

На правах рукописи



Слюта Евгений Николаевич

**Особенности гравитационной
деформации малых тел Солнечной
системы в зависимости от их
химического и минерального состава**

**Специальность - 25.00.09 - геохимия,
геохимические методы поисков полезных ископаемых**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук**

Москва 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции Институте геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН)

Научный руководитель: доктор химических наук, член-корреспондент РАН, Олег Львович Кусков (ГЕОХИ РАН).

Официальные оппоненты: Анатолий Михайлович Никишин, доктор геолого-минералогических наук, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (МГУ), профессор.

Павел Васильевич Флоренский, доктор геолого-минералогических наук, Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина, профессор.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН).

Защита состоится «21» мая 2014 г. в «11» часов на заседании диссертационного совета Д002.109.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН (ГЕОХИ РАН) по адресу: 119991, Москва В-334, ул. Косыгина 19, факс (495) 938-20-54, e-mail: dissovetal@geokhi.ru

Электронный адрес размещения:
на сайте ВАК:
на сайте ГЕОХИ РАН: www.geokhi.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН (ГЕОХИ РАН)

Автореферат разослан «__» марта 2014 г.

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные гербовой печатью, просим направлять на адрес ГЕОХИ РАН и по электронной почте dissovetal@geokhi.ru учёному секретарю диссертационного совета. Отзывы должны быть предоставлены в совет и размещены на сайте ученым секретарем не позднее, чем за 15 дней до защиты.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д002.109.02
кандидат геолого-минералогических наук



Н.А. Мигдисова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований. «К сожалению, нет точных данных о том, с какой величины массы астероида теряется или начинает теряться угловатость его форм; но если бы эту грань найти, это было бы вместе с тем гранью между состояниями пространства гравитационным и кристаллическим». (Б.Л. Личков, 1965).

Все твердые тела в Солнечной системе на основе внешних морфологических признаков, т.е. в зависимости от формы тела могут быть разделены на два основных класса. Это класс малых тел, которые обладают неправильной фигурой, т.е. имеют вид обломка или глыбы. Это малые спутники планет, астероиды, кометы и малые объекты из пояса Койпера. Это тела, которые в силу своей недостаточной массы так и не стали планетными телами. В другом классе объединяются планетные тела, которые характеризуются шарообразной равновесной формой. Это планеты, крупные спутники планет, астероиды Церера и Веста и крупные объекты из пояса Койпера. Шарообразная форма планетных тел образуется в результате гидростатического уравнивания поверхности тела, известного в геотектонике как механизм изостатической компенсации или механизм изостазии. Равновесная фигура планетного тела контролируется силой тяжести, т.е. гравитацией, которая доминирует над прочностными свойствами вещества, как если бы вещество тела было представлено гравитирующей несжимаемой жидкостью. Только в планетном теле возможна плотностная дифференциация на оболочки.

До настоящего времени проблема наблюдаемого перехода между малыми и планетными телами, зависимость этого перехода от состава, массы и размеров тел, от физико-механических и реологических свойств вещества, оставалась практически неисследованной областью в космохимии и планетологии. Многие фундаментальные вопросы наблюдаемого перехода между такими разными внешне и внутренне объектами, как малые и планетные тела, которые с определенного момента своего образования характеризуются разной формой организации вещества и его различной эволюцией, по-прежнему остаются без ответов. Например, является ли состоятельной предложенная много лет назад гипотеза крипа в малых телах (Личков, 1965; Johnson, McGetchin, 1973; Симоненко, 1979) или, напротив, они обладают пределом прочности и текучести и как эти свойства зависят от состава и температуры? Какова максимальная (критическая) масса малых тел определенного состава, после которой они должны подвергнуться гравитационной деформации, и какова минимальная наблюдаемая масса планетных тел аналогичного состава? Какими основными параметрами определяется гравитационная деформация этих тел? И др. Отсутствие ответов на эти и другие подобные вопросы объясняется, прежде всего, тем, что необходимые по качеству и количеству данные по химическому и минеральному

составу и морфологии малых тел Солнечной системы появились лишь в последние 10-15 лет. Появление таких данных было обусловлено не только применением новейших технологий в дистанционных исследованиях малых тел с Земли, но и прежде всего, исследованием этих объектов (комет, астероидов, малых спутников планет) непосредственно с борта космических аппаратов.

Цель работы. Экспериментальное и теоретическое исследование процесса и параметров гравитационной деформации малых тел Солнечной системы в зависимости от их химического и минерального состава, температуры, физико-механических и реологических свойств вещества, массы, размеров и формы этих тел.

Задачи исследования. Для достижения поставленных целей были сформулированы и решены следующие задачи:

- Анализ зависимости формы малых тел Солнечной системы от химического и минерального состава и массы.
- Исследование физико-механических и реологических свойств малых тел Солнечной системы в зависимости от химического и минерального состава.
- Экспериментальное изучение физико-механических свойств каменных метеоритов, родительскими телами которых являются силикатные малые тела Солнечной системы.
- Постановка и решение пространственной задачи теории упругости и оценка применимости линейной теории упругости к гравитационной деформации малых тел.
- Оценка и изучение основных параметров гравитационной деформации малых тел Солнечной системы в зависимости от их химического и минерального состава на основе наблюдательных, экспериментальных и аналитических данных.

