

НАПРАВЛЕНИЕ 3. Луна и планеты земной группы, сравнительная планетология

Кураторы направления: Базилевский А.Т. (ГЕОХИ), Иванов Б.А. (ИДГ).

3.1	Проект 3.1: Модели ранней эволюции и дегазации Земли, основанные на данных изотопии благородных газов	ГИ КНЦ РАН	Толстихин И.Н.
3.2	Проект 3.2: Сейсмология и физика недр Марса	ИФЗ РАН	Жарков В. Н.
3.3	Проект 3.3: Ударные кратеры на Луне, планетах и астероидах	ИДГ РАН	Иванов Б.А.
3.4	Проект 3.4: Термохимические модели ядра и мантии Луны	ГЕОХИ РАН	Кусков О.Л.
3.5	Проект 3.5: Построение долгосрочной теории движения Луны	ИПА РАН	Иванова Т.В.
3.6	Проект 3.6: Научные задачи изучения внутреннего теплового потока Луны и методика контактных теплофизических измерений в лунном грунте	ГЕОХИ РАН	Маров М.Я.
3.7	Проект 3.7: Теоретические и астрономические исследования механизмов диссипации приливной энергии для Луны и других объектов Солнечной системы	ГЕОХИ РАН	Воропаев С.А.
3.8	Проект 3.8: Исследование физических свойств реголита Луны методами активной радиолокации	ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН	Смирнов В.М.

Проект 3.1. Модели ранней эволюции и дегазации Земли, основанные на данных изотопии благородных газов

Анализ темпа дегазации модели двух-резервуарной мантии, основанной на $^{244}\text{Pu} - ^{238}\text{U} - ^{129}\text{I} - \text{Xe}(\text{Pu}, \text{U}, \text{I})$ изотопной системе, показал, что максимальные значения параметра дегазации достигают $\text{ПД} = 2 \cdot 10^{-4}$. Впервые найдена зависимость между параметром дегазации и минимальным временем диссипации Хе из атмосферы Земли, которое меняется от 10^8 лет после формирования солнца ($\text{ПД} \approx 10^{-7}$) до 10^9 лет ($\text{ПД} \approx 10^{-4}$).

Впервые для моделирования ранней эволюции и дегазации Земли объединены все три известные информативные изотопные системы, включающие (сравнительно) короткоживущие изотопы и позволяющие моделировать процессы ранней эволюции Земли на шкалах от 10 до 500 млн. лет.

Руководитель проекта: д.х.н. Толстихин И.Н., ГИ КНЦ РАН и ИКИ РАН

E-mail: igor.tolstikhin@gmail.com

В 2015 году публикаций по теме не было.

Проект 3.2. Сейсмология и физика недр Марса.

Для выяснения возможности регистрации следов воды на Марсе при сейсмическом эксперименте проведена численная оценка изменения теоретического годографа и спектра собственных колебаний Марса из-за эффекта гидратации.

Количественные оценки эффектов гидратации на сейсмические скорости в оливине, вадслейте и рингвудите для предполагаемого содержания железа в мантии Марса представляют интерес для прогнозирования сейсмического отклика планеты. Важно определить глубину фазового перехода в мантии Марса, поскольку это зафиксирует распределение температуры. Наложение ограничений на состав мантии и возможная локализация зоны фазового перехода – одна из задач будущих сейсмических экспериментов.

Руководитель проекта: Жарков Владимир Наумович ИФЗ РАН zharkov@ifz.ru

Публикации: по данному проекту в 2015 году опубликованы 8 статей.

Проект 3.3. Роль гигантских ударов в ранней эволюции Луны, планет земной группы и крупнейших астероидов.

Методом численного моделирования показано, что для малых тел (близких по размерам к Фобосу) скорость откола поверхности за счет сейсмического действия удара на порядок величины превышает скорость мишени за счет передачи импульса и момента вращения.

