

**Отчет по НИР «Изучение последствий космогенной переработки вещества безатмосферных тел Солнечной системы»**

**за период 1 января – 31 декабря 2022 г.**

**Госзадание ГАИШ 4.2, номер ЦИТИС АААА-А20-120012990068-0**

Руководитель: Шевченко В.В.

Участники НИР в 2022 г.: Бережной А.А., Бусарев В.В., Максимова Т.Г., Насонова Л.П., Пугачева С.Г., Родионова Ж.Ф., Савелова А.А., Феоктистова Е.А., Чуйкова Н.А., Щербина М.П.

**Реферат**

Ключевые слова:

Солнечная система, Луна, физические и химические характеристики метеороидов, низкотемпературные отложения в полярных районах Луны и Меркурия, спектрофотометрические исследования астероидов, Меркурий

Ключевые слова по-английски:

Mercury, spectrophotometric study of asteroids, Solar System, the Moon, the physical and chemical characteristics of the meteoroids, low temperature deposits in the polar regions of the Moon and Mercury

В отчете приводятся результаты исследований по теме НИР госзадания «4.2. Изучение последствий космогенной переработки вещества безатмосферных тел Солнечной системы» (ЦИТИС 115021270029) этапа 2022 г. Основным содержанием проведенных исследований являются разработки, соответствующие этапам выполнения Федеральной космической программы России на 2016 – 2025 годы в части изучения и освоения Луны. На основе результатов дистанционных и прямых исследования, полученных с помощью космической техники, продолжается выделение и предварительное изучение районов вероятных низкотемпературных отложений летучих, в первую очередь, водных льдов. Продолжаются исследования наиболее типичных ударников, образовавших лунные кратеры и более обширные депрессии, относящихся к гигантским кометам, группам астероидов Главного пояса и астероидов, сближающихся с Землей. Выполнены исследования характеристик отдельных районов Меркурия и морфологические исследования поверхности планеты, направленные на подготовку международной миссии «Беппи Колумбо». Полученные данные предполагается использовать при планировании перспективных космических миссий к Луне и Меркурию, интерпретации полученных результатов, а также в учебном процессе при подготовке студентов и аспирантов астрономического отделения физического факультета МГУ и факультета космических исследований МГУ.

## Введение

Выполнение научно-исследовательских работ по этапу 2022 г. характеризовалось решением задач, поставленных в Федеральной космической программе России на 2016 – 2025 годы. В части осуществления фундаментальных исследований в космосе Федеральной космической программой (ФПК) предусматривается создание не менее 5 космических аппаратов для проведения углубленных исследований Луны с окололунной орбиты и на ее поверхности автоматическими космическими аппаратами, а также для доставки образцов лунного грунта на Землю. В отчетном этапе продолжались работы по уточнению характеристик районов предполагаемых мест посадки космических аппаратов «Луна-25» и «Луна-27». Как известно, после утверждения правительством РФ Федеральной космической программы был оформлен проект «Программа исследования и освоения Луны на период до 2030 года и дальнейшую перспективу». Для обеспечения выполнения этого проекта на стадии предварительных разработок была сформирована рабочая группа научного обеспечения технических и технологических проблем по созданию космической техники нового поколения и определения текущих и перспективных научных целей. Шевченко В.В. также был включен в эту группу как представитель ГАИШ МГУ. Шевченко В.В. как член рабочей группы вместе с сотрудниками продолжал исследования в части поисков и использования естественных ресурсов Луны и решения других фундаментальных и прикладных задач. В программе работ по этапу 2022 г. предполагалось выполнить ряд задач, соответствующих указанным директивным решениям. В последнее время появились разработки, согласно которым значительная часть астероидов, падающих на лунную поверхность, не испаряется в результате высокотемпературных ударных процессов. В этом случае механически разрушенный астероид остается внутри образованного им кратера. Таким образом, предполагается, что при падении «медленного» астероида на поверхность Луны внутри ударного кратера сохраняется существенная часть материала ударника и, следовательно, его доставка на Землю может быть экономически выгодной. Этот вывод вытекает из обобщения результатов исследования последних лет, согласно которым металлические и каменные астероиды в различной степени могут содержать включения редких и редкоземельных элементов, представляющих особую ценность при развитии высокотехнологичных производств на Земле. Наряду с лунными исследованиями был выполнен ряд исследований Меркурия, относящихся к подготовительному периоду космической международной миссии «БепиКоломбо» («BepiColombo»). Космическая миссия осуществляется Европейским космическим агентством и Японским агентством аэрокосмических исследований. КА «БепиКоломбо» запущен 19 октября 2018 г. и прибывает к Меркурию в 2025 г. В первую очередь эти работы касались сравнительного анализа южных полярных областей Меркурия и Луны, которые при определенных условиях можно рассматривать как обладающих похожими аномальными свойствами. Значительный комплекс исследований был посвящен астероидам Главного пояса и астероидам, сближающимся с Землей.

