотности их наиболее вероятных метеоритных аналогов. Это указывает на то, что многие астероиды обладают значительной пористостью (Britt, Consolmagno, 2000). Высокая пористость ослаб-

ляет распространение удара, значительно влияя на характер образования кратеров и сильно увеличивая время жизни пористых астероидов при столкновении. Анализируя плотности астероидов, Britt и Consolmagno (2000) и Britt и др. (2002) предполагают, что астероиды делятся на три основные группы: (1) астероиды, являющиеся существенно твердыми объектами, (2) астероиды с макропористостью ~20%, которые, вероятно, имеют много трещин, и (3) астероиды с макропористостью >30%, которые представляют собой консолидированные рыхлые структуры типа “кучи щебня (гальки)”, содержащие больше пустого пространства, чем твердого материала. К астероидам группы (2) относятся астероиды S-типа (243) Ида и (433) Эрос с объемной плотностью примерно 2.6 г/см³ и астероид C-типа (121) Гермона с плотностью примерно 1.8 г/см³. Наиболее вероятные аналоги метеоритов для этих астероидов указывают на пористость, вероятно, в пределах 25–30%. Также в группу (2) входят крупные астероиды (1) Церера, (2) Паллада и (4) Веста, объемная плотность которых и вероятные аналоги указывают на очень низкую пористость. Объемная плотность астероидов группы (3) существенно ниже минералогической плотности наименее плотных метеоритов. К ним относятся астероиды C-типа (253) Матильда, (45) Евгения, а также M-типа (16) Психея (Britt, Consolmagno, 2000).

Средние оценки объемной и минералогической плотности, а также пористости для метеоритных типов обыкновенных хондритов по данным Britt и др. (2002) приведены в табл. 2.

На рис. 2 приведены объемные плотности измеренных астероидов и астероидоподобных спутников Марса, Фобоса и Деймоса, минералогическая плотность известных типов метеоритов (в виде вертикальных линий) и оценки средней объ-

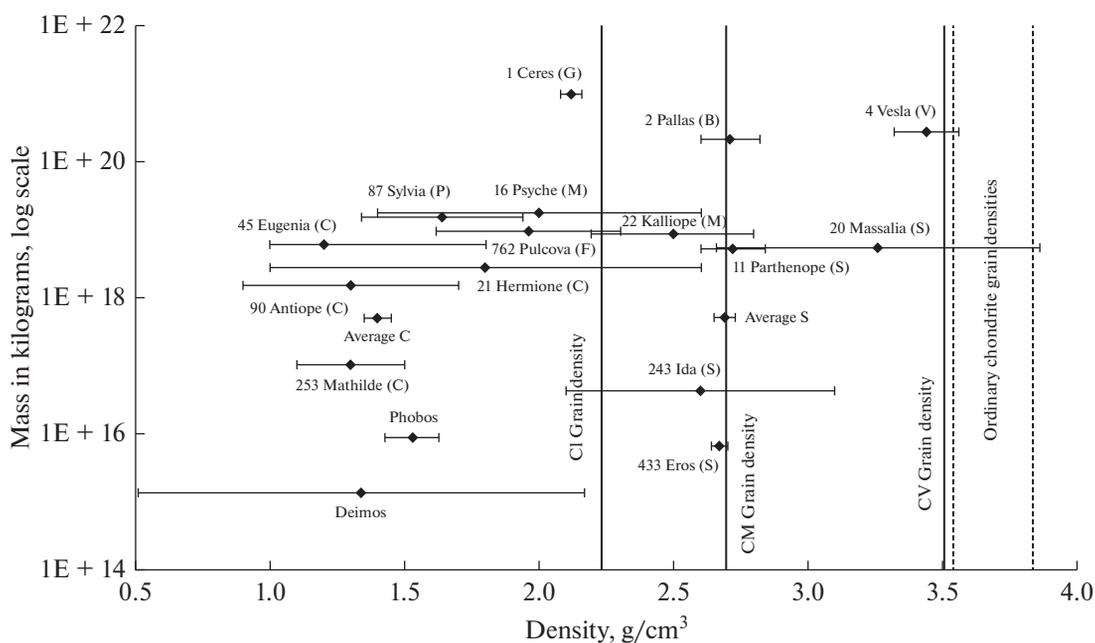


Рис. 2. Объемная плотность измеренных астероидов, минералогическая плотность известных типов метеоритов и оценки средней объемной плотности для астероидов C- и S-типов (взято из: (Britt и др., 2002)).

емной плотности для астероидов C- и S-типов по данным Standish (2001). График заимствован из работы Britt и др. (2002).

Hanus и др. (2017) на основе наблюдений и теоретического моделирования определили объемную плотность 40 астероидов и проанализировали зависимость плотности от различных таксономических классов и диаметров. Выявлена сопоставимость плотностей для астероидов S- и M-типов, только самые маленькие объекты S-типа (<35 км) имеют систематически более низкие объемные плотности, вероятно, из-за большей макропористости. Выявлена тенденция более низкой объемной плотности у примитивных объектов C-типа, чем у астероидов S-типа. Лишь немногие крупные примитивные астероиды C-типа имеют значительно большую объемную плотность по сравнению с остальными астероидами в выборке. Большинство астероидов имеет довольно узкий диапазон значений плотности около ~ 1.5 г/см³ (Hanus и др., 2017). Эти данные подтверждают и результаты Siltala, Granvik (2022), которые посредством комбинации данных из Gaia DR2 и наземной астрометрии оценили объемную плотность астероидов C-типа (52) Европы и (445) Эдны как 1.87 ± 0.31 и 1.06 ± 0.31 г/см³ соответственно.

Приведем данные определения плотности с помощью космической миссии. В результате пролета миссии NEAR-Shoemaker мимо астероида GP (253) Матильда на расстоянии 1200 км

(июнь 1997 г.) оценены: размер $66 \times 48 \times 46$ км, объем 78 тысяч км³ с точностью $\sim 15\%$, масса 10^{17} кг с точностью $\sim 3\%$, плотность 1.34 г/см³ (<https://ns-sdc.gsfc.nasa.gov>, 2022). Такая плотность, слегка превышающая плотность воды, так же, как и в вышеприведенных исследованиях, позволяет предположить, что астероид является не твердым телом, а скорее, уплотненной грудой галечника или его обломков. Измерения AC3 (25143) Итокава на КА Hayabusa показали, что его размер $535 \times 294 \times 209$ м, масса 3.51×10^{10} кг, расчетная объемная плотность 1.9 ± 0.13 г/см³ (Fujiwara и др., 2006). Из-за низкой объемной плотности, высокой пористости, богатого валунами внешнего вида и формы (25143) Итокава также считается телом, состоящим из груды щебня (Fujiwara и др., 2006). Результаты космических миссий подтвердили данные, полученные с другими методами и подходами.

Согласно имеющимся данным, касающимся AC3, они могут происходить или из ГПА, или быть ядрами “угасших” короткопериодических комет. Считается, что большинство AC3 представляют собой астероиды (или их фрагменты), переброшенные из ГПА на околоземные орбиты вследствие столкновений, гравитационных резонансов с планетами, главным образом, с Юпитером, или же комбинации этих процессов. AC3 представляют собой динамично молодую популяцию, орбиты в которой эволюционируют порядка 100 млн лет в результате столкновений и

гравитационных взаимодействий с Солнцем и планетами земной группы. Об этом свидетельствуют как многочисленные теоретические изыскания, так и сведения, полученные с помощью космических миссий. В частности, по данным, собранным миссией OSIRIS-Rex, на АСЗ (101955) Бенну, выявлено, что он, как и астероид ГПА (253) Матильда, представляет собой темную грудку обломков, удерживаемую гравитацией (Dellagustina и др., 2019). Исследование показало, что Бенну является фрагментом астероида, образовавшегося в результате столкновения с более крупным объектом ГП, и что время существования астероида около Земли составляет 1.75 млн лет (Ballouz и др., 2020b).

КОМЕТЫ, СБЛИЖАЮЩИЕСЯ С ЗЕМЛЕЙ

В некоторых случаях орбиты короткопериодических комет (период обращения P менее 200 лет) проходят близко от орбиты Земли, а иногда и пересекают ее. Короткопериодические кометы, орбиты которых имеют перигелийные расстояния менее 1.3 а. е., образуют группу комет, сближающихся с Землей (КСЗ) и также входят в популяцию ОЗО. В настоящее время известно 120 околоземных комет (табл. 1). Среди них известные кометы 1P/Галлея, 2P/Энке, 21P/Джакобини—Циннера, 26P, 27P, 45P, 46P, 55P и др. Околоземные кометы, так же, как и АСЗ, представляют собой репрезентативную коллекцию известных комет, включая все короткопериодические кометы. Поэтому, в целом, все установленные динамические и физические свойства комет в полной мере характеризуют околоземные кометы. Однако каждая комета, несомненно, имеет собственные особенности, в связи с чем является объектом отдельного изучения посредством наблюдений и теоретических подходов.

Знание о некоторых динамических и физических характеристиках околоземных комет можно получить из данных, полученных для кометы 67P. Перигелий кометы 1.24 а. е., и она относится к околоземным объектам. Динамические и особенно физические свойства, исследованные с КА Rosetta, являются наиболее достоверными данными, характеризующими короткопериодические кометы. В результате нам известна ее геометрическая фигура, размер ядра $4.1 \times 3.2 \times 1.3$ км (большая часть) и $2.5 \times 2.5 \times 2.0$ км (меньшая часть) (<https://esa.int/rosetta/2014/10/03/measuring-comet-67pc-g/>, 2014). Объемная плотность 0.533 ± 0.006 г/см³, масса 9.982×10^{12} кг (Patzold и др., 2016), диаметр 3.4 ± 0.1 км (Sierks и др., 2015), альbedo 0.06, период вращения 12.4 ч, температура поверхности ядра 205–230 К (<https://esa.int/rosetta/2014/10/03/measuring-comet-67pc-g/>, 2014).

Ядро кометы имеет пористую структуру и 75–85% его объема составляет пустота. Поверхность ядра покрыта пылью, под которой находится твердая кора из спрессованных пыли и льда. В кометном ядре обнаружены молекулы 16 органических соединений, четыре из которых – метилизоцианат, ацетон, пропаналь и ацетамид – ранее на кометах не встречались (Rubin и др., 2019). В коме кометы помимо ожидаемых воды, угарного и углекислого газов, были обнаружены органические соединения, включая формальдегид и аминокислоту глицин (Rubin и др., 2019; Wurz и др., 2017a; 2017b). Также КА Rosetta показал наличие полимерных молекул на поверхности ядра кометы, образовавшихся под действием солнечного излучения. Более сотни образований из льда превращаются в пар с частицами пыли при приближении кометы к Солнцу (Wurz и др., 2017a; 2017b). Этот пар выпадает в виде инея на холодной стороне ядра, после чего процесс повторяется по мере вращения ядра. Возможно также, что вскоре после заката Солнца остаточное тепло освобождает воду из недр ядра, после чего она замерзает на его поверхности (Gicquel и др., 2016). Кроме того, наблюдались внезапные выбросы газа и пыли, связанные с освещением Солнцем недавно оказавшегося на поверхности льда. Другой возможностью является формирование выбросов в момент, когда тепловой импульс доходит до подповерхностных “карманов” со льдом, что приводит к быстрой сублимации и взрывному высвобождению газа (Gicquel и др., 2016; Kramer, Lauter, 2019).

Некоторые динамические и физические характеристики околоземных комет приводятся в следующем разделе.

УГАСШИЕ ЯДРА КОМЕТ

Другую, небольшую часть популяции АСЗ составляют “потухшие” или “спящие” кометные ядра (см., например, Opik, 1963; Weissman и др., 1989; 2002; Bowell и др., 1992; Fernandez и др., 1997; Bottke и др., 2002; Jewitt, 2012; Бабаджанов, Кохирова, 2009; Babadzhанov и др., 2008a; 2008b; 2008c; 2009; 2012; 2013; Kokhirova и др., 2020; 2021). Такие объекты являются конгломератами замерзших газов и твердых частиц и представляют конечное состояние кометных ядер после многократных прохождений через перигелий. В периоды прохождения перигелия происходит интенсивный выброс газов и пыли кометой, при этом некоторые из пылевых частиц не могут покинуть поверхность ядра или возвращаются на нее, и в результате со временем поверхность ядра покрывается толстой тугоплавкой корой. Она

препятствует проникновению тепла вовнутрь и ослабляет интенсивность пыле- и газовой выделений, таким образом, предотвращая дальнейшую сублимацию подкорковых льдов. Любой АСЗ, образованный таким образом, содержит значительное количество летучих примесей и, следовательно, имеет очень пористую структуру.

Возможность покрытия ядра кометы тугоплавкой корой показали результаты спектральных наблюдений комет, изучения комет посредством космических аппаратов и лабораторного моделирования кометных явлений. Спектры многих комет показали наличие большого количества молекулярного углерода C_2 , C_3 и положительных ионов этих молекул (Добровольский, 1961; Шулман, 1972; Ellis, Neff, 1992). Исследования кометы Галлея с КА Giotto в непосредственной близости от поверхности ядра показали, что большая часть пылевых частиц состоит преимущественно из элементов H, C, N, O (Krankowsky и др., 1986; Krasnopolsky и др., 1986). Оптический спектрометр на КА Vega-2 и масс-спектрометр на КА Giotto зарегистрировали большое содержание атомарного и молекулярного углерода, C, C_2 , C_3 и их ионов в непосредственной близости от ядра кометы. Не выяснены источник и возможный физический механизм образования тугоплавких веществ, в частности ионов многоатомного углерода, вблизи ядра на больших гелиоцентрических расстояниях комет. В решении этой задачи большой вклад принадлежит методу лабораторного моделирования кометных явлений (см., например, Хашимов, Шоекубов, 1989; Хашимов и др., 1994). Результаты лабораторного моделирования показывают, что на поверхностном слое формирующегося конкретного ядра, первоначально состоявшего из замороженных легколетучих веществ, могут образоваться более сложные, в том числе тугоплавкие и органические вещества. С течением времени под действием солнечного ветра и космических лучей состав и структура поверхностного слоя ядра изменяются, обогащаясь тугоплавкими веществами. Лабораторные эксперименты показали, что поверхностный слой кометного ядра должен покрываться слоем вещества типа графита (см., например, Хашимов, Шоекубов, 1989). Этот же слой является источником ионов многоатомного углерода (и других сложных молекулярных ионов), наблюдавшихся на КА Giotto и Vega-2 вблизи ядра кометы Галлея (Krankowsky и др., 1986; Krasnopolsky и др., 1986). Наличием темного тугоплавкого графитоподобного слоя на поверхности ядра качественно можно объяснить малую величину альбедо поверхности ядра кометы Галлея, наблюдавшейся на КА Vega-1 и Vega-2 (Sagdeev и др., 1986). Исследова-

ния кометы 67P на КА Rosetta выявили наличие органических и полимерных соединений на комете, а также существование очень темных областей на ее поверхности, очень вероятно, что ядро также подверглось процессу покрытия корой. Отметим, что органические и полимерные соединения присущи и АСЗ, изучение частиц пыли, собранных КА Hayabusa с поверхности астероида (25143) Итокава, показало наличие в ней органического вещества, представленного как нанокристаллическим графитом, так и неупорядоченным полициклическим ароматическим углеродом (Chan и др., 2021).

В работе Weissman и др., (2002) предложены следующие определения для описания существующих объектов кометной природы. Неактивной кометой называют ядро кометы, которая активна в некоторой части своей орбиты, но в настоящее время она находится в той части орбиты, где газопродуктивность незначительна и нет видимой комы. Термином “спящая” комета обозначено ядро кометы, которая когда-то была активной и потом утратила способность генерировать кому, видимую в любой части ее нынешней орбиты. “Спящая” комета может быть реактивирована, когда она перебрасывается вследствие возмущений на меньшее перигелийное расстояние. Или реактивация возможна, если в результате столкновения с другим телом удаляется поверхностная тугоплавкая кора и свежие ледяные субстанции начинают сублимировать с поверхности, увлекая за собой пылевые частицы (Weissman и др., 2002).

