

НАПРАВЛЕНИЕ 8. МАЛЫЕ ТЕЛА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Кураторы направления: А.В. Захаров (ИКИ), Л.В. Рыхлова (ИНАСАН).

8.1	Проект 8.1: Исследование физико-механических свойств реголита кометных ядер на основе результатов миссий к кометам и астероидам и новых наблюдений дисков экзопланетных систем в стадии формирования	ИКИ РАН	Ксанфомалити Л.В., Эйсмонт Н.А.
8.2	Проект 8.2: Происхождение и эволюция метеоритного вещества и космической пыли	ГЕОХИ РАН	Назаров М.А.
8.3	Проект 8.3: Свойства, динамика и проявления лунной пыли	ИКИ РАН	Попель С.И.
8.4	Проект 8.4: Эволюция вещества метеоритов при ударных процессах на ранних этапах формирования Солнечной системы	ИКИ РАН	Герасимов М.В.
8.5	Проект 8.5: Комплексное исследование избранных астероидов и комет небесно-механическими и астрофизическими методами	ИНАСАН	Рыхлова Л.В., Багров А.В., Емельяненко В.В.
8.6	Проект 8.6: Небесно-механические факторы, вызывающие существенную трансформацию движения малых тел Солнечной системы	ИПМ им. М.В. Келдыша РАН	Сидоренко В.В.
8.7	Проект 8.7: Форма, состав и физико-механические свойства малых силикатных и ледяных тел Солнечной системы	ГЕОХИ РАН	Слюта Е.Н.
8.8	Проект 8.8: Изучение процессов формирования и эволюции поверхности, а также состава ядра кометы 67Р Чурюмова-Герасименко по данным миссии «Розетта» в сравнении с таковыми ядер других комет	ГЕОХИ РАН	Базилевский А.Т.
8.9	Проект 8.9: Динамика пыли на безатмосферных телах. Методы исследований	ИКИ РАН	Захаров А.В.

Проект 8.1. Исследование физико-механических свойств реголита кометных ядер на основе результатов миссий к кометам и астероидам и новых наблюдений дисков экзопланетных систем в стадии формирования.

Тема 8.1.1. Исследовались процессы эволюции и разрушения кометных ядер вытянутой и гантеле-подобной формы. Рассматривается также альтернативная гипотеза, возникающая при анализе эволюции ядра кометы 67Р/Чурюмова-Герасименко, о слиянии планетезимальных тел с разными физическими свойствами и образовании агрегатного ядра, устойчивого к механическим напряжениям.

В работах Л.В. Ксанфомалити, опубликованных в 2015 г. совместно с К.И. Чурюмовым и Л.М. Зеленым, рассматривались свойства ядра кометы 67Р/Чурюмова-Герасименко на основе данных наблюдений, полученных в ходе миссии РОЗЕТТА-ФИЛЫ. По измерениям

приборов, установленных на орбитальном аппарате, обнаружены пары воды, окись углерода, двуокись углерода, аммиак, метан, метанол, формальдегид, сероводород, цианистый водород, диоксид серы, дисульфид углерода, сера, натрий и магний. Газообразные составляющие комы включают ряд соединений, указывающих на важные особенности возникновения небесного тела. Само ядро кометы имеет резко неправильную форму с двумя частями, соединенными более узкой перемычкой, с общими размерами 1.3 x 3.2 x 4.1 км.

Были продолжены исследования процессов эволюции и разрушения кометных ядер вытянутой и гантеле-подобной формы, начатые при изучении ядра кометы Хартли-2. В работе рассматривается также альтернативная гипотеза, возникающая при анализе эволюции ядра кометы 67P/Чурюмова-Герасименко. Высокая механическая прочность материала шейки ядра приводит к предположению о слиянии планетезимальных тел с разными физическими свойствами и образовании агрегатного ядра, устойчивого к механическим напряжениям. Расчеты устойчивости ядер комет к разрушению также продолжены.

Руководитель темы: Л.В. Ксанфомалити, ИКИ РАН, ksanf@rssi.ru

Публикации: по данной теме в 2015 году опубликованы 4 статьи.

