### Направление 8. Малые тела Солнечной системы

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

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

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.** Аннотация. 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. Можно напомнить, что комета 67Р/Чурюмова-Герасименко была выбрана как цель миссии «Розетта» Европейского космического агентства (ESA) после неудачной попытки запуска аппарата к комете Виртанена в 2002 г., когда произошёл отказ двигателей ракетыносителя «Ариан-5». Аппарат «Розетта» был запущен с космодрома Куру во Французской Гвиане 2 марта 2004 г. На полет к цели ушло более 10 лет, причем в полете аппарат сближался с астероидами Штейнс и Лютеция. На основе экспресс-материалов о ходе исследований ядра кометы 67Р/Чурюмова-Герасименко, выполненных аппаратами Розетта и Филы и опубликованных работ, были рассмотрены методы и условия выполнения задач миссии Розетта и состояние аппаратов после выполнения посадки зонда Филы на ядро кометы. 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 х 3.2 х 4.1 км.



Image of the nuclei of comet Borelly and asteroid Toutatis (J. Huang et al, Y.H. Zhao, W.-H. Ip, S. Mazronei, Y. Jiang, et al., 2015). The nuclei are similar in their shape to Hartley-2.

На снимках поверхности видны грубые изломы поверхности, крутые горные склоны с признаками слоистости, испещренные провалами, хребтами и глыбами различных размеров и небольшие равнинные поля, покрытые раздробленным материалом. Под его слоем обнаружена твердая порода, которая не поддается бурению и долблению. Из-за отказов некоторых элементов посадочной техники, ряд экспериментов на поверхности ядра кометы выполнить не удалось. В работах Л.В. Ксанфомалити, опубликованных в 2015 г., были рассмотрены результаты выполненных экспериментов и проведено их сравнение с отечественной миссией ВЕГА (1986 г.) Были оценены перспективы восстановления работоспособности аппарата ФИЛЫ И показано. что они обработать неудовлетворительны, что подтвердилось В дальнейшем. Удалось изображение темной стены перед аппаратом ФИЛЫ и показать, что это – выступающая глыба, а освещенный участок в виде трапеции – это поверхность глыбы, а не опора аппарата, как сообщалось. Попытка определить положение Филы путем совмещения изображений опор аппарата с двумя белыми пятнами была ошибочной.



Sizes for calculations. The comet 67P/CG has total dimensions of 1,3 x 3,2 x 4,1 km.

По итогам исследований ядра кометы опубликовано 3 научных и 2 научно-популярных работы, сделано 5 докладов (в том числе 2 на международных конференциях в США и Японии), несколько телевизионных выступлений.

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 67Р/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, подготовлен черновой вариант рукописи L.V. Ksanfomality. Disintegration of

elongated cometary nuclei and asteroids by centrifugal forces. На генеральной ассамблее MAC был представлен доклад на ту же тему: «L.V. Ksanfomality. Disintegration of cometary nuclei and asteroids by centrifugal forces». Ранее было опубликовано несколько работ (без включения данных о комете 67Р/Чурюмова-Герасименко) в журналах УФН, Астрономический вестник, Наука и Жизнь, ВПВ.

Руководитель темы: Л.В. Ксанфомалити, ИКИ РАН, <u>ksanf@rssi.ru</u>

#### Публикации:

1. Л.В. Ксанфомалити, К. И. Чурюмов. // Комета 67Р/Чурюмова–Герасименко: аппараты РОЗЕТТА И ФИЛЫ у цели. Астрономический вестник, 2015. Т. 49, с. 224-212.

2. Л.М. Зеленый, Л.В. Ксанфомалити. От миссии «Вега» у кометы Галлея к миссии «Розетта» у кометы <u>67Р/Чурюмова – Герасименко</u> // Вестник НПО им. С.А.Лавочкина. 2015. №3. Стр.81-93.

3. К.И. Чурюмов, Л.М. Зелёный, Л.В. Ксанфомалити. "Розетта" исследует комету Чурюмова – Герасименко. // Земля и Вселенная, 2015, №4, стр.3-22.

4. Л.В. Ксанфомалити, К.И.Чурюмов. Посадка Philae: Первые итоги // Вселенная, Пространство, Время. 2014. №12, с. 12-16.

5. Л.В. Ксанфомалити, Л.М. Зеленый, К.И.Чурюмов. On comparison of the nuclei of comets 67P/Churumov-Gerasimenko and 1P/Halley // Планетная конференция 6M-S3-SB-03, ИКИ РАН, 2015, стр. SB-03

# 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

Аннотация. 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 предыдущем отчете, посвященном решению задач управления объектами в солнечной системе, была рассмотрена задача перевода малых астероидов на орбиты, резонансные с орбитальным движением Земли в рамках более общей проблемы планетарной защиты и исследования малых тел Солнечной системы. Были разработаны методы, позволяющие с

помощью гравитационных маневров у Земли и других планет изменять траектории движения этих естественных объектов за счет сообщения им технически реализуемых импульсов скорости. На конкретных примерах, включающих моделирование управления движением, были продемонстрированы сценарии операций управления, приводящие к решению поставленных задач наведения малых астероидов на опасные небесные объекты или перевода их на упомянутые резонансные орбиты.

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, как это было описано в предыдущем отчете, 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.

#### Способ захвата астероидов на орбиту спутника Земли.

В излагаемой ниже концепции главная трудность захвата преодолевается за счет проведения специальным образом планируемой последовательности операций по захвату астероида на орбиту спутника Земли, главной частью которых являются многократные гравитационные маневры в окрестности Луны и окрестности Земли, так что необходимое суммарное изменение скорости астероида за счет включения ракетного двигателя удерживается в пределах 20 метров в секунду.

#### Использование орбит, резонансных с движением Земли.

Ниже излагается способ использования преимущества резонансных орбит: возможность многократных гравитационных маневров у Луны в условиях, когда орбита астероида в движении относительно Земли остается гиперболической, т.е. после каждого маневра у Луны астероид покидает сферу действия Земли, но в движении вокруг Солнца период астероида остается неизменным, равным одному году.

#### Гравитационные маневры у Луны.

Главным условием каждого пролета является сохранение резонансности (с земной орбитой) управляемого нами астероида в его движении относительно Солнца при выполнении задачи уменьшения (в крайнем случае, невозрастания) скорости астероида относительно Земли до тех пор, пока эта скорость не станет меньше параболической. Тем

самым при достаточном числе пролетов Луны астероид будет захвачен на орбиту спутника Земли.

Иными словами, ключевой особенностью предлагаемого способа является достигаемая здесь многократность гравитационных маневров у Луны, при каждом из которых скорость астероида относительно Земли уменьшается, а относительно Солнца остается постоянной.

Таблина	1.1.	
гаолица		

Номер	Дата маневра у Луны и уменьшение скорости относительно Земли,			
маневра у	км/с			
Луны				
1	2043-03-15 3.19 -> 2.77	2050-12-30 3.77->3.63		
2	2044-03-15 2.77 -> 2.19	2054-12-29 3.63 -> 3.41		
3	2047-03-15 2.19 -> 1.96	2056-12-28 3.41->3.11		
4	2048-03-15 1.96 -> <b>1.05</b>	2059-12-28 3.11 -> 3.02		
5		2062-12-27 3.02 -> 2.57		
6		2063-12-27 2.57 -> 2.11		
7		2064-12-26 2.11 -> <b>1.38</b>		

#### Примеры захвата астероида на орбиту спутника Земли.

В качестве примера в табл. 1.1 приводится последовательность операций и их характеристики для миссий по захвату на орбиту спутника Земли астероидов 2014 QN266 и 2012 AP10.

Оскулирующие элементы орбиты захваченного астероида 2014 QN266 в геоцентрической экваториальной системе координат на эпоху J2000 представлены в табл. 1.2:

Астероид	2014 QN266
время, UTC	2048-03-15 06:00:00
эксцентриситет	0.7877
большая полуось, км	426295.29417
Наклонение, град	153.7
долгота восходящего узла, град	168.9
аргумент широты перигея, град	29.30

Таблица 1.2. Оскулирующие элементы для астероида 2014 QN266

Орбита спутника Земли, на которую переводится астероид 2014 QN66, показана на рис. 1.4.



Рис. 1.4. Проекция орбиты астероида на плоскость *XY* эклиптической геоцентрической системы координат.

В качестве второго примера в табл. 1.1 приводятся характеристики захвата астероида 2012 AP10. В этом случае требуется выполнение семи гравитационных маневров у Луны, а полное время миссии занимает 26 лет.

**Выводы.** Полученные результаты дают основание для утверждения, что использование гравитационных маневров у Земли для перевода околоземных астероидов на орбиты, резонансные с орбитой Земли, открывает возможность выполнения дальнейших операций по захвату астероидов на орбиту спутника Земли. В том случае, если удается перевести астероид на резонансную орбиту, последующие гравитационные маневры у Луны обеспечивают решение этой задачи. Для этого достаточно при последовательных облетах Луны сохранять указанную резонансность, что при соответствующем выборе параметров

облетов, как показано, оказывается достижимым при использовании современной ракетно-космической техники, позволяющей сообщать астероиду или его фрагментам характеристическую скорость в пределах 20 м/с.