Впервые гипотеза о том, что некоторые из астероидов групп Аполлона, Амура и Атона являются “угасшими” кометами, то есть кометами, ядра которых покрыты толстой (до 10 м) пылевой корой или же вообще растерявшие все замерзшие газы, была предложена Opik (1963). В пользу реальности существования угасших ядер комет говорит и тот факт, что, как показали Emel'yanenko и др. (2013), средняя продолжительность активной фазы всех комет в области $q < 1.5$ а. е. составляет менее 200 оборотов, что значительно короче их динамического времени жизни в околоземном пространстве. Следовательно, можно ожидать, что после завершения активной фазы кометы переходят в фазу астероидоподобных угасших (спящих) кометных ядер, если под действием сильных гравитационных воздействий больших планет или столкновений с другими мелкими телами они не распадутся на отдельные фрагменты и не прекратят свое существование (Weissman и др., 2002). Таким образом, большую часть срока своей жизни комета может провести в “высохшем” состоянии в виде АСЗ. Внешне для наземного наблюдателя угасшие кометные ядра выглядят так же, как

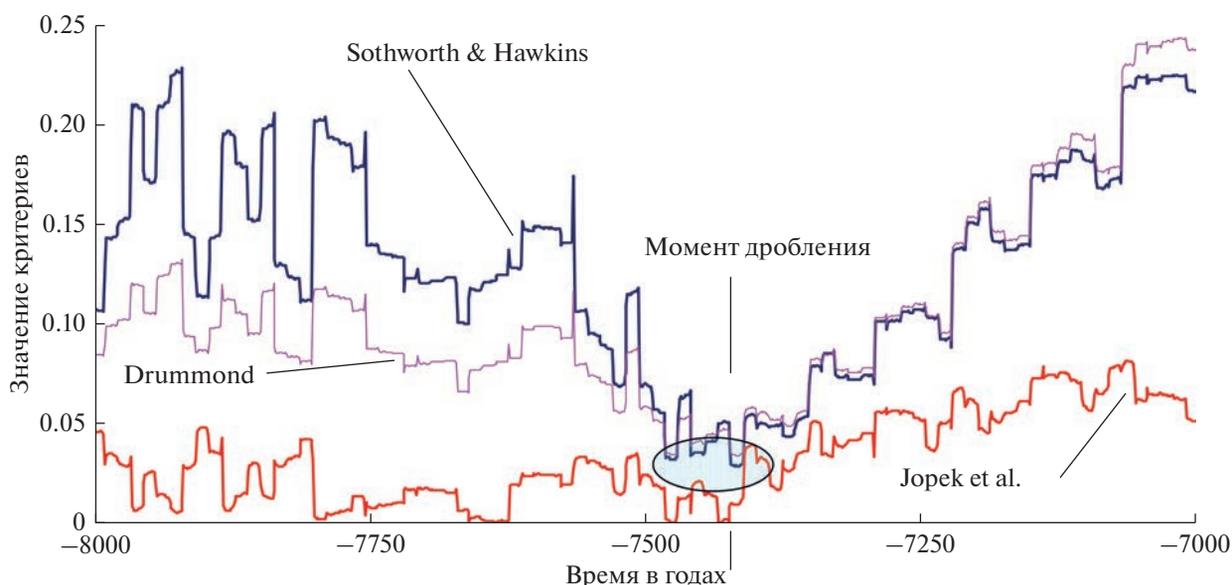


Рис. 3. Критерии близости орбит кометы 96P/Мачхолца 1 и АСЗ 2003 ЕН1 вблизи момента дробления.

астероиды, из-за чего различить их практически невозможно и при обнаружении они каталогизируются как АСЗ.

К настоящему времени имеется множество достоверных фактов, подтверждающих гипотезу Эпика. Существование астероидов, отождествленных с “потухшими” или “спящими” кометами, например, таких, как (2060) Хирон (1977 UB), (4015) Вильсона–Харрингтона (1979 VA), 119P/Паркера–Хартли (1989 E1, 1986 TF), действительно, подтверждает кометное происхождение части астероидов, пересекающих орбиту Земли. Weissman и др. (1989) полагают, что астероиды (3200) Фаэтон, (2101) Адонис, (2201) Олджато, (2212) Гефест, а также (3552) Дон Кихот (1983 SA) и (6063) Ясон (1984 KB) с большой вероятностью имеют кометное происхождение, и что их физические свойства подтверждают это предположение. Согласно McFadden и др. (1993), возмущения в магнитном поле солнечного ветра, связанные с (2201) Олджато (Russell и др., 1984), аномальное радиоэхо от (2101) Адониса (Ostro и др., 1991) и УФ-избыток в спектре отражения (2201) Олджато наводят на мысль, что эти астероиды являются высохшими кометами.

Приведем больше фактов по ядрам угасших комет. Очевидным доказательством реальности таких объектов служит объект 107P/Вильсона–Харрингтона, открытый в 1949 г. как активная комета, затем утерянный и вновь открытый в 1979 г. как астероид, сближающийся с Землей, (4015) 1979 VA. Позже, в 1992 г., было подтверждено, что этот АСЗ в действительности является кометой

107P/Вильсона–Харрингтона, утерявшей какие-либо признаки кометной активности (Bowell и др., 1992; Fernandez и др., 1997). Примером обратного хода событий служит комета 96P/Мачхолца 1, открытая в 1986 г. Специальные поиски этой кометы по вычисленным эфемеридам на пластинках, полученных на телескопах с большим полем зрения и предельной звездной величиной до +19^m до момента открытия кометы, не дали результата (Green и др., 1990). Хотя, по крайней мере три из четырех ее прохождений перигелия были очень благоприятны для наблюдений (Sekanina, 1990). Наиболее логичное объяснение этого факта заключается в предположении, что вплоть до 1986 г. комета находилась в неактивном или “спящем” состоянии (Green и др., 1990; Sekanina, 1990). Дальнейшие исследования динамических свойств показали, что комета 96P/Мачхолца 1 и АСЗ 2003 ЕН1 с большой вероятностью имеют общее происхождение, распад общего родителя на эти два крупных фрагмента произошел почти 9.5 тыс. лет назад, и астероид 2003 ЕН1 в реальности является угасшим фрагментом кометы (Babadzhanov и др., 2017). На рис. 3 приведен график зависимости трех критериев близости орбит кометы 96P/Мачхолца 1 и АСЗ 2003 ЕН1 от времени, из которого видно, что все три критерия имели минимальные величины примерно 9.5 тыс. лет назад, следовательно, на этот момент приходится максимальное совпадение орбит и с высокой вероятностью тогда и произошла фрагментация родительской кометы. В настоящий момент активная комета 96P/Мачхолца 1, околоземный объект (186256) 2003 ЕН1, являющийся угасшим

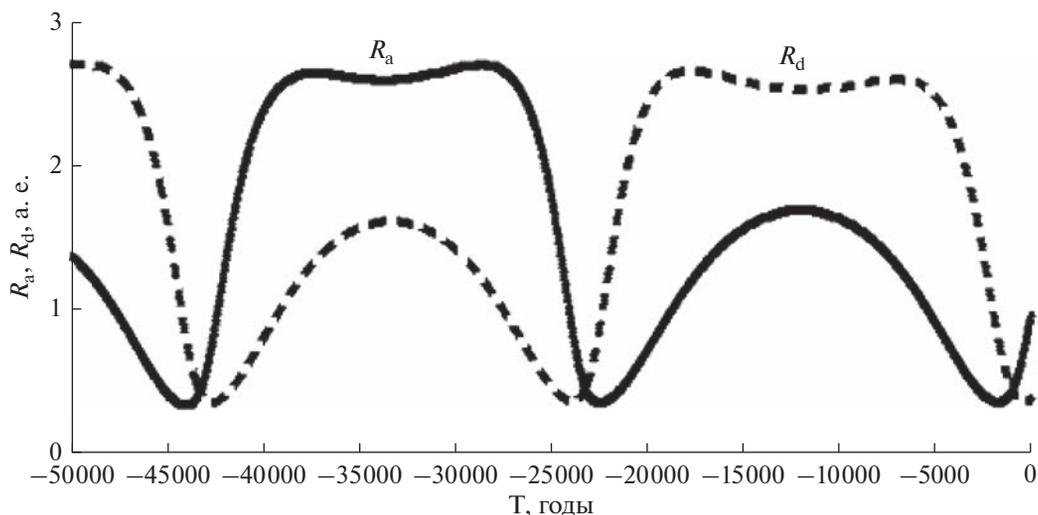


Рис. 4. Долгопериодические изменения радиус-векторов восходящего R_a и нисходящего R_d узлов орбиты астероида 2015 ТВ145 на интервале 50 тыс. лет в прошлое (взято из: (Kokhirova и др., 2017)).

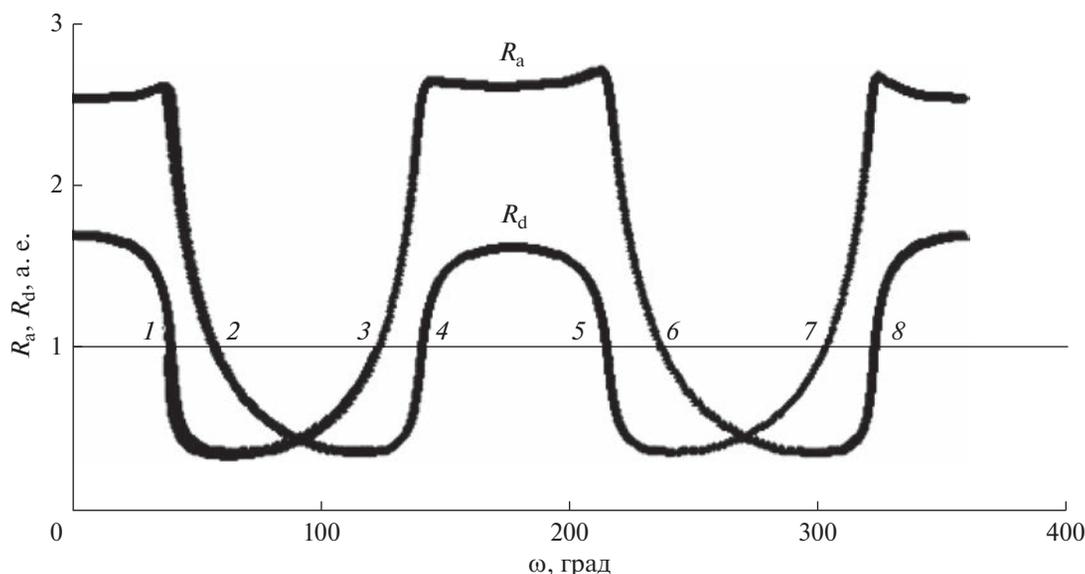


Рис. 5. Изменения радиус-векторов восходящего R_a и нисходящего R_d узлов орбиты астероида 2015 ТВ145 в зависимости от аргумента перигелия ω . Положения пересечений с орбитой Земли указаны цифрами 1–8 (взято из: (Kokhirova и др., 2017)).

фрагментом ядра прародительской кометы, и метеороидный рой Квадрантид с его восемью метеорными потоками образуют астероидно-метеороидный комплекс Квадрантид (Jenniskens, 2004; Williams и др., 2004; Babadzhanov и др., 2008b; Jenniskens, Mardsen, 2003; Kanuchova, Neslusan, 2007; Neslusan и др., 2013a; 2013b; Wiegert, Brown, 2005; Babadzhanov и др., 2017).

Другой случай угасшего ядра кометы связан с потенциально опасным околоземным астероидом 2015 ТВ145. Объект был открыт 10 октября

2015 г., а уже 31 октября он сближился с Землей на минимальном расстоянии. В период сближения в обсерватории Аресибо (США) получены первые радиолокационные изображения астероида, выполнены и оптические наблюдения астероида, включая наблюдения в инфракрасном диапазоне излучения. Найдено, что размер объекта действительно составляет 600 м, что он имеет почти сферическую фигуру и совершает полный оборот вокруг своей оси за 5 ч. Темные участки в центре астероида, выявленные по радионаблюдениям,

могут быть следами ударного кратера. Установлено, что астероид отражает только 6% солнечного света, т.е. является достаточно темным объектом. На основе этого факта и кометоподобной орбиты астероида было предположено, что на самом деле этот объект является ядром угасшей кометы. Нами исследована эволюция орбиты АСЗ 2015 ТВ145 на интервале времени 100 тыс. лет под действием планетных возмущений. Показано, что астероид за один цикл изменения аргумента перигелия его орбиты (это примерно 40 тыс. лет) пересекает орбиту Земли восемь раз (рис. 4, 5). Следовательно, если объект имеет кометную природу, то он может иметь родственный метеороидный рой, порождающий восемь метеорных потоков, наблюдаемых на Земле. Вычислены параметры теоретических потоков, связанных с 2015 ТВ145, и во всех опубликованных каталогах проведен поиск наблюдаемых потоков, идентичных теоретически предсказанным потокам. Оказалось, что семь из восьми предсказанных метеорных потоков отождествлены с наблюдаемыми активными потоками. Сделан вывод, что околоземный объект 2015 ТВ145, действительно, с высокой вероятностью является угасшим ядром родительской кометы выявленного роя (Бабаджанов и др., 2016; Kokhirova и др., 2017).

АСЗ (3552) Дон Кихот, включенный в группу активных астероидов (Jewitt, 2012; Jewitt и др., 2015), согласно постоянной Тиссерана $T_j = 2.31$ имеет кометоподобную орбиту. Veeder и др. (1989) определили, что его геометрическое альbedo в полосе V равно 0.02, что типично для кометных ядер (Lamy и др., 2004; Jewitt, 1992). Кометное происхождение астероида было предсказано со 100% вероятностью и на основе динамического моделирования, и это самая высокая вероятность кометного происхождения среди всех известных АСЗ (Bottke и др., 2002). Hsieh и Jewitt (2006) также предположили кометное происхождение астероида (3552) Дон Кихот. Однако на тот момент никаких признаков активности у астероида не было зарегистрировано, поэтому было высказано предположение, что объект является ядром угасшей кометы (Weissman и др., 1989; 2002). Позже, в 2009 г., была зарегистрирована кометная активность в виде выброса газа CO_2 (Mommert и др., 2014), повторившаяся в 2017 г. (Mommert и др., 2018). В 2018 г. впервые выявлена эпизодическая пылевая активность этого объекта, на основании новых исследований сделано заключение, что астероид (3552) Дон Кихот, действительно, является ядром угасшей кометы, которое вновь проявило активность (Mommert и др., 2014; 2018; Kokhirova и др., 2021b).

Таким образом, наблюдательные открытия и теоретические разработки за последние десятилетия привели к общему мнению о том, что по крайней мере некоторые астероиды, в частности, с орбитами, пересекающими орбиту Земли, на самом деле могут быть потухшими ядрами комет или их фрагментами. Угасшие ядра могут напоминать примитивные типы астероидов, такие как С, Р и D. Имеющиеся динамические оценки заключаются в том, что менее половины астероидов групп Аполлона и Атона могут быть угасшими ядрами комет, хотя неопределенность этой оценки довольно велика. Бабаджанов и Кохирова (2009) на основе вычисления эволюции орбит АСЗ и критерия выявления угасших комет по метеорному признаку показали, что среди общего числа АСЗ, открытых до 2005 г., 5% составляют угасшие ядра комет. “Высохшее” кометное ядро при столкновении с Землей произведет явление, подобное Тунгусскому. Таким образом, астероиды, сближающиеся с Землей, как из первого, так и из второго источников представляют опасность для Земли, хотя и по-разному. Совершенно очевидно, что для решения этих проблем и проблемы кометно-астероидной опасности необходимы дальнейшие подробные физические исследования АСЗ и других необычных ОЗО.