Полученные по всем направлениям научные результаты использовались в учебных курсах и лекциях, предназначенных для подготовки квалифицированных специалистов данного профиля.

## Основная часть

Бережным А.А. и Шевченко В.В. с соавторами исследовано поведение ОН/Н<sub>2</sub>О-содержащих соединений на поверхности Луны. Была изучена корреляция между содержанием ОН/Н<sub>2</sub>О на поверхности Луны и минеральным составом лунного грунта (содержанием плагиоклаза, TiO<sub>2</sub> (ильменитом) и Mg-содержащей шпинелью). Было установлено, что спектральные свойства участков лунной поверхности с низким содержанием плагиоклаза или высоким содержанием TiO<sub>2</sub>/Mg-содержащей шпинелью отличаются низким уровнем гидратирования в лунный полдень. Эти результаты можно объяснить тем, что данные минералы содержат меньше сильно связанного гидроксила, который не удаляется к полудню. Амплитуда вариаций ширины линии на 3 мкм, вызванной наличием ОН/Н<sub>2</sub>О, увеличивается с содержанием TiO<sub>2</sub>. Таким образом, содержащие минералы, содержащие титан, обладают более сильной способностью адсорбировать протоны солнечного ветра в связанные состояния с низкой энергией, а также способны адсорбировать и десорбировать ОН/Н<sub>2</sub>О в течение лунного дня.

Также была усовершенствована модель поведения ОН/Н<sub>2</sub>О на Луне в рамках приближения реалистичной шероховатой поверхности. Содержание ОН/Н<sub>2</sub>О значительно изменяется на шкале порядка нескольких см, причем амплитуда таких вариаций достигает двух порядков на широте 75 градусов. Данная модель способна воспроизвести вариации параметров линии на 3-мкм, наблюдаемой в спектрах «M<sup>3</sup> data». На умеренных широтах обнаружена аккумуляция ОН на пониженных участках, освещаемых Солнцем только в полуденное время. Таким образом, данные результаты являются доказательством того, что учет шероховатости поверхности является критическим параметром для понимания наблюдаемого поведения ОН/Н<sub>2</sub>О на поверхности Луны.

Бережным А.А. с соавторами проведен анализ петрологического и минералогического состава поверхности Луны. Были исследованы геологические особенности кратеров Лавуазье С, Лавуазье Е, Лавуазье F и Лавуазье Н, расположенных на границе между морями и материками, на основании данных об элементном составе, петрологии, минералогии и морфологии этих районов. Подтверждено присутствие морских базальтов и темных депозитов из пород мантии на дне этих пяти кратеров. На основании исследования инфракрасных спектров обнаружено присутствие пигеонита (или ортопироксена в норите) в кратерах Лавуазье, Лавуазье F и Лавуазье Н, а также наличие аугита в кратерах Лавуазье С и Е. Данное исследование также важно для поиска лунных ресурсов и выбора мест для посадки будущих лунных космических аппаратов.

Бережным А.А. с соавторами изучено поведение атомов щелочных металлов в экзосферах небесных тел Солнечной системы. Был проведен детальный обзор исследований поведения атомов натрия и калия в экзосферах небесных тел Солнечной системы. Эмиссионные линии натрия и калия в оптической области спектра наблюдаются в экзосферах Меркурия, Луны и галилеевых спутников Юпитера. В течение последнего десятилетия новые наблюдения с борта космических аппаратов полностью изменили наши представления о поведении атомов щелочных металлов в экзосферах Луны и Меркурия. Были систематизированы результаты наблюдений линий натрия и калия в экзосферах Луны и Меркурия. Рассмотрены источники и стоки атомов щелочных металлов в этих экзосферах с учетом влияния магнитосферы. Критически рассмотрены теоретические модели поведения атомов натрия и калия в экзосферах Луны и Меркурия, созданные на основании имеющихся наблюдательных данных. Исследована возможность

отправки ударника для столкновения с Меркурием с целью изучения процессов кратерообразования на Меркурии и физических параметров верхнего слоя реголита этой планеты.