Методы исследований. Для изучения основных морфометрических параметров малых тел Солнечной системы различного состава использовался метод диаграммы Фудзивары отношения главных полуосей (Fujiiwara и др., 1978). Для исследования крипа в малых телах Солнечной системы различного состава изучалась зависимость изменения морфометрических параметров фигуры тел от массы. Были проанализированы все имеющиеся на сегодня наблюдательные, экспериментальные и аналитические данные по физико-механическим свойствам внеземного вещества и веществ-аналогов малых тел различного состава, опубликованные в научной печати. Для исследования трехмерного распределения физико-механических свойств каменных метеоритов в одном образце была разработана специальная экспериментальная методика (Slyuta и др., 2014). Аналитическое решение пространственной задачи линейной теории упругости для твердого упругого тела под воздействием гравитации осуществлялось с учетом математического аппарата, разработанного для решений плоских задач линейной теории упругости (Новожилов, 1953).

Фактический материал. Основной материал для исследований – это имеющийся на сегодня огромный объем наблюдательных данных по морфологии, химическому и минеральному составу и физико-механическим и реологическим свойствам вещества малых тел Солнечной системы, полученных как с помощью дистанционных исследований с поверхности Земли, так и с помощью межпланетных автоматических станций и опубликованных в научной печати. В исследованиях также использовались данные по химическому и минеральному составу и физико-механическим свойствам внеземного вещества – каменных и железных метеоритов, и веществ-аналогов (льда) малых тел Солнечной системы. Это также полученные в ходе экспериментальных исследований данные по физико-механическим и реологическим свойствам железных и каменных метеоритов и зависимости этих свойств от химического и минерального состава метеоритов.

Научная новизна работы. На основе проведенного детального анализа формы, массы и размеров многочисленных малых тел силикатного состава, состоящих из обыкновенных и углистых хондритов, металлических астероидов, малых ледяных тел, состоящих преимущественно из водного льда и малых койперовских объектов, в составе которых кроме силикатной компоненты и водного льда в значительном количестве присутствуют и экзотические льды других летучих, показана несостоятельность гипотезы крипа в малых телах Солнечной системы (Личков, 1965; Johnson, McGetchin, 1973; Симоненко, 1979). Обнаружено, что малые тела различного состава характеризуются различной формой. При этом зависимость формы от массы отсутствует у малых тел любого состава – от ледяных до металлических, хотя они и радикально отличаются друг от друга физико-механическими и реологическими свойствами.

Впервые получено аналитическое решение для гравитационной деформации неравновесной фигуры твердых малых тел Солнечной системы и показана применимость линейной теории упругости для оценки величины и распределения напряжений в реальных малых телах различного состава, обладающих пределом прочности и пределом текучести.

Было установлено, что для ледяных тел и койперовских объектов наблюдаемый переход между малыми и планетными телами обусловлен гравитационной деформацией твердого льда, характеризующегося определенным значением предела текучести при низких температурах в зависимости от состава льдов, а не термальным эффектом, т.е. разогревом и плавлением льда в результате каких-либо причин.

Полученные оценки современных девиаторных напряжений в металлических астероидах с учетом выведенной температурной зависимости предела текучести железных метеоритов показывают, что с момента своего образования в виде отдельных тел с наблюдаемой массой и фигурой металлические астероиды не подвергались разогреву более 400°C, и тем более не подвергались частичному или полному плавлению.

По данным нескольких сотен экспериментальных исследований впервые было обнаружено, что все исследованные обыкновенные хондриты характеризуются сильной пространственной анизотропией физико-механических свойств, когда по одному из трех направлений прочность значительно превышает значения по двум другим направлениям. Полученные экспериментальные данные по физико-механическим свойствам каменных метеоритов позволили оценить критическую массу и размеры силикатных тел, состоящих из обыкновенных и углистых хондритов, которые подвергнутся гравитационной деформации. Анализ основных параметров гравитационной деформации малых тел показал, что силикатные тела, состоящие из обыкновенных и углистых хондритов, хотя и обладают практически одинаковыми критическими размерами, тем не менее, значительно отличаются друг от друга по своей критической массе и пороговой величине максимальных девиаторных напряжений, ответственных за деформацию.

Полученная значительная разница в величине современных девиаторных напряжений на астероиде 4 Веста и предела текучести силикатов аналогичного состава подтверждает, что Веста на ранней стадии существования подверглась сильному разогреву, а возможно, и полному плавлению. В противном случае Веста никогда бы не приобрела шарообразную равновесную форму и, тем более, не продифференцировала бы на оболочки. Оцененная величина девиаторных напряжений на астероиде 1 Церера также в два раза ниже минимального предела прочности углистых хондритов. По-видимому, в составе Цереры в значительном количестве присутствует еще менее прочный материал, например, водный лед. На присутствие льда в составе Цереры указывает и невысокая плотность Цереры.

Данная работа представляет собой самостоятельное направление исследований в мало изученной области сравнительной планетологии и космохимии – в области гравитационной деформации малых тел и проблемы наблюдаемого перехода между малыми и планетными телами Солнечной системы в зависимости от их химического и минерального состава.

Основные защищаемые положения

1. На основе проведенного детального анализа формы, массы и размеров многочисленных малых тел силикатного состава, состоящих из обыкновенных и углистых хондритов, металлических астероидов, малых ледяных тел, состоящих преимущественно из водного льда, и малых койперовских объектов, показано отсутствие крипа в малых телах Солнечной системы. Все малые тела независимо от своего химического и минерального состава (от ледяных до металлических) представляют собой твердые упругие тела, которые в условиях объемного гравитационного сжатия обладают пределом прочности и пределом текучести.