8.1.2. Разработка методов управления малыми астероидами с целью их захвата на орбиту спутника Земли за счет использования гравитационных маневров в системе Солнце-Земля и системе Земля-Луна

В рамках проведенных исследований разработан способ захвата малых околоземных астероидов или их фрагментов на орбиту спутника Земли. Реализуемость способа показана на примере двух астероидов, для захвата которых достаточно в номинальном случае сообщить астероиду импульс скорости в пределах 20 м/с, переводящий его на серию гравитационных маневров в окрестности Земли и Луны.

В настоящей работе сделан следующий шаг в решении задачи управления астероидами: разработан способ их захвата на орбиту спутника Земли, опирающийся на возможности многократных гравитационных маневров в системе Солнце-Земля и системе Земля-Луна. Идея метода заключается в изначальном переводе астероида на орбиту, резонансную с Землей, с последующими многократными гравитационными маневрами у Луны при сохранении резонансности с движением Земли. Подтверждение выполнимости такого подхода при сохранении запаса рабочего тела в допустимых по техническим возможностям современных носителей пределах получено моделированием управления для двух околоземных астероидов.

Руководитель темы: Эйсмонт Натан Андреевич, ИКИ РАН, neismont@rssi.ru

Публикации: по данной теме в 2015 году опубликованы 6 статей.

Проект 8.2. Происхождение и эволюция метеоритного вещества и космической пыли.

Проводились исследования процессов испарения метеоритного вещества, первичное изучение, классификация и регистрация новых метеоритов, изучение лунных метеоритов и микрометеоритов из ледникового покрова Новой Земли.

На основе экспериментальных данных об испарении Ca–Al–включений в углистых хондритах впервые в газовой фазе обнаружены сложные молекулярные формы (AlSiO, MgAlO, CaTiO₃). Эти многоатомные формы (кластеры) в отличие от простых молекулярных образований (одноатомных и двухатомных частиц) содержат различные по своим индивидуальным свойствам элементы и / или их оксиды.

Выполнено первичное изучение 11 новых метеоритов.

Впервые в лунных метеоритах обнаружено включение кордиерита в симплектитовом срастании с плеонастом.

На основе электронно-микроскопических исследований проведена структурная классификация микрометеоритов Новоземельской коллекции.

Руководитель проекта: Назаров Михаил Александрович, ФГБУ Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН)

nazarov@geokhi.ru

Публикации: по данному проекту в 2015 году опубликованы 6 статей.

Проект 8.3. Свойства, динамика и проявления лунной пыли.

Показано, что в приповерхностной лунной плазме могут возбуждаться высокочастотные волны с частотами в диапазоне ленгмюровских и электромагнитных колебаний, а также пылевые звуковые линейные и нелинейные волны. В окрестности лунного терминатора существует область, которая представляет собой аналог плазменного слоя. Такой слой создает потенциальный барьер в плазме. В области терминатора возникают электрические поля с напряженностью $E \sim 300$ В/м, которые приводят к подъему положительно заряженных микронных пылевых частиц на высоты порядка нескольких десятков сантиметров. Показано, что важным механизмом образования пыли над Луной являются удары высокоскоростных метеороидов о ее поверхность. Для различных высот над Луной найдены значения среднего числа частиц реголита, покидающих лунную поверхность за счет этого механизма.

Руководитель проекта: Попель Сергей Игоревич, ИКИ РАН, serg.i.popel@gmail.com

Публикации: по данному проекту в 2015 году опубликовано 17 статей и докладов.

Проект 8.4. Эволюция вещества метеоритов при ударных процессах на ранних этапах формирования Солнечной системы.

В 2015 году проект не получал субсидии от Программы. Тем не менее, были проведены определенные работы по проекту с целью накопления экспериментального материала в ожидании продолжения финансирования работ. Тема 8.4 состоит из двух подтем:

Тема 8.4.1. Экспериментально изучены особенности синтеза сложных органических соединений в азотно-метановой атмосфере при высокоскоростных ударных событиях, происходящих при падении каменных ударников.

Показано, что азотно-метановая атмосфера способствует синтезу сложных органических веществ при высокоскоростных ударных событиях с участием каменных тел даже при малом содержании в ней метана. При этом падающие тела могут не содержать углерод, водород и другие химические элементы, необходимые для образования органики. В подобных условиях, заметный вклад в ударно-индуцируемый синтез сложных органических веществ, по-видимому, вносят гетерогенно-каталитические реакции, в том числе реакции типа Фишера-Тропша.