АСТЕРОИДНО-МЕТЕОРОИДНЫЕ КОМПЛЕКСЫ

АСЗ кометного происхождения и их родственные метеороидные рои образуют комплексы околоземных объектов (ОЗО), которые имеют очень схожие орбиты и, вероятно, общее родительское тело. Астероидно-метеороидные комплексы являются результатом разрушения большей кометы и, следовательно, эти “астероиды” на самом деле являются угасшими фрагментами кометы. Отметим, что теория образования и эволюции метеороидных роев подробно рассмотрена в работах (Babadzhanov, Obrubov, 1992) и (Бабаджанов, Кохирова, 2009), другие имеющиеся гипотезы образования роев приведены в статьях Бабаджанов и др. (2015a; 2015b).

Как было отмечено, по наземным наблюдениям сложно различить АСЗ различного происхождения. На больших расстояниях от Земли они выглядят внешне одинаково. Поэтому очень важно в дополнение к наблюдениям использовать критерии, которые могут помочь нам надежно определить природу конкретных астероидов. Такие критерии позволят идентифицировать АСЗ как угасшие кометные ядра, найти метеороидные рои и метеорные потоки, связанные с ними, установив таким способом астероидно-метеороидные

Таблица 3. Элементы орбиты околоземных объектов и средние орбиты метеорных потоков в астероидно-метеороидном комплексе Тауриды (равноденствие 2000.0)

Название объектов	q , а. е.	e	i , град	λ , град	α , град	δ , град	V_g , км/с	D_{SH}	Источник
Северные Тауриды NTA (00017)	0.35	0.83	3	226	59	22	28	—	Porubcan, Kornos (2002)
1984 KB	0.52	0.76	5	226	50	14	26	0.20	Asher и др. (1993a; 1993b); Бабаджанов, Кохирова (2009)
1988 VP4	0.79	0.65	12	280	70	51	14	0.19	Asher и др. (1993a; 1993b)
1990 HA	0.78	0.70	4	247	50	25	18	0.20	Babadzhanov (2001); Asher и др. (1993a; 1993b); Бабаджанов, Кохирова (2009)
1991 BA	0.71	0.68	2	299	111	18	18	0.16	Asher и др. (1993a; 1993b); Babadzhanov (2001)
1998 VD31	0.52	0.80	10	247	70	11	25	0.21	Babadzhanov и др. (2008a); Бабаджанов, Кохирова (2009)
1999 VK12	0.50	0.78	10	229	54	8	24	0.16	Babadzhanov и др. (2008a); Бабаджанов, Кохирова (2009)
1999 VR6	0.53	0.76	9	232	50	28	23	0.20	Babadzhanov и др. (2008a); Бабаджанов, Кохирова (2009)
2002 XM35	0.38	0.84	3	252	81	25	28	0.03	Porubcan и др. (2004; 2006); Бабаджанов, Кохирова (2009)
2003 WP21	0.49	0.79	4	242	66	17	25	0.15	Porubcan и др. (2004; 2006); Babadzhanov и др. (2008a); Бабаджанов, Кохирова (2009)
2003 UL3	0.46	0.80	15	91	82	29	26	0.26	Porubcan и др. (2004; 2006); Babadzhanov и др. (2008a); Бабаджанов, Кохирова (2009)
2004 TG10	0.32	0.86	4	224	55	22	30	0.06	Porubcan и др. (2004; 2006); Babadzhanov и др. (2008a); Бабаджанов, Кохирова (2009)
2005 UY6	0.30	0.87	12	217	52	20	33	0.19	Rudawska и др. (2012b); Кохирова и др. (2022)
2008 NS1	0.48	0.80	14	226	53	26	28	0.19	Кохирова и др. (2022)
2008 XM1	0.45	0.81	4	252	78	28	26	0.16	Madiedo и др. (2013); Кохирова и др. (2022)
2011 UE256	0.51	0.80	12	242	64	27	26	0.20	Кохирова и др. (2022)
2012 UR158	0.32	0.86	3	288	96	21	29	0.05	Кохирова и др. (2022)
2014 NK52	0.35	0.84	3	225	57	22	30	0.02	Кохирова и др. (2022)
2014 XQ7	0.66	0.75	31	239	61	29	27	0.12	Кохирова и др. (2022)
5025 P-L	0.44	0.90	6	226	51	15	29	0.14	Babadzhanov (2001); Бабаджанов, Кохирова (2009)

Таблица 3. Продолжение

Название объектов	q , а. е.	e	i , град	λ , град	α , град	δ , град	V_g , км/с	D_{SH}	Источник
Южные Тауриды STA (00002)	0.35	0.82	5	217	49	13	28	—	Porubcan, Kornos (2002)
1996 SK	0.51	0.80	2	196	16	10	24	0.17	Babadzhanov (2001); Бабаджанов, Кохирова (2009)
1999 RK45	0.36	0.77	6	—	—	—	—	0.07	Porubcan и др. (2004; 2006)
2003 QC10	0.37	0.74	5	180	16	1.2	24	0.11	Porubcan и др. (2004; 2006)
2003 SF	0.48	0.79	6	—	—	—	—	0.12	Porubcan и др. (2004; 2006)
2005 TF50	0.30	0.87	11	218	52	15	31	0.15	Кохирова и др. (2022)
2005 UR	0.27	0.88	7	216	51	15	32	0.11	Кохирова и др. (2022)
2010 TU149	0.38	0.83	2	214	45	16	29	0.07	Rudawska и др., (2012a); Кохирова и др. (2022)
2011 SB16	0.49	0.80	7	208	32	10	26	0.18	Кохирова и др. (2022)
(4197) 1982 TA	0.52	0.77	12	216	33	25	23	0.25	Asher и др. (1993a; 1993b); Babadzhanov (2001); Бабаджанов, Кохирова (2009)
ζ-Персеиды ZPE (00172)	0.34	0.79	1	79	63	24	27	—	Cook (1973)
16960	0.39	0.86	18	81	65	9	31	0.21	Babadzhanov и др. (2008a); Бабаджанов, Кохирова (2009)
1984 QY1	0.28	0.91	4	60	41	19	32	0.13	Бабаджанов, Кохирова (2009)
1991 GO	0.66	0.66	10	24	19	25	18	0.19	Asher и др. (1993a; 1993b); Babadzhanov (2001)
1993 KA2	0.50	0.78	3	60	54	16	24	0.16	Babadzhanov (2001); Бабаджанов, Кохирова (2009)
2005 LV30	0.54	0.77	8	66	60	31	23	0.18	Кохирова и др. (2022)
2006 TH7	0.31	0.87	11	78	60	28	31	0.14	Кохирова и др. (2022)
2009 SB	0.39	0.82	6	57	43	22	27	0.10	Кохирова и др. (2022)
2014 LN17	0.50	0.80	7	72	68	14	25	0.17	Кохирова и др. (2022)
2201 Oljato	0.63	0.71	3	77	79	27	20	0.12	Asher и др. (1993a; 1993b); Babadzhanov (2001)
β-Тауриды BTA (00173)	0.34	0.85	6	97	87	19	30	—	Cook (1973)
1937 UB Hermes	0.62	0.62	6	—	—	—	—	0.25	Asher и др. (1993a; 1993b)
1991 TB2	0.39	0.84	9	—	—	—	—	0.11	Babadzhanov (2001)
2001 HB	0.40	0.69	9	16	6	−8	22	0.21	Porubcan и др. (2004; 2006)
2001 QJ96	0.32	0.80	6	159	357	−6	27	0.10	Porubcan и др. (2004; 2006)
2005 NX39	0.30	0.87	14	92	81	17	30	0.22	Кохирова и др. (2022)
4341 Poseidon	0.59	0.68	12	—	—	—	—	0.20	Asher и др. (1993a; 1993b); Babadzhanov (2001)
5143 Heracles	0.42	0.77	9	—	—	—	—	0.14	Babadzhanov (2001)
(8201) 1994 AH2	0.73	0.71	10	—	—	—	—	0.20	Babadzhanov (2001)

Таблица 4. Элементы орбиты околоземных объектов и средние орбиты метеорных потоков в астероидно-метеороидном комплексе Хи-Скорпииды (равноденствие 2000.0)

Название объектов	q , а. е.	e	i , град	λ , град	α , град	δ , град	V_g , км/с	D_{SH}
χ -Скорпииды	0.71	0.77	6	74	248	-13	21	—
δ -Скорпииды	0.69	0.76	0	70	240	-21	20	—
β -Либриды	0.76	0.53	3	217	224	-9	18	—
σ -Либриды	0.61	0.77	6	237	234	-28	25	—
2003 HP32	0.63	0.76	3	83	258	-19	21	0.14
2006 WX29	0.67	0.71	4	77	251	-15	20	0.09
2007 VH189	0.72	0.72	6	75	245	-11	19	0.09
2007 WT3	0.70	0.70	7	76	248	-11	19	0.07
2007 WY3	0.64	0.77	11	77	254	-8	22	0.13
2008 UM1	0.69	0.72	6	68	241	-10	20	0.12

комплексы и, в конечном итоге, определить долю вымерших комет в популяции астероидов. Одним из возможных критериев является наличие метеороидных роев, образованных угасшими кометными ядрами в период их кометной активности. Поскольку метеорный поток может быть произведен только метеороидным роем, пересекающим орбиту Земли, то поиск угасших комет в популяции АСЗ посредством выявления связанных метеороидных роев и метеорных потоков может быть очень надежным. Данный подход, названный “метеорным” признаком, создан и развит в Институте астрофизики НАН Таджикистана под руководством академика П.Б. Бабаджанова. Детали метода, этапы его реализации и некоторые результаты по определению доли угасших кометных ядер среди АСЗ детально изложены в монографии Бабаджанова и Кохировой (2009). Результаты, полученные на основе применения данного метода, апробированы и опубликованы, их надежность и достоверность не вызывает сомнений.

Применение данного метода позволило выявить ряд астероидно-метеороидных комплексов. Самым известным, достаточно изученным и подтвержденным является астероидно-метеороидный комплекс Таурид. В результате исследований этого комплекса выявлено более 40 астероидов кометной природы с размерами в несколько деkamетров, двигающихся наряду с кометой 2P/Энке по орбитам, находящимся внутри роя Таурид (Asher и др., 1993a; 1993b; Babadzhanov, 2001; Porubcan и др., 2004; 2006; Babadzhanov и др., 2008a; Rudawska и др., 2012a; 2012b; Madiedo и др., 2013; Кохирова и др., 2022). Метеороидный рой Таурид, комета 2P/Энке, являющаяся родительницей роя, и более 40 астероидов, сближающихся с Землей, в действительности являющимися угасшими фрагментами родительской кометы, об-

разуют кометно-астероидно-метеороидный комплекс Таурид. Рой Таурид порождает метеорные потоки и субпотоки, наблюдаемые на Земле ежегодно в периоды октябрь–ноябрь и май–июнь.

За последние 15 лет в научной школе академика П.Б. Бабаджанова были выявлены более 10 астероидно-метеороидных комплексов – Йота-Акварид, Сигма-Каприкорнид, Дельта-Писцид, Хи-Скорпиид, Виргинид, Бета-Либрид, Либрид-Лупид, исследован комплекс Квадрантид, добавлены новые ОЗО в комплекс Таурид (Бабаджанов, Кохирова, 2009; Babadzhanov и др., 2008a; 2008b; 2008c; 2009; 2012; 2013; 2014; 2015a; 2015b; 2017; Кохирова и др., 2020a; 2020б; 2020в; 2020г; 2020д; 2021a; 2022). Нами показано, что некоторые метеороидные рои связаны не с одним, а с несколькими астероидами, сближающимися с Землей, кометного происхождения. Это означает, что в ансамбле данного роя двигаются несколько ОЗО деkamетровых размеров, которые в будущем могут вторгнуться в земную атмосферу и породить ярчайшие болиды. Каждый из этих комплексов состоит из соответствующего метеороидного роя (порождающего метеорные потоки), и нескольких ОЗО кометной природы. Они имеют схожие орбиты и произошли от одной родительской кометы, т.е. от нее остался ее рой и несколько крупных угасших фрагментов.

В табл. 3–5 приведены основные параметры астероидно-метеороидных комплексов Тауриды (Asher и др., 1993a; 1993b; Babadzhanov, 2001; Porubcan и др., 2004; 2006; Babadzhanov и др., 2008a; Rudawska и др., 2012a; 2012b; Madiedo и др., 2013; Кохирова и др., 2022), Хи-Скорпииды (Babadzhanov и др., 2013) и Виргиниды (Jenniskens, 2006; Babadzhanov и др., 2012; 2015b; Кохирова и др., 2020a; 2020г; 2020д; 2021). Отметим,

Таблица 5. Элементы орбиты околоземных объектов и средние орбиты метеорных потоков в астероидно-метеороидном комплексе Виргиниды (равноденствие 2000.0)

Название объектов	q , а. е.	e	i , град	λ , град	α , град	δ , град	V_g , км/с	D_{SH}	Источник
α -Виргиниды (00021AVB)	0.72	0.72	7	30	203	3	18	—	Jenniskens и др. (2016)
h -Виргиниды (00343 HVI)	0.74	0.73	1	39	204	−12	18	—	
1998 FR11	0.80	0.71	7	51	207	−18	17	0.21	Бабаджанов, Кохирова (2009)
1999 UZ5	0.82	0.68	2	46	206	−6	16	0.16	Бабаджанов, Кохирова (2009)
1998 SH2 (PHA)	0.74	0.72	3	13	184	3	19	0.15	Бабаджанов, Кохирова (2009)
2009 HS44	0.77	0.70	2	29	193	−11	18	0.11	Кохирова и др. (2020а)
2009 SM98	0.78	0.67	6	35	204	4	17	0.12	Кохирова и др. (2020а)
2010 EK44 (PHA)	0.65	0.77	9	29	208	3	22	0.02	Кохирова и др. (2020а)
2010 FD7	0.81	0.68	6	30	197	9	16	0.19	Кохирова и др. (2020а)
2011 BE38 (PHA)	0.76	0.71	7	19	191	10	18	0.15	Кохирова и др. (2020а)
2011 EF17 (PHA)	0.60	0.74	4	21	199	−2	22	0.02	Кохирова и др. (2020а)
2014 EQ12 (PHA)	0.68	0.74	11	17	195	10	20	0.13	Кохирова и др. (2020а)
2012 SW20 (PHA)	0.82	0.66	9	35	204	11	16	0.12	Кохирова и др. (2020а)
2012 TT256	0.77	0.71	2	36	200	−5	17	0.04	Кохирова и др. (2020а)
2013 TE135 (PHA)	0.62	0.74	5	21	199	−1	22	0.12	Кохирова и др. (2020а)
2014 GN1	0.71	0.73	2	10	183	2	20	0.20	Кохирова и др. (2020а)
Сев. η -Виргиниды (00011EVI)	0.46	0.81	5	357	185	3	26	—	Jenniskens и др. (2016)
Южн. η -Виргиниды (00011EVI),	0.50	0.71	3	350	175	−1	23	—	
Дн.Окт. η -Виргиниды	0.48	0.83	7	190	187	5	27	—	
Дн.Окт. β -Виргиниды	0.48	0.83	5	191	184	−8	27	—	
1995 EK1	0.51	0.78	9	355	201	1	25	0.19	Бабаджанов, Кохирова (2009)
2003 FB5	0.53	0.79	5	358	184	−8	28	0.12	Бабаджанов, Кохирова (2009)
2007 CA19 (PHA)	0.48	0.83	10	174	189	6	26	0.10	Babadzhanov и др. (2015b)
2010 CR5	0.55	0.82	6	323	174	6	27	0.13	Кохирова и др. (2020г)
2010 FJ81	0.43	0.88	9	191	188	6	29	0.18	Кохирова и др. (2020г)
2012 VJ134	0.38	0.83	21	144	206	2	30	0.15	Кохирова и др. (2020г)
2014 VC10	0.41	0.82	12	358	185	2	26	0.10	Кохирова и др. (2020г)
Сев. ν -Виргиниды	0.40	0.82	6	335	168	11	27	—	Terentjeva (1989); Babadzhanov и др. (2012)
Южн. ν -Виргиниды	0.39	0.85	0	340	170	4	28	—	
Дн.Окт. η -Виргиниды	0.31	0.80	11	201	187	5	30	—	
Дн.Окт. β -Виргиниды	0.43	0.80	8	192	179	−8	28	—	
2013 TR135	0.42	0.81	2	243	164	6	26	0.11	Кохирова др. (2020д)
2013 CU82	0.56	0.77	11	318	176	16	24	0.19	Кохирова и др. (2020д)
2002 BK25 (PHA)	0.58	0.75	12	156	163	23	23	0.05	Бабаджанов, Кохирова (2009)