#### Литература

1. Брофи, Муирхед (John R. Brophy<sup>1</sup> and Brian Muirhead<sup>2</sup>), Near-Earth Asteroid Retrieval Mission (ARM) Study IEPC-2013-82, Presented at the 33rd International Electric Propulsion Conference, Washington, DC, October 6 – 10, 2013, 1. Jet Propulsion Laboratory, 2. California Institute of Technology, Pasadena, CA (http://www.kiss.caltech.edu/study/asteroid/papers/near.pdf).

2. Гудинг (R.H. Gooding), Celest. Mech. Dyn. Astron. 48, 145 (1990).

3. Ледков А.А., Эйсмонт Н.А., Боярский М.Н., Федяев К.С., Назиров Р.Р., Письма в Астрон. журн. **41**, 72 (2015) [А.А. Ledkov et al., Astron. Lett. **41**, 67 (2015)].

4. Эйсмонт Н.А., Боярский М.Н., Ледков А.А., Назиров Р.Р., Данхэм Д., Шустов Б.М.. Астрон. вестник **47**, 352 (2013).

5. Эйсмонт и др. (N. Eismont, M. Boyarsky, A. Ledkov, et al.), 23<sup>rd</sup> Int. Symp. on Space Flight Dynamics (2012). NEO Discovery Statistics – <u>http://neo.jpl.nasa.gov/stats/</u>

Руководитель темы: Эйсмонт Натан Андреевич, ИКИ РАН. <u>neismont@rssi.ru</u> Состав группы: Назиров Р.Р., Рыхлова Л.В., Боярский М.Н., Ледков А.А., Рязанова Е.Е., Корнева Н.Н., Эйсмонт Н.А.

#### Публикации:

1. David W. Dunham, Robert W. Farquhar, Natan Eismont, and Eugene Chumachenko NEW APPROACHES FOR HUMAN DEEP-SPACE EXPLORATION Journal of Astronautical Sciences (2013) 60:149–166 DOI 10.1007/s40295-014-0025-x.

2. А. А. Ледков, Н. А. Эйсмонт, Р. Р. Назиров, М. Н. Боярский. СПОСОБ ЗАХВАТА АСТЕРОИДОВ НА ОРБИТУ СПУТНИКА ЗЕМЛИ. ПИСЬМА АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2015, том 41, №8, с. 482–489.

3. А. А. Ледков, Н. А. Эйсмонт, М. Н. Боярский, К. С. Федяев, Р. Р. Назиров. УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ОКОЛОЗЕМНЫХ АСТЕРОИДОВ. ПИСЬМА В АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2015, том 41, №1–2, с. 72–89.

4. Н.А. Эйсмонт, А.А. Ледков, Р.Р. Назиров. Укрощение астероидов: как управлять их движением. Природа № 9, 2015, стр. 57–65.

5. Н. Эйсмонт, А. Ледков. Астероиды – источники опасности и объекты исследований. Наука и Жизнь, 2015, №1, стр. 2-14 и № 2, 2015, стр. 2-14.

6. L.M. Zelenyi et al. PLASMA-F Experiment: Three Years of Operation On Orbit. 2015, Solar System Research, Vol. 49, No. 7, pp. 580–603.

7. A.Ledkov, N.Eismont, R.Nazirov, M.Boyarsky. NEAR MOON GRAVITY ASSIST MANEUVERS AS A TOOL FOR ASTEROID CAPTURE ONTO EARTH SATELLITE ORBIT. 25<sup>th</sup> International Symposium on Space Flight Dynamics, 19-23 October 2015, Munich, Germany. (http://issfd.org/index.php/final-program).

**Проект 8.2. Происхождение и эволюция метеоритного вещества и космической пыли. Аннотация.** 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, CaTiO<sub>3</sub>). 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, из них 2 мезосидерита, 1 эвкрит, 1 шерготтит, 6 обыкновенных хондритов и хондритовых брекчий.

Впервые в лунных метеоритах обнаружено включение кордиерита в симплектитовом срастании с плеонастом. Валовый состав этого включения соответствует Mg-аналогу анортита. Эта фаза не известна в природе, но была синтезирована в ходе твердофазных реакций. Предполагается, что такая фаза могла выделиться из плагиоклаза с последующим распадом на кордиерит и плеонаст в условиях низкого давления.

На основе электронно-микроскопических исследований проведена структурная классификация микрометеоритов Новоземельской коллекции. По степени атмосферного нагрева выделяются группы шлаковидных и непереплавленных микрометеоритов – ШММ и НММ соответственно. По степени раскристаллизации ШММ делятся на тонко– и среднезернистые классы, происходящие из одного исходного материала, близкого по составу к матрице углистых хондритов и грубозернистые, имеющие другой источник, предположительно вещество обыкновенных хондритов или хондры. НММ делятся на два

основных класса – тонкозернистые, похожие на углистые хондриты, и крупнозернистые, имеющие структуры кристаллизации расплавов.

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

Состав группы: Бадеха К.А., Бадюков Д.Д., Демидова С.И., Лоренц К.А., Назаров М.А., Скрипник А.Я., Теплякова С.Н., Хисина Н.Р., Шорников С.И.

#### Структурное подразделение:

Лаборатория метеоритики ГЕОХИ РАН.

#### Публикации:

1. Д.Д. Бадюков, Й. Райтала, П. Костама, А.В.Игнатьев (2015) Метеорит Челябинск:

ударный метаморфизм, импактный расплав и ударная адиабата. Петрология, 2015, том 23, № 2, с. 115 – 128

2. С.И. Демидова, М.А.Назаров, Т. Нтафлос, Ф. Брандштеттер. Возможные реликты серпентина в лунных метеоритах. Петрология, 2015, том 23, № 2, с. 129-140.

3. М.А. Назаров, С.И. Шорников, С.И. Демидова. Происхождение самородного кремния и силицидов железа в лунном метеорите Dhofar 280. Петрология, 2015, том 23, № 2, с. 186-194.

4. С.И. Шорников, О.И.Яковлев. Исследование сложных молекулярных форм, содержащихся в газовой фазе над системой CaO–MgO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–TiO<sub>2</sub>–SiO<sub>2</sub>. Геохимия. 2015. том. 53. № 8. с. 695–705.

5. С.И. Шорников. Коэффициенты испарения оксидов, содержащихся в расплавах Ca–Al– включений в хондритах. Геохимия. 2015. том. 53. № 12. с. 1110–1119.

6. S.I. Shornikov. Thermodynamics of Ca–Al–inclusion's high-temperature minerals. Meteorit.Planet. Sci. 2015. V. 50. (Suppl S1): #5017.

#### Проект 8.3. Свойства, динамика и проявления лунной пыли.

Аннотация. 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.

В настоящее время немаловажная роль в космических исследованиях принадлежит выявлению свойств и проявлений заряженной пыли у поверхности Луны и в лунной экзосфере. В России готовятся миссии «Луна-25» и «Луна-27». На посадочных модулях станций «Луна-25» и «Луна-27» предполагается разместить аппаратуру, которая будет как непосредственно детектировать пылевые частицы над поверхностью Луны, так и осуществлять оптические измерения. В недавней американской миссии LADEE («Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer» – «Исследователь лунной атмосферы и пылевой среды») лунная пыль изучалась с помощью наблюдений с орбиты. В отчете представлены основные результаты, полученные в 2015 году коллективом сотрудников ИКИ РАН по проекту «Свойства, динамика и проявления лунной пыли» в рамках Программы 9 фундаментальных исследований президиума РАН.

Фактически общепринятым в настоящее время считается, что пыль над лунной поверхностью является составной частью плазменно-пылевой системы. Поверхность Луны заряжается под действием электромагнитного излучения Солнца, плазмы солнечного ветра, плазмы хвоста магнитосферы Земли. При взаимодействии с солнечным излучением поверхность Луны испускает электроны вследствие фотоэффекта, что приводит к формированию над поверхностью слоя фотоэлектронов. К появлению фотоэлектронов приводит также их испускание пылевыми частицами, парящими над поверхностью Луны, вследствие взаимодействия последних с электромагнитным излучением Солнца. Пылевые частицы, находящиеся на поверхности Луны или в приповерхностном слое, поглощают фотоэлектроны, фотоны солнечного излучения, электроны и ионы солнечного ветра, а если Луна находится в хвосте магнитосферы Земли, то электроны и ионы плазмы магнитосферы. Все эти процессы приводят к зарядке пылевых частиц, их взаимодействию с заряженной поверхностью Луны, подъему и движению пыли.