Проведены эксперименты по модельному ударному испарению перидотита – минерального аналога каменных астероидов – в азотно-метановой атмосфере.. Методом пиролитической газовой хроматографии в сочетании с масс-спектрометрией показано, что твердые конденсаты, полученные в лазерных экспериментах, содержат относительно сложные низко- и высокомолекулярные (керогеноподобные) органические соединения.

Отработанные методики анализа будут использованы в дальнейшем для исследования органического вещества в твердых продуктах ударно-испарительного преобразования в инертной и восстановительной газовой атмосфере углистых хондритов Murchison, Kainsaz и Efremovka.

Публикация: по данной теме в 2015 году опубликована 1 статья.

Тема 8.4.2. Проведены модельные эксперименты по высокотемпературному испарению одного из основных минералов метеоритов – оливина, с целью изучения особенностей ударно-испарительной модификации его состава.

Экспериментально установлено, что в условиях высокотемпературного испарения, характерного для высокоскоростных ударных процессов, улетучивание вещества из оливина происходит при ведущей роли энстатитового ($MgSiO_3$) кластера.

Высокоскоростные ударные процессы играли фундаментальную роль в преобразовании силикатного вещества в Солнечной системе, как на допланетном этапе ее развития, так и на ранних этапах аккумуляции планет. Ударные процессы рассматриваются как один из механизмов образования хондр метеоритов. Формирование химического состава летучих веществ в парогазовом облаке во многом зависит от состава конденсированных силикатных частиц, участвующих в гетерогенных химических процессах. Изменение химического состава ударного расплава происходит в результате селективного испарения, основные закономерности которого оцениваются по индивидуальной летучести входящих в расплав веществ.

Наши эксперименты, моделирующие высокотемпературное испарение при ударном нагреве вещества, показывают, что в этих условиях испарение идет преимущественно по кластерному типу. Такое испарение характеризуется выходом из расплава в парообразное состояние атомно-молекулярных группировок (кластеров), что обеспечивает одинаковую летучесть входящих в группировку элементарных веществ, индивидуальные свойства которых могут сильно различаться между собой. С другой стороны, образуются предпосылки для формирования объектов с составами, стехиометричность которых задается составом кластеров.

Руководитель проекта: Герасимов Михаил Владимирович, зав. лаб. № 532 ИКИ РАН
(mgerasim@mx.iki.rssi.ru)

Руководитель темы 8.4.1: Зайцев Максим Андреевич, м.н.с. лаб. № 532 ИКИ РАН,
(mzaitsev@iki.rssi.ru).

Руководитель темы 8.4.2: Герасимов Михаил Владимирович.

Проект 8.5. Комплексное исследование избранных астероидов и комет небесно-механическими и астрофизическими методами.

Тема 8.5.1. Исследование динамических и физических характеристик астероидов и комет, сближающихся с планетами.

Проведены спектральные и высокоточные фотометрические наблюдения астероидов, сближающихся с Землей и планетами земной группы, с целью изучения химико-минералогического состава их поверхности на 2-м телескопе пика Терскол и 1-м телескопе в Симеизе и в Краснодаре, в том числе синхронные наблюдения на фотометре и спектрометре, а также астрометрические наблюдения из двух-трех пунктов одновременно.

Проведена комплексная обработка наблюдений.

В ИНАСАН отработывается и применяется методика получения данных о физико-химических свойствах астероидов и комет, что является важным условием изучения их

природы, путей миграции и т.д., а также пополнения базы данных о физических, химических и минералогических свойствах малых тел Солнечной системы.

Для осуществления комплексного изучения каждого объекта исследований мы проведём синхронные или квази-синхронные астрометрические, фотометрические и спектрометрические наблюдения с нескольких обсерваторий

Данные наблюдений обрабатываются и будут опубликованы в начале 2016 г.

По существующему каталогу орбит сближающихся с Землей объектов (NEO) из общего числа 11673 нами было выявлено 52 астероида, относящихся к системе Эксцентрид.

Среди 52 астероидов мы выявили 8 астероидных роев, которым принадлежат 31 астероид.

Получена зависимость характера распределения по долготе перигелия от эксцентриситетов орбит для NEOs.

Можно полагать, что метеорная и астероидная системы Эксцентрид составляют единую популяцию представителей малых тел Солнечной системы, обладающих малыми орбитами большого эксцентриситета.