Бережным А.А. с соавторами проведен анализ параметров оранжевых полос FeO и CaO во время болидных явлений в атмосфере Земли. Были рассмотрены возможности получения оптических спектров горячих облаков, образующихся во время проведения лазерных экспериментов, с целью интерпретации спектров болидов в атмосфере Земли. Было найдено, что лабораторные спектры излучения оранжевых полос FeO более похожи на спектры FeO в земных болидах по сравнению с хемилюминесцентными спектрами FeO. Во время лазерных экспериментов были получены спектры оранжевых полос FeO и CaO при различных давлениях с целью нахождения наилучшего соответствия между лабораторными спектрами и спектром болида Бенешов, достигнутого при давлении воздуха в 7-10 раз выше, чем давление воздуха на высоте излучения полос FeO и CaO в болиде Бенешов. Интенсивность полос FeO практически не зависит от давления, в то время как интенсивность излучения полос CaO резко возрастает с увеличением давления воздуха. Эти наблюдения были объяснены тем, что образование CaO происходит при реакции связывания атомов кальция с кислородом воздуха. Таким образом, лазерные эксперименты помогают установить детали физико-химических процессов во время метеорных явлений в атмосфере Земли. Также были рассчитаны теоретические спектры инфракрасной системы полос CaO в диапазоне температур 1000–8000 К. Проведено сравнение теоретических спектров с экспериментальными спектрами инфракрасной системы полос CaO, полученными во время лазерных экспериментов. Найдено, что температура возбуждения линий атомов Ca, колебательная и вращательная температуры молекул CaO неравны, что свидетельствует об отсутствии локального термодинамического равновесия. Температура возбуждения линий атомов Ca близка к 10000 К, колебательная температура CaO 350–5000 К, а вращательная температура CaO меньше 2000–3000 К. Более того, вращательная температура заметно отличается для различных колебательных переходов. Обнаружены также значительные различия между длинами волн и вероятностями переходов теоретических спектров, полученных на основании базы данных EXOMOL, и лабораторными спектрами. Проведены расчеты равновесного химического состава горячих облаков, полученных при лазерном нагреве мишеней из Fe и CaCO<sub>3</sub>. Рассчитаны времена протекания основных реакций с участием Fe- и Ca- содержащих соединений на основании измеренных констант скоростей этих реакций. Оценены условия закалки химического состава лазерно-образованных облаков.

Бусаревым В.В., Савеловой А.А., Щербина М.П. с соавтором проведено изучение спектров отражения астероидов, находившихся вблизи перигелия (19 Фортуны, 52 Европы, 102 Мириам, 177 Ирмы, 203 Помпеи, 250 Беттины, 266 Алины, 379 Гуенны и 383 Янины). В результате исследования показано, что минералогия их вещества является низкотемпературной и в основном соответствует ранее установленной классификации. В то же время на спектрах 8 астероидов (за исключением 102 Мириам) впервые обнаружены значительные отклонения, выходящие за спектральные границы их таксономических типов при отсутствии изменений спектральной прозрачности земной атмосферы на интервалах времени меньших и превышающих время экспозиции. Такие особенности можно интерпретировать как рассеяние света подвижной (или неоднородной) пылевой экзосферой, образующейся у этих астероидов вблизи перигелия в процессе сублимации

льдов при наиболее высоких подсолнечных температурах. Кроме того, как следует из данных спутников GOES-16 и SOHO, на рассматриваемые астероиды в конце ноября 2020 г. (за 10 дней до начала наших наблюдений) оказали воздействие сильная солнечная вспышка в рентгеновском диапазоне и связанная с ней ударная волна в солнечном ветре. Можно предполагать, это привело к дополнительному усилению сублимационной активности астероидов и проявлений пылевой экзосферы.