Таблица 5. Окончание

Название объектов	q , а. е.	e	i , град	λ , град	α , град	δ , град	V_g , км/с	D_{SH}	Источник
2002 TZ59	0.41	0.84	16	187	172	-12	29	0.13	Бабаджанов, Кохирова (2009)
2004 CK39	0.39	0.83	12	359	163	-6	28	0.05	Babadzhanov и др. (2012)
Сев. μ -Виргиниды (00047DLI)	0.42	0.83	9	39	226	-8	28	-	Porubcan, Gavajdova (1994);
Южн. μ -Виргиниды	0.72	0.70	2	43	210	-16	18	-	Терентьева (1966)
2010 XD11	0.36	0.85	16	20	210	-8	29	0.16	Кохирова и др. (2021a)
2010 GO33	0.72	0.71	10	41	207	-28	20	0.13	Кохирова и др. (2021a)
2011 VG9	0.51	0.77	1	29	209	-9	23	0.15	Кохирова и др. (2021a)
2003 WW26	0.48	0.80	6	58	229	-25	25	0.01	Бабаджанов, Кохирова (2009)

что комплекс Виргинид включает четыре субсемейства АСЗ кометного происхождения и метеороидных роев. В табл. 3–5 для каждого комплекса (субкомплекса) даны названия наблюдаемых метеорных потоков, наименования связанных с ними ОЗО, средние орбиты метеорных потоков и элементы орбит родственных с ними ОЗО: q – перигелийное расстояние, e – эксцентриситет, i – наклон, λ – долгота Солнца, соответствующая активности потока, α_g – прямое восхождение и δ_g – склонение геоцентрического радианта, V_g – геоцентрическая скорость. Здесь также даны значения критерия D_{SH} (Southworth, Hawkins, 1963), который определяет меру сходства орбит метеорного потока и ОЗО. Когда D_{SH} не превышает значения 0.25, то предполагается, что эти два тела имеют общее происхождение. Во всех приведенных случаях были обнаружены ОЗО, которые могут быть родительскими телами наблюдаемых метеорных потоков. Величины критерия D_{SH} удовлетворяют условию $D_{SH} \leq 0.25$, следовательно, исследуемые ОЗО и метеорные потоки имеют схожие орбиты. Близость положений радиантов, скоростей и периодов активности также указывают на возможную связь ОЗО и метеорных потоков и позволяют сделать вывод, что данные комплексы образовались в результате распада гигантских родительских комет. Отметим также, что рассмотренные метеороидные рои содержат крупные фрагменты своих родительских комет.

Некоторые из ОЗО кометной природы являются потенциально опасными телами для Земли, и нами получены теоретические параметры, характеризующие их возможное вторжение в земную атмосферу: экваториальные координаты точки входа (радиант), геоцентрические скорости, даты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные сведения об околоземных объектах, накопленные за последние десятилетия, дают лишь самое общее представление об ОЗО. С учетом значительного числа ОЗО, открытых к настоящему времени, и индивидуальных особенностей каждого из них мы уже имеем мощные базы данных и публикаций, и можно предположить, какой объем информации нам еще предстоит выявить. С развитием наблюдательной техники и средств, теоретических методов исследования и успешных космических экспериментов наши знания об околоземных объектах быстро прогрессируют и расширяются. На смену устаревших подходов и концепций приходят более современные теории и гипотезы, черпающие свои доказательства из новых результатов научных исследований. В будущем можно ожидать новых выдающихся, порой совершенно неожиданных открытий, которые будут основываться на имеющихся современных сведениях об околоземных объектах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бабаджанов П.Б., Кохирова Г.И. Метеорные потоки астероидов, пересекающих орбиту Земли. Душанбе: Изд-во НАНТ “Дониш”, 2009. 185 с.
- Бабаджанов П.Б., Кохирова Г.И., Обрубов Ю.В. Угасшие кометы и астероидно-метеороидные комплексы // Астрон. вестн. 2015а. Т. 49. С. 182–189. (Babadzhanov P.B., Kokhirova G.I., Obrubov Yu.V. Extinct comets and asteroid-meteoroid complexes // Sol. Syst. Res. 2015a. V. 49. P. 165–172.)
- Бабаджанов П.Б., Кохирова Г.И., Обрубов Ю.В. Образование и эволюция метеороидных роев. Астероидно-метеороидные комплексы // Сб. тр. Международной конференции “V Бредихинские чтения” / Ред.: Сачков М.Е., Карташова А.П., Емельяненко В.В. М.: Изд-во Янус-К, 2015б. С. 165–181.

- Бабаджанов П.Б., Кохирова Г.И., Хамроев У.Х.* Объект 2015 ТВ145 — астероид или угасшая комета? // ДАН РТ. 2016. Т. 59. № 1–2. С. 33–40.
- Добровольский О.В.* Нестационарные процессы в кометах и солнечная активность. Душанбе: Изд-во АН ТаджССР, 1961. 194 с.
- Кохирова Г.И., Бабаджанов П.Б., Хамроев У.Х., Джон-мухаммади А.И., Кулаев И.В.* Астероидно-метеороидный комплекс Виргинид. I. Астероиды, связанные с метеороидным роём Альфа-Виргиниды // ДАН РТ. 2020а. Т. 63. С. 187–198.
- Кохирова Г.И., Бабаджанов П.Б., Хамроев У.Х., Джон-мухаммади А.И., Кулаев И.В.* Астероидно-метеороидный комплекс Бета-Либрид // Изв. АН РТ. Отделение ФМХГТН. 2020б. № 3 (180). С. 43–54.
- Кохирова Г.И., Бабаджанов П.Б., Хамроев У.Х., Джон-мухаммади А.И.* Астероиды, связанные с метеороидным роём Либриды-Луиды // Изв. АН РТ. Отделение ФМХГТН. 2020в. № 4 (181). С. 41–48.
- Кохирова Г.И., Бабаджанов П.Б., Хамроев У.Х., Джон-мухаммади А.И., Кулаев И.В.* Астероидно-метеороидный комплекс Виргинид. II. Астероиды, связанные с метеороидным роём Эта-Виргиниды // ДАН РТ. 2020г. Т. 63. С. 591–597.
- Кохирова Г.И., Бабаджанов П.Б., Хамроев У.Х., Джон-мухаммади А.И.* Астероидно-метеороидный комплекс Виргинид. III. Астероиды, связанные с метеороидным роём Нью-Виргиниды // ДАН РТ. 2020д. Т. 63. С. 708–714.
- Кохирова Г.И., Бабаджанов П.Б., Хамроев У.Х., Джон-мухаммади А.И., Кулаев И.В.* Астероидно-метеороидный комплекс Виргинид. IV. Астероиды, связанные с метеороидным роём Мю-Виргиниды // ДАН РТ. 2021а. Т. 64. С. 57–63.
- Кохирова Г.И., Иванова А.В., Рахматуллаева Ф.Д.* Подтверждение кометной природы астероида Дон Кихот по наблюдениям в обсерватории Санглох // Астрон. вестн. 2021б. Т. 55. С. 74–83 (*Kokhirova G.I., Ivanova O.V., Rakhmatullaeva F.D.* Evidence of the cometary nature of asteroid Don Quixote provided by observations at the Sanglokh observatory // Sol. Syst. Res. 2021. V. 55. P. 61–70).
- Кохирова Г.И., Бабаджанов П.Б., Латипов М.Н., Джон-мухаммади А.И., Хамроев У.Х.* Новые околоземные объекты в комплексе Таурид // Изв. АН РТ. ОФМХГТН. 2022. № 1 (186). С. 40–61.
- Терентьева А.К.* Малые метеорные рои // Результаты исследований по межд. геофиз. проектам // Исследование метеоров. № 1. М.: Наука. 1966. С. 62–132.
- Хашимов Н.М., Шоекубов Ш.Ш.* Лабораторное моделирование образования ионов молекулярного углерода в кометах // ДАН ТаджССР. 1989. Т. 32. С. 22–25.
- Хашимов Н.М., Ибадинов Х.И., Шоекубов Ш.Ш.* Лабораторное исследование возможности образования тугоплавких веществ в кометах // ДАН ТаджССР. 1994. Т. 37. С. 16–19.
- Шульман Л.М.* Динамика кометных атмосфер. Нейтральный газ. Киев: Изд-во “Наукова думка”, 1972. 242 с.
- Asher D.J., Clube S.V.M., Steel D.I.* Asteroids in the Taurid Complex // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 1993a. V. 264. P. 93–105.
- Asher D.J., Clube S.V.M., Steel D.I.* The Taurid Complex asteroids // Proc. Int. Astron. Symp. “Meteoroids and their parent bodies”, Smolenice, Slovakia, July 6–12, 1992. Bratislava: Astron. Inst., Slovak Acad. Sci. 1993b. P. 93–96.
- Babadzhanov P.B., Obrubov Yu.V.* Evolution of short-period meteoroid streams // Celest. Mech. and Dyn. Astron. 1992. V. 57. P. 111–127.
- Babadzhanov P.B.* Search for meteor showers associated with near-Earth asteroids. I. Taurid Complex // Astron. and Astrophys. 2001. V. 373. P. 329–335.
- Babadzhanov P.B., Williams I.P., Kokhirova G.I.* Near-Earth objects in the Taurid complex // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2008a. V. 386. P. 1436–1442.
- Babadzhanov P.B., Williams I.P., Kokhirova G.I.* The meteor showers associated with 2003 EH1 // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2008b. V. 386. P. 2271–2277.
- Babadzhanov P.B., Williams I.P., Kokhirova G.I.* Near-Earth asteroids among the Piscids meteoroid stream // Astron. and Astrophys. 2008c. V. 479. P. 249–255.
- Babadzhanov P.B., Williams I.P., Kokhirova G.I.* Near-Earth asteroids among the Iota Aquarids meteoroid stream // Astron. and Astrophys. 2009. V. 507. P. 1067–1072.
- Babadzhanov P.B., Williams I.P., Kokhirova G.I.* Near-Earth asteroids among the Scoriids meteoroid complex // Astron. and Astrophys. 2013. V. 556. id. A25 (5 p.).
- Babadzhanov P.B., Williams I.P., Kokhirova G.I.* Near-Earth object 2004 CK39 and its associated meteor showers // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2012. V. 420. P. 2546–2550.
- Babadzhanov P.B., Kokhirova G.I., Khamroev U.Kh.* The Capricornids asteroid-meteoroid complex // Proc. Astron. Conf. “Meteoroids 2013”, A.M. Univ., Poznan, Poland, Aug. 26–30, 2013. Poznan: A.M. Univ. Press, 2014. P. 199–204.
- Babadzhanov P.B., Kokhirova G.I., Khamroev U.Kh.* The Sigma-Capricornids complex of near-Earth objects // Adv. Space Res. 2015a. V. 55. P. 1784–1791.
- Babadzhanov P.B., Kokhirova G.I., Obrubov Yu.V.* The potentially hazardous asteroid 2007 CA19 as the parent of the η -Virginid meteoroid stream // Astron. and Astrophys. 2015b. V. 579. id. A119 (5 p.).
- Babadzhanov P.B., Kokhirova G.I., Williams G.I., Obrubov Yu.V.* Investigation into the relationship between comet 96P/Machholz 1 and asteroid 2003 EH1 // Astron. and Astrophys. 2017. V. 598. id. A94 (7 p.).
- Ballouz R., Walsh K., Bottke W., DellaGiustina D.N., Al Asad M.M., Michel P., Avdellidou C., Delbo M., Jawin E.R., Asphaug E. and 10 co-authors.* Craters on (101955) Bennu’s boulders // AAS Division of Planet. Sci. Meeting #52. id. 402.01. Bull. Am. Astron. Soc. 2020a. V. 52. № 6. e-id. 2020n6i402p01.
- Ballouz R.L., Walsh K.J., Barnouin O.S., DellaGiustina D.N., Al Asad M.M., Jawin E.R., Daly M.G., Bottke W.F., Michel P., Avdellidou C. and 15 co-authors.* Bennu’s near-Earth lifetime of 1.75 million years inferred from craters on its boulders // Nature. 2020b. V. 587. P. 205–209.