Астероидные рои (так же как и отдельные астероиды) системы Эксцентрид, сближаясь в районе своих афелиев с орбитой Земли на всем ее протяжении, могут создавать определенную космическую угрозу для Земли. Причем орбиты роев сближаются с орбитой Земли на значительном временном интервале от нескольких дней до полутора месяцев.

Руководитель темы: Рыхлова Лидия Васильевна, вед.н.с. Института астрономии РАН, rыхlova@inasan.ru

Публикации: по данной теме в 2015 году опубликованы 4 статьи.

Тема 8.5.2. Исследование потоков метеорного вещества через околоземное пространство и их динамики.

Проведены наблюдения метеорных потоков Персеиды, Каппа-Цигниды, а также Северные и Южные Дельта-Аквариды на патрульных телевизионных камерах, расположенных в Звенигородской обсерватории ИНАСАН, в Истринском р-не МО, в г. Калуге и п. Михнево Ступинского р-на МО. Впервые получены высокоточные данные о радиантах потока Тауриды и их дрейфе (наблюдения на камере FAVOR) различными способами, один из которых разработан метеорной группой ИНАСАН. Для метеорного потока Персеиды определены основные характеристики: дрейф радианта, распределение метеоров потока по абсолютной звездной величине, приток вещества на Землю в максимуме активности Персеид, параметры орбиты потока.

Продолжены начатые ранее теоретические исследования, которые будут использованы для разработки общего стандарта оценки фотометрических величин метеоров и космического мусора. Получены формулы, позволяющие связать равные фотометрические отклики от метеора и от звезды сравнения для вычисления яркости метеоров. Отлажено написанное ранее программное обеспечение для вычисления фотометрических характеристик метеоров. Ведется разработка фотометрического каталога, который крайне необходим для проведения фотометрической обработки метеорных регистраций, осуществляемой на основе сравнения яркостей метеорных треков и звезд сравнения в кадрах, на которых зарегистрированы метеорные события.

Рассмотрена методика поиска микрометеоритного вещества, обладающего магнитными свойствами, рассеянного в определенных областях поверхности Земли, минимально подверженного уносу этого вещества эрозионными процессами. Это необходимо для получения предварительных оценок концентрации метеоритов, т.е. для получения оценки границы притока метеоритного вещества на Землю при условии однородности его распределения по поверхности Земли.

Базисные Метеорные наблюдения в Институте астрономии РАН проводятся из двух пунктов, расположенных на расстоянии 20 км (пункт 1–Звенигородская обсерватория ИНАСАН (ЗО ИНАСАН), пункт 2 – наблюдательный пункт «Истра» (нп «Истра»)). Для наблюдений использовались широкоугольные телевизионные системы, состоящие из телевизионных камер WATEC 902NUltimate и объективов Computar 6/0.8, 1/2". Метеорные события фиксировались автоматически с помощью программы UFOCapture V2.

Для обработки наблюдательного материала использовались программы UFOAnalazer и UFOOrbit. В результате были вычислены основные параметры (радиант, геоцентрическая скорость, высоты загорания и потухания, орбитальные параметры) для каждого базисного метеора потока Персеид.

Руководитель темы: Багров Александр Викторович, вед.н.сотрудник, Институт астрономии РАН, abagrov@inasan.ru

Публикации: опубликована одна статья

Тема 8.5.3. Исследование процессов миграции малых тел в околоземное пространство.

Показана важность околосолнечных объектов как источника малых астероидов типа Челябинского тела.

Было показано, что существует большая вероятность того, что Челябинский объект сближался с Солнцем в прошлом. Астероиды должны испытывать большие тепловые и приливные воздействия при таких сближениях. Мы изучили динамическую роль околосолнечных состояний астероидов в производстве потока объектов Челябинского типа.

Исследование эволюции орбиты Челябинского объекта показало, что наиболее вероятное время прохождения этого объекта вблизи Солнца хорошо согласуется с космическим возрастом 1.2 миллиона лет, определенным на основе анализа вещества метеорита.

Моделирование динамической эволюции объектов, образовавшихся в результате распада родительского тела вблизи Солнца 1.2 миллиона лет назад показывает, что около четверти первоначальной популяции выживает до современной эпохи. Большинство выживших тел являются типичными околоземными объектами. Частота их столкновения с Землей остается постоянной в течение последних 0.5 миллиона лет. Около трети тел Челябинского типа приближается к Земле со стороны Солнца.