Бусаревым В.В., Щербина М. П. с соавторами был проведен анализ наблюдений, выполненных с декабря 2021 по март 2022 года на полуавтоматическом телескопе RC-600 КГО ГАИШ (Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ). Были проведены *UBVRI*-наблюдения 56 астероидов Главного Пояса и АСЗ преимущественно примитивных типов, движущихся вблизи перигелия. Целью наблюдательной программы был охват максимального числа астероидов для уточнения их спектрального класса, а также выявления признаков вероятной квазиодновременной сублимационной активности. Приблизительно пятая часть астероидов не имела определённого спектрального класса, который удалось оценить по аппроксимированным спектрам отражения этих тел по нашим многополосным данным. Некоторые астероиды, а именно 145 Адеона, 779 Нина, 521 Бриксия и 322 Фео, имели явные признаки сублимационной активности, а у астероидов 751 Фаина, 762 Пулкова и 778 Теобальда можно предполагать наличие сублимационной активности. Для всех включенных в данную наблюдательную программу астероидов проведен сравнительный анализ физических и динамических параметров, таких как диаметр, период вращения вокруг собственной оси, большая полуось орбиты, эксцентриситет и наклонение орбиты.

Бусаревым В.В., Щербина М.П. с соавторами продолжено изучение сублимационно-пылевой активности ряда астероидов примитивных типов Главного пояса (ГПА), которая коррелирует с положением астероидов на перигелийном участке орбиты. Данная особенность приводит к предположению о том, что такая активность обусловлена сублимационным (кометным) механизмом, т. е. выбросом пылевых частиц с поверхности испаряющихся льдосодержащих слоев. Предполагается, что эти слои обнажаются вследствие соударений между астероидами ГПА. Однако при соударениях может происходить и прямой выброс пылевого вещества (ударный механизм). В данном исследовании рассмотрены оба механизма. Проведена количественная оценка частоты и эффективности соударений. Показано, что частота столкновений астероидов-ударников, обладающих кинетической энергией, превышающей  $(1-3) \times 10^{10}$  Дж (достаточной для выброса значительного количества пыли), с астероидом-мишенью диаметром  $\sim 100$  км (на примере астероида 145 Адеона) составляет до  $\sim 2$  год $^{-1}$ . При характерном времени 0.01 года проявления пылевой активности в случае ударного механизма из примерно 300 крупных астероидов ГПА диаметром более 100 км в любой момент времени несколько астероидов может находиться в активном состоянии. Отмечено согласие этой оценки с наблюдениями. Для обеспечения эффективности кометного механизма, столкновения должны быть мощнее (характерная энергия  $10^{13}$  Дж), чтобы вскрывать льдосодержащие слои на достаточно большой площади (до 0.1 кв. км). Частота мощных столкновений мала, но участки 2 вскрытых льдосодержащих слоев существуют долго. Всплески солнечной активности и нагрев при прохождении астероида по перигелийному участку орбиты могут обеспечить наблюдаемую частоту проявлений сублимационной активности крупных ГПА астероидов примитивных типов (их насчитывается около 200). Согласно

нашей модели, в каждый момент времени ~ 1 крупный астероид находится в активном состоянии. Нужны подтверждения в дальнейших наблюдениях.

Пугачевой С.Г., Родионовой Ж.Ф., Скобелевой Т.П., Феоктистовой Е.А., Шевченко В.В. подготовлен и опубликован сборник «Наименования форм рельефа Луны», содержащий данные об утвержденных МАС названиях деталей рельефа лунной поверхности на латинском и русском языках. В сборнике подробно описана история появления первых наименований на зарисовках Луны и расширения системы номенклатуры по мере совершенствования телескопических и космических изображений. В каталоге все наименования сгруппированы в таблицы согласно морфологическому типу образования: болота, борозды, горы, гряды, долины, заливы, кратеры, моря, мысы, озера, океан, равнина, сбросы, цепочки. Таблицы содержат следующую информацию в алфавитном порядке латинского языка: тип рельефа, название кратера, имя, далее на русском языке даны название, страна, область деятельности, годы жизни, широта, долгота, размер, год утверждения названия МАС. Отдельная таблица содержит названия 83 форм рельефа в местах посадок КК «Аполлон». Для удобства пользования в каталоге приведены названия форм рельефа Луны в алфавитном порядке русского языка. Кратеры, пики, мысы гряды на Луне называют (посмертно) именами астрономов и выдающихся ученых других специальностей. Общее правило планетной номенклатуры – не использовать имена политических и религиозных деятелей, полководцев и философов XIX, XX и XXI веков. Данное издание уже стало востребованным в научных коллективах, проводящих исследования Луны астрономическими, геологическими, геохимическими и космическими методами.