Были продолжены исследования специфики ударного кратерообразования на телах Солнечной системы. В рамках подготовки к анализу данных с КА “DAWN” на орбите вокруг астероида Церера сделаны оценки возможности обнаружения крупных ударов по деформации каменного ядра астероида, сделаны оценки размеров ударников, образовавших малые кратеры на Церере, что необходимо для распределения по размерам ударников. Обновлен систематический обзор проблем и достижений в области определения возрастов поверхности планетных тел Солнечной системы по числу наложенных кратеров. Полученные результаты применены для анализа популяции малых кратеров на Марсе, образовавшейся за последние 10 лет

Полученные результаты могут быть использованы в будущем при анализе деградации поверхности малых тел за счет сейсмического действия ударов.

Руководитель проекта: Иванов Борис Александрович, Институт динамики геосфер РАН, baivanov@idg.chph.ras.ru, boris_a_ivanov@mail.ru

Публикации: по данному проекту в 2015 году опубликовано 5 статей.

Проект 3.4. Термохимические модели ядра и мантии Луны.

Установлены термохимические ограничения на тепловой режим, состав и минералогию верхней мантии Луны по сейсмическим моделям, и проведено согласование моделей внутреннего строения Луны с данными гравитационного поля.

Реализован новый подход к исследованию термохимических моделей мантии Луны, основанный на преобразовании профилей скоростей сейсмических волн в соотношения температура – глубина с помощью методов термодинамики и физики минералов. Наиболее вероятным составом верхней мантии является оливин-содержащий пироксенит, обедненный тугоплавкими оксидами (~2 мас.% CaO и Al₂O₃, $\rho \sim 3.33-3.34$ г/см³). Модели, обогащенные Ca и Al, не могут рассматриваться в качестве петрологической основы верхней мантии, поскольку приводят к нереалистичным температурам (вблизи или выше солидуса).

Максимальная величина теплового потока в верхней мантии составляет 3.8-4.7 мВт/м², что в два-три раза меньше величин теплового потока 7-13 мВт/м² по данным измерений по программе «Apollo» и распространенности тория (Keihm, Langseth, 1977). В рамках гипотезы стационарного теплового равновесия, полученные значения теплового потока приводят к концентрации урана 10-12 ppb в верхней мантии. На основе этих и литературных данных оценены верхние пределы значений полного теплового потока с поверхности 6.2-9.6 мВт/м² и валового содержания урана в Луне на уровне 15-23 ppb.

Решение проблемы возможности / невозможности частичного плавления вблизи ядра, во многом зависящее от надежных данных по скоростям распространения сейсмических волн в подошве нижней мантии на границе с ядром, требует дальнейшего анализа.

Получена самосогласованная информация по распределению скорости P -, S -волн – температура ($T_{P,S}$) – химический и минеральный состав – плотность – глубина, что обеспечивает более надежные ограничения на внутреннее строение Луны. Сделан вывод, что для адекватного распределения температуры в мантии Луны скорости P , S -волн должны оставаться практически постоянными, либо слабо уменьшаться с глубиной (особенно это касается V_S) как результат влияния температуры, нарастающей быстрее, чем давление. Предложенный подход к тестированию скоростной структуры мантии Луны, основанный на методах термодинамики и физики минералов, дает независимый

инструмент для оценки достоверности исследуемой сейсмической модели и ее соответствия петрологическим и термальным моделям.

Руководитель проекта: Кусков О. Л. / ГЕОХИ РАН (ol_kuskov@mail.ru);

Публикации: по данному проекту в 2015 году опубликовано 5 статей.

Проект 3.5. Построение долгосрочной теории движения Луны.

Разработка алгоритмов теории вращения Луны в рамках обобщенной планетной теории GPT.