- Betzler A.S., Borges E.P. Nonextensive distributions of asteroid rotation periods and diameters // *Astron. and Astrophys.* 2012. V. 539. id. A158.
- Borovicka J. About the definition of meteoroid, asteroid, and related terms // *WGN, J. Int. Meteor Organization.* 2016. V. 44. № 2. P. 31–34.
- Bottke W.F., Morbidelli A., Jedicke R., Petit J.-M., Levison H.F., Michel P., Metcalfe T.S. Debaised orbital and absolute magnitude distribution of the near-Earth objects // *Icarus.* 2002. V. 156. P. 399–433.
- Bowell E., Buie M.W., Picken H. (4015) 1979 VA = Comet Wilson-Harrington (1949 III) // *IAU Circ.* 1992. № 5585. #1. 1B.
- Brisset J., Cox C., Anderson S., Hatchitt J., Madison A., Mendonca M., Partida A., Remie D. Regolith behavior under asteroid-level gravity conditions: Low-velocity impacts into mm- and cm-sized grain targets // *Astron. and Astrophys.* 2020. V. 642. id. A198 (13 pp.).
- Britt D.T., Consolmagno G.J. Asteroid bulk density // *AAS Division of Planet. Sci. Meeting #32, id.07.02. Bull. Am. Astron. Soc.* 2000. V. 32. P. 999.
- Britt D.T., Yeomans D., Housen K., Consolmagno G. Asteroid density, porosity, and structure // *Asteroids III / Eds: Bottke, Jr W.F., Cellino A., Paolicchi P., Binzel R.P. Tucson: Univ. Arizona Press, 2002. P. 485–500.*
- Bus S.J., Binzel R.P. Phase II of the small Main-Belt asteroid spectroscopic survey. A feature-based taxonomy // *Icarus.* 2002. V. 158. P. 146–177.
- Chan Q.H.S., Stephant A., Franchi I.A., Zhao X., Brunetto R., Kebukawa Y., Noguchi T., Johnson D., Price M.C., Harriss K.H., Zolensky M.E., Grady M.M. Organic matter and water from asteroid Itokawa // *Sci. Rep.* 2021. V. 11. P. 5125.
- Chapman C.R., Merline W.J., Thomas P.C., Joseph J., Cheng A.F., Izenberg N. Impact history of Eros: Craters and boulders // *Icarus.* 2002. V. 155. P. 104–118.
- Cook A.F. A working list of meteor streams // *Evolutionary and Physical Properties of Meteoroids / Eds: Hemenway C.L., Millman P.M., Cook A.F. Washington DC: NASA, SP-319, 1973. P. 183–191.*
- Dellagiustina D.N., Emery J.P., Golish D.R., Emery J.P., Golish D.R., Rozitis B., Bennett C.A., Burke K.N., Ballou R.-L., Becker K.J., Christensen P.R., Drouet D'Aubigny C.Y. and 46 co-authors. Properties of rubble-pile asteroid (101955) Bennu from OSIRIS-REx imaging and thermal analysis // *Nature Astron.* 2019. V. 3. P. 341–351.
- Ellis T.A., Neff J.S. A comparison of modeled and observed intensity profiles for C₂, C₃, CN, and the continuum for P/Halley // *Icarus.* 1992. V. 97. P. 99–110.
- Emel'yanenko V.V., Asher D.J., Bailey M.E. A model for the common origin of Jupiter family and Halley type comets // *Earth, Moon, and Planets.* 2013. V. 110. P. 105–130.
- Fernandez Y.R., McFadden L.A., Lisse C.M., Helin E.F., Chamberlin A.B. Analysis of POSS images of comet-asteroid transition object 107P/1949 W1 (Wilson-Harrington) // *Icarus.* 1997. V. 128. P. 114–126.
- Fujiwara A., Kawaguchi J., Yeomans D.K., Abe M., Mukai T., Okada T., Saito J., Yano H., Yoshikawa M., Scheeres D.J. and 12 co-authors. The rubble-pile asteroid Itokawa as observed by Hayabusa // *Science.* 2006. V. 312. P. 1330–1334.
- Gicquel A., Vincent J.-B., Agarwal J., A'Hearn M.F., Bertini I., Bodewits D., Sierks H., Lin Z.-Y., Barbieri C., Lamy P.L. and 51 co-authors. Sublimation of icy aggregates in the coma of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko detected with the OSIRIS cameras on board Rosetta // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2016. V. 462. P. S57–S66.
- Gradie J.C., Chapman C.R., Tedesco E.F. Distribution of taxonomic classes and the compositional structure of the Asteroid Belt // *Asteroids II / Eds: Binzel R.P., Gehrels T., Matthews M.S. Tucson: Univ. Arizona Press, 1989. P. 321.*
- Green D.W.E., Rickman H., Porter A.C., Meech K.J. The strange periodic comet Machholz // *Science.* 1990. V. 247. P. 1063–1067.
- Gundlach B., Blum J. A new method to determine the grain size of planetary regolith // *Icarus.* 2013. V. 223. P. 479–492.
- Hanus J., Viikinkoski M., Marchis F., Ďurech J., Kaasalainen M., Delbo' M., Herald D., Frappa E., Hayamizu T., Kerr S. and 4 co-authors. Volumes and bulk densities of forty asteroids from ADAM shape modeling // *Astron. and Astrophys.* 2017. V. 601. id. A114.
- Harris A.W., Burns J.A. Asteroid rotation. I. Tabulation and analysis of rates, pole positions and shapes // *Icarus.* 1979. V. 40. P. 115.
- Hsieh H.H., Jewitt D. A population of comets in the main asteroid belt // *Science.* 2006. V. 312. P. 561–563.
- Jenniskens P. 2003 EH₁ is the Quadrantid shower parent comet // *Astron. J.* 2004. V. 127. P. 3018–3022.
- Jenniskens P., Marsden B.G. 2003 EH1 and the Quadrantids // *IAU Circ.* 2003. № 8252. #2.
- Jenniskens P. Meteor showers and their parent comets. New-York: Cambridge Univ. Press, 2006. 790 p.
- Jenniskens P., Nenon Q., Albers J., Gural P.S., Haberman B., Holman D., Morales R., Grigsby B.J., Samuels D., Johannink C. The established meteor showers as observed by CAMS // *Icarus.* 2016. V. 266. P. 331–354.
- Jewitt D.C. The active asteroids // *Astron. J.* 2012. V. 143. id. 66 (14 p.).
- Jewitt D., Hsieh H., Agarwal J. The active of asteroids // *Asteroids IV / Eds: Michel P., DeMeo F., Bottke W. Tucson: Univ. Arizona Press, 2015. P. 221–241.*
- Kanuchova Z., Neslusan L. The parent bodies of the Quadrantid meteoroid stream // *Astron. and Astrophys.* 2007. V. 470. P. 1123–1136.
- Kokhirova G.I., Babadzhanov P.B., Khamroev U.H. On a possible cometary origin of the object 2015TB145 // *Planet. and Space Sci.* 2017. V. 143. P. 164–168.
- Kokhirova G.I., Ivanova O.V., Rakhmatullaeva F.D. Results of observations of asteroid Don Quixote at the Sanglokh observatory // *INASAN Sci. Rep.* 2020. V. 5 (4). P. 196–200.
- Kokhirova G.I., Ivanova O.V., Rakhmatullaeva F.D. Evidence of the cometary nature of asteroid Don Quixote provided by observations at the Sanglokh observatory // *Sol. Syst. Res.* 2021. V. 55. P. 61–70.
- Kramer T., Lauter M. Outgassing-induced acceleration of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko // *Astron. and Astrophys.* 2019. V. 630. id. A4.

- Krankowsky D., Lammerzahl P., Herrwerth I., Woweries J., Eberhardt P., Dolder U., Herrmann U., Schulte W., Berthelier J.J., Illiano J.M. and 2 co-authors.* In situ gas and ion measurements at comet Halley // *Nature*. 1986. V. 321. P. 326.
- Krasnopolsky V.A., Godoshev M., Moreels G., Moroz V.I., Krysko A.A., Gogosheva Ts., Palazov K., Sargoichev S., Clairemidi J., Vincent M. and 4 co-authors.* Spectroscopic study of comet Halley by the Vega 2 three-channel spectrometer // *Nature*. 1986. V. 321. P. 269–270.
- Küppers M.* The Regolith of Asteroid 433/Eros // Abstracts of EGS XXVII GA, Nice, 21–26 April 2002. 2002. Abstract #4231.
- Kwiatkowski T., Polinska M., Loaring N., Buckley D.A.H., O'Donoghue D., Kniazev A., Romero Colmenero E.* Photometric survey of the very small near-Earth asteroids with the SALT telescope. III. Lightcurves and periods for 12 objects and negative detections // *Astron. and Astrophys.* 2010. V. 511. id. A49.
- Lamy P.L., Toth I., Fernandez Y.R., Weaver H.A.* The sizes, shapes, albedos, and colors of cometary nuclei // *Comets II* / Eds: Festou M.C., Keller H.U., Weaver H.A. Tucson: Univ. Arizona Press, 2004. P. 223–264.
- Madiedo J.M., Trigo-Rodríguez J.M., Williams I.P., Ortiz J.L., Cabrera J.* The Northern χ -Orionid meteoroid stream and possible association with the potentially hazardous asteroid 2008XM1 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2013. V. 431. P. 2464–2470.
- Matsumoto T., Noguchi T., Miyake A., Igami Y., Haruta M., Saito H., Hata S., Seto Y., Miyahara M., Tomioka N. and 10 co-authors.* Space weathering of anhydrous minerals in regolith samples from the C-type asteroid Ryugu // Abstracts 53rd Lunar and Planet. Sci. Conf. 2022. 1693.pdf
- McFadden L.A., Cochran A.L., Barker E.S., Cruikshank D.P., Hartmann W.K.* The enigmatic object 2201 Oljato: Is it an asteroid or an evolved comet? // *J. Geophys. Res.: Planets*. 1993. V. 98. P. 3031–3041.
- Mommert M., Hora J.L., Harris A.W., Reach W.T., Emery J.P., Thomas C.A., Mueller M., Cruikshank D.P., Trilling D.E., Delbo M., Smith H.A.* The discovery of cometary activity in Near-Earth Asteroid (3552) Don Quixote // *Astrophys. J.* 2014. V. 781. 25M (10 p.).
- Mommert M., Trilling D., Knight M.M., Hora J., Biver N., Womack M., Wierzbos K., Polishook D., Veres P., Gustafsson A. and 6 co-authors.* Systematic characterization and monitoring of potentially active asteroid: The case of Don Quixote // AAS Division of Planet. Sci. Meeting #50. id. 505.05. Am. Astron. Soc. 2018.
- Nakamura T., Noguchi T., Tanaka M., Zolensky M.E., Kimura M., Tsuchiyama A., Nakato A., Ogami T., Ishida H., Uesugi M. and 12 co-authors.* Itokawa dust particles: A direct link between S-type asteroids and ordinary chondrites // *Science*. 2011. V. 333. P. 1113–1116.
- Neslusan L., Kanuchova Z., Tomko D.* The meteor-showers complex of 96P/Machholz revised // *Astron. and Astrophys.* 2013a. V. 551. id. A87. (14 p.).
- Neslusan L., Hajdukova M., Jakubik M.* Meteor-showers complex of asteroid 2003EH1 compared with that of comet 96P/Machholz // *Astron. and Astrophys.* 2013b. V. 560. id. A47 (10 p.).
- Ostro S.J., Campbell D.B., Chandler J.F., Shapiro I.I., Hine A.A., Velez R., Jurgens R.F., Rosema K.D., Winkler R., Yeomans D.K.* Asteroid radar astrometry // *Astron. J.* 1991. V. 102. P. 1490–1502.
- Opik E.* The stray bodies in the Solar system. I. Survival time of cometary nuclei // *Adv. Astron. and Astrophys.* 1963. V. 2. P. 219–262.
- Patzold M., Abdert T., Hahn M., Asmar S.W., Barriot J.-P., Bird M.K., Häusler B., Peter K., Tellmann S., Grün E. and 10 co-authors.* A homogeneous nucleus for comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from its gravity field // *Nature*. 2016. V. 530. P. 63–65.
- Porubcan V., Gavajdova M.* A search for fireball streams among photographic meteors // *Planet. and Space Sci.* 1994. V. 42. P. 151–155.
- Porubcan V., Kornos L., Williams I.P.* Associations between asteroids and meteoroid streams // *Earth, Moon and Planets*. 2004. V. 95. P. 697–712.
- Porubcan V., Kornos L., Williams I.P.* The Taurid complex meteor showers and asteroids // *Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso*. 2006. V. 36. P. 103–117.
- Porubcan V., Kornos L.* The Taurid meteor shower // *Proc. Asteroids, Comets, Meteors – ACM 2002*. Int. Conf., 29 July–2 August 2002, Berlin, Germany / Ed.: Warmbein B. ESA SP-500. Noordwijk, Netherlands: ESA Publications Division, 2002. P. 177–180.
- Pravec P., Harris A.W.* Fast and slow rotation of asteroids // *Icarus*. 2000. V. 148. P. 12.
- Pravec P., Harris A.W., Warner B.D.* NEA rotations and binaries // *Near-Earth Objects, our Celestial Neighbors: Opportunity and Risk*, Proc. IAU Symp. 236 / Eds: Valsecchi G.B., D. Vokrouhlický D., Milani A. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2007. P. 167–176.
- Pravec P., Harris A.W., Kusnirak P., Galád A., Hornoch K.* Absolute magnitudes of asteroids and a revision of asteroid albedo estimates from WISE thermal observations // *Icarus*. 2012. V. 221. P. 365–387.
- Pravec P., Harris A.W., Scheirich P., Kušnirák P., Šarounová L., Hergenrother C.W., Mottola S., Hicks M.D., Masi G., Krugly Yu.N. and 10 co-authors.* Tumbling asteroids // *Icarus*. 2005. V. 173. P. 108–131.
- Rozitis B., Green S.F., MacLennan E., Emery J.P.* Observing the variation of asteroid thermal inertia with heliocentric distance // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2018. V. 477. P. 1782–1802.
- Rubin M., Altwegg K., Balsiger H., Berthelier J.-J., Combi M.R., De Keyser J., Drozdovskaya M., Fiethé B., Fuselier S.A., Gasc S. and 11 co-authors.* Elemental and molecular abundances in comet 67P/Churyumov-Gerasimenko // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2019. V. 489. P. 594–607.
- Rudawska R., Vaubaillon J., Jenniskens P.* Asteroid 2010TU149 in the Taurid complex // *Europ. Planet. Sci. Congress 2012*. Sept. 23–28. 2012. Madrid, Spain. id. espc. 886. 2012a.
- Rudawska R., Vaubaillon J., Jenniskens P.* Asteroid 2005UW6 – A 'new' object in the Taurid complex? // *Proc. Conf. "Asteroids, Comets, Meteors 2012"*, May 16–20, 2012, Niigata, Japan LPI Contrib. № 1667. id. 6222. 2012b.
- Russell C.T., Aroian R., Arghavani M., Nock K.* Interplanetary magnetic field enhancements and their association

- with the asteroid 2201 Oljato // *Science*. 1984. V. 226. P. 43–45.
- Sagdeev R.Z., Szabo F., Avanesov G.A., Cruvellier P., Szabo L., Szego K., Abergel A., Balazs A., Barinov I.V., Bertaux J.-L. and 28 co-authors. Television observations of comet Halley from Vega spacecraft // *Nature*. 1986. V. 321. P. 262–266.
- Saito J., Miyamoto H., Nakamura R., Ishiguro M., Michikami T., Nakamura A.M., Demura H., Sasaki S., Hirata N., Honda C. and 24 co-authors. Detailed images of asteroid 25143 Itokawa from Hayabusa // *Science*. 2006. V. 312. P. 1341–1344.
- Sekanina Z. Periodic comet Machholz and its idiosyncrasies // *Astron. J.* 1990. V. 99. P. 1268–1278.
- Sierks H., Barbieri C., Lamy P.L., Rodrigo R., Koschny D., Rickman H., Keller H.U., Agarwal J., A'Hearn M.F., Angrilli F. and 56 co-authors. On the nucleus structure and activity of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko // *Science*. 2015. V. 347. id. aaa1044.
- Siltala L., Granvik M. Masses, bulk densities, and macroporosities of asteroids (15) Eunomia, (29) Amphitrite, (52) Europa, and (445) Edna based on Gaia astrometry // *Astron. and Astrophys.* 2022. V. 658. id. A65.
- Southworth R.B., Hawkins G.S. Statistics of meteor streams // *Smith. Contrib. Astrophys.* 1963. V. 7. P. 261–285.
- Standish E.M. JPL Interoffice Memorandum 312.F-01-006.-2001. April 11, 2001.
- Terentjeva A.K. Fireball streams // *Asteroids, Comets, Meteors III* / Eds: Lagerkvist C.I., Rickman H., Lindblad B.A., Lindgren M. Uppsala Univ. Reprocentralen, 1989. P. 579–584.
- Tholen D.J. Asteroid taxonomic classifications // *Asteroids II* / Eds: Binzel R.P., Gehrels T., Matthews M.S. Tucson: Univ. Arizona Press, 1989. P. 1139–1150.
- Veeder G.J., Hanner M.S., Matson D.L., Tedesco E.F., Lebofsky L.A., Tokunaga A.T. Radiometry of near-Earth asteroids // *Astron. J.* 1989. V. 97. P. 1211–1219.
- Veverka J., Thomas P.C., Robinson M., Murchie S., Chapman C., Bell M., Harch A., Merline W.J., Bell J.F., Bussey B. and 23 co-authors. Imaging of small-scale features on 433 Eros from NEAR: Evidence for a complex regolith // *Science*. 2001. V. 292. P. 484–488.
- Weissman P.R., A'Hearn M.F., Rickman H., McFadden L.A. Evolution of comets into asteroids // *Asteroids II*; Proc. Conf., Tucson, AZ, Mar. 8-11, 1988 (A90-27001 10-91). Tucson: Univ. Arizona Press, 1989. P. 880–920.
- Weissman P.R., Bottke Jr W.F., Levison H.F. Evolution of comets into asteroids // *Asteroids III* / Eds: Bottke Jr W.F., Cellino A., Paolicchi P., Binzel R.P. Tucson: Univ. Arizona Press, 2002. P. 669–686.
- Whipple F.L. A comet model I. The acceleration of comets // *Astrophys. J.* 1950. V. 111. № 2. P. 375–394.
- Whipple F.L. A comet model II. Physical relation for comets and meteors // *Astrophys. J.* 1951. V. 113. № 3. P. 464–474.
- Whipple F.L. A comet model III. The zodiacal light // *Astrophys. J.* 1955. V. 121. P. 750.
- Wiegert P., Brown P. The Quadrantid meteoroid complex // *Icarus*. 2005. V. 179. P. 139–157.
- Williams I.P., Ryabova G.O., Baturin A.D., Chernetsov A.M. The parent of the Quadrantid meteoroid stream and asteroid 2003 EH1 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2004. V. 355. P. 1171–1181.
- Wurz P., Altwegg K., Balsiger H.R., Berthelier J.J., De Keyser J., Fiethe B., Fuselier S.A., Gasc S., Gombosi T.I., Korth A. and 4 co-authors. Chemical composition of the semi-volatile grains of Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko // *Am. Geophys. Union, Fall Meeting 2017*. 2017a. abstract #P51D-2625.
- Wurz P., Altwegg K., Balsiger H., Berthelier J.-J., Bieler A., Calmonte U., De Keyser J., Fiethe B., Fuselier S., Gasc S. and 8 co-authors. Chemical composition of the semi-volatile grains of comet 67P /Churyumov-Gerasimenko // *Proc. 19th EGU GA, EGU2017 Conf.*, 23-28 April, 2017, Vienna, Austria. 2017b. P. 5587.
- <https://minorplanetcenter.net/mpc/summary>, дата обращения 23 марта 2023 г.
- <https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/>, дата обращения 23 марта 2023 г.
- <https://ssd.jpl.nasa.gov/>, дата обращения 23 марта 2023 г.
- https://cneos.jpl.nasa.gov/about/search_program.html, 2022.
- https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=apophis&view=ОПС, дата обращения 1 апреля 2022 г.
- <https://cneos.jpl.nasa.gov>, Chamberlin A., 2007 JPL/Caltech, 2022.
- <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacescraft/display.action?id=1996-008A>, дата обращения 2022.
- <https://esa.int/rosetta/2014/10/03/measuring-comet-67pc-g/>, 2014.