Родионовой Ж.Ф., Шевченко В.В. с соавторами выполнена обзорно-аналитическая работа по исследованию и картографированию Луны космическими аппаратами и кораблями. В работе показано, что в процессе составления «Обзорной карты Луны» масштаба 1:13 000 000 были изучены характерные особенности лунного рельефа, отобраны и обработаны самые подробные данные лазерного высотомера LOLA космического аппарата LRO, использовано программное обеспечение ArcGIS 10.1. В ходе разработки цветовой шкалы для отображения высот на карте была учтена различная природа рельефа на видимом и обратном полушариях, и решена задача отображения характерных форм рельефа на всех интервалах высот. Так, например, показано, что дно Моря Дождей оказалось глубже в северной части по сравнению с южной, а дно Моря Ясности в центральной части глубже, чем на периферии. На основе Обзорной карты Луны проведён представленный в данной работе обзор исследований лунной поверхности космическими аппаратами и пилотируемыми кораблями «Аполлон», показаны места всех посадок на лунную поверхность, обсуждены планируемые в будущем полеты к Луне различных стран. Обзорная карта Луны является научно-справочным картографическим произведением. Картографические материалы были использованы при выборе основного и резервного мест посадки автоматической лунной станции (АЛС) «Луна-25» в южной приполярной области Луны, а также послужат при реализации проектов АЛС «Луна-26», «Луна-27» и «Луна-28».

Феоктистовой Е.А., Родионовой Ж.Ф. с соавтором выполнено сравнение морфологических характеристик популяций ударных кратеров Луны и Меркурия. Наличие террас и разломов на внутренних склонах характерно для большинства (65%) кратеров Меркурия, в то время как на Луне доля таких кратеров составляет лишь 7,4%.

Дно 49% кратеров Меркурия частично или полностью заполнено лавой, что указывает на период интенсивного вулканизма на Меркурии в прошлом. Для сравнения, доля таких кратеров на Луне составляет всего 11%. Центральные поднятия (холмы, пики, хребты) имеются у 40% кратеров Меркурия. На Луне доля таких кратеров составляет 21%. Около половины всех кратеров Меркурия (45,5%) расположены в переходной зоне между континентами и равнинами. Доля таких кратеров на Луне составляет всего 2,6%. Таким образом, показано, что активность интенсивных эндогенных процессов на Меркурии была более выраженной, чем на Луне.

Феоктистовой Е.А., Родионовой Ж.Ф. с участием студента-практиканта Слодарж Н.А. был выполнен статистический анализ морфологических особенностей 3622 кратеров, расположенных в полярных областях Луны, который показал, что большинство кратеров в полярных областях Луны можно отнести к 3-му и 4-му классам сохранности по нашей классификации (40 и 30% соответственно). Эти кратеры имеют сглаженный или разрушенный гребень вала. Примерно 20% кратеров относятся ко 2-му классу (кратеры с четким гребнем). Пропорции свежих кратеров (класс сохранности 1) и разрушенных кратеров (класс сохранности 5) в полярных областях Луны примерно одинаковы: 5 и 4,6% соответственно. Средние глубины кратеров увеличиваются с ростом диаметров. В южной полярной области они больше, чем в северной (от 1,3 км для кратеров диаметром 10-20 км до 4,3 км для кратеров диаметром более 100 км. В северной части (от 1 км до 3,2 км), что можно объяснить наличием лавы на дне многих кратеров в этой области. Средние глубины кратеров в полярных областях, расположенных на видимой и обратной сторонах Луны практически одинаковы (расхождения наблюдаются для кратеров диаметром 50-60 км (0,5 км) и 90-100 км (0,7 км). Анализ максимальных глубин кратеров в полярных областях Луны показал, что в северной части насчитывается всего 59 кратеров глубиной более 5 км, при этом 16 кратеров находятся на видимой стороне и 43 кратера - на обратной. В южной полярной области насчитывается 109 кратеров глубиной более 5 км (72 из них находятся на видимой стороне и только 37 - на обратной). Список десяти самых глубоких кратеров в Северном полярном регионе включает: Зоммерфельд (7,9 км), Стеббинс (7,7 км), Миланкович (7,3 км), Рождественский (6,9 км), Шварцшильд (6,8 км), Кремона (6,6 км), Хейн (6,6 км), Белькович (6,3 км), Тихов (6,3 км), Авогадро (6,2 км). В южной полярной области Луны такие кратеры глубже: Кабео (10,1 км), Зееман (9,5 км), Планк (9,3 км), Буссенго (9,2 км), Пецваль (9,2 км), Скотт (9,1 км), Бейли (8,8 км), Сикорский (8,7 км), Дригальский (8,7 км), Амундсен (8,5 км). Существенную роль здесь сыграло расположение большинства кратеров южной полярной области в глубоком гигантском бассейне Южный полюс - Эйткен. Данная работа кроме фундаментального значения имеет существенный прикладной характер, поскольку предоставляет материал для выбора мест посадки при реализации перспективных лунных миссий.