2. Получено аналитическое решение для гравитационной деформации неравновесной фигуры твердых малых тел Солнечной системы и впервые показана применимость линейной теории упругости для оценки величины и распределения напряжений в реальных малых телах различного состава, обладающих пределом прочности и пределом текучести. В результате проведенного анализа обнаружено, что величина и распределение 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.
3. Оценены пределы текучести для малых ледяных тел ($0.14 < \sigma_p < 0.87$ МПа) и койперовских объектов ($0.002 < \sigma_p < 0.49$ МПа). На основе этого анализа сделан вывод, что в Солнечной системе спутник Сатурна Гиперион представляет собой самое крупное малое ледяное тело ($R_{cp}=135$ км), а спутник Сатурна Мимас - самое маленькое ледяное планетное тело ($R_{cp}=198.2$ км). Спутник Сатурна Феба, состав которого аналогичен составу койперовских объектов, обладает самым низким пределом текучести и является самым маленьким планетным телом ($R_{cp}=106.5$ км). Впервые показано, что предел прочности койперовских объектов размером более 60 км увеличивается по квадратичному закону в зависимости от массы и размеров этих тел, что приводит к наблюдаемому дефициту кометных ядер диаметром более 60 км.
4. На основе существующих стандартов разработана методика экспериментальных трехмерных исследований физико-механических свойств в одном образце метеорита. В результате проведения нескольких сотен экспериментальных измерений предела прочности на образцах разных метеоритов впервые обнаружено, что все исследованные обыкновенные хондриты характеризуются сильной трехмерной анизотропией физико-механических свойств, когда по одному из направлений предел прочности на сжатие значительно превышает значения по двум другим направлениям. Экспериментально установленная анизотропия аппроксимируется вытянутым эллипсоидом с соотношением главных полуосей $a:(b=c)=1.6:1$.

Практическое значение работы. Полученные результаты позволяют определить и отобрать наиболее интересные малые тела для исследования с помощью космических аппаратов при планировании Федеральной космической программы. Данные по физико-механическим свойствам малых тел в зависимости от их химического и минерального состава являются необходимой основой для создания надежных инженерных моделей этих тел, используемых для проектирования космических посадочных аппаратов для их исследования и грунтозаборных устройств для отбора образцов грунта. Полная карта величины и распределения напряжений в твердом природном космическом объекте может

быть использована для оценки основных параметров естественного или принудительного разрушения данного объекта и адекватной оценки астероидной опасности для Земли.

Апробация работы. Различные аспекты этой работы докладывались автором и обсуждались на международных и всероссийских конференциях и рабочих встречах в виде устных и стендовых докладов: 1) на международных конференциях по сравнительной планетологии “Vernadsky-Brown Microsymposium” (2006-2010), г. Москва, ГЕОХИ РАН; 2) на международных конференциях по планетологии “Lunar and Planetary Science Conference” (2006-2013), г. Хьюстон (США); 3) на международной конференции “Asteroids, Comets, Meteors”, г. Ниигата, Япония (2012); 4) на семинаре Отдела планетных исследований ГЕОХИ РАН (2012), г. Москва, ГЕОХИ РАН.

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликованы две главы в монографии «Защита населения и территорий от астероидной и кометной опасности (Основные подходы)» (2014), в реферируемых журналах опубликовано 7 статей (Доклады Академии Наук СССР, 1992, 1998; Icarus, 1997; Астрономический Вестник, 1993, 2009, 2013; 2014) и две статьи находятся в печати (Астрономический Вестник, 2014, Icarus, 2014). Кроме того, опубликован 21 развернутый (2 стр.) тезис докладов на международных лунно-планетных конференциях (г. Хьюстон, США; г. Laurel, США; Washington, США, г. Ниигата, Япония) и на международных микросимпозиумах Вернадский-Браун (г. Москва).

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из одного тома, включает в себя введение, 4 главы, заключение, основные защищаемые положения, общий вывод и 1 приложение. Объем работы составляет 179 машинописных страниц, включая 87 иллюстраций и 20 таблиц. Библиографический список к работе включает 361 наименование.

Благодарности. Автору хотелось бы выразить глубокую благодарность за постоянную поддержку, помощь и обсуждение работы академику Марову М.Я. и научному руководителю член-корреспонденту РАН Кускову О.Л. Автор глубоко признателен за постоянную помощь, и консультации по проблемам современной теории упругости сотруднику ГЕОХИ РАН Воропаеву С.А. Автор также благодарен за поддержку и помощь в экспериментальных исследованиях сотрудникам ГЕОХИ РАН Назарову М.А., Лоренцу К.А., Корочанцеву А.В., Скрыпник А.Я. и бывшему сотруднику института Никитину С.М. Автор также с благодарностью хотел бы отметить поддержку и позитивное отношение к проблеме сотрудников лаборатории Базилевского А.Т., Яковлева О.И., Кузьмина Р.О., Забалуевой Е.В. и Гусевой Е.Н.

Глава 1. История проблемы

История проблемы самогравитации и неупругой деформации твердых малых и планетных тел Солнечной системы тесно связана с историей представлений о форме твердой Земли на основе теории тяготения Ньютона. История этих представлений в геологии и сравнительной планетологии развивалась по двум основным направлениям, конкурирующих друг с другом – термальному и гравитационному.

Согласно термальной гипотезе современная форма нашей планеты была унаследована из ее далекого горячего прошлого, когда Земля была жидкой и по законам гидростатики приняла шарообразную форму. Со временем она остыла, затвердела, и над силами тяготения стали доминировать силы трения. Впервые понятие планетарности Земли, которое характеризует ее шарообразную форму, ввел А.К. Клеро (1713-1765). Термальную гипотезу разделяли И. Кант (1724-1804), П.С. Лаплас (1749-1827) (гипотеза Канта–Лапласа), У. Томсон (1824-1907), А.М. Ляпунов (1857-1918) и др.