Существенное внимание в 2015 году уделялось волновым процессам в приповерхностной лунной плазме, плазменно-пылевой системе в области лунного терминатора и механизмам отрыва частиц пыли от лунной поверхности. Описание линейных и нелинейных волн в

приповерхностной лунной плазме детально описано в работе [Морозова Т.И., Копнин С.И., Попель С.И. // Физика плазмы. 2015. Т. 41, № 10. С. 867-876]. Как было показано, функция распределения фотоэлектронов (по скоростям) может быть представлена в виде суперпозиции двух функций распределения, характеризуемых различными температурами электронов: электроны с меньшей энергией выбиваются из лунного реголита фотонами с энергиями, близкими к работе выхода реголита, тогда как происхождение электронов с большей энергией связано с фотонами, соответствующими пику 10.2 эВ в спектрах солнечного излучения. Нарушение изотропии функции распределения электронов в приповерхностной лунной плазме связано с движением солнечного ветра относительно фотоэлектронов и заряженных пылевых частиц, что приводит к развитию неустойчивости и возбуждению высокочастотных волн с частотами в диапазоне ленгмюровских и электромагнитных волн. Кроме того, возможно распространение пылевых звуковых волн, возбуждение которых может, например, происходить в окрестности лунного терминатора. Найдены решения в виде пылевых звуковых солитонов, соответствующие параметрам плазменно-пылевой системы в приповерхностном слое освещенной части Луны (рис. 1). Определены области возможных чисел Маха и амплитуд солитонов.



Рис. 1. Профили электростатического потенциала  $\varphi(\xi)$ , характеризующие пылевые звуковые солитоны на различных высотах *h* при  $\theta = 82^{\circ}$ , числа Маха M = 2.1 и параметрах плазменно-пылевой системы, вычисленных при  $N_0 = 2.1 \cdot 10^5 \,$  см<sup>-3</sup>,  $T_e = 0.15 \,$  эВ. Переменная  $\xi$  характеризует пространственную координату в системе отсчета, движущейся вместе с солитоном, нормированную на электронный дебаевский радиус у поверхности освещенной части Луны.

Волновые движения в приповерхностном слое освещенной части Луны (или те или иные их проявления) могут быть зафиксированы с помощью аппаратуры, которую предполагается разместить на спускаемых аппаратах станций «Луна-25» и «Луна-27». Так, в состав выносных датчиков на станции «Луна-27» входит зонд Ленгмюра, с помощью которого возможны локальные измерения флуктуаций концентрации и потенциала в плазме. С другой стороны возможность возникновения волновых движений в приповерхностной лунной плазме должна быть учтена при обработке вольт-амперной характеристики зонда Ленгмюра и интерпретации данных наблюдений.

Согласно результатам исследований по Программе 9 в предыдущие годы (см., например, работу [Попель С.И., Копнин С.И., Голубь А.П., Дольников Г.Г., Захаров А.В., Зеленый Л.М., Извекова Ю.Н. // Астрономический вестник. 2013. Т. 47, № 6. Р. 455-466]) характерный размер *а* и характерная концентрация *n<sub>d</sub>* заряженных пылевых частиц в приповерхностном слое освещенной части Луны определяются, соответственно, значениями порядка 100 нм и 10<sup>3</sup> см<sup>-3</sup>. Столь высокая концентрация пыли возникает в связи со значительной концентрацией фотоэлектронов над Луной (в том числе, и фотоэлектронов, выбиваемых фотонами солнечного излучения с поверхностей парящих пылевых частиц). Над темной частью Луны фотоэлектроны отсутствуют. Концентрация заряженной пыли оценивается при этом из соотношения  $n_d \sim n_{e,S}/|Z_d|$ , где  $n_{e,S}$  – концентрация фотоэлектронов солнечного ветра. Для пылевых частиц с размерами порядка 100 нм оценка их концентрации над темной частью Луны дает  $n_d \sim 10^{-2} \cdot 10^{-1}$  см<sup>-3</sup>. Таким образом, имеется существенный скачок концентрации пыли в области терминатора, при этом можно ожидать достаточно сложного поведения характеристик плазменнопылевой системы. Изучению плазменно-пылевой системы в области лунного терминатора посвящена работа [Popel S. I., Atamaniuk B., Zelenyi L. M. // The Sixth Moscow Solar System Symposium (Moscow, Russia, 2015), 6MS3-DP-06, pp. ab-92–ab-93].

Основными составляющими плазмы над освещенной частью Луны являются фотоэлектроны и положительно заряженные пылевые частицы, тогда как над темной частью основной вклад вносят электроны солнечного ветра (имеющие большую компоненту скорости, перпендикулярную направлению распространения солнечного ветра, из-за больших значений температуры электронов в нем), электроны и ионы хвоста магнитосферы Земли, а также отрицательно заряженные пылевые частицы. В приповерхностном слое концентрации электронов и пылевых частиц над освещенной частью всегда значительно выше, чем соответствующие концентрации над темной частью Луны. Возникает резкая граница между этими частями (терминатор), и такая ситуация жестко поддерживается внешними факторами, в частности, непрерывным действием

солнечного излучения на освещенную часть Луны, а также ее вращением. Электроны и пылевые частицы стремятся покинуть освещенную часть, попасть в область терминатора (и дальше в почти пустое пространство над темной частью Луны). Поскольку тепловая скорость у электронов намного выше, чем у пылевых частиц, потеря электронов происходит гораздо быстрее и в плазме (над освещенной частью Луны в окрестности терминатора) накапливается свободный положительный заряд. Вследствие этого потенциал плазмы (над освещенной частью Луны) относительно терминатора должен стать положительным, т.е. потенциал терминатора будет меньше нуля. Перепад потенциалов между терминатором и плазмой (над освещенной частью Луны) не может распределиться по всему объему плазмы, поскольку из-за дебаевского экранирования изменение потенциала должно происходить у терминатора в области толщиной в несколько дебаевских радиусов. Эта область, которая должна существовать в окрестности терминатора, представляет собой аналог плазменного слоя. Такой слой создает потенциальный барьер в области терминатора, благодаря которому в плазме за счет электростатических сил удерживаются более подвижные частицы (в рассматриваемом случае электроны). Для терминатора выполняется критерий, аналогичный критерию Бома для образования слоев, что обусловлено достаточно большими значениями (несколько м/с) скорости терминатора. Поведение электрического поля и концентрации пылевых частиц в области терминатора показано на рис. 2. Ширина плазменной возмущенной области, связанной с терминатором, составляет величину  $\sqrt{2}\lambda_{Di} \sim 10$  м, где  $\lambda_{Di}$  – ионный дебаевский радиус у поверхности Луны. В этой области возникают значительные электрические поля с напряженностью  $E \sim 300$  В/м, которые приводят к подъему положительно заряженных микронных пылевых частиц на высоты порядка нескольких десятков сантиметров. Предложенный эффект может быть использован для объяснения свечения над областью лунного терминатора, которое наблюдалось космическими аппаратами Surveyor.

Важным механизмом образования пыли над Луной являются удары высокоскоростных метеороидов о ее поверхность. Функция распределения метеороидов, ударяющихся о поверхность Луны, по скоростям представлена на рис. 3. Исследование влияния ударов высокоскоростных метеороидов на плазменно-пылевую систему в окрестностях Луны проводилось в работе [Popel S. I., Golub' A. P., Izvekova Yu. N., Atamaniuk B., Dolnikov G. G., Lisin E. A., Zakharov A. V., Zelenyi L. M. // The Sixth Moscow Solar System Symposium (Moscow, Russia, 2015), 6MS3-DP-07, pp. ab-94–ab-95].



Рис. 2. Концентрация пылевых частиц (синяя кривая) и электрическое поле (красная кривая) в окрестности лунного терминатора. Невозмущенные зоны соответствуют освещенной (ξ < 0) и темной (ξ > √2λ<sub>Di</sub>) сторонам Луны. Зона 0< ξ < √2λ<sub>Di</sub> представляет собой плазменную возмущенную область, связанную с терминатором. Римские цифры I, II, III характеризуют участки синей кривой с различными зависимостями концентрации пыли. Участок IV на красной кривой обозначает ту же область, что и участок I на синей кривой. Переменная ξ характеризует пространственную координату в системе отсчета,

движущейся вместе с терминатором.



Рис. 3. Функция распределения метеороидов, ударяющихся о поверхность Луны, по скоростям.