Руководитель темы: Емельяненко Вячеслав Васильевич, вед.н.с. Институт астрономии РАН, vvemel@inasan.ru

Публикация: по данной теме в 2015 году опубликована 1 статья.

Проект 8.6. Небесно-механические факторы, вызывающие существенную трансформацию движения малых тел Солнечной системы.

На примере семейства «плутино» исследована роль резонансов средних движений в появлении в поясе Койпера динамически «горячих» объектов, движущихся по орбитам с большим наклоном к плоскости эклиптики.

В 2016 году предполагается подготовить статью с подробным описанием данного исследования.

Руководитель темы: Сидоренко Владислав Викторович, в.н.с., Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН; vsidorenko@list.ru

Публикации: по данной теме в 2015 году опубликованы 2 доклада.

Проект 8.7. Форма, состав и физико-механические свойства малых силикатных и ледяных тел Солнечной системы.

Все исследованные обыкновенные хондриты характеризуются сильной трехмерной анизотропией физико-механических свойств, которая аппроксимируется вытянутым эллипсоидом с соотношением главных полуосей $a:(b=c)=1.6:1$. Величина и распределение девиаторных напряжений зависят от химического и минерального состава малых тел и

определяются такими основными параметрами, как масса тела, плотность, размеры и форма тела, предел текучести и коэффициент Пуассона.

Тема 8.7.1. Физико-механические свойства каменных метеоритов.

Для исследования были взяты образцы обыкновенных хондритов – метеорита Губара, метеорита Sayh al Uhaymir 001 (SAUH 001) и два разных фрагмента метеорита Царёв. Физико-механические свойства метеоритов исследовались методом комплексного определения пределов прочности при многократном раскалывании и сжатии в соответствии с установленным стандартом (ГОСТ 21153.4-75, Породы горные, 1975). Этот метод также оказался удобным для исследования пространственного распределения физико-механических свойств в отдельном образце размером от 10 до 20 см. Фрагменты метеоритов были разрезаны на три перпендикулярных друг другу пластины толщиной по 20 мм (рис. 19). Каждая пластина при измерении предела прочности на растяжение раскалывалась на кубики полуправильной формы размерами $20 \times (20-30) \times (20-30)$ мм. Предел прочности на сжатие определялся раздавливанием полученных кубических образцов. Всего было сделано более 500 измерений, а количество измерений в одном образце достигало 140.

Было обнаружено, что величина предела прочности на сжатие по одному из трех направлений сильно отличается от остальных двух направлений. Все исследованные обыкновенные хондриты характеризуются сильной пространственной анизотропией физико-механических свойств. Величина анизотропии, т.е. отношение главных полуосей эллипсоида анизотропии достигает $a:(b=c)=1.6:1$, и в среднем по разным фрагментам составляет 1.5. Как правило, длинная ось (a) фигуры исследуемых фрагментов метеоритов совпадает с длинной осью (a_c) эллипсоида анизотропии.

Оцененный предел прочности на сжатие исследованных обыкновенных хондритов с учетом анизотропии составляет 105-203 МПа, а предел прочности на растяжение – 18-31 МПа (табл. 1). Оцененный предела прочности на сжатие углистых хондритов находится в диапазоне 35-85 МПа, а предел прочности на растяжения – в интервале 4-8 МПа.

Тема 8.7.2. Аналитическое решение для гравитационной деформации неравновесной фигуры твердых малых тел Солнечной системы

В этой главе представлено аналитическое решение гравитационной деформации неправильной фигуры малого тела, обладающего пределом прочности и пределом текучести, на основе теории упругости. Пространственная или объемная задача теории упругости в условиях гравитационного сжатия относится к классу задач с обратной

связью, когда любое изменение формы влияет на гравитационный потенциал, и наоборот. Единственной силой, способной преодолеть барьер фундаментальной прочности малого тела и преобразовать его неправильную фигуру в равновесную, шарообразную фигуру планетного тела, является гравитация или сила тяжести. Для вязко-пластичных тел, не обладающих пределом прочности и текучести, данный эффект приводит к набору сложных фигур самогравитирующей вязкой жидкости, например, сфероиды Макларена, эллипсоиды Якоби и т.д. (Chandrasekhar, 1969).