В представлениях гравитационной гипотезы шарообразная равновесная форма Земли образовалась в процессе гравитационной деформации неправильной фигуры твердого тела под воздействием собственной массы тела, т.е. самогравитации, когда над силами трения твердого тела доминируют силы тяготения. Впервые представление о гравитации, как о главной движущей геологической силе, было рассмотрено основоположником геологической науки Дж. Геттоном (1726-1797) в его работе «Теория Земли». Геттон полагал, что гравитация, «сила материала» и «громадность протекшего времени» объясняют не только все геологические процессы на Земле, но и ее шарообразную форму. Гравитационную гипотезу поддерживали Дж. Плейфер (1748-1819), Дж. Гершель (1792-1871), И.Д. Лукашевич (1863-1928), А. Вегенер (1880-1930), В.А. Магницкий (1915-2005), Б.Л. Личков (1888-1966) и др.

По мере накопления данных по морфологии астероидов проблема перехода между малыми и планетными телами вновь стала актуальной и возродилась в виде верхнего предела неправильной фигуры астероидов и других малых тел Солнечной системы. Предполагалось, что в результате крипа и отсутствия предела прочности характер перехода между малыми и планетными телами должен быть постепенным (Johnson, McGetchin, 1973; Симоненко, 1979; Farinella и др., 1982). Но гипотеза крипа оказалась несостоятельной, а наблюдаемый переход оказался не постепенным, а резким. В результате комплексного анализа наблюдательных, экспериментальных и аналитических данных была предложена концепция гравитационной деформации, в основу которой легла критическая масса малых тел в зависимости от их химического и минерального состава, физико-механических и реологических свойств (Слюта, Воропаев, 1992; Slyuta, Voropaev, 1997; 2014).

Глава 2. Форма малых тел Солнечной системы

В этой главе рассматривается детальный анализ формы, массы и размеров как фрагментов каменных и железных метеоритов, так и многочисленных малых тел

силикатного состава, состоящих из обыкновенных и углистых хондритов, металлических астероидов, малых ледяных тел, состоящих преимущественно из водного льда и малых койперовских объектов, в составе которых кроме силикатной компоненты и водного льда в значительном количестве присутствуют и экзотические льды других летучих.

В отличие от планетных тел, форма малых тел является продуктом длительной столкновительной эволюции, т.е. таких механических процессов, как экскавация и дробление. Малые тела, представленные метеоритами и астероидами, имеют тесную связь. Астероиды не только являются родительскими телами метеоритов, но и самые маленькие астероиды фактически представляют собой крупные метеороиды (Кринов, 1951). Типичная фигура малого тела, также как и обычных обломков, аппроксимируется трехосным модельным эллипсоидом с осями $a > b \geq c$. По химическому и минеральному составу спектральным аналогом обыкновенных хондритов являются астероиды S-класса (рис.1). Силикатные малые тела C-типа состоят из углистых хондритов (рис. 1). В работе (Fujiwara и др., 1978) было показано, что обломки, полученные результате высокоскоростного обстрела базальтовой мишени, характеризуются средним отношением полуосей $b/a=0.73$, $c/a=0.50$, или $a:b:c=2:\sqrt{2}:1$ (рис. 2). После этого было принято считать, что все астероиды и малые тела не зависимо от своего состава также характеризуются подобной формой.

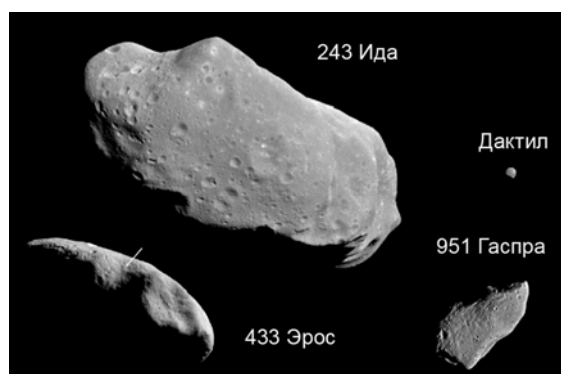


Рис. 1. S-астероиды 243 Ида со спутником Дактил, 433 Эрос и 951 Гаспра, показанные в едином масштабе. Фото АМС «Galileo» и «NEAR», NASA.

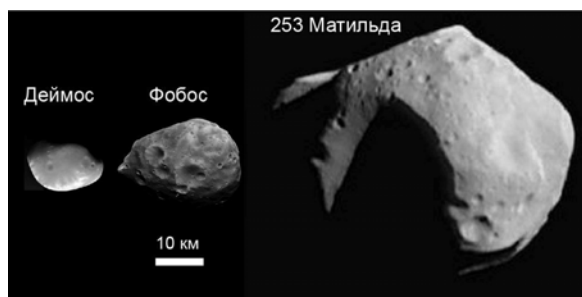


Рис. 3. Малые тела C-типа, спутники Марса Деймос и Фобос, астероид 253 Матильда, показанные в едином масштабе. Фото АМС «Mars Express» (ESA) и «NEAR» (NASA).

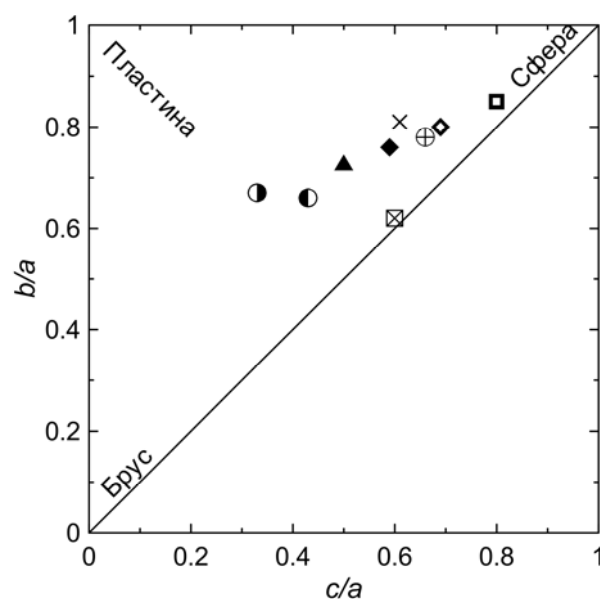


Рис. 2. Форма малых тел различного состава (Слюта, 2014; Slyuta, 2013a):

◆ - обыкновенные хондриты;
 ◇ - астероиды S-типа; ■ - астероиды C-типа; ▲ - обломки базальта;
 ● - железный метеорит Сихотэ-Алинь;
 ○ - железный метеорит Чинге;
 ⊕ - металлические астероиды; × - малые ледяные тела; ☒ - койперовские объекты.