УДК 521.1,523.4

О ВЛИЯНИИ СБЛИЖЕНИЙ С ПЛАНЕТАМИ НА ВЕЛИЧИНУ ЭФФЕКТА ЯРКОВСКОГО В ДИНАМИКЕ АСТЕРОИДОВ

© 2023 г. А. А. Мартюшева^а, А. В. Мельников^а, *

^а Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: melnikov@gaoran.ru

Поступила в редакцию 21.03.2023 г.

После доработки 03.04.2023 г.

Принята к публикации 26.04.2023 г.

Для ряда астероидов, испытывающих последовательные сближения с планетами, получены оценки влияния светового давления Солнца и эффекта Ярковского на долговременную орбитальную динамику. Рассмотрено влияние изменения величины периода собственного вращения астероида из-за сближения с планетой на его дальнейшую орбитальную динамику посредством действия эффекта Ярковского. Показано, что тесные сближения с планетами малых астероидов (десятки метров в диаметре) с быстрым вращением (период вращения менее 10 ч), приводящие к изменению периода собственного вращения астероида на несколько часов, существенно влияют на величину эффекта Ярковского для него.

Ключевые слова: астероиды, сближения с планетами, световое давление, эффект Ярковского, вращательная динамика, орбитальная динамика

DOI: 10.31857/S0320930X23050055, **EDN:** NZNDZW

ВВЕДЕНИЕ

Астероиды представляют собой наиболее многочисленное семейство малых тел Солнечной системы. В ходе долговременной орбитальной эволюции астероиды могут испытывать многочисленные сближения с планетами, некоторые из таких событий заканчиваются катастрофическим образом — разрушительным столкновением (Chodas, Yeomans, 1996; Емельяненко и др., 2013), либо распадом астероида на более мелкие тела (Richardson и др., 1998; Sharma и др., 2006; Tóth и др., 2011; Zhang, Michel, 2020; Воропаев и др., 2020; Zeng и др., 2022). Исследование динамики астероидов, испытывающих тесные сближения с планетами, имеет непосредственное отношение к проблеме астероидно-кометной опасности, что определяет его актуальность и важность.

В динамике астероидов имеет место синергетический эффект — сближения астероида с планетами приводят к изменению его орбиты, что влияет и на вращение астероида относительно своего центра масс, в свою очередь гравитационное воздействие со стороны планеты непосредственно оказывает влияние на вращение астероида (Батраков, Медведев, 1992; Devyatkin и др., 2016; Scheeres и др., 2000; 2004; 2005; Souchaу и др., 2018; Benson и др., 2020; 2023; Boldrin и др., 2020; Мельников, 2022); это влияние вносит определенный вклад в его дальнейшую орбитальную ди-

намику. Для малых астероидов (диаметром сотни метров и менее) драйвером такого процесса может являться эффект Ярковского (Ярковский, 1901; Радзиевский, 1952; 2003; Vokrouhlický, 1999; Vokrouhlický и др., 2000; 2015a). Характер и величина возмущений орбиты астероида вследствие действия этого эффекта зависит от вращательного состояния (скорости вращения, ориентации оси вращения относительно направления на Солнце), свойств поверхности астероида, его формы и ряда других факторов. Наиболее заметен данный эффект в вековом изменении величины большой полуоси орбиты астероида, которое можно выявить посредством наблюдений изменения величины среднего движения астероида. Эффект Ярковского может существенным образом влиять на оценку вероятности столкновения астероида с планетой. Что подтверждают, например, детальные исследования влияния эффекта Ярковского на динамику астероида, сближающегося с Землей (АСЗ), (99942) Apophis, проведенные в работах (Chesley и др., 2009; Шор и др., 2012; Farnocchia и др., 2013; Vokrouhlický и др., 2015b; Benson и др., 2023). Во вращательной динамике малых астероидов неправильной формы существенную роль играет эффект анизотропного переизлучения — YORP-эффект (Yarkovsky–O’Keefe–Radzievskii–Paddack), приводящий к изменению скорости вращения астероида и ориентации его оси враще-

Таблица 1. Орбитальные параметры и диаметры фигур (D) исследуемых астероидов

Астероид	a , а. е.	e	i , град	ω , град	Ω , град	M , град	D , м
2008 FP	2.5820417	0.897618	3.6053	152.3963	158.4591	314.7334	20
2009 WP6	1.1300877	0.740954	2.7620	228.0252	54.4203	316.4803	20
2010 JJ41	1.0726108	0.672689	3.2819	29.3474	50.1456	85.7767	150
2015 EO61	1.4551681	0.734409	1.9785	261.3447	43.6538	300.4765	170
2015 TX24	2.2660105	0.872083	6.0426	127.0568	32.9362	112.6511	250
2015 XG55	1.0294541	0.557679	2.3634	237.4629	70.3029	164.8940	10
(367943) Duende	0.910140	0.089319	11.6090	195.5777	146.9281	262.7014	50

Примечание: a – большая полуось, e – эксцентриситет орбиты, i – наклонение, ω – аргумент перицентра, Ω – долгота восходящего узла, M – средняя аномалия. Данные взяты из работ (Девяткин и др., 2022; Мельников, 2022) и <https://ssd.jpl.nasa.gov/>.

ния в пространстве (Rubincam, 2000; Ershkov, Shamin, 2018; Lowgu и др., 2007; Vokrouhlický и др., 2015a; Greenberg и др., 2020). Изменение вращательного состояния астероида из-за сближения с планетой должно оказывать влияние как на величину эффекта Ярковского, так и на величину YORP-эффекта.

В работе (Мельников, 2022) для ряда малых астероидов были получены оценки изменений величины периода собственного вращения астероида из-за его последовательных сближений с планетами земной группы. В настоящей работе для выборки астероидов из работы (Мельников, 2022) мы получили оценки воздействия светового давления Солнца и эффекта Ярковского на орбитальную динамику астероидов и оценили влияние изменения их вращательных состояний из-за сближений с планетами на дальнейшую орбитальную динамику посредством действия эффекта Ярковского.

ИЗМЕНЕНИЕ СКОРОСТИ СОБСТВЕННОГО ВРАЩЕНИЯ АСТЕРОИДА ИЗ-ЗА СБЛИЖЕНИЯ С ПЛАНЕТОЙ

В работе (Девяткин и др., 2022) была установлена группа астероидов, испытывающих на промежутке времени 1500–2500 гг. сближения на расстоянии менее 0.05 а. е. с Меркурием, Венерой, Землей и Марсом. Мельников (2022) из перечня астероидов, приведенного в работе Девяткина и др. (2022), отобрал объекты, сближающиеся с перечисленными выше планетами на расстоянии менее 100 радиусов Земли. При сближении на данное расстояние астероид попадает в сферу действия планеты (за исключением случая Меркурия). Схожий критерий для отбора исследуемых астероидов используется различными исследователями (Richardson и др., 1998; Boldrin и др., 2020). В табл. 1 приведены список астероидов из работы (Мельников, 2022), их орбитальные параметры и размеры. Для всех астероидов в (Мельников, 2022) были найдены максимальные значения

изменений периодов вращений малых астероидов при сближениях с планетами, а именно, в табл. 2 указаны значения $|\Delta P|$ – абсолютной величины изменения периода вращения астероида. В численных экспериментах по моделированию сближения астероида с планетой наблюдалось как замедление, так и ускорение вращения астероида. Для определения возможности идентификации таких изменений вращательного состояния астероида из анализа наблюдений достаточно знания именно величины $|\Delta P|$.

Из данных, приведенных в табл. 2, видно, что в большинстве случаев установленное изменение периода вращения астероида после его сближения с планетой является весьма малым (менее 0.3 ч). Современные методы и инструменты позволяют определять периоды вращения малых астероидов с точностью больше чем 10^{-4} ч (см., например, Lee и др., 2021; Podlowska-Gaca и др., 2021; Zegmott и др., 2021). Поэтому указанные в табл. 2 изменения периода вращения астероида могут быть выявлены из анализа наблюдательных данных. Отметим, что в случае весьма тесного (на расстояние ≈ 27700 км) сближения с Землей в 2013 г. астероида (367943) Duende период его вращения существенно изменился (Devyatkin и др., 2016; Venson и др., 2020; Мельников, 2022) – по разным оценкам на 2–3 ч (примерно на 20%). Вероятно, такое изменение вращательного состояния астероида должно оказать влияние как на его дальнейшую орбитальную динамику, посредством изменения величины эффекта Ярковского, так и на величину YORP-эффекта, оказывающего влияние на вращательную динамику астероида. Рассмотрим далее вопрос об изменении величины эффекта Ярковского для сближающихся с планетами астероидов подробно.

СВЕТОВОЕ ДАВЛЕНИЕ

Для всех астероидов, перечисленных в табл. 1, было вычислено влияние на их долговременную

Таблица 2. Максимальное изменение величины периода собственного вращения астероида из-за его сближения с планетой (прочерк означает отсутствие сближений)

Астероид	ΔP , ч			
	Меркурий	Венера	Земля	Марс
2008 FP	–	0.002	0.007	–
2009 WP6	0.0003	0.003	0.002	0.003
2010 JJ41	0.0002	0.006	0.004	0.001
2015 EO61	0.002	0.005	0.008	0.003
2015 TX24	0.004	0.02	0.09	0.1
2015 XG55	0.008	0.08	0.2	0.009
(367943) Duende	–	–	2.4	–

Примечание: данные взяты из (Мельников, 2022).

орбитальную динамику давления солнечной радиации. Сила светового давления определяется формулой (см., например, Радзиевский, 2003)

$$\mathbf{F} = k \frac{E(r)A}{c} \mathbf{e},$$

где $E(r) = L/(4\pi r^2)$ – освещенность на расстоянии r от Солнца, L – светимость Солнца, $A = \pi R^2$ – площадь миделева сечения астероида, R – радиус астероида, c – скорость света, k – оптический коэффициент астероида, \mathbf{e} – единичный вектор радиального гелиоцентрического направления. В общем случае оптическая модель поверхности астероида исходит из предположения о преобладании диффузного характера переизлучения света, при котором для сферического тела оптический коэффициент имеет вид (Поляхова, Шмыров, 1994): $k = \alpha + \beta + (13/9) \delta$, где α – коэффициент поглощения, β и δ – коэффициенты зеркального и диффузного отражения, соответственно. Для астероида принимаем $\beta = 0$, а δ представляет собой геометрическое альbedo астероида. Тогда, из условия непрерывности потока световой энергии $\alpha + \beta + \delta = 1$, следует: $\alpha = 1 - \delta$, $k = 1 + (4/9) \delta$.

Для вычисления влияния светового давления проводилось интегрирование уравнений движения системы тел (Солнце–Юпитер–астероид) методом Эверхарта 19-го порядка (Бордовицына, 1984). Относительная точность интегрирования была положена равной 10^{-10} , шаг интегрирования – 0.1 года. Методика интегрирования и вычисления сил светового давления подробно описаны в работе (Мартюшева и др., 2015).

Начальные данные для расчетов приведены в табл. 1 и 3. В табл. 3 указаны: H_v – видимая звездная величина астероида (согласно данным <https://ssd.jpl.nasa.gov/>), δ – альbedo астероида, полученное по формуле (Виноградова и др., 2003)

$$\lg D = 3.122 - 0.5 \lg \delta - 0.2 H_v, \quad (1)$$

и k – оптический коэффициент, вычисленный по формуле (см. выше): $k = 1 + (4/9) \delta$.

Поскольку плотность астероида ρ , необходимая для оценки его массы, неизвестна, вычисления влияния светового давления выполнялись для трех различных значений средней плотности основных спектральных классов астероидов (Krasinsky и др., 2002): углеродистых астероидов класса C ($\rho = 1380 \text{ кг/м}^3$), кремниевых астероидов класса S (2710 кг/м^3) и металлических астероидов класса M (5320 кг/м^3); а также для их среднего арифметического значения (3137 кг/м^3). За исключением астероида (367943) Duende, принадлежащего к группе атонцев, все остальные из рассмотренных астероидов принадлежат к группе аполлонцев. Согласно различным исследованиям (Caḡу и др., 2016; Perna и др., 2018; Binzel и др., 2019; Hromakina и др., 2023) значительная часть (40–70%) AC3 представляют собой астероиды класса S, астероидов класса C существенно меньше (10–20%), астероиды класса M встречаются редко. Из всех рассмотренных нами астероидов принадлежность к классу S установлена (Moskovitz и др., 2020) только у (367943) Duende. Оценки, полученные для среднего значения плотности, позволяют дополнительно грубо охарактеризовать величину исследуемого эффекта для остальных

Таблица 3. Принятые для вычисления светового давления Солнца параметры астероидов

Астероид	D , м	H_v	δ	k
2008 FP	20	26.3	0.13	1.06
2009 WP6	20	26.8	0.08	1.04
2010 JJ41	150	21.8	0.15	1.07
2015 EO61	170	21.4	0.17	1.08
2015 TX24	250	21.6	0.07	1.03
2015 XG55	10	27.7	0.15	1.07
(367943) Duende	50	24.2	0.15	1.07

Таблица 4. Смещения орбиты астероида из-за действия светового давления Солнца

Астероид	ρ , кг/м ³	Δr , км		Δl , км		Δd , км	
		$t = 10$ лет	$t = 100$ лет	$t = 10$ лет	$t = 100$ лет	$t = 10$ лет	$t = 100$ лет
2008 FP	1380	155	11050	126	14920	201	18570
	2710	79	5626	64	7601	102	9457
	3137	69	4860	55	6566	88	8169
	5320	40	2866	33	3872	52	4817
2009 WP6	1380	235	3707	190	10075	302	10104
	2710	120	1888	97	5131	154	5145
	3137	103	1631	84	4432	133	4445
	5320	61	961	49	2614	78	2621
2010 JJ41	1380	29	355	27	626	40	693
	2710	15	181	14	319	20	353
	3137	13	156	12	275	17	305
	5320	7	92	7	162	10	180
2015 EO61	1380	16	406	15	784	22	818
	2710	8	207	8	381	11	417
	3137	7	178	7	329	10	360
	5320	4	105	4	194	6	212
2015 TX24	1380	11	598	10	885	15	1068
	2710	6	304	5	450	8	544
	3137	5	263	4	389	6	470
	5320	3	155	2	229	4	277
2015 XG55	1380	313	2645	428	7255	530	7256
	2710	159	1347	218	3694	270	3695
	3137	137	1164	188	3191	233	3192
	5320	81	686	111	1882	137	1882

ных астероидов, спектральный класс которых пока не определен.