При высокоскоростном ударе метеороида о поверхность Луны вещество в ударнике и мишени сильно сжимается и нагревается. Под действием возникающего высокого

давления происходит расширение и вытеснение среды с образованием сильной ударной волны, в первом приближении полусферической формы. Распространяясь от центра удара, ударная волна охватывает всё большую массу вещества мишени, значительно превышающую массу ударника. В стадии быстрой механической разгрузки происходит испарение и плавление вещества. Для полного испарения вещества, сжатого ударной волной с последующей быстрой разгрузкой, удельная энергия во фронте волны более чем примерно в 5 раз должна превышать энергию связи, что соответствует скорости ударника больше 10 км/с. По мере удаления от центра удара первоначально сильная сверхзвуковая ударная волна ослабевает и постепенно становится звуковой волной, в которой максимальное давление и максимальная массовая скорость прямо пропорциональны друг другу. При высокоскоростном ударе основным параметром, характеризующим источник возмущения на больших расстояниях от точки удара, является кинетическая энергия ударника. Это обстоятельство позволяет воспользоваться ударно-взрывной аналогией и законами энергетического подобия, согласно которым параметры, описывающие удар и взрыв, могут быть связаны одними и теми же уравнениями, если все линейные размеры будут нормированы на корень кубический из полной выделившейся энергии вне зависимости от источника быстрого энерговыделения. В процессе механической разгрузки вещества и ослабления ударной волны за зоной испарения формируются области плавления, разрушения и необратимой деформации частиц реголита. В этой области при распространении ударной волны максимальное давление в ударной волне еще остается выше динамического предела упругости материала частиц реголита. За областью дробления и необратимых деформаций следует область упругих деформаций частиц реголита, характеризующаяся максимальным давлением в ударной волне ниже динамического предела упругости. В области упругих деформаций частиц реголита звуковая волна может разрушить обусловленную силами адгезии связь между частицами реголита и оторвать их друг от друга и от лунной поверхности. Условием отрыва частицы реголита от лунной поверхности может служить превышение максимального давления в звуковой волне над пределом прочности реголита на растяжение. Данные рассуждения позволяют определить среднее число частиц реголита, покидающих в результате метеороидной бомбардировки лунную поверхность с единицы площади лунной поверхности в единицу времени на различных высотах над Луной. Например, вычисления для высот h = 0.1 м, 1 м и 10 м дают следующие значения среднего числа частиц реголита, покидающих лунную поверхность:  $N = 65 \text{ м}^{-2}$  сутки<sup>-1</sup>, 20 м<sup>-2</sup> сутки<sup>-1</sup>, 7 м<sup>-2</sup> сутки<sup>-1</sup>. Функция распределения выбрасываемых метеороидами частиц по размерам, нормированная на единицу, приведена на рис. 4.



Рис. 4. Функция распределения выбрасываемых метеороидами частиц по размерам.

Руководитель проекта: Попель Сергей Игоревич, ИКИ РАН, serg.i.popel@gmail.com Состав группы: Попель С.И., Буринская Т.М., Голубь А.П., Дольников Г.Г., Дубинский А.Ю., Захаров А.В., Извекова Ю.Н., Копнин С.И., Морозова Т.И.

#### Публикации:

Попель С.И. Пыль и пылевая плазма в Солнечной системе // Природа. 2015. № 9. С.
 48-56.

2. Burinskaya T.M. Non-monotonic potentials above the day-side lunar surface exposed to the solar radiation // Planetary and Space Science. 2015. V. 115. P. 64–68.

3. Морозова Т.И., Копнин С.И., Попель С.И. Волновые процессы в пылевой плазме у поверхности Луны // Физика плазмы. 2015. Т. 41, № 10. С. 867-876.

4. Lisin E. A., Tarakanov V. P., Popel S. I., Petrov O. F. Lunar dusty plasma: A result of interaction of the solar wind flux and ultraviolet radiation with the lunar surface // Journal of Physics: Conference Series. 2015. V. 653. P. 012139, 6 pages.

5. Копнин С.И., Попель С.И., Морозова Т.И. К вопросу о зарядке пылевых частиц на темной стороне Луны // XLII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу 9-13 февраля 2015 г., г. Звенигород. Сборник тезисов докладов. М.: ЗАО НТЦ «ПЛАЗМАИОФАН», 2015. – с. 234.

6. Popel S. I., Golub' A. P., Dolnikov G. G., Dubinskii A. Yu., Izvekova Yu. N., Kopnin S. I., Zakharov A. V., Zelenyi L. M. Dusty Plasmas at the Moon: Recent Developments and Unsolved Problems // 13th Workshop on Complex Systems of Charged Particles and their Interaction with Electromagnetic Radiation (Moscow, Russia, 2015), p. 39.

7. Kopnin S. I., Popel S. I. Dusty Plasmas in Laboratory and Nature // Fundamental and Applied Space Research. XII Conference of Young Scientists Devoted to Cosmonautics Day (Moscow, Russia, 2015), p. 56.

8. Morozova T. I., Kopnin S. I., Popel S. I. Plasma Waves at the Surface of the Moon, Fundamental and Applied Space Research. XII Conference of Young Scientists Devoted to Cosmonautics Day (Moscow, Russia, 2015), p. 86.

9. Lisin E. A., Tarakanov V. P., Popel S. I., Petrov O. F. PIC Simulation of the Lunar Polar Plasma Environment // 42st EPS Conference on Plasma Physics (Lisbon, Portugal, 2015), p. P4.411.

10. Popel S. I., Zelenyi L. M. Lunar Dusty Plasma Environment: Theory Results and Future Experimental Research // IPELS2015 (Atholl Palace Hotel, Pitlochry, UK). Abstract Book, IOP Institute of Physics, London (2015), pp. 22-23.

11. Popel S. I., Zelenyi L. M. Dust and Dusty Plasmas at the Moon: Recent Research and Future Lunar Missions, 15th International Conference on the Physics of Non-Ideal Plasmas (Almaty, Kazakhstan, 2015). Book of Abstracts, p. 133.

 Popel S. I., Golub' A. P., Izvekova Yu. N., Dol'nikov G. G., Zakharov A. V., Zelenyi L.
 M. Dust Particle Release from the Lunar Surface: Role of Adhesion and Meteoroid Impacts // European Planetary Science Congress 2015 (Nantes, France). EPSC Abstracts, Vol. 10, EPSC2015-191, 2015, 2 pages.

 Dubinskii A. Yu., Popel S. I. Mechanism of Formation of Water Molecules Incorporated in Near-Surface Lunar Soil // European Planetary Science Congress 2015 (Nantes, France).
 EPSC Abstracts, Vol. 10, EPSC2015-752, 2015, 2 pages.

 Popel S. I., Atamaniuk B., Zelenyi L. M. Electric Fields and Dust Particle Rise near the Lunar Terminator // The Sixth Moscow Solar System Symposium (Moscow, Russia, 2015), 6MS3-DP-06, pp. ab-92–ab-93.

15. Popel S. I., Golub' A. P., Izvekova Yu. N., Atamaniuk B., Dolnikov G. G., Lisin E. A., Zakharov A. V., Zelenyi L. M. Meteoroid Impacts and Dust Particle Release from the Lunar Surface // The Sixth Moscow Solar System Symposium (Moscow, Russia, 2015), 6MS3-DP-07, pp. ab-94–ab-95.

Dubinskii A. Yu., Popel S. I. On Formation of Water Molecules Incorporated in Near-Surface Lunar Regolith // The Sixth Moscow Solar System Symposium (Moscow, Russia, 2015), 6MS3-PS-29, pp. ab-232–ab-234.

17. Morozova T., Popel S. Linear waves in the near-surface plasma layer of the illuminated part of the Moon // Bulletin of The American Physical Society, Vol. 60 (2015), Abstract (57th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, Savannah, Georgia, USA, 2015), YP12.00068.

## 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.

Аннотация. 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. Моделирование ударного испарения было выполнено на лазерной установке при температуре ~ 4000-5000 К и длительности импульса ~  $10^{-3}$  с. Газовая среда (96 % об. N<sub>2</sub> и 4% об. СН<sub>4</sub>, P = 1 атм.) была возможным аналогом ранних атмосфер планет земной группы и соответствовала современному составу атмосферы спутника Сатурна – Титана. 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. Основными продуктами пиролиза конденсатов (рис. 1) были бензол и алкилбензолы (в том числе длинноцепочечные), неразветвленные длинноцепочечные алифатические углеводороды, и разнообразные азотсодержащие вещества (алифатические и ароматические нитрилы и пиррол).

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

271



Рис. 1. Хроматограммы продуктов пиролиза (при 460°С) 20 мг конденсата «96:4» (показана чёрным), исходного перидотита (показана синим) и холостого опыта без образца (показана красным). «а» – артефакты.

#### Публикация:

M. A. Zaitsev, M. V. Gerasimov, E. N. Safonova, A. S. Vasiljeva (2015) Characterization of the complex organic compounds synthesized by laser vaporization of silicates in nitrogen-methane atmosphere: Application for the impact-induced prebiotic synthesis. In: *The Sixth Moscow Solar System Symposium (6M-S3)*. IKI RAS, Moscow, October 5-9, 2015, Abs. #6MS3-PS-27.

#### 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.

Аннотация. Экспериментально установлено, что в условиях высокотемпературного испарения, характерного для высокоскоростных ударных процессов, улетучивание вещества из оливина происходит при ведущей роли энстатитового (MgSiO<sub>3</sub>) 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, (<u>mzaitsev@iki.rssi.ru</u>).

Руководитель темы 8.4.2: Герасимов Михаил Владимирович.

Состав группы: м.н.с. Зайцев М.А., вед. техн. Сафонова Э.Н., инженер Васильева А.С., с.н.с. Диков Ю.П.

Проект 8.5. Комплексное исследование избранных астероидов и комет небесномеханическими и астрофизическими методами.

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

**Аннотация.** 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 отрабатывается и применяется методика получения данных о физикохимических 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.