На примере 69 фрагментов метеорита Царев были рассмотрены характерные морфометрические параметры обыкновенных хондритов. Полиэдрическая или пирамидальная форма с различным числом граней является преобладающей для фрагментов всех обыкновенных хондритов (Кринов, 1955). Среднее значение распределения главных полуосей для обыкновенных хондритов составляет $b/a=0.76$, $c/a=0.59$, а отношение между полуосями - $a:b:c=1.7:1.3:1$. Для образцов массой менее 1 кг соотношение полуосей $a:b:c$ соответствует 1.7:1.3:1, для образцов массой 1-10 кг - $a:b:c=1.8:1.3:1$, а для образцов массой более 10 кг - $a:b:c=1.7:1.3:1$. Форма фрагментов обыкновенных хондритов практически не зависит от массы и размера фрагментов. Известно, что характерная величина отношения главных полуосей обломков земной горной породы данного состава и структуры при однотипном разрушении (например, взрывном) также сохраняется постоянной (Барон, 1960).

Отношение главных полуосей астероидов S-типа по данным для 54 объектов соответствует $a:b:c=1.45:1.16:1$, и $b/a=0.80$, $c/a=0.69$. По своей форме S-астероиды, состоящие из обыкновенных хондритов, и фрагменты обыкновенных хондритов, располагаются рядом (рис. 2). Среднее отношение полуосей малых тел C-типа по данным 64 объектов составляет $a:b:c=1.25:1.06:1$ и $b/a=0.85$, $c/a=0.80$ (рис. 2). Наблюдается явная корреляция формы силикатных тел в зависимости от их прочности. Если предел прочности на сжатие базальтов составляет 150-350 МПа, обыкновенных хондритов и, соответственно, S-астероидов - 105-203 МПа, а углистых хондритов – 35-70 МПа (Слюта, 2014) (рис. 2).

Напротив, форма металлических астероидов ($b/a=0.73$, $c/a=0.62$, или $a:b:c=1.61:1.18:1$) значительно отличается от формы фрагментов железных метеоритов (рис. 2). Она просто другая, что может объясняться различной механикой образования фигуры этих объектов (Слюта, 2013). Малые ледяные тела, которые достаточно широко распространены в системах планет-гигантов, и прежде всего в системе Сатурна, характеризуются отношением полуосей b/a и c/a , равным 0.81 и 0.61 соответственно, и $a:b:c=1.64:1.33:1$ (рис. 2). Среднее отношение главных полуосей b/a и c/a кометных ядер и койперовских объектов равно 0.62 и 0.60 соответственно, или $a:b:c=1.67:1.03:1$, и в отличие от ледяных тел имеют вид огурца.

Таким образом, проведенный анализ показал, что форма малых тел все-таки отличается от формы базальтовых обломков и зависит от состава этих тел. Характерное изменение формы малых тел в зависимости от их массы (увеличение отношения c/a и стремление к шарообразной форме), которое должно быть при наличии крипа в малых телах и отсутствии предела прочности и текучести, не наблюдается. Причем такая зависимость отсутствует у малых тел любого состава – от ледяных до металлических (рис 4-9), хотя они и радикально отличаются по своим физико-механическим и реологическим свойствам.

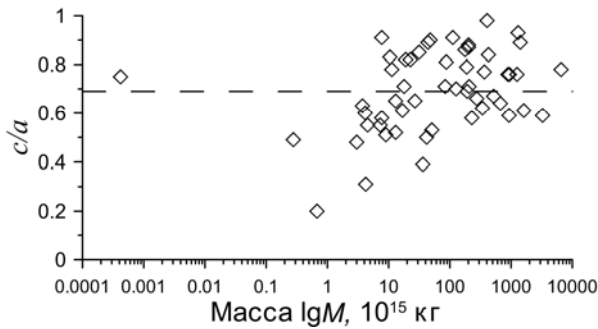


Рис. 4. Распределение S-астероидов в зависимости от формы и массы тел. Штриховая линия - $c/a=0.69$ (рис. 2).

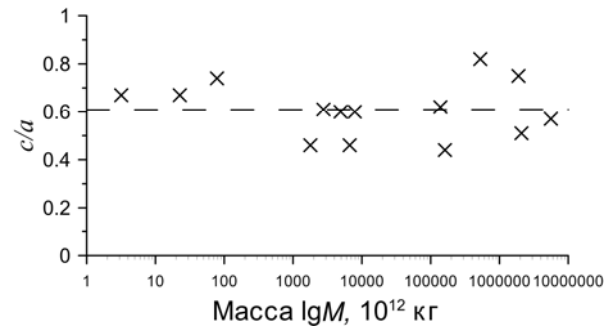


Рис. 7. Распределение малых ледяных тела в зависимости от формы и массы тел. Штриховая линия - $c/a=0.61$ (рис. 2).