Расчеты влияния светового давления на орбитальную динамику астероидов проводились на двух интервалах времени: $t = 10$ и 100 лет. В результате были получены следующие величины: смещение астероида вдоль гелиоцентрического радиус-вектора Δr , смещение астероида по долготе Δl , а также полное смещение астероида Δd . Результаты вычислений представлены в табл. 4. Результаты исследования влияния светового давления на динамику астероида (367943) Duende приведены в работе (Devyatkin и др., 2016), где указано, что для $t = 10$ лет и разных значений параметров задачи имеем: $\Delta d = 250\text{--}280$ км.

Согласно полученным результатам, отклонения Δr , Δl и Δd носят нелинейный характер по времени и убывают с увеличением значений плотности для всех рассмотренных астероидов (см. также Мартюшева и др., 2015). Очевидно, что наибольшие отклонения соответствуют астерои-

дам с наименьшим диаметром: 2008 FP, 2009 WP6, 2015 XG55 и (367943) Duende. Наименьшие отклонения, напротив, соответствуют астероидам наибольшего диаметра: 2010 JJ41, 2015 EO61 и 2015 TX24. Средние смещения орбит рассмотренных астероидов из-за действия сил светового давления составляют от 0.4 до 50 км за год (на основе вычислений, проведенных для $t = 10$ лет), т.е. являются весьма существенными и на два–три порядка превышают размеры астероида. Поэтому действие силы светового давления, безусловно, необходимо учитывать при оценке астероидно-кометной опасности и планировании космических миссий к малым астероидам. Например, если рассматривать долговременную динамику астероидов с точки зрения их сближений с планетами, то найденное (см. табл. 4) смещение орбиты астероида 2008 FP из-за действия силы светового давления на промежутке времени $t = 100$ лет почти на 20 000 км ($\approx 3R_E$, где R_E – радиус Земли) может увеличить вероятность его ката-

строфического сближения с планетой. Отметим, что в 2008 г. астероид 2008 FP сближался с Землей на расстояние около $27R_E$ (согласно данным <https://ssd.jpl.nasa.gov/>).

ЭФФЕКТ ЯРКОВСКОГО

Помимо силы светового давления солнечной радиации для всех астероидов, перечисленных в табл. 1, была вычислена величина эффекта Ярковского (Ярковский, 1901; Радзиевский, 1952; 2003), представляющего собой негравитационное ускорение в орбитальном движении, вызываемое анизотропным переизлучением солнечной радиации поверхностью вращающегося астероида. Термодинамическая модель эффекта Ярковского была взята из работ (Vokrouhlický, 1999; Vokrouhlický и др., 2000). Средняя скорость векового изменения большой полуоси орбиты астероида a складывается под влиянием двух эффектов: суточного

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_s = -\frac{8\alpha}{9n} \frac{F(r)\pi R^2}{Mc(1+\lambda)} G \sin \delta \cos^2 \gamma \quad (2)$$

и сезонного

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_s = \frac{4\alpha}{9n} \frac{F(r)\pi R^2}{Mc(1+\lambda)} G \sin \delta \sin^2 \gamma, \quad (3)$$

где α – поглощающая способность поверхности астероида, n – среднее суточное движение астероида, M – масса астероида, c – скорость света, R – радиус астероида, $F(r)$ – поток солнечной радиации на расстоянии r от Солнца ($F(r) = 1370r^2$ Вт/м²), γ – угол наклона оси вращения астероида к плоскости орбиты, G – амплитуда эффекта, δ – фаза эффекта. Для безразмерного параметра λ имеем

$$\lambda = \frac{\sqrt{K\rho_s C\omega}}{\varepsilon\sigma T^3} \frac{l}{R\sqrt{2}},$$

где K – теплопроводность вещества астероида, C – теплоемкость вещества астероида, ε – коэффициент эмиссии астероида, σ – постоянная Стефана–Больцмана, ρ_s – плотность поверхностных слоев астероида, T – температура астероида, связанная соотношением $\alpha F(r) = \varepsilon\sigma T^4$, ω – частота вращения астероида, $l = (K/(\rho_s C\omega))^{1/2}$ – глубина проникновения тепловых волн.

Интегрирование уравнений движения методом Рунге–Кутты 4-го порядка точности с шагом 10^{-5} орбитального периода астероида позволило получить величину изменения его большой полуоси из-за эффекта Ярковского за один оборот вокруг Солнца. Методика вычисления величины эффекта Ярковского была взята из (Панасенко, Чернетенко, 2014). Следующие характеристики были приняты для всех астероидов: $\rho_s = \rho = 3137$ кг/м³, $\varepsilon = 0.9$, $K = 10^{-2}$ Вт/(м К), $C = 500$ Дж/(кг К). Ис-

пользование средней величины плотности астероида позволило оценить величину эффекта Ярковского без разделения АСЗ на спектральные классы (см. предыдущий раздел). Отметим, что величины эффекта Ярковского, вычисленные для одного и того же астероида при разных значениях плотности, соответствующих возможным спектральным классам, отличались на 5–10%. Для величины светового давления, различия существенно выше (см. табл. 4).

Поскольку реальные вращательные состояния астероидов неизвестны, вычисления выполнялись для трех различных значений периода вращения астероида, $P = 5, 10$ и 15 ч. Выбор этих значений обусловлен тем, что согласно данным наблюдений $P < 10$ ч для большей части астероидов с $D < 100$ м (см. рис. 8 в (Pravec и др., 2014) и рис. 6 в (Zhang, Michel, 2021)). Для всех астероидов ось вращения предполагалась ортогональной плоскости орбиты, $\gamma = 0^\circ$ (в случае $\gamma > 180^\circ$ величина эффекта Ярковского имеет противоположный знак). При такой ориентации оси вращения влияние суточной компоненты $(da/dt)_d$ эффекта Ярковского на большую полуось будет максимальным, а влияние сезонной составляющей $(da/dt)_s$ обращается в ноль. Суммарный результат действия обеих компонент $(da/dt)_{d+s}$ и представляет собой эффект Ярковского. Отметим, что для малых астероидов суточный эффект Ярковского существенно выше сезонного (Vokrouhlický и др., 2015a). В зависимости от направления вращения астероида по отношению к направлению орбитального движения эффект Ярковского может вызывать как замедление орбитального движения, т.е. увеличение a , что соответствует $\gamma < 90^\circ$, так и ускорение, т.е. уменьшение a при $\gamma > 90^\circ$. Результаты вычислений величины эффекта Ярковского для всех астероидов из табл. 1 представлены в табл. 5.

Расчеты показали, что наибольшая величина $(da/dt)_{d+s}$ соответствует астероидам 2009 WP6, и 2015 XG55 и (367943) Duende. Этим астероидам из рассмотренной нами выборки соответствуют наименьшие видимые звездные величины, что может быть объяснено весьма малыми размерами астероидов, либо их низким альбедо (см. уравнение (1) и табл. 2). Отметим, что в случае астероида (367943) Duende его размер определен из радарных наблюдений (Benner и др., 2013). Относительно малая величина эффекта Ярковского для 2008 FP, также имеющего небольшой размер, может быть объяснена его более удаленной по сравнению с тремя указанными выше астероидами от Солнца орбитой (см. табл. 1).

Для всех исследуемых астероидов была изучена зависимость величины эффекта Ярковского от P и γ (периода и угла наклона оси вращения астероида, соответственно). В первом случае величи-

Таблица 5. Величина эффекта Ярковского $(da/dt)_{d+s} \times 10^{-4}$ а. е./млн лет для астероидов

Астероид	P , ч		
	5	10	15
2008 FP	0.2645	0.2882	0.2938
2009 WP6	4.3560	3.2006	2.6582
2010 JJ41	0.1981	0.1680	0.1492
2015 EO61	0.0905	0.0854	0.0800
2015 TX24	0.0250	0.0267	0.0269
2015 XG55	4.2036	3.3751	2.9188
(367943) Duende	1.7620	1.5320	1.3630

на $(da/dt)_{d+s}$ вычислялась за один орбитальный период астероида, в предположении, что $\gamma = 45^\circ$ (произвольное значение для учета действия сезонной и суточной компонент), на множестве значений P от 1 до 30 ч с шагом 1 ч. Во втором случае, для трех фиксированных значений $P = 5, 10$ и 15 ч эффект Ярковского вычислялся за один орбитальный период астероида на множестве значений γ от 0° до 90° с шагом 5° . Для удобства анализа полученных результатов мы получили оценки Δa — величины изменения большой полуоси астероида за год из-за действия эффекта Ярковского.

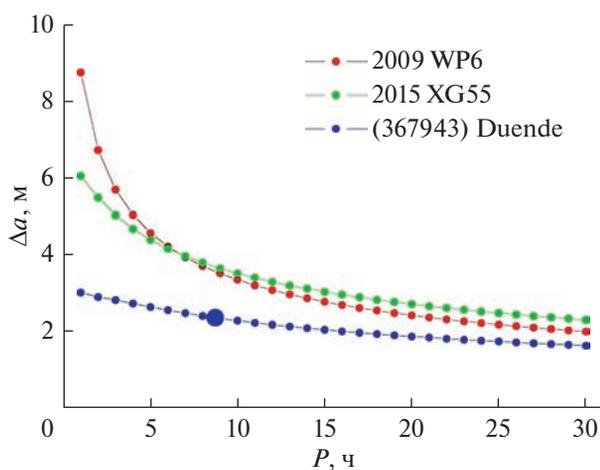


Рис. 1. Зависимость величины изменения большой полуоси орбиты астероида за год из-за действия эффекта Ярковского от периода собственного вращения астероида. Синим кружком указан реальный период вращения астероида (367943) Duende, согласно (Venson и др., 2020).

На рис. 1 представлены зависимости Δa от P , полученные для астероидов 2009 WP6, 2015 XG55 и (367943) Duende. Для остальных астероидов вычисленные величины эффекта Ярковского оказались на 2–3 порядка меньше (см. также табл. 5) и не играют существенной роли в их орбитальной динамике, поэтому мы не привели полученные для них зависимости. Видно, что все зависимости, представленные на рис. 1, являются нелинейными, и в случае малых астероидов ($D \sim 20$ м) с быстрым вращением ($P \leq 10$ ч) величина Δa может быть сопоставима с размерами астероида. Отметим, что, согласно Vokrouhlický и др. (2015b), для AC3 (99942) Apophis ($D = 325$ м) имеем $\Delta a \approx 200$ м, т.е. тоже сравнимую с размерами астероида величину.

Из рис. 1 видно, что в области $P \leq 5$ ч величина эффекта Ярковского (величина Δa) для астероидов 2009 WP6 и 2015 XG55 существенно зависит от P . Поскольку рассмотренные нами астероиды весьма малы, то, согласно (Pravec и др., 2014; Zhang, Michel, 2021), они, вероятно, обладают весьма быстрым вращением. Для астероидов 2009 WP6 и 2015 XG55 стоит ожидать существенного изменения величины эффекта Ярковского после их сближений с планетами, даже если в результате таких событий вращательные состояния астероидов будут изменяться незначительно.

Для астероида (367943) Duende из зависимости, представленной на рис. 1, видно, что имевшее место изменение периода вращения астероида при его весьма тесном сближении с Землей в 2013 г. существенным образом не повлияло на величину эффекта Ярковского. При установленном из анализа наблюдений (Devyatkin и др., 2016; Venson и др., 2020) изменении периода вращения астероида (367943) Duende на 2–3 ч величина эф-

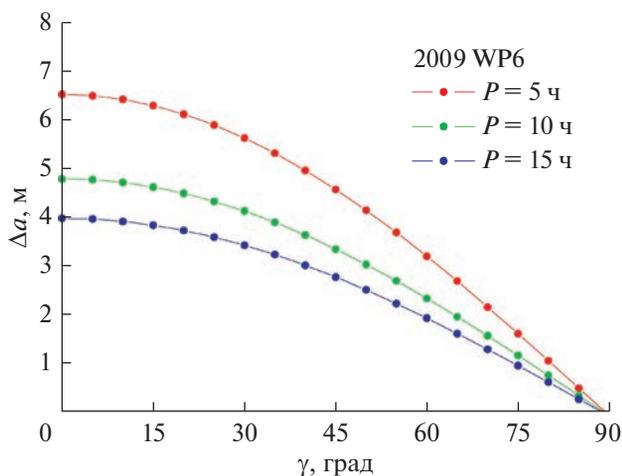


Рис. 2. Зависимость величины изменения большой полуоси орбиты астероида 2009 WP6 за год из-за действия эффекта Ярковского от угла наклона оси вращения для разных возможных значений периода собственного вращения астероида.

фекта Ярковского могла измениться на $\approx 10\%$. Отметим, что (367943) Duende примерно в два раза крупнее, чем астероиды 2009 WP6 и 2015 XG55 (см. табл. 2).

На рис. 2 представлены полученные при различных значениях P зависимости Δa от γ для астероида 2009 WP6. Для 2015 XG55 и (367943) Duende зависимости имеют схожий характер, поэтому мы их не приводим. Видно, что величина Δa при изменении угла γ меняется примерно в тех же пределах, как и при изменении P (см. рис. 1).

При сближениях с планетой имеет место изменение как P , так и γ (см., например, Devyatkin и др., 2016; Venson и др., 2023), поэтому стоит ожидать, что тесное сближение с планетой малого астероида ($D = 10\text{--}50$ м) с быстрым вращением ($P < 10$ ч) окажет существенное влияние на величину эффекта Ярковского для него. Сближение с планетой может привести к тому, что вращение астероида перейдет в режим “кувыркания” (tumbling) (см. Pravec и др., 2005), либо в режим хаотического (непредсказуемого) вращения, имеющий место во вращательной эволюции малых спутников планет (Wisdom, 1987; Melnikov, Shevchenko, 2010; Shevchenko, 2020; Мельников, Шевченко, 2022). В последнем случае, вероятно, эффект Ярковского не будет влиять на вековую эволюцию орбиты астероида. Данный вопрос требует дополнительного исследования.

ВЫВОДЫ

Итак, в настоящей работе для ряда малых астероидов, испытывающих сближения с планетами земной группы, получены оценки влияния на ор-

битальную динамику давления солнечной радиации и эффекта Ярковского. Установлено, что действие светового давления приводит к смещению орбиты астероида на величину от сотен метров до десятков километров в год. Величина изменения большой полуоси орбиты астероида из-за действия эффекта Ярковского за год может быть сопоставима с размерами астероида.

Сближение астероида с планетой приводит к изменению его вращательного состояния — величины периода собственного вращения астероида и ориентации оси вращения в пространстве. Изменение вращательного состояния астероида приведет к изменениям величин эффекта Ярковского и YORP-эффекта. Полученные нами оценки показали, что влияние сближения с планетой на орбитальную динамику астероида из-за изменения периода его собственного вращения посредством действия эффекта Ярковского хотя обычно мало, может быть существенным. В случае, когда орбита астероида проходит достаточно далеко от планеты (20–100 радиусов Земли), период вращения астероида изменяется менее чем на 0.3 ч, что оказывает незначительное влияние на величину эффекта Ярковского. Однако при весьма тесных сближениях (менее пяти радиусов Земли) период вращения астероида может измениться на несколько часов, что способно изменить величину эффекта Ярковского в 1.5–2 раза и будет заметным в дальнейшей орбитальной динамике астероида. Отметим, что в недавно опубликованной работе (Venson и др., 2023) при исследовании динамики AC3 (99942) Apophis было высказано предположение о незначительном влиянии изменения периода вращения астероида из-за сближения с Землей на величину эффекта Ярковского. Как видно из полученных нами результатов, в ряде случаев для малых астероидов влияние сближений с планетами на эффект Ярковского все же надо учитывать.

При наблюдательной идентификации проявлений эффекта Ярковского и YORP-эффекта в динамике малых астероидов необходимо учитывать наличие сближений с планетами, иначе можно получить ошибочные оценки величин указанных эффектов. Влияние негравитационных эффектов возрастает во времени, и на больших интервалах времени изменение орбиты астероида может быть весьма существенным, например, действие светового давления приводит к смещению орбиты на несколько десятков тысяч километров на промежутке времени в 100 лет. Таким образом, при планировании космических миссий к малым астероидам и оценке астероидно-кометной опасности необходимо учитывать как давление солнечной радиации и эффект Ярковского, так и влияние изменения вращательного состоя-

ния астероида при сближениях с планетами на его дальнейшую орбитальную динамику.