Чуйковой Н.А., Насоновой Л.П., Максимовой Т.Г. проведены исследования ранних этапов эволюции Луны как планетного тела. Для раннего этапа развития Луны, с учетом квадратичного приближения, определены топография ее поверхности и возможное распределение аномалий гравитационного потенциала и аномалий плотности в ее недрах.

Чуйковой Н.А., Насоновой Л.П., Максимовой Т.Г. проведен анализ современных данных о движении земной коры, найдены глобальные характеристики вертикальных движений, как для всей Земли, так и для отдельных регионов. Определены причины таких движений. Проведен анализ взаимосвязи кинематических явлений и изменений климата

на Земле с наличием Луны и с динамикой системы «Земля-Луна». Сделан вывод о возможной тектонической пассивности Земли в случае отсутствия Луны.

Шевченко В.В. на основе морфологических исследований ударных мегаструктур на Луне, а также особенностей поверхности Весты и Цереры построил модель событий во внутренней части Солнечной системы в период 4,5 – 4,0 млрд. лет назад. По результатам кратерной статистики и данным о возрасте образцов, определенном по отношению  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , гигантский лунный бассейн «Южный полюс – Эйткен» мог сформироваться в период от 4.25 до 4.33 млрд. лет назад. В ГАИШ МГУ был проведен комплексный анализ распределения в бассейне ЮПЭ химического состава поверхностных пород и мегарельефа. В результате выявлены концентрические кольца, образующие ударную структуру. Диаметр внешнего кольца составляет 3500 км. Среднее отношение максимальной глубины депрессии к диаметру бассейна составляет величину 0.0034. По другим оценкам это отношение может составлять 0.0037. Данная характеристика депрессии ЮПЭ имеет аномально малую величину. Луноход «Юйту-2» прошел более 1300 м по лунной поверхности и сделал более 1000 снимков окружающего ландшафта вблизи центра этой ударной структуры. Признаки пород мантии, богатых оливином, до сих пор не обнаружены, что могло бы указывать на значительное проникновение ударника в лунную кору или верхнюю мантию. Предполагаемое направление падения ударника составляет угол с плоскостью лунного экватора (или плоскостью эклиптики, что в первом приближении одно и то же) около  $75^\circ$ . Таким образом, движение гипотетического ударника внутри Солнечной системы происходило по траектории (или орбите), почти нормально ориентированной к плоскости эклиптики. Ближайшим по времени и хорошо изученным примером может служить движение в Солнечной системе гигантской кометы Хейла-Боппа (1997). Согласно расчетам плотность вещества ударника, образовавшего ударную структуру «Южный полюс – Эйткен», была менее  $1 \text{ г/см}^3$ . Скорость падения достигала около 60 км/с, а его размеры составляли от 50 км до 60 км. Подобные характеристики свойственны ядрам крупных кометных тел. В монографии Дж. Бирна (2016) можно найти достаточно примеров подобных структур с отношением «глубина-диаметр» в пределах 0.003–0.005, которые могли быть образованы при падении на Луну ударников ледяного состава с модельной плотностью вещества, не более  $1.0 \text{ г/см}^3$ , и скоростью соударения около 60 км/с. С большой долей вероятности в первые 500 млн. лет лунной истории основные формы рельефа на поверхности земного спутника были сформированы падением гигантских комет, пришедших с окраин Солнечной системы. Другим примером может служить астероид Веста диаметром  $525.4 \pm 0.2 \text{ км}$ . В сентябре 2020 г., ученые Токийского университета заново исследовали метеориты, предположительно пришедшие с астероида. Исследования включали изотопный состав пород этих фрагментов. Оказалось, что Веста подвергалась интенсивной бомбардировке космическими телами в период 4.4–4.15 млрд. лет назад. Исследования также обнаружили богатые аммиаком глины на поверхности карликовой планеты Церера. Аммиак чаще всего встречается во внешней Солнечной системе, поэтому этот материал мог быть занесен на Цереру кометами из Облака Оорта. С использованием данных проекта NASA IBEX можно сделать вывод, что переход Солнечной системы из одного галактического облака в другое совпал по времени с катастрофическим перемещением гигантских комет из Облака Оорта во внутреннюю область Солнечной системы. По данным проекта NASA IBEX в настоящую эпоху Солнечная система