Методика общей планетной теории (GPT) (Brumberg, 1995) позволяет построить новую теорию вращения Луны в тригонометрической форме без фиктивных вековых членов, с принципиальной точки зрения не имеющую ограничений на длительность временного интервала ее годности, а с практической точки зрения значительно расширяющую этот интервал (несколько тысячелетий) по сравнению с существующими классическими теориями (несколько столетий). Метод GPT, основанный на идеях Хилла (использование некепplerовой промежуточной орбиты), Цейпеля (разделение медленно и быстро меняющихся переменных) и Биркгофа (приведение динамической системы к нормальной форме), позволяет совместное приведение уравнений поступательного движения больших планет и Луны и уравнений вращательного движения Земли к вековой системе, описывающей эволюцию планетных и лунной орбит (независимо от вращения Земли) и эволюцию вращения Луны (в зависимости от эволюции планетных и лунного движений).

Руководитель проекта: Иванова Тамара Вениаминовна, с.н.с., Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, e-mail: itv@ipa.nw.ru

Публикация: по данному проекту в 2015 году опубликована 1 статья.

Проект 3.6. Научные задачи изучения внутреннего теплового потока Луны и методика контактных теплофизических измерений в лунном грунте

Разработана программа и проведен комплекс экспериментальных исследований с целью разработки методики контактных теплофизических измерений в лунном грунте в экстремальных условиях лунной среды.

Величина внутреннего теплового потока является важным граничным условием для восстановления тепловой эволюции Луны и накладывает определенные ограничения на геофизические и геохимические модели ее внутреннего строения. Изучение латерального глобального (видимая и обратная стороны Луны) и регионального распределения

внутреннего теплового потока необходимо также для исследования глобальных и региональных неоднородностей в строении и составе лунной коры и мантии.

Ранее нами был проанализирован температурный режим в полярных областях Луны, определяемый уникальными условиями освещения вследствие наклона лунной оси и плоскости орбиты Луны к плоскости эклиптики. Получены оценки средней температуры, равновесной температуры на поверхности длительно освещенных участков и в постоянно затененных участках на дне кратеров и вклада в температуру поверхности различных факторов. Проведен анализ особенностей теплопроводности и теплоемкости лунного реголита в зависимости от температуры, минералогического состава, формы и размера частиц, от пористости и объемного веса. Предложено общее аналитическое выражение для эффективной теплопроводности и эмпирическое соотношение для теплоемкости лунного реголита в диапазоне температур от 90 до 350 К и результаты расчетов по этому соотношению.

Была рассмотрена тепловая модель грунта, исходя из динамического равновесия градиентного потока тепла с разностью потоков поглощенной и излученной энергии. Проведено моделирование теплового режима грунта путем решения нелинейного одномерного уравнения теплопроводности в конечной области с граничными условиями второго рода. Сформулированы основные научные задачи по измерению температуры на поверхности на КА «Луна Глоб» и «Луна Ресурс» и по определению на этой основе теплофизических свойств реголита в полярных районах путем решения обратных задач. Сделаны оценки возможности измерения внутреннего теплового потока в эксперименте на «Луне Ресурс», что необходимо для понимания происхождения, состава, внутреннего строения и эволюции Луны. Показано, что зависимость теплопереноса от выбора моделей структуры и состава верхнего горизонта лунной коры приводит к значительной неопределенности в оценке глобального теплового потока, а его региональное распределение резко неоднородное, что может быть связано с латеральным изменением состава и мощности лунной коры и верхней мантии.

Были проведены исследования с целью разработки методики проведения контактных теплофизических измерений в экстремальных условиях лунной среды.

Конкретные результаты исследований следующие:

1. По результатам проведенных измерений в КТХ были составлены вольт-температурные характеристики термодатчиков.
2. Были определены параметры для проведения экспериментальных измерений в вакуумной камере.

3. Данные, полученные на эталонных образцах и на имитаторе лунного грунта, показали разность, позволяющую интерпретировать результат.

4. Была разработана методика проведения экспериментальных измерений для построения математической модели теплофизических свойств.

Проведенные исследования являются необходимым этапом для проведения более полного цикла измерений на имитаторах лунного грунта и наработки статистики измерений для построения математической модели с целью получения теплофизических характеристик реголита по измерениям теплового потока. Тестовые испытания на эталонных образцах и имитаторе лунного грунта показали, что данные могут быть интерпретированы с достаточной точностью.