Авторы благодарят И.И. Шевченко за весьма ценные замечания, а также А.В. Девяткина и М.Ю. Ховричева за полезные обсуждения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-22-00306, <https://rscf.ru/project/23-22-00306/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Батраков Ю.В., Медведев Ю.Д.* О вращении астероида при его прохождении вблизи Земли // Тр. Всесоюзн. совещания “Астероидная опасность”. СПб.: ИТА РАН, 1992. С. 129–133.
- Бордовицына Т.В.* Современные численные методы в задачах небесной механики. М.: Наука, 1984. С. 67–70.
- Виноградова Т.А., Железнов Н.В., Кузнецов В.Б., Чернетенко Ю.А., Шор В.А.* Каталог потенциально опасных астероидов и комет // Тр. ИПА РАН. 2003. Вып. 9. С. 43–46.
- Воропаев С.А., Джианго Я., Барриот Ж.П.* Разрыв вытянутого малого тела приливными силами Земли при подлете: возможные сценарии // Астрон. вестн. 2020. Т. 54. № 2. С. 171–182. (*Voropaev S.A., Jianguo Y., Barriot J.P.* Prolate body disruption by Earth at near flyby: Possible scenarios // *Sol. Syst. Res.* 2020. V. 54. № 2. P. 155–166.) <https://doi.org/10.31857/S0320930X20020097> <https://doi.org/10.1134/S0038094620020082>
- Девяткин А.В., Львов В.Н., Цекмейстер С.Д.* Особые группы потенциально опасных астероидов // Астрон. вестн. 2022. Т. 56. № 1. С. 68–72. (*Devyatkin A.V., Lvov V.N., Tsekmeister S.D.* Special groups of potentially hazardous asteroids // *Sol. Syst. Res.* 2022. V. 56. № 1. P. 62–65.) <https://doi.org/10.31857/S0320930X22010029> <https://doi.org/10.1134/S0038094622010026>
- Емельяненко В.В., Попова О.П., Чугай Н.Н., Шеляков М.А., Пахомов Ю.В., Шустов Б.М., Шувалов В.В., Бирюков Е.Е., Рыбнов Ю.С., Маров М.Я., Рыхлова Л.В., Нароенков С.А., Карташова А.П., Харламов В.А., Трубецкая И.А.* Астрономические и физические аспекты Челябинского события 15 февраля 2013 г. // Астрон. вестн. 2013. Т. 47. № 4. С. 262–277. (*Emel'yanenko V.V., Chugai N.N., Shelyakov M.A. et al.* Astronomical and physical aspects of the Chelyabinsk event // *Sol. Syst. Res.* 2013. V. 47. № 4. P. 240–254.) <https://doi.org/10.7868/S0320930X13040130> <https://doi.org/10.1134/S0038094613040114>
- Мартюшева А.А., Петров Н.А., Поляхова Е.Н.* Численное моделирование воздействия светового давления на движение астероидов, в том числе сближающихся с Землей // Вестн. СПб ун-та. Сер. 1. 2015. Т. 2. Вып. 60. № 1. С. 135–147
- Мельников А.В.* Вращательная динамика сближающихся с планетами астероидов // Астрон. вестн. 2022. Т. 56. № 4. С. 254–265. (*Melnikov A.V.* Rotational dynamics of asteroids approaching planets // *Sol. Syst. Res.* 2022. V. 56. № 4. P. 241–251.) <https://doi.org/10.31857/S0320930X22040065> <https://doi.org/10.1134/S0038094622040062>
- Мельников А.В., Шевченко И.И.* Вращательная динамика и эволюция спутников планет Солнечной и экзопланетных систем // Астрон. вестн. 2022. Т. 56. № 1. С. 3–26. (*Melnikov A.V., Shevchenko I.I.* Rotational dynamics and evolution of planetary satellites in the Solar and exoplanetary systems // *Sol. Syst. Res.* 2022. V. 56. № 1. P. 1–22.) <https://doi.org/10.31857/S0320930X22010042> <https://doi.org/10.1134/S003809462201004X>
- Панасенко А.И., Чернетенко Ю.А.* Моделирование влияния эффекта Ярковского на движение астероидов // Тр. ИПА РАН. 2014. Т. 31. С. 59–65.
- Поляхова Е.Н., Шмыров А.С.* Физическая модель сил давления световой радиации на плоскость и сферу // Вестн. СПб ун-та. Сер. 1. 1994. Вып. 2. № 8. С. 87–104.
- Радзиевский В.В.* Механизм разрушения астероидов и метеоритов // Астрон. журн. 1952. Т. 29. С. 162–170.
- Радзиевский В.В.* Фотогравитационная небесная механика. Н. Новгород: Изд. Николаев Ю.А., 2003. 196 с.
- Шор В.А., Чернетенко Ю.А., Кочетова О.М., Железнов Н.Б.* О влиянии эффекта Ярковского на орбиту Апофиса // Астрон. вестн. 2012. Т. 46. № 2. С. 131–142. (*Shor V.A., Chernetenko Yu.A., Kochetova O.M., Zheleznov N.B.* On the impact on the Yarkovsky effect on Apophis' orbit // *Sol. Syst. Res.* 2012. V. 46. № 2. P. 119–129.)
- Ярковский И.О.* Плотность светового эфира и оказываемое им сопротивление движению. Брянск: Тип. Юдина, 1901. 17 с.
- Benner L., Brozovic M., Giorgini J.D., Jao J.S., Lee C.G., Busch M.W., Slade M.A.* Goldstone radar images of near-Earth asteroid 2012 DA 14 (101.02) // *Am. Astron. Soc. DPS meeting.* № 45. 2013. id. 101.02.
- Benson C.J., Scheeres D.J., Moskovitz N.A.* Spin state evolution of asteroid (367943) Duende during its 2013 Earth flyby // *Icarus.* 2020. V. 340. id. 113518.
- Benson C.J., Scheeres D.J., Brozović M., Chesley S.R., Pravec P., Scheirich P.* Spin state evolution of (99942) Apophis during its 2029 Earth encounter // *Icarus.* 2023. V. 390. id. 115324.
- Binzel R.P., DeMeo F.E., Turtelboom E.V., Bus S.J., Tokunaga A., Burbine T.H., Lantz C., Polishook D., Carry B., Morbidelli A., Birlan M., Vernazza P., Burt B.J., Moskovitz N., Slivan S.M., Thomas C.A., Rivkin A.S., Hicks M.D., Dunn T., Reddy V., Sanchez J.A., Granvik M., Kohout T.* Compositional distributions and evolutionary processes for the near-Earth object population: Results from the MIT-Hawaii Near-Earth Object Spectroscopic Survey (MITHNEOS) // *Icarus.* 2019. V. 324. P. 41–76.
- Boldrin L.A.G., Araujo R.A.N., Winter O.C.* On the rotational motion of NEAs during close encounters with the

- Earth // *European Phys. J. — Spec. Topics.* 2020. V. 229. № 8. P. 1391–1403.
- Carry B., Solano E., Ettl S., DeMeo F.E. Spectral properties of near-Earth and Mars-crossing asteroids using Sloan photometry // *Icarus.* 2016. V. 268. P. 340–354.
- Chesley S.R., Milani A., Tholen D., Bernardi F., Chodas P., Micheli M. An updated assessment of the impact threat from 99942 Apophis // *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting* № 41. 2009. V. 41. id. 43.06.
- Chodas P.W., Yeomans D.K. The orbital motion and impact circumstances of Comet Shoemaker–Levy 9 // *IAU Colloq. 156: The Collision of Comet Shoemaker–Levy 9 and Jupiter* / Eds: Noll K.S., Weaver H.A., Feldman P.D. 1996. P. 1–30.
- Devyatkin A.V., Gorshakov D.L., Yershov V.N., Melnikov A.V., Martysheva A.A., Petrova S.N., L'vov V.N., Tsekmeister S.D., Naumov K.N. A study of the asteroid (367943) Duende at Pulkovo Observatory // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2016. V. 459. № 4. P. 3986–3997.
- Ershkov S.V., Shamin R.V. The dynamics of asteroid rotation, governed by YORP effect: The kinematic ansatz // *Acta Astronautica.* 2018. V. 149. P. 47–54.
- Farnocchia D., Chesley S.R., Chodas P.W., Micheli M., Tholen D.J., Milani A., Elliott G.T., Bernardi F. Yarkovsky driven impact risk analysis for asteroid (99942) Apophis // *Icarus.* 2013. V. 224. № 1. P. 192–200.
- Greenberg A.H., Margot J.-L., Verma A.K., Taylor P.A., Hodge S.E. Yarkovsky drift detections for 247 Near-Earth Asteroids // *Astron. J.* 2020. V. 159. № 3. id. 92.
- Hromakina T., Birlan M., Barucci M.A., Fulchignoni M., Colas F., Fornasier S., Merlin F., Sonka A., Anghel S., Poggiali G., Belskaya I., Perna D., Dotto E., NEOROCS Team. NEOROCS project: surface properties of small near-Earth asteroids // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2023. V. 520. P. 3143–3150.
- Krasinsky G.A., Pitjeva E.V., Vasilyev M.V., Yagudina E.I. Hidden mass in the Asteroid Belt // *Icarus.* 2002. V. 158. P. 98–105.
- Lee H.-J., Ďurech J., Vokrouhlický D., Pravec P., Moon H.-K., Ryan W., Kim M.-J., Kim C.-H., Choi Y.-J., Bacci P., Pollock J., Apitzsch R. Spin change of asteroid 2012 TC4 probably by radiation torques // *Astron. J.* 2021. V. 161. № 3. id. 112.
- Lowry S.C., Fitzsimmons A., Pravec P., Vokrouhlický D., Boehnhardt H., Taylor P.A., Margot J.-L., Galád A., Irwin M., Irwin J., Kusnirák P. Direct detection of the asteroidal YORP effect // *Science.* 2007. V. 316 (5822). P. 272–274.
- Melnikov A.V., Shevchenko I.I. The rotation states predominant among the planetary satellites // *Icarus.* 2010. V. 209. P. 786–794.
- Moskovitz N.A., Benson C.J., Scheeres D., Endicott T., Polshook D., Binzel R., DeMeo F., Ryan W., Ryan E., Willman M., Hergenrother C., Verveer A., Lister T., Birtwhistle P., Sickafoose A., Nagayama T., Gilmore A., Kilmartin P., Benechhi S., Sheppard S., Marchis F., Augusteijn T., Smirnova O. Observational investigation of the 2013 near-Earth encounter by asteroid (367943) Duende // *Icarus.* 2020. V. 340. id. 113519.
- Perna D., Barucci M.A., Fulchignoni M., Popescu M., Belskaya I., Fornasier S., Doressoundiram A., Lantz C., Merlin F. A spectroscopic survey of the small near-Earth asteroid population: Peculiar taxonomic distribution and phase reddening // *Planet. and Space Sci.* 2018. V. 157. P. 82–95.
- Podlowska-Gaca E., Poleski R., Bartczak P., McDonald I., Pál A. Determination of rotation periods for a large sample of asteroids from the K2 Campaign 9 // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2021. V. 255. № 1. id. 4.
- Pravec P., Harris A.W., Scheirich P., Kušnirák P., Šarounová L., Hergenrother C.W., Mottola S., Hicks M.D., Masi G., Krugly Yu.N., Shevchenko V.G., Nolan M.C., Howell E.S., Kaasalainen M., Galád A., Brown P., DeGraff D.R., Lambert J.V., Cooney W.R., Foglia S. Tumbling asteroids // *Icarus.* 2005. V. 173 (1). P. 108–131.
- Pravec P., Scheirich P., Ďurech J., Pollock J., Kušnirák P., Hornoch K., Galád A., Vokrouhlický D., Harris A.W., Jehin E., Manfroid J., Opitom C., Gillon M., Colas F., Oey J., Vraštil J., Reichart D., Ivarsen K., Haislip J., LaCluyze A. The tumbling spin state of (99942) Apophis // *Icarus.* 2014. V. 233. P. 48–60.
- Richardson D.C., Bottke W.F., Love S.G. Tidal distortion and disruption of Earth-crossing asteroids // *Icarus.* 1998. V. 134. P. 47–76.
- Rubincam D.P. Radiative spin-up and spin-down of small asteroids // *Icarus.* 2000. V. 148. P. 2–11.
- Scheeres D.J., Ostro S.J., Werner R.A., Asphaug E., Hudson R.S. Effects of gravitational interactions on asteroid spin states // *Icarus.* 2000. V. 147. P. 106–118.
- Scheeres D.J., Marzari F., Rossi A. Evolution of NEO rotation rates due to close encounters with Earth and Venus // *Icarus.* 2004. V. 170. P. 312–323.
- Scheeres D.J., Benner L.A.M., Ostro S.J., Rossi A., Marzari F., Washabaugh P. Abrupt alteration of Asteroid 2004 MN4's spin state during its 2029 Earth flyby // *Icarus.* 2005. V. 178. № 1. P. 281–283.
- Sharma I., Jenkins J.T., Burns J.A. Tidal encounters of ellipsoidal granular asteroids with planets // *Icarus.* 2006. V. 183. № 2. P. 312–330.
- Shevchenko I.I. *Dynamical Chaos in Planetary Systems.* Springer, 2020. 401 p.
- Souchay J., Lhotka C., Heron G., Hervé Y., Puente V., Folgueira Lopez M. Changes of spin axis and rate of the asteroid (99942) Apophis during the 2029 close encounter with Earth: A constrained model // *Astron. and Astrophys.* 2018. V. 617. id. A74.
- Tóth J., Vereš P., Kornoš L. Tidal disruption of NEAs — a case of Příbram meteorite // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2011. V. 415. № 2. P. 1527–1533.
- Vokrouhlický D. A complete linear model for the Yarkovsky thermal force on spherical asteroid fragments // *Astron. and Astrophys.* 1999. V. 344. P. 362–366.

- Vokrouhlický D., Milani A., Chesley S.R.* Yarkovsky effect on small near-Earth asteroids: Mathematical formulation and examples // *Icarus*. 2000. V. 148. P. 118–138.
- Vokrouhlický D., Bottke W.F., Chesley S.R., Scheeres D.J., Statler T.S.* The Yarkovsky and YORP effects // *Asteroids IV*. Tucson, AZ: Univ. Arizona Press, 2015a. P. 509–532.
- Vokrouhlický D., Farnocchia D., Čapek D., Chesley S.R., Pravec P., Scheirich P., Müller T.G.* The Yarkovsky effect for 99942 Apophis // *Icarus*. 2015b. V. 252. P. 277–283.
- Wisdom J.* Rotation dynamics of irregularly shaped natural satellites // *Astron. J.* 1987. V. 94. № 5. P. 1350–1360.
- Zegmott T.J., Lowry S.C., Rožek A., Rožitis B., Nolan M.C., Howell E.S., Green S.F., Snodgrass C., Fitzsimmons A., Weissman P.R.* Detection of the YORP effect on the contact binary (68346) 2001 KZ66 from combined radar and optical observations // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2021. V. 507. № 4. P. 4914–4932.
- Zeng X., Feng C., Wen T., Gan Q.* The coupling orbit–attitude–structure evolution of Rubble-Pile asteroid with Earth flyby in the restricted three-body problem // *Aerospace*. 2022. V. 9. № 7. id. 351.
- Zhang Y., Michel P.* Tidal distortion and disruption of rubble-pile bodies revisited. Soft-sphere discrete element analyses // *Astron. and Astrophys.* 2020. V. 640. id. A102.
- Zhang Y., Michel P.* Shapes, structures, and evolution of small bodies // *Astrodynamic.* 2021. V. 5. № 4. P. 293–329.