находится в Local Cloud и движется в направлении Altair со скоростью 15 – 25 км/с. При сохранении этой схемы движения в указанную эпоху (4,5 – 4,0 млрд. лет назад) Солнечная система находилась на границе галактических облаков Local Cloud и G Cloud. Имеют ли эти два одновременных события какую-либо связь остается неизвестным и требует дополнительного изучения.

Шевченко В.В. в соавторстве с Зеленым Л.М. (ИКИ РАН) продолжил исследования перспективных ресурсов редких и редкоземельных металлов в ближнем космосе. В последние годы в аналитических обзорах эксперты все чаще обращают внимание на рост дефицита редких и редкоземельных металлов. Согласно прогнозам аналитиков из «Goldman Sachs Group, Inc.» разведанных запасов, например, платины, меди и никеля на Земле осталось не более чем на 40 лет. В то же время, согласно этим же прогнозам рынок ключевых редкоземельных металлов, которые используются в области высоких технологий, возрастет с 140-150 тыс. тонн в 2020 году до 200-240 тыс. тонн уже в 2025 году. В середине февраля 2019 г. состоялось заседание Президиума РАН, посвященное обсуждению научных основ развития минерально-сырьевой базы высокотехнологической промышленности России. В материалах заседания отмечалось, что некоторыми металлами (медь, никель, олово, вольфрам, молибден, тантал, ниобий, кобальт, скандий, германий, платиноиды, железо) наша страна обеспечена более чем на 15 лет, а такими металлами, как свинец, сурьма, золото, серебро, цинк всего лишь на 10 – 15 лет. Есть дефицитные металлы: уран, марганец, хром, титан, алюминий, цирконий, бериллий, литий, рений, редкие земли иттриевой группы, запасы которых либо уже исчерпаны или находятся на грани исчерпания. Эта ситуация заставляет искать космические источники указанных ресурсов. В настоящее время предполагается, что детальное изучение материальных ресурсов Луны является весьма актуальным, поскольку результаты могут определить перспективные направления научно-технических и технологических разработок в области освоения ресурсов ближайших к Земле тел Солнечной системы. Известно, что 97% редкоземельных металлов на мировой рынок поступает из Китая. Однако, некоторые эксперты полагают, что в ближайшие 15 - 20 лет этот источник мирового масштаба может иссякнуть. В связи с этим следует обратить внимание на резкое ускорение весьма амбициозной лунной программы КНР, основной целью которой является разработка лунных ресурсов. В период 2030–2035 годов в КНР планируется осуществить на спутнике Земли промышленную добычу редкоземельных металлов, включая металлы платиновой группы. В опубликованных программных материалах КНР отмечается также, что по оценкам китайских исследователей осмия, платины и палладия на Луне в тысячу раз больше чем доступных ресурсов на Земле. НАСА США начало осуществление программы «Artemis», предусматривающей освоение отдельных территорий Луны с целью разработки и утилизации природных ресурсов. На основании результатов дистанционных исследований поверхностного вещества Луны, а также с учетом детальных анализов образцов лунных пород, доставленных на Землю, к настоящему времени выявлены области, содержащие РМ и РЗМ. Основным источником РМ и РМЗ в лунных породах являются падающие на поверхность Луны астероиды. Поскольку падение подобных тел происходит постоянно в течении 4,5 млрд. лет, ресурсы РМ и РЗМ на Луне являются неисчерпаемыми. С другой стороны, при скорости падения не более 10 км/с в поверхностном слое Луны сохраняется более 20% массы упавшего тела. Это означает, что утилизация полезных ресурсов не требует применения сложных