Руководитель проекта: Маров Михаил Яковлевич, ГЕОХИ РАН, marovmail@yandex.ru

На данном этапе исследований публикации по проекту не было.

Проект 3.7. Теоретические и астрономические исследования механизмов диссипации приливной энергии для Луны и других объектов Солнечной системы.

Изучено распределение температуры в недрах Луны с глубиной и показано, что энергия приливной диссипации не распределяется равномерно в мантии Луны, а локализована внутри слоя пониженной вязкости возле ядра.

Руководитель проекта: Снск. ф.-м.н. Воропаев Сергей Александрович, ГЕОХИ РАН.

Телефон: 8-916-182-65-16, E-mail: voropaev@geokhi.ru

Публикации: по данному проекту в 2015 году опубликовано 4 статьи.

Проект 3.8. Исследование физических свойств реголита Луны методами активной радиолокации.

Проанализированы результаты лабораторных измерений диэлектрических характеристик образцов лунного грунта, доставленных на Землю миссиями «Луна» и «Apollo» для частот от 10^2 - 10^9 Гц, предложена методика оценки процентного состава оксидов металлов и определения плотности верхнего покрова Луны, по диэлектрической проницаемости, восстановленной в результате решения обратной задачи радиолокации

Интерес к исследованиям Луны как к объекту возможной колонизации в последние годы значительно возрос. Одна из основных целей космических исследований – поиск водяного льда в районе её полюсов, в кратерах, где никогда не бывает солнечного света. Поиск льда является составной частью изучения поверхности и приповерхностного слоя, которое включает в себя определение диэлектрических свойств пород в слое толщиной в

несколько километров, оценку пористости и плотности грунтов, процентного содержания в них оксидов металлов, идентификацию наличия пустот и локализацию мест, в которых грунты имеют аномальные свойства. Один из методов глобального и детального исследования приповерхностного слоя Луны – радиолокационное зондирование. В основе радиолокации лежит способность радиосигнала, генерируемого передатчиком, отражаться от границ геологических пород с разными диэлектрическими свойствами. Сигналы, отражённые от поверхности и от внутренних границ с коэффициентом отражения, зависящим от градиента диэлектрической проницаемости на этих границах, сдвинуты на время, необходимое для распространения радиоволны от поверхности до внутренней границы и обратно.

Таким образом, суммарный отражённый сигнал несёт информацию о структуре и диэлектрической проницаемости грунта, зависит от частотной полосы радиосигнала, его мощности, наличия внутренних границ, рельефа района проведения эксперимента, от высоты космического аппарата. Разработаны методы решения обратных задач радиолокационного зондирования, позволяющие по измеренному отражённому сигналу восстанавливать распределение диэлектрической проницаемости грунта. Возможность использовать априорную экспериментальную информации о физико-химических характеристиках грунта Луны позволяет по восстановленным диэлектрическим свойствам грунта определить пористость и плотность грунта, оценить минералогический состав. Для выявления соответствия действительной части диэлектрической проницаемости и тангенса потерь использовались результаты лабораторных исследований образцов грунта, доставленных на Землю из 9 посадочных мест в центральной части видимой стороны Луны.

Лабораторные измерения многих научных групп показали, что в целом грунт Луны является диэлектриком.

В результате решения обратной задачи подповерхностного зондирования и определения диэлектрических параметров по коэффициенту отражения, по действительной части диэлектрической проницаемости можно рассчитать плотность пород, и затем, используя полученное значение ρ и тангенса потерь, оценить процентное содержание оксидов металлов в грунте.

Руководитель проекта: зам. дир. ФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН,
д. ф.-м. н. В. М. Смирнов, тел. +7(496) 5652670, e-mail vsmirnov@ire.rssi.ru

Публикации: по данному проекту в 2015 году опубликовано 4 статьи.