В 2015 г. были проведены три плановых сеанса спектральных наблюдений астероидов, сближающихся с Землей и планетами земной группы с целью изучения химикоминералогического состава их поверхности на 2-м телескопе пика Терскол. Сеансы наблюдений были проведены в феврале, июне и марте. Получены спектры отражения для астероидов 2014 ЕМ, Icarus, Haines, 348400. В ноябре 2015 г. проводились экспериментальные наблюдения с высокоточным фотометром с последующей сменой на низкую моду (R~100) подвесного спектрометра MMSC. К сожалению, из-за плохой погоды и неисправности аппаратуры спектры получены не были. Выполнена только высокоточная фотометрия двух астероидов.

Для осуществления комплексного изучения каждого объекта исследований мы проповедуем синхронные или квази-синхронные астрометрические, фотометрические и спектрометрические наблюдения с нескольких обсерваторий. Так, например, астероид 348400 наблюдался одновременно в Симеизе, Терсколе и Краснодаре и были получены спектры, фотометрические кривые и высокоточная астрометрия. Определены спектральный тип объекта, показатель цвета, период вращения и т.п. В табл. приводятся полученные данные по всем объектам, наблюдаемым нами в 2015 г.

274

Таблица. Объекты исследований в 2015 г. Наблюдения выполнялись в Симеизе, Терсколе и Краснодаре.

N п/п	Название	Тип	Полученные данные		
1.	2006 UF204	MB	Фотометрические кривые, период		
			вращения, блеск в фильтрах UBVR,		
			разности цвета, оценки		
			таксономического класса		
2.	5392	MC	Фотометрические кривые, период		
			вращения, блеск в фильтрах UBVR,		
			разности цвета, оценки		
			таксономического класса		
3.	9773	MC	Фотометрические кривые, период		
			вращения, блеск в фильтрах UBVR,		
			разности цвета, оценки		
			таксономического класса		
4.	9400	Amor	Фотометрические кривые, период		
			вращения, блеск в фильтрах UBVR,		
			разности цвета, оценки		
			таксономического класса		
5.	2014 EM	NEO	Спектры, оценка таксономического		
			класса		
6.	348400	NEO, PHA	Спектры, фотометрические кривые,		
			период вращения, блеск в фильтрах		
			UBVR, разности цвета, оценки		
			таксономического класса		
7.	Icarus	NEO, PHA	Спектры, оценка таксономического		
			класса, сравнение с известными		
			параметрами для калибровки		
8. s	Haines	MC	Спектры, оценка таксономического		
			класса		

Примечание: МВ – главный пояс, МС – марс-кроссер.

Планово ведется работа по подготовке наблюдательных материалов к комплексному анализу и публикациям.

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, rykhlova@inasan.ru

Состав группы: Баканас Е.С., Барабанов С.И., Нароенков С.А.

#### Публикации:

 A. Terentjeva, E. Bakanas Meteorite producing fragment on the Apophis' orbit. Proceedings of the International Meteor Conference", Giron, France, 18-21 September 2014. Eds.: Rault J.-L., Roggemans P. IMO, Hove, Belgium, 2014, pp. 154-156.

2. А.К. Терентьева. «Предисловие» к монографии: И.С. Астапович. «Занимательные очерки о метеоритах». К 150-летию Одесского национального университета им. И.И. Мечникова. Ред. доц. В.А. Смирнов. 176 стр. Одесса, «Астропринт», 2015, стр. 3-5.

3. L.Rykhlova, E.Bakanas. The Minor Planets Databases//Baltic Astronomy (принята к печати в 2015).

4. Л.В. Рыхлова, А.П. Краминцев. Астероидно-кометная опасность и МЧС России. Что ждет МЧС от астрономии?// Тезисы международной конференции "Околоземная астрономия-2015" с.44, Издательство КБНЦ РАН, 2015.

5. Е.С. Баканас, С.И. Барабанов, С.В. Крючков, И.В. Николенко. Фотометрические наблюдения избранных астероидов в 2014 году в Симеизской обсерватории //Тезисы международной конференции "Околоземная астрономия-2015" с.16., Издательство КБНЦ РАН, 2015.

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

Аннотация. 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.

В 2015 г. в ИНАСАН 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.

Обработаны полученные ранее результаты многолетних наблюдений, проводимых на камерах с разными проницающими характеристиками, в т.ч. и на уникальной камере FAVOR. Впервые в мировой практике получены высокоточные данные о радиантах потока Тауриды и их дрейфе различными способами, один из которых разработан метеорной группой ИНАСАН. Полученные результаты положений радиантов субпотоков для слабых метеоров имеют отличия от результатов других исследователей (преимущественно для ярких метеоров) и требуют тщательного анализа.

Исследована методика вычисления масс слабых метеоров, движущихся в атмосфере Земли в режиме свободно-молекулярного обтекания, и построена математическая теория таких вычислений. Показана возможность применения этой теории для метеоров слабее +4<sup>m</sup>. Для подтверждения этой теории могут быть использованы данные о метеорах, зарегистрированных на камере FAVOR. Методика позволит получить четкую связь между видимой яркостью метеора и его массой, а в дальнейшем – ценную информацию о плотности верхних слоев атмосферы.

Также разработана методика вычисления характеристик плотности верхних слоев атмосферы (на высотах сгорания метеорных частиц), движущихся в режиме свободномолекулярного обтекания. Эти характеристики можно извлекать непосредственно из данных базисных регистраций метеоров, получаемых на телевизионных камерах. Необходимые для вычислений данные определяются из геометрической и фотометрической обработки многокадровых телевизионных регистраций нескольких метеоров одного метеорного потока, зарегистрированных в течение одной наблюдательной ночи.

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 обеспечения 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 подверженных 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 902H Ultimate и объективов Computar 6/0.8, <sup>1</sup>/<sub>2</sub>". 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

Состав группы: Болгова Г.Т., Карташова А.П., Леонов.

#### Публикации:

1. Kartashova Anna P., Bolgova Galina T. TV observations of the Perseid meteor shower in 2012-2013// Planetary and Space Science, (2015) V 118C, pp. 120-126.

2. Карташова А. П., Болгова Г. Т. "Исследование метеорного потока Персеиды"// Тезисы международной конференции "Околоземная астрономия-2015" с.33, Издательство КБНЦ РАН, 2015.

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

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

В работе (Emel'yanenko, V.V., Naroenkov, S.A., Jenniskens, P., Popova, O.P., 2014. Meteoritics and Planetary Science 49, 2169) 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 (Popova, O. P., Jenniskens, P., Emel'yanenko, V., et al., 2013. Science 342, 1073).

Рис. 1 демонстрирует типичные примеры изменения перигелийных расстояний q и наклонов для двух объектов из доверительной области, которые достигают околосолнечных состояний вблизи этого времени. Первый объект имел значение q = 0.038 а.е. при t = -1.1 миллиона лет, а второй – q = 0.050 а.е. при t = -1.2 миллиона лет. Уменьшение q до очень малых значений связано главным образом с действием векового резонанса  $V_6$ .



Рис. 1. Типичные изменения перигелийных расстояний и наклонов вблизи траектории Челябинского объекта на примере двух объектов из доверительной области: слева – объект 1; справа – объект 2 (данные для элементов орбит приведены каждые 500 лет, крестики отражают начальные положения объектов в 2013 году).

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. Института астрономии PAH, vvemel@inasan.ru **Состав группы**: Емельяненко Н.Ю., В.А., Нароенков С.А.

#### Публикация:

Emel'yanenko V.V. Lessons from the Chelyabinsk event. Asteroids: New Observations, New Models. Proceedings IAU Symposium No. 318, 2015 (in press).

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

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

Поясом Койпера называют область Солнечной системы за орбитой Нептуна, простирающуюся на расстояние примерно в 50 а.е. от Солнца [1]. Важной динамической особенностью пояса Койпера является относительная распространенность объектов, находящихся в резонансе средних движений (РСД) с Нептуном. Самыми многочисленными резонансными объектами являются «плутино», совершающие два оборота вокруг Солнца за время трех оборотов Нептуна. Динамика небесных тел при РСД характеризуется наличием процессов трех временных шкал: «быстрых», «полубыстрых» и «медленных». Они соответствуют орбитальному движению, изменению резонансной фазы  $\varphi$  (комбинации средних долгот и некоторых оскулирующих элементов) и вековой эволюции орбиты малого тела.

При некоторых предположениях изучение динамики объектов семейства «плутино» в рамках ограниченной круговой задачи трех тел сводится к исследованию гамильтоновой системы с нестандартной симплектической структурой

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{\partial \Xi}{\partial \Phi}, \quad \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{\partial \Xi}{\partial \varphi}, \quad \frac{dx}{dt} = \varepsilon \frac{\partial \Xi}{\partial y}, \quad \frac{dy}{dt} = -\varepsilon \frac{\partial \Xi}{\partial x} \quad . \tag{1}$$

Здесь  $\varepsilon_{-}$  малый параметр,  $x \sim e \cos \omega$ ,  $y \sim e \sin \omega$  ( $e_{-}$  эксцентриситет орбиты объекта,  $\omega_{-}$  аргумент перигелия), а гамильтониан  $\Xi$  имеет вид

$$\Xi(x, y, \varphi, \Phi) = \frac{\Phi^2}{2} + W(x, y, \varphi), \quad W(x, y, \varphi) = x \cos \varphi + y \sin \varphi + \cos 2\varphi.$$
(2)

Изменение наклонения i орбиты объекта и его эксцентриситета e связаны соотношением  $\sqrt{1-e^2}\cos i = c$ ,

где *С* – постоянная величина, отражающая сохранение проекции кинетического момента орбитального движения объекта на нормаль к плоскости эклиптики.