Структурные напряжения рассматриваются в упрощенной модели фигуры малого тела в виде двухосного вытянутого эллипсоида с полуосями $a > b = c$ и с однородным распределением температуры и плотности.

В результате аналитического решения пространственной задачи теории упругости самогравитирующего твердого упругого тела, была получена универсальная функция величины и распределения девиаторных напряжений в исследуемом малом теле.

В результате проведенного анализа и полученного аналитического решения было установлено, что величина и распределение девиаторных напряжений в малом теле зависят от химического и минерального состава и определяется такими параметрами как масса тела, плотность, размеры и форма, предел текучести и коэффициент Пуассона.

Руководитель темы: Слюта Евгений Николаевич, к.г.-м.н., зав. лабораторией геохимии планет, ГЕОХИ РАН, slyuta@mail.ru

Публикации: по данной теме в 2015 году опубликована 1 статья.

Проект 8.8. Изучение процессов формирования и эволюции поверхности, а также состава ядра кометы 67P Чурюмова-Герасименко по данным миссии «Розетта» в сравнении с таковыми ядер других комет.

Установлено, что консолидированный материал ядра кометы имеет зернистое сложение, оценены величины его прочности, обнаружены следы перемещения материала вниз по склонам в виде оползней, падений валунов и осыпания тонкозернистого материала. Составлена сводка полученных к настоящему времени данных по минеральному и химическому составу материала ядра, по химическому и изотопному составу газов комы.

Работа проводилась по двум направлениям: 1) изучение морфологии поверхности ядра кометы 67P с попыткой интерпретации, как наблюдаемые формы рельефа и типы местности были образованы, и как они будут изменяться с течением времени, и 2) изучение состава вещества поверхности и отлетающих от ядра газов и пыли с попыткой понять состав неизмененного вещества ядра и его возможные вариации в пределах ядра кометы 67P и от кометы к комете.

Тема 8.8.1. Геолого-морфологический анализ изображений поверхности ядер кометы 67P.

По этому направлению выполнен геолого-морфологический анализ большого количества снимков, полученных ТВ камерой NavCam, КА «Розетта», на северную часть кометы 67P в период с августа 2014 по январь 2015 года. В это время КА «Розетта» находился на расстояниях от 10 до 30 км от центра ядра, что дало возможность с помощью камеры NavCam получать снимки с разрешением от 0.7 до 3 м. Ядро кометы диаметром около 4 км состоит из двух частей, условно называемых Head (Голова), Body (Тело) и разделяющая их Neck (Шея) (Sierksetal., 2015) (рис. 1). Основные объекты проведенных исследований: уступ Хатор (Nathor), находящаяся его подножия равнинная местность Хапи (Nari) и граничащий с ними район сложного рельефа Анукет (Anuket). Кроме того, с привлечением цифровой модели поверхности (Preuskeretal., 2015) анализировалась геометрия уступа Хатор, что дало возможность оценить прочность консолидированного вещества ядра кометы.

Основные результаты за отчетный период могут быть сформулированы в виде следующих положений:

- На поверхности ядра кометы 67P в пределах исследованных районов видны материалы трех типов: 1) консолидированный материал, выходящий на поверхность на крутых склонах рельефа, 2) валуны или блоки, сложенные этим консолидированным материалом, и 3) рыхлый «тонкозернистый» относительно светлый материал, наблюдаемый на субгоризонтальных поверхностях, в том числе, в пределах Хапи.
- Обнаружены следы перемещения материала вниз по склонам в виде оползней, падений валунов и осыпания тонкозернистого материала (Basilevskyetal., 2015). Эти образования, достигая подножия склона, за счет инерции набранной во время движения вниз могут продолжить движение в субгоризонтальном направлении.
- В пределах Хапи вблизи района Анукет нами и другими исследователями (Thomasetal., 2015) обнаружены формы рельефа декаметрового размера типа эоловой ряби. Они могли быть образованы горизонтальным течением газа, выделившегося в событии типа произошедшего 29 июля 2015 г. мощного газо-пылевого выброса в районе Анукет (http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2015/08/Outburst_in_action).
- Источником упомянутого выброса могли быть обнаруженные нами и другими исследователями (Thomasetal., 2015; El-Maarryetal., 2015) трещины растяжения. Этот выброс произошел вблизи перигелия орбиты кометы 76P (13 августа 2015 г.), когда можно ожидать усиления напряжений в теле ядра, вызванных орбитальными возмущениями

(типа известных лунотрясений в апогее и перигее орбиты Луны при ее движении вокруг Земли). Не исключено, что трещины растяжения и связанный с ними газо-пылевой выброс являются предвестниками разрушения ядра кометы.