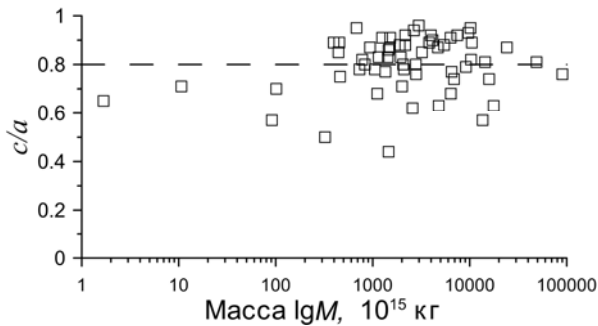


Рис. 5. Распределение малых тел C-типа в зависимости от формы и массы тел. Штриховая линия - $c/a=0.80$ (рис. 2).

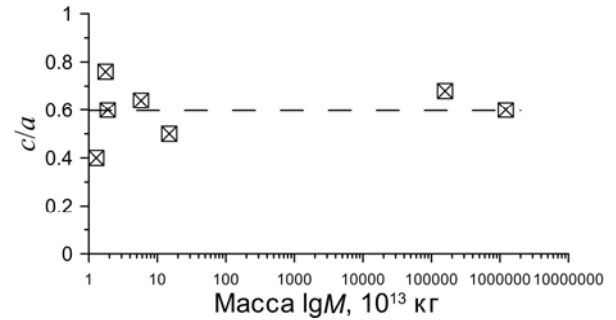


Рис. 8. Распределение койперовских объектов в зависимости от формы и массы тел. Штриховая линия - $c/a=0.60$.

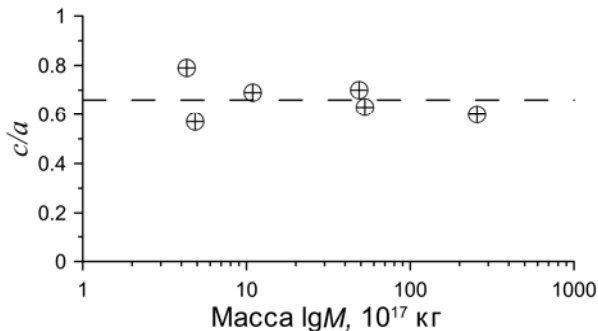


Рис. 6. Распределение металлических астероидов в зависимости от формы и массы тел. Штриховая линия - $c/a=0.66$.

Основной вывод и первое

защищаемое положение: Крип в малых телах Солнечной системы отсутствует. Все малые тела независимо от своего химического и минерального состава (от ледяных до металлических) представляют собой твердые упругие тела, которые в условиях объемного гравитационного сжатия обладают пределом прочности и пределом текучести.

Глава 3. Аналитическая теория гравитационной деформации малых тел

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. 9).

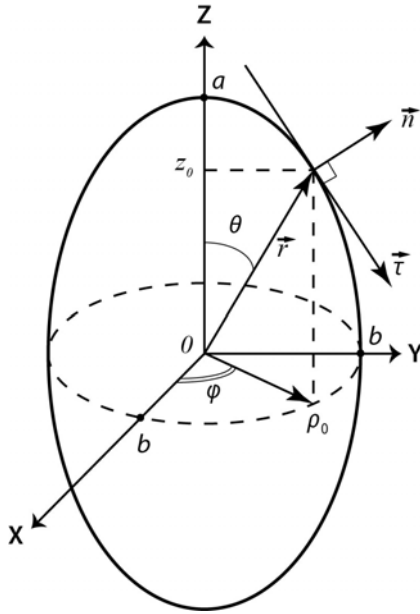


Рис. 9. Вытянутый эллипсоид с полуосями $a > b = c$ в сферических координатах. Все обозначения компонент векторов деформации описаны в тексте.

Эксцентриситет эллипсоида равен

$$(b/a)^2 = 1 - \varepsilon^2, \text{ где } \varepsilon > 0, \text{ или } \varepsilon_{cp} = \sqrt{1 - \frac{bc}{a^2}}.$$

Соответственно, для шара $\varepsilon = 0$. Гравитационный потенциал (V) однородного эллипсоида для внутренних точек может быть представлен выражением

$$V = \pi \rho_0 G_0 b^2 a \int_0^\infty \left[1 - \frac{\rho^2}{s + b^2} - \frac{z^2}{s + a^2} \right] D(s) ds,$$

где $D(s) = (b^2 + s)^{-1} (a^2 + s)^{-1/2}$. Поверхность эллипсоида определяется уравнением $\rho_0^2/b^2 + z^2/a^2 = 1$, где $\rho^2 = x^2 + y^2$. В сферической системе координат $x = r \sin \theta \cos \theta$, $y = r \sin \theta \sin \varphi$, $z = r \cos \theta$ (рис. 9).

Тогда, $V(\varepsilon, r, \theta) = A - \frac{r^2}{b^2} C + \frac{r^2}{b^2} \cos^2(\theta) (C - B)$, где коэффициенты A , B и C являются трансцендентными функциями от эксцентриситета фигуры.

Зная потенциал, находим силу, которая действует на единицу объема $\mathbf{F} = \rho_0 \text{grad} V(\varepsilon, r, \theta)$. Под действием гравитации тело деформируется и вектор деформации равен $\mathbf{u} = \mathbf{e}_r u_r + \mathbf{e}_\theta u_\theta$, где u_r – радиальная компонента смещения, u_θ – меридиональная компонента смещения, а u_φ (азимутальная компонента смещения) равна 0. Уравнение равновесия изотропного тела в поле силы тяжести принимает вид $\text{grad div } \mathbf{u} - 1/2 \text{rot rot } \mathbf{u} = -\mathbf{F}G$, где упругая постоянная $G = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{E(1-\nu)}$, ν – коэфф. Пуассона, E – модуль Юнга.