Наличие у системы (1) малого параметра позволяет провести исследование эволюции «медленных» переменных *x*, *y* методом усреднения. Усреднение проводится вдоль решений

$$\varphi(t, x, y, \xi), \Phi(t, x, y, \xi) \tag{3}$$

гамильтоновой системы с одной степенью свободы, гамильтонианом которой служит гамильтониан  $\Xi(\varphi, \Phi, x, y)$ , где x, y рассматриваются как независящие от времени параметры; параметр  $\xi$  равен значению гамильтониана на решении. В зависимости от значений  $x, y, \xi$  решение (3) может быть «колебательным» или «вращательным».

Примечательно, что при некоторых *x*, *y* условию  $\Xi = \xi$  могут удовлетворять два разных «колебательных» решения.

Усредненные уравнения имеют вид

$$\frac{dx}{dt} = \varepsilon \left\langle \sin \varphi \right\rangle_t, \quad \frac{dy}{dt} = -\varepsilon \left\langle \cos \varphi \right\rangle_t, \quad (4)$$

где  $T(x, y, \xi)$  – период решения (3),

$$\left\langle \sin \varphi \right\rangle_{t} = \frac{1}{T(x, y, \xi)} \int_{0}^{T(x, y, \xi)} \sin \varphi(t, x, y, \xi) dt,$$

$$\left\langle \cos \varphi \right\rangle_{t} = \frac{1}{T(x, y, \xi)} \int_{0}^{T(x, y, \xi)} \cos \varphi(t, x, y, \xi) dt.$$

$$(5)$$

Соотношение

$$\frac{d\varphi}{dt} = \pm \sqrt{2 \left[ \xi - \Xi(x, y, \varphi) \right]}$$

позволяет найти значение периода решения (3) и вычислить значения интегралов в правой части уравнений (5). Например, для «колебательных» решений

$$T(x, y, \xi) = 2 \int_{\varphi_{\min}}^{\varphi_{\max}} \frac{d\varphi}{\sqrt{2\left[\xi - \Xi(x, y, \xi)\right]}}, \quad \int_{0}^{T(x, y, \xi)} f(\varphi(t, x, y, \xi)) dt = 2 \int_{\varphi_{\min}}^{\varphi_{\max}} \frac{f(\varphi)d\varphi}{\sqrt{2\left[\xi - \Xi(x, y, \varphi)\right]}}.$$
 (6)

Здесь  $\varphi_{\min}$  и  $\varphi_{\max}$  обозначают наименьшее и наибольшее значение фазы в колебательном решении, вдоль которого ведется усреднение.

Для рассматриваемой системы интегралы (6) после несложных, но достаточно громоздких выкладок могут быть выражены через полные эллиптические интегралы I и III рода. Мы ограничимся только кратким описанием этого процесса. В случае

$$-\pi \le \varphi_* < \varphi^* \le \pi \tag{7}$$

после стандартной замены  $\lambda = tg \frac{\varphi}{2}$  получим

$$T(x, y, \xi) = 4 \int_{\lambda_*}^{\lambda^*} \frac{d\lambda}{\sqrt{2R_4(\lambda)}}, \quad \int_{\varphi_*}^{\varphi^*} \frac{\sin\varphi d\varphi}{\sqrt{2[\xi - \Xi(x, y, \varphi)]}} = 2 \int_{\lambda_*}^{\lambda^*} \frac{\lambda d\lambda}{(1 + \lambda^2)\sqrt{2R_4(\lambda)}}, \quad (8)$$

$$\int_{\varphi_*}^{\varphi^*} \frac{\cos\varphi d\varphi}{\sqrt{2\left[\xi - \Xi(x, y, \varphi)\right]}} = 2 \int_{\lambda_*}^{\lambda^*} \frac{(1 - \lambda^2) d\lambda}{(1 + \lambda^2)\sqrt{2R_4(\lambda)}}$$

Функция  $R_4(\lambda)$  в (8) является полиномом четвертой степени:

$$R_4(\lambda) = d_0 \lambda^4 + d_1 \lambda^3 + d_2 \lambda^2 + d_3 \lambda + d_4,$$

где

$$d_0 = \xi - 1 + x, d_1 = d_3 = -2y, d_2 = 2\xi - 6, d_4 = \xi - 1 - x.$$

Формулы (8) удобно переписать следующим образом:

$$T(x, y, \xi) = \frac{4}{\sqrt{2|d_0|}} I_{0,0}, \int_{\varphi_*}^{\varphi_*} \frac{\sin \varphi d\varphi}{\sqrt{2[\xi - \Xi(x, y, \varphi)]}} = \frac{2}{\sqrt{2|d_0|}} I_{1,1},$$
(9)  
$$\int_{\varphi_*}^{\varphi_*} \frac{\cos d\varphi}{\sqrt{2[\xi - \Xi(x, y, \varphi)]}} = \frac{2}{\sqrt{2|d_0|}} (I_{0,0} - 2I_{1,0}).$$

Обозначение  $I_{k,r}$  в (9) используется для интегралов специального вида:

$$I_{k,r} = \int_{\lambda_*}^{\lambda^*} \frac{\lambda^r d\lambda}{(\lambda^2 + 1)^k \sqrt{\pm (t - a_1)(t - a_2)(t - a_3)(t - a_4)}}$$

Здесь  $a_k$  – корни полинома  $R_4(\lambda)$ , а выбор знака определяется знаком  $d_0$ . Интегралы  $I_{k,r}$  могут быть записаны в виде линейных комбинаций полных эллиптических интегралов I и III рода:

$$I_{0,0} = c_{0,0}K(k), \quad I_{1,0} = c_{1,1}K(k) + c_{1,3}\Pi(h,k) + \overline{c}_{1,3}\Pi(\overline{h},k),$$
(10)  
$$I_{1,1} = g_{1,1}K(k) + g_{1,3}\Pi(h,k) + \overline{g}_{1,3}\Pi(\overline{h},k).$$

Значения коэффициентов  $c_{k,l}, g_{k,l}$ , модулей k и параметров h эллиптических интегралов в (10) зависят от выбора интервала интегрирования и свойств корней полинома  $R_4(\lambda)$ . Различные возможные ситуации разобраны в приложении А.

При использовании интегралов  $I_{k,r}$  эволюционные уравнения (4) приобретают следующий вид:

$$\frac{dx}{dt} = \varepsilon \frac{2I_{1,1}}{I_{0,0}}, \ \frac{dy}{dt} = \varepsilon \left[ 1 - \frac{2I_{1,0}}{I_{0,0}} \right].$$
(11)

Дальнейшего упрощения можно достичь, выразив  $I_{k,r}$  через эллиптические интегралы в соответствии с соотношениями (10):

$$\frac{dx}{dt} = \frac{2\varepsilon}{c_{0,0}} \left[ g_{1,1} + \frac{1}{K(k)} \left( g_{1,3} \Pi(h,k) + \overline{g}_{1,3} \Pi(\overline{h},k) \right) \right],$$
$$\frac{dy}{dt} = \varepsilon \left\{ 1 - \frac{2}{c_{0,0}} \left[ c_{1,1} + \frac{1}{K(k)} \left( c_{1,3} \Pi(h,k) + \overline{c}_{1,3} \Pi(\overline{h},k) \right) \right] \right\}.$$

Проведена классификация фазовых портретов эволюционных уравнений, характеризующих поведение решений системы (4) на разных уровнях  $\Xi = \xi$ , указаны критические значения  $\xi$ , при которых происходит качественная перестройка фазового портрета системы. В качестве примера на рис. 1 приведен фазовый портрет, характеризующий эволюцию медленных переменных в случае  $\Xi = 2$ .



Рис. 1. Фазовый портрет усредненных уравнений при  $\xi = 2$ 

В общем случае на плоскости x, y могут быть точки, в которых для заданного  $\xi$  решение (3) имеет апериодический (асимптотический) характер. Такие точки образуют кривую, именуемую кривой неопределенности. На кривой неопределенности проекции фазовых траекторий исходной системы (1) на плоскость медленных переменных совершают малые (~ $\varepsilon$ ) квазислучайные скачки по отношению к траекториям усредненных уравнений. Серия скачков приведет к размазыванию фазовой траектории системы (1) по некоторой области фазового пространства, именуемой областью адиабатического хаоса (на рис. 1 область адиабатического хаоса заштрихована).