– Консолидированный материал ядра имеет зернистое сложение, сложение с размерностью «зерен» от десятков метров-метров до сантиметров-миллиметров, что накладывает ограничения на возможные механизмы образования этого материала.

– Из анализа геометрии уступа Хатор удалось оценить величины прочности слагающего его материала на разрыв, сдвиг и сжатие, которые с учетом поправок на эффект масштаба измеряемого объекта оказались близки к величинам прочности свежеснежного снега при -10°C , хотя по другим свойствам эти материалы сильно различаются.

– Упомянутые геологические процессы, по-видимому, вызываются и поддерживаются сублимацией летучих компонентом материала ядра и, таким образом, должны быть наиболее активны, когда комета находится вблизи Солнца. В свою очередь, интенсификация геологических процессов открывает доступ к материалам богатым летучими компонентами, что должно усиливать активность сублимации.

Тема 8.8.2. Изучение состава вещества поверхности и отлетающих от ядра газов и пыли.

В ходе эксперимента «Rosetta–Philae» ЕКА определение химического состава ядра кометы 67P/Чурюмова-Герасименко проводится как по анализу состава ее комы с помощью приборов, расположенных на КА «Rosetta», так и *in-situ* зондом «Philae», находящимся на поверхности кометы.

Состав поверхности ядра кометы изучался разными методами; результаты, полученные ими, не противоречат, но дополняют друг друга. Отмечено две особенности состава поверхности ядра:

Практически полное отсутствие льда H_2O , как это следует из данных, полученных с помощью спектрометра VITRIS. Лишь в области перешейка были обнаружены следы присутствия на поверхности кометы водяного льда, смешанного с пылью. К тем же выводам пришли исследователи, измерявшие температуру южной приполярной области ядра кометы инструментом MIRO (Microwave Instrument for the Rosetta Orbiter) в миллиметровом (1.6 мм) и субмиллиметровом (0.5 мм) диапазонах.

Присутствие на поверхности кометы органических соединений. Присутствие органических соединений на поверхности 67P подтвердили данные спектрометра VITRIS. Состав органических соединений был определен непосредственно на поверхности кометы с помощью приборов, установленных на зонде «Philae». Было идентифицировано 16

различных органических веществ, в том числе метил изоцианат, ацетон, пропионовый альдегид и ацетамид – вещества, которых ранее в кометах не обнаруживали. Некоторые из этих соединений, в особенности те, которые содержат углерод–азотные связи, играют ключевую роль в синтезе аминокислот, сахаров и нуклеинов, являющихся необходимыми компонентами для зарождения жизни. Происхождение органических молекул в комете неизвестно, но не исключено, что они образовались еще на досолнечной стадии.

Важное космохимическое значение имело определение изотопного состава водорода в молекуле воды кометы 67P. Полученное значение $D/H = 5.3 \times 10^{-4}$ ставит под сомнение тезис о том, что все кометы семейства Юпитера принадлежали только к рассеянному диску (SDO – scattered disc object). Имеющиеся динамические модели также не противоречат предположению, что в состав комет семейства Юпитера могли при определенных условиях войти и долгопериодические кометы, пришедшие из облака Оорта. Кроме того, полученное высокое значение D/H противоречит гипотезе о кометном происхождении воды на Земле даже за счет короткопериодических комет. Заметим также, что, кометы подобные 67P, также вряд ли могли быть источником азота на Земле.

Руководитель проекта: Базилевский А.Т., доктор геол.-мин. наук, заведующий лабораторией сравнительной планетологии ГЕОХИ РАН, atbas@geokhi.ru.

Публикации: по данному проекту в 2015 году опубликовано 6 статей.

Проект 8.9. Динамика пыли на безатмосферных телах.