Уравнение равновесия переписывается в сферической системе координат в виде системы уравнений (Новожилов, 1953). Из уравнения равновесия радиальный и меридиональный компоненты вектора деформации могут быть представлены в виде

$$\left. \begin{aligned} u_r(x, \varepsilon, r, \theta) &= r \left[A_0(x, \varepsilon) + B_0(x, \varepsilon) \cos(2\theta) + r^2 (C_0(x, \varepsilon) + C_1(x, \varepsilon) \cos(2\theta) + \right. \\ &\quad \left. + C_3(x, \varepsilon) \cos(2\theta)^2) \right] \\ u_\theta(x, \varepsilon, r, \theta) &= r \sin(2\theta) \left[r^2 (D_0(x, \varepsilon) - C_3(x, \varepsilon) \cos(2\theta)) - B_0(x, \varepsilon) \right] \end{aligned} \right\},$$

где A_0 , B_0 , D_0 и C_0 , C_1 , C_2 , как функции ε и ν определяются граничными условиями на поверхности тела. В качестве граничных условий используется равенство нулю нормального и касательного напряжения для любой точки поверхности тела.

Компоненты тензора напряжений в уравнении связаны с компонентами тензора деформации через пространственный аналог закона Гука $\sigma_{ik} = 2\mu e_{ik} + \lambda e_{kk}$, где $i, k = 1, 2, 3$. Для анализа гравитационной деформации малого тела наибольший интерес представляет максимальное девиаторное напряжение (τ_{max}), которое определяется разностью наибольшего

(σ_1) и наименьшего (σ_3) главных напряжений $\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$. Либо τ_{max} определяется с помощью интенсивности девиаторных напряжений ($\bar{\tau}$) (Новожилов, 1953). При превышении максимальной девиаторной частью тензора напряжений (τ_{max}) предела текучести (σ_p) данного материала возникает необратимая деформация в виде пластического течения вещества под нагрузкой. По экспериментальным данным наиболее удачной характеристикой τ_{max} является критерий пластичности Губера-Мизеса $\tau_{max} > \sigma_p$.

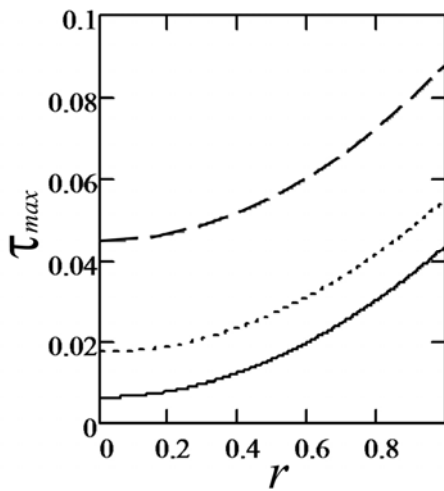


Рис. 10. Распределение девиаторных напряжений (τ_{max}) от центра к поверхности (r) в экваториальной плоскости ($\theta=\pi/2$) вытянутого эллипсоида малого тела для вещества с коэффициентом Пуассона $\nu=0.31$. Сплошной линией показано распределение девиаторных напряжений для малого тела с эксцентриситетом фигуры $\varepsilon=0.4$; пунктирной линией — для $\varepsilon=0.6$; штриховой линией — для $\varepsilon=0.8$.

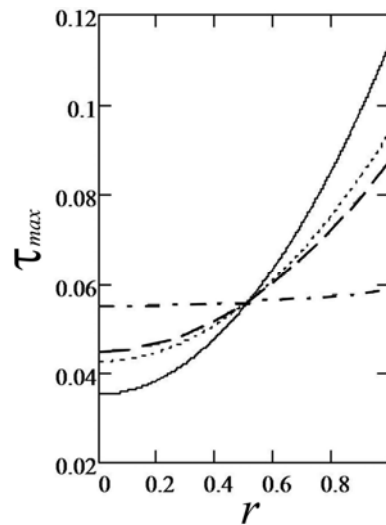


Рис. 11. Распределение девиаторных напряжений (τ_{max}) от центра к поверхности (r) в экваториальной плоскости ($\theta=\pi/2$) вытянутого эллипсоида малого тела с эксцентриситетом $\varepsilon=0.8$. Сплошной линией показано распределение девиаторных напряжений для вещества малого тела с коэффициентом Пуассона $\nu=0.17$; пунктирной линией — для $\nu=0.28$; штриховой — для $\nu=0.31$; штрихпунктирной линией — для $\nu=0.42$.

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

$$\tau_{max} = \sigma_0 F(\varepsilon, \nu) \quad (1),$$

где размерный коэффициент $\sigma_0 = \frac{9}{8\pi} \frac{GM^2}{a^2bc}$, 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 $F(\varepsilon, \nu)$ – безразмерная функция. 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. 10 и 11 показана величина и распределение девиаторного напряжения для разных значений эксцентриситета фигуры тела (рис. 10) и для разных значений коэффициента Пуассона (рис. 11).

Основной вывод и второе защищаемое положение: 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.

Глава 4. Гравитационная деформация малых тел различного состава

4.1. Гравитационная деформация малых ледяных тел

В этой главе рассматривается гравитационная деформация малых ледяных тел, состоящих преимущественно из водного льда и характеризующихся, как правило, высоким альбедо (от 0.4 до 1.0) (Buratti и др., 2010). Высокая пористость малых ледяных тел указывает на отсутствие гравитационного сжатия и гравитационной деформации (табл. 1).