Если в области адиабатического хаоса выбрать траекторию, лежащую достаточно далеко от начала координат (что соответствует большим значениям эксцентриситета объекта и малым значениям наклонения), то в результате квазислучайных скачков такое движение может трансформироваться в движение в окрестности начала координат (т.е., в движение с малым эксцентриситетом и большим наклонением). Таким образом, РСД приводят к появлению в поясе Койпера динамически «горячих» объектов, движущихся по орбитам с большим наклонением 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; <u>vvsidorenko@list.ru</u>

Состав группы: Батхин Б.М., к.ф.-м.н., с.н.с., Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН, Ефимов С.С., студент МФТИ.

#### Публикации:

1. Ефимов С.С.: Исследование модельной системы, описывающей вековую эволюцию «резонансных» объектов пояса Койпера // Труды 58-ой научной конференции МФТИ. Москва, МФТИ.

 Сидоренко В.В.: Динамика «прыгающих» троянцев: исследование методами теории возмущений // Тезисы докладов IX международной конференции «Околоземная астрономия».

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

Аннотация. Все исследованные обыкновенные хондриты характеризуются сильной трехмерной анизотропией физико-механических свойств, которая аппроксимируется вытянутым эллипсоидом с соотношением главных полуосей а:(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×(20-30)×(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 (рис. 1). 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 (табл. 1). Как правило, длинная ось (*a*) фигуры исследуемых фрагментов метеоритов совпадает с длинной осью (*a<sub>c</sub>*) эллипсоида анизотропии.



Рис. 1. Ориентация эллипсоида анизотропии физико-механических свойств с полуосями a<sub>c</sub>>b<sub>c</sub>≥c<sub>c</sub> во фрагментах метеоритов: а) метеорит SAUH 001; b) метеорит Царев, фрагмент №15390.9; c) метеорит Царев, фрагмент №15384.1.

Таблица 1. Трехмерное распределение физико-механических свойств в обыкновенных хондритах.

Название	Оси эллипсоида анизотропии		Среднее		
	а	b	С	для	
				Образца	
Метеорит SAUH 001 ( <i>a</i> / <i>c</i> = <b>1.6</b> )					
Предел прочности на сжатие, МПа	143	94	91	105	
Количество измерений	6	7	10	23	
Коэффициент вариации, %	20	29	23	31	
Предел прочности на растяжение, МПа	18	17	18	18	

Количество измерений	13	13	14	40		
Коэффициент вариации, %	28	26	27	27		
Метеорит Царев, обр. №15390,9 ( <i>а</i> , <i>c</i> =1.6)						
Предел прочности на сжатие, МПа	262	168	160	203		
Количество измерений	25	27	13	65		
Коэффициент вариации, %	19	37	29	35		
Предел прочности на растяжение, МПа	28	34	27	29		
Количество измерений	23	20	33	76		
Коэффициент вариации, %	32	35	31	34		
Метеорит Царев, обр. №15384,1 ( <i>а</i> , <i>c</i> =1.3)						
Предел прочности на сжатие, МПа	223	182	174	194		
Количество измерений	22	17	20	59		
Коэффициент вариации, %	29	25	29	30		
Предел прочности на растяжение, МПа	31	34	29	31		
Количество измерений	12	24	25	61		
Коэффициент вариации, %	33	30	42	35		

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 (рис. 2).

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, которая записывается в удобном для вычислений виде

$$\tau_{max} = \sigma_0 F(\varepsilon, v) \tag{1},$$

где размерный коэффициент  $\sigma_0 = \frac{9}{8\pi} \frac{GM^2}{a^2 bc}$ , *G* – гравитационная постоянная, *M* – масса

тела ( $M = \frac{4}{3} \pi \rho_0 R_m^3$ , где  $R_m$  – средний радиус равнообъемного тела), *a*, *b* и *c* – главные полуоси фигуры тела, а *F*(*ε*,*v*) – безразмерная функция.



Рис. 2. Вытянутый эллипсоид с полуосями a>b=с в сферических координатах. Все обозначения компонент векторов деформации описаны в тексте.

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. В качестве примера на рис. 3 и 4 показана величина и распределение девиаторного напряжения для разных значений эксцентриситета фигуры тела (рис. 3) и для разных значений коэффициента Пуассона (рис. 4).



Рис. 3. Распределение девиаторных напряжений (τ<sub>max</sub>) от центра к поверхности (r) в экваториальной плоскости (θ=π/2) вытянутого эллипсоида малого тела для вещества с коэффициентом Пуассона v = 0.31. Сплошной линией показано распределение девиаторных напряжений для малого тела с эксцентриситетом фигуры ε = 0.4; пунктирной линией – для ε = 0.6; штриховой линией – для ε = 0.8.



Рис. 4. Распределение девиаторных напряжений (τ<sub>max</sub>) от центра к поверхности (r) в экваториальной плоскости (θ=π/2) вытянутого эллипсоида малого тела с эксцентриситетом ε = 0.8. Сплошной линией показано распределение девиаторных напряжений для вещества малого тела с коэффициентом Пуассона ν = 0.17; пунктирной линией – для ν = 0.28; штриховой – для ν = 0.31; штрихпунктирной линией – для ν = 0.42.

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

Состав группы: Слюта Евгений Николаевич, к.г.-м.н., зав. лаб., ГЕОХИ РАН, Воропаев Сергей Александрович, к.ф.-м.н., с.н.с., ГЕОХИ РАН.

#### Публикации:

 Слюта Е.Н., Воропаев С.А. История проблемы и аналитическое решение для гравитационной деформации малых тел Солнечной системы. Астрономический Вестник. 2015. Т. 49. №2. С. 131-147.

2. Слюта Е.Н. Физико-механические свойства каменных метеоритов. Астрономический Вестник. 2016. (В печати).

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.

**Аннотация.** 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 67Р 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 67Р и от кометы к комете.

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

По этому направлению выполнен геолого-морфологический анализ большого количества снимков, полученных ТВ камерой NavCam, KA «Розетта», на северную часть кометы 67Р в период с августа 2014 по январь 2015 года. В это время KA «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) (Sierks et al., 2015) (рис. 1). Основные объекты проведенных исследований: уступ Хатор (Hathor), находящаяся его подножия равнинная местность Хапи (Hapi) и граничащий с ними район сложного рельефа Анукет (Anuket). Кроме того, с

привлечением цифровой модели поверхности (Preusker et al., 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 67Р 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 (Basilevsky et al., 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 (Thomas et al., 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 (Thomas et al., 2015; El-Maarry et al., 2015) трещины растяжения. Этот выброс произошел вблизи перигелия орбиты кометы 76Р (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 свежевыпавшего 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

291

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 67Р/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. Качественно состав ядра кометы характеризуется следующими особенностями.

*Минеральная компонента* определялась по составу пылевых частиц с помощью приборного комплекса COSIMA – COmetary Secondary Ion Mass Analyser. К настоящему времени опубликованы результаты исследования лишь одной частицы, названной Борис. В ее составе был определен магний и натрий. Мg, видимо, входит в состав силикатов – оливина и пироксена – основных минералов ядер комет. В состав каких минералов входит Na, пока определить не удалось, хотя ранее он регистрировался в составе кометной пыли, собранной зондом NASA Stardust у кометы Wild 2, а также в составе комы некоторых других комет, например кометы Hale-Bopp.

Ледяная компонента ядра кометы, образующая в результате сублимации льдов основной состав ее комы, изучалась с помощью масс-спектрометров DFMS и RTOF инструмента ROSINA и спектрометрами инструмента VIRTIS (Visible and Infrared Thermal Imaging Spectrometer). Было определено, что основными газами комы, как и большинства других комет, являются H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> и CO. В качестве компонентов-примесей в ней присутствуют углеводороды CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, CH<sub>3</sub>OH, C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>, также соединения азота HCN, NH<sub>3</sub> и N<sub>2</sub> и серы – H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>, COS. Особый интерес представляет определение в составе комы формальдегида - CH<sub>2</sub>O. Из микрокомпонентов с помощью масс-спектрометра DFMS инструмента ROSINA был обнаружен молекулярный кислород, относительное содержание которого  $O_2/H_2O = 0.0380 \pm 0.0085$  оказалось вдвое выше ожидаемого, а также <sup>36</sup>Ar. Его мольное обилие относительно воды  ${}^{36}$ Ar/H<sub>2</sub>O = (0.1 ÷ 2.3) × 10<sup>-5</sup> и значение изотопного отношения  ${}^{36}\text{Ar}/{}^{38}\text{Ar} = 5.4 \pm 1.4$ ; относительно большой разброс значений объясняется гетерогенностью комы. Значение изотопного отношения <sup>36</sup>Ar/<sup>38</sup>Ar для 67Р оказалось близко как значению для Земли (5.3), так и для солнечного ветра (5.5). Важное космохимическое значение имеет обнаружение высокой корреляции между содержаниями <sup>36</sup>Аг и N<sub>2</sub>. Мольное соотношение  ${}^{36}$ Аг/N<sub>2</sub> = (9.1 ± 0.3) × 10<sup>-3</sup>, что свидетельствует не только 292

о том, что летучести этих компонентов близки, но и о том, что механизм их аккумуляции в твердой фазе был аналогичным – скорее всего сорбция аморфным льдом. В то же время корреляции между содержаниями CO и <sup>36</sup>Ar, а также CO и N<sub>2</sub>, установлено не было. Это может свидетельствовать о каких-то вторичных процессах, протекавших в теле кометы, возможно связанных с изменением структуры льда воды с аморфной на кристаллическую. Поскольку это экзотермический процесс, он мог вызывать сублимацию льдов наиболее летучих компонентов – Ar и N<sub>2</sub>, при этом основная часть CO могла сохраниться уже в форме кристаллогидрата CO·5.75H<sub>2</sub>O, имеющего более высокую температуру сублимации, нежели CO<sub>2</sub>(лед). Следует подчеркнуть, что измерения содержаний в коме кометы 67Р всех высоко летучих компонентов – CO, Ar и N<sub>2</sub> – проводились в октябре 2014 года, когда комета находилась значительном удалении от Солнца.