Рассмотрен вопрос о динамике наночастиц вблизи поверхности Луны. Показано, что ансамбль слабо связанных пылевых частиц тонкой фракции лунного реголита может принимать некоторые свойства газа, а тепловые флуктуации приводить к их левитации и агрессивному воздействию на системы КА и скафандры космонавтов

Работа посвящена анализу двух групп известных проблем, связанных с динамикой лунной пыли в приповерхностных слоях Луны. В первую группу этих проблем входят:

- левитация пыли на малых высотах над поверхностью Луны;
- исключительно сильное разрушительное воздействие этой пыли.

Ко второй группе проблем относятся

- крайне высокая адгезия лунной пыли к скафандрам, приборам и другим артефактам;
- практически неизбежное возникновение в земных условиях низкоразмерных структур из слипающихся наночастиц в мелкодисперсных порошках.

В настоящее время обе эти группы проблем считаются не связанными друг с другом.

Показано, что все эти четыре проблемы связаны с явлениями, возникающими при превращении твердого тела в газ не в результате плавления и последующего испарения

(или в результате прямой возгонки), а в результате раздробления тела на все более и более мелкие частички при активной бомбардировке поверхности. По мере того, как эти частички делаются мельче, в их поведении становятся заметными эффекты, связанные с тепловыми флуктуациями (проблемы первой группы). Процессы слипания порошинок (аналог конденсации) определяются конкуренцией между тепловыми флуктуациями и силами притяжения между ними. С этой точки зрения в пыли, возникшей и существующей в лунном вакууме, преобладают флуктуационные эффекты, а в порошках, изготовленных в земных условиях или контактирующих с загрязненными артефактами, на первый план выходят силы притяжения между порошинками.

Тепловые флуктуации и приповерхностная левитация лунной пыли.

Получено, что:

- для частиц размером 100 нм – $v \sim$ нескольких см в сек. и поднимаются они только на $h \sim 1$ мм, т.е. они не левитируют, а создают эффект "кипения".
- для частиц размером 10 нм тепловая скорость достаточна для левитации и высота подъема частиц – порядка метра.

Учитывая, что масса частиц лунной пыли размером порядка 1 мкм составляет несколько процентов, а частиц менее 100 нм – 25-40%, можно заключить, что эффективность электростатического механизма левитации значительно ниже механизма левитации из-за тепловых флуктуаций.

Тепловые флуктуации и разрушающий эффект пыли.

В этой части рассмотрен механизм разрушающего влияния частиц лунной пыли на оборудование и материалы.

Так как форма лунных пылевых частиц далека от сферической и они имеют острые ребра, такие частицы можно рассматривать как "звезда ниндзя" (а не как просто ударник), который совершает несколько десятков или сотен оборотов в секунду.

Сравнение тепловых флуктуаций и сил притяжения.

Из статистической физики известно, что если размер частиц порошка (пыли) становится достаточно мал и их тепловая энергия $k_B T$ превышает энергию притяжения между ними, порошок будет вести себя как газ.

Кроме того, как уже указывалось, тепловые флуктуации должны были бы привести к возникновению слоя наночастиц, парящих над поверхностью.

Низкая насыпная плотность, на один-два порядка меньшая чем the bulk density, является характерной особенностью нанопорошков. Имеется множество свидетельств пользу того, что под действием сил Ван-дер-Ваальса наночастицы объединяются в относительно

жесткие конгломераты, и низкая насыпная плотность является результатом рыхлой укладки таких структур.

Сделано предположение, что температура распада конгломератов на отдельные частицы на Луне ниже, чем в обычных условиях на Земле. Не исключено, что причиной крайне высокой адгезии скафандрам, оборудованию и приборам, которая резко осложняет проведение лунных миссий, является вовсе не предполагаемое обычно наличие заряда у частиц лунной пыли. Принципиально важную роль при агрегации пыли на поверхности артефактов может играть наличие на ней не удаленных перед выходом из посадочного модуля молекул, способствующих слипанию пылевых частиц. .

В свете этих соображений весьма актуальными представляются как дальнейшие исследования динамики лунной пыли с помощью планируемых к реализации лунных посадочных аппаратов, так и лабораторные высокотемпературные исследования нанопорошков с различной степенью очистки поверхностей порошинок.

Руководитель проекта: А.В. Захаров, ИКИ РАН.

Публикации: статья "Lunar Nanodust: Is It a Borderland Between Powder and Gas?" направлена в журнал *Advances in Space Research*.