горнорудных технологий и ограничивается простым собиранием поверхностного мелкодробленого материала. Астероид М-типа и размером 1 км при скорости падения на лунную поверхность не более 10 км/с (медленный астероид) образует кратер диаметром 20,25 км и глубиной 0,732 км. Согласно расчетным данным внутри такого кратера в донных отложениях сохраняется 915,2 млн. т железа, 6,6 млн. т никеля, 0,33 млн. т кобальта и 1650 т платины и платиноидов. Оценивая значимость возможного наличия подобных ресурсов в одном лишь ударном кратере Луны, достаточно напомнить, что годовая добыча платины на Земле в последние годы составляет всего лишь 170 – 180 т. В то же время, астероид платиновой группы размером в 500 м содержит в 174 раза больше годового производства платины и в 1,5 раза больше известных мировых запасов РЗМ платиновой группы (рутений, родий, палладий, осмий, иридий, платина) на Земле. Полагают, что масса платины и платиноидов на поверхности Луны составляет 14,1 млн. т. В середине 2016 г. было объявлено, что НАСА США выдало разрешение частной компании «Moon Express Inc.» самостоятельно выполнять программу изучения и утилизации лунных природных ресурсов. В своих комментариях по этому поводу глава компании Н. Йен (Naveen Jain) заявил, что в ближайшем будущем «Moon Express Inc.» планирует довести стоимость одного рейса на Луну до 10 млн. долларов. При том, что на лунной поверхности по его словам могут находиться залежи полезных ресурсов общей стоимостью не менее, чем на 16 квадриллионов долларов, освоение Луны может стать прибыльным.

Сотрудники активно участвуют в педагогической работе. Бусарев В.В. читал учебные курсы для студентов Физического факультета МГУ и Факультета космических исследований МГУ. Шевченко В.В., Родионова Ж.Ф., Феоктистова Е.А. разработали методические указания для подготовки курсовых и дипломных работ студентами Факультета космических исследований МГУ.

Результаты изложенных выше научных работ опубликованы в 14 статьях в зарубежных и отечественных журналах, в 7 статьях в сборниках, в 5 книгах, а также представлены в 6 докладах на международных и российских научных конференциях.

### **Заключение**

На данной стадии выполнения работ по теме госзадания НИР «4.2. Изучение последствий космогенной переработки вещества безатмосферных тел Солнечной системы» (ЦИТИС 115021270029) этапа 2022 г. проведены исследования, соответствующие текущему периоду выполнения Федеральной космической программы России на 2016 – 2025 гг. в части изучения и освоения Луны. Результаты исследований показали эффективность примененных методов и подходов к решению таких задач, как определение районов в южной полярности области Луны, наиболее пригодных для дальнейшего изучения с помощью автоматических средств космической техники. Продолжение исследований наиболее типичных ударников, образовавших лунные кратеры и более обширные депрессии, показали, что в поверхностном слое реголита может содержаться вещество, не относящееся к исходным лунным породам. Этот вывод важен как в отношении фундаментальных проблем происхождения и эволюции Солнечной системы, так и в прикладном отношении, поскольку при дальнейшем углубленном изучении может привести к решению задач утилизации лунных ресурсов в интересах земных высокотехнологических производств. Полученные результаты при

дальнейшей разработке будут использованы для формирования рекомендаций по выбору мест на лунной поверхности для посадки аппаратов нового поколения. Отдельные районы будут рекомендованы для более тщательного изучения с помощью орбитальных аппаратов и, возможно, как предварительные цели пилотируемых экспедиций. Наряду с лунными исследованиями был выполнен ряд исследований Меркурия, относящихся к подготовительному периоду успешно начатой космической международной миссии «БепиКоломбо» («BepiColombo»). Вся полученная новая научная информация также будет использована в учебном процессе на астрономическом отделении Физического факультета и на Факультете космических исследований МГУ с целью подготовки специалистов, способных в последующем решать задачи по изучению Луны и космического пространства, предусмотренные Федеральной космической программой России на 2016 – 2025 гг. Данный отчет по госзаданию был заслушан и утвержден Координационным советом по астрофизике ГАИШ МГУ        декабря 2022 г.