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**. Такая возможность предполагалась еще на ранних этапах изучения 67Р, когда было установлено, что значение альбедо ее поверхности весьма низко (0.06), впрочем, как и других комет, хотя не исключалось, что оно объясняется тем, что поверхность комет покрыта пылевой матрицей, образующейся при сублимации льдов. Позднее присутствие органических соединений на поверхности 67Р 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 67Р. Полученное значение  $D/H = 5.3 \times 10^{-4}$  более чем в три раза больше земной величины 1.56 ×10<sup>-4</sup> и значений для двух других комет семейства Юпитера - 103P/Hartley 2 и 45P/Honda-Mrkos-Pajdušáková. Это 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 67Р, также вряд ли могли быть источником и азота на Земле. Согласно опубликованным данным, относительное содержание в ней двух близких по температурам сублимации компонентов N<sub>2</sub> и CO в несколько десятков раз ниже солнечных пропорций: по результатам серии из 138 измерений среднее значение составляет  $N_2/CO = (5.70 \pm$ 0.66)·10<sup>-3</sup>. Кроме того, обилие N<sub>2</sub> ниже любого иного азот-содержащего компонента кометы.

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

Состав группы: ведущий научный сотрудник ГЕОХИ РАН, доктор хим. наук В. А. Дорофеева; старший научный сотрудник Института динамики геосфер РАН, кандидат физ-мат. наук, Н.А. Артемьева; старший научный сотрудник ГЕОХИ РАН, кандидат геол.мин. наук, Н.Э. Демидов; младший научный сотрудник ГЕОХИ РАН.

#### Публикации:

1. Basilevsky, A.T. et al., 2015. NavCam observations of the Hathor cliff and Hapi area on the nucleus of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. Lunar and Planetary Science 46. Abs. 1152.

2. Basilevsky, A.T. et al., 2015. NavCam and ROLIS observations of the nucleus of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. The Sixth Moscow Solar System Symposium (6M-S<sup>3</sup>). IKI RAN.Moscow. Abs. 6MS3-SB-06.

3. Basilevsky A.T., Mall U., Keller H.U.<sup>3</sup>, Skorov Yu.V., Hviid S.F., Mottola S., Krasilnikov S.S.,

4. Dabrowski B., 2015.Geologic analysis of the Rosetta Navigation Camera and ROLIS images in selected areas on the nucleus of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. Icarus (in press).

5. Dorofeeva, V.A., 2015. Studies of comets and problems of cosmochemistry. The Sixth Moscow Solar System Symposium (6M-S<sup>3</sup>). IKI RAN.Moscow. Abs. 6MS3-GP-05.

6. Дорофеева В.А., Базилевский А.Т. 2015. Космические миссии «Dawn» и «Rosetta»: предварительные итоги. Труды ВЕСЭМПГ-2015. Т.2. с. 233-237.

#### Проект 8.9. Динамика пыли на безатмосферных телах.

Аннотация. 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, превалируют 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.

Из классической молекулярно-кинетической теории известно, что для любого ансамбля частиц среднеквадратические флуктуации компоненты скорости частиц обратно

пропорциональны массе и пропорциональны абсолютной температуре  $\langle v_i^2 \rangle = \frac{k_B T}{m}$ . Для

Луны при T~400 К, получим  $v_{\perp} \approx \sqrt{6 \frac{10^{-21}}{m}} \approx 2 \frac{10^{-12}}{d_{eff}^{\frac{3}{2}}} \text{ ms}^{-1}$  (здесь *d* в метрах). С такой

начальной скоростью пылевая частица может подняться на высоту  $h \approx \frac{k_B T}{\rho g d_{eff}^3} \approx \frac{10^{-24}}{d_{eff}^3} \,\mathrm{m}$ .

Принимая  $\rho \approx 3 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$  и  $g \approx 1.6 \text{ m s}^{-2}$ , получим, что

– для частиц размером 100 нм – v~ нескольких см в сек. и поднимаются они только на h~ 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 будет рассмотрен механизм разрушающего влияния частиц лунной пыли на оборудование и материалы. Тепловая энергия отдельного атома 3kT/2 и, следовательно, средняя кинетическая энергия отдельной наночастицы мала. Однако эффективность разрушающего эффекта зависит не только от величины энергии, но и от того, куда она приложена. Если материал, который подвергается воздействию состоит из относительно слабо связанных фрагментов, внутри которых атомы достаточно сильно связаны (например полимерные цепи, поликристаллы и т.д.), пороговой энергией разрушения материала является энергия связи отдельных фрагментов. Для более эффективного воздействия масса пылевой частицы, которая воздействует на фрагмент материала, должна приблизительно соответствовать массе фрагмента материала. Если масса частицы будет много меньше, она отразится, сохраняя свою кинетическую энергию. Если масса частицы мастицы много больше, при ударе ее энергия распределиться среди большего числа фрагментов. Только в случае, когда массы частицы и фрагмента материала близки, частица (в случае центрального удара) остановится и передаст свою энергию фрагменту.

Кроме того, необходимо принять во внимание вращение пылевых частиц, особенно это важно при рассмотрении разрушения полимерных цепочек. Учитывая принцип равного распределения энергии по степеням свободы, сфероид с массой м должен вращаться со

скоростью  $v \approx \sqrt{\frac{5k_BT}{2m}}$ . Для микронной частицы (массой порядка  $10^{-15}$  кг) эта скорость

порядка миллиметров в сек., но для пылевых частиц размером 10 нм (10<sup>-21</sup> кг) эта скорость уже несколько метров в сек. Так как форма лунных пылевых частиц далеко 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  $k_BT$  превышает энергию притяжения между ними, порошок будет вести себя как газ. В частности, удельный объем отдельной пылевой частицы, который она "отвоевывает" себе в ансамбле, расталкивая другие пылинки, может получиться гораздо больше ее реального объема  $V = \frac{m}{\rho}$ . Для идеального газа и для ансамбля отдельных наночастиц под давлением P удельный объем равен  $V_{ig} = \frac{k_B T}{\rho}$ . Пылевые частиц, плотность материала которых  $\rho \approx 3 \times 10^3$  kg m<sup>-3</sup>, насыпанные на поверхность слоем толщиной порядка 1 см при g = 9.8 ms<sup>-2</sup> создают на дне слоя давление порядка 300 Pa. Следовательно, при температуре  $T \approx 300$  K и диаметре частиц d условие  $V_{ig} \approx 1.5 \times 10^{-23} > V \approx 0.5d^3$  m<sup>-3</sup> выполняется, если d < 30 nm. В результате должна была бы уменьшаться насыпная плотность порошка и появляться ее зависимость от толщины слоя и от температуры. 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. Однако, в отличие от того, что предсказывает формула  $V_{ig} = {}^{k_B}T/_{P}$ , эта плотность пропорциональна не давлению *P*, а по некоторым данным, скорее  $P^{1/3}$ . Нам не известны также какие-либо экспериментальные подтверждения обратно пропорциональной связи между насыпной плотностью и температурой. В то же время имеется множество свидетельств в 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.

Естественно ожидать, что когда  $k_B T$  превысит энергию связи пары частиц, в этих структурах должен возникать некий аналог перехода жидкость-пар. В результате с ростом температуры конгломераты должны распадаться, если, конечно, до тех пор порошинки не спекутся и не расплавятся. Отметим, что в земных условиях весьма вероятна адсорбция на

поверхности пылинок активных молекул из окружающей среды, в частности, из атмосферы. Это должно вести к дополнительной стабилизации конгломератов, сформированных силами Ван-дер-Ваальса, и к росту температуры их распада.

Так как на Луне атмосферы нет, там этот механизм стабилизации агрегатов из наночастиц реголита в естественных условиях не должен реализоваться. Поэтому можно предполагать, что температура распада конгломератов на отдельные частицы на Луне ниже, чем в обычных условиях на Земле. Не исключено, что причиной крайне высокой адгезии к 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.

Состав группы: Е.В. Розенфельд, А.В. Королев ИФМ УрНЦ РАН.

#### Публикации:

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