Таблица 1. Девиаторные напряжения (τ_{max}) в малых ледяных телах

№	Малое тело	Диаметр, км	R_{cp} , км	Плотность, кг м ⁻³	τ_{max} для ε_{cp} , МПа	ε_{cp}
1	Пандора	104.0×81.0×64.0	40.7	490±60	0.019	0.722
2	Прометей	135.6×79.4×59.4	43.1	480±90	0.012	0.863
3	Эпиметей	129.8×114.0×106.2	58.1	640±62	0.026	0.534
4	Амальтея	250×146×128	83.5	857±99	0.130	0.837
5	Янус	203.0×185.0×152.6	89.5	630±30	0.062	0.564
6	Гиперион	360.2×266.0×205.4	135.0	544±50	0.135	0.761

Повышенная плотность спутника Юпитера Амальтеи (и низкое альбедо) объясняется повышенным содержанием силикатной пыли. Спутник Сатурна Гиперион, обладая

наибольшей массой и размерами среди малых ледяных тел, характеризуется и наибольшим девиаторным напряжением (0.14 МПа) (табл. 1). Если величина девиаторных напряжений не превышает предела текучести вещества, в данном случае льда, то малое тело (Гиперион) таковым и остается. Самым маленьким планетным телом, также состоящим преимущественно из водного льда, является спутник Сатурна Мимас со средним радиусом 198.2 км. Гравитационная деформация сопровождается сокращением пористости и уплотнением вещества (Slyuta, Voropaev, 1997). Плотность Мимаса, равная 1149 кг м^{-3} , почти вдвое превышает плотность пористых малых ледяных тел, не подвергавшихся гравитационной деформации. Найденная величина девиаторных напряжений для Мимаса составляет 0.87 МПа. Полученный диапазон значений предела текучести $0.14 < \sigma_p < 0.87 \text{ МПа}$ для реального состава ледяных тел Солнечной системы хорошо согласуется с имеющимися экспериментальными данными по пределу текучести для чистого льда при низких температурах ($0.1 < \sigma_p < 2 \text{ МПа}$) (Goodman и др., 1981). Таким образом, на примере Гипериона и Мимаса мы наблюдаем переход между малыми и планетными телами ледяного состава, который обусловлен гравитационной деформацией твердого льда, а не термальным эффектом, т.е. разогревом и плавлением льда в результате каких-либо внешних и внутренних причин.

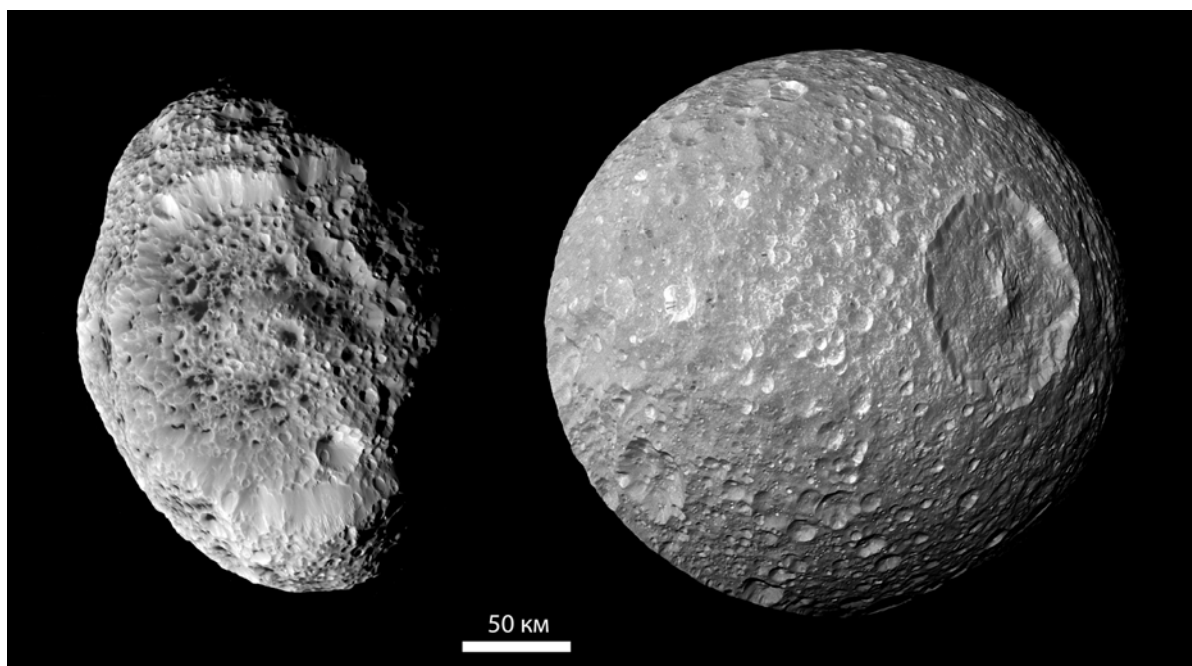


Рис. 12. Ледяные спутники Сатурна Гиперион (слева) и Мимас (справа), показанные в одном масштабе. Фото АМС «Кассини», NASA.

Основной вывод и третье защищаемое положение: Предел текучести для реального состава ледяных тел при низких температурах оценивается в интервале $0.14 < \sigma_p < 0.87 \text{ МПа}$. Наблюдаемый переход обусловлен критической массой тела и величиной предела текучести твердого льда, а не термальным эффектом, т.е. его плавлением.

4.2. Состав, физико-механические свойства и гравитационная деформация кометных ядер и койперовских объектов

В этой главе детально рассматриваются существующие различные модели строения кометных ядер и малых койперовских объектов, их химический и минеральный состав, физико-механические и реологические свойства. По данным (Greenberg и др., 1995), соединения Si, Mg, Fe (силикаты) составляют около 26% массы кометного ядра, сложные органические соединения около 23%, вкрапления мельчайших частиц или больших молекул - около 9%. Около 42% приходится на льды разного состава, среди которых доминирует водный лед (около 30%) и примерно по 2-3% приходится на CO, CO₂, CH₃OH, CH₄, H₂CO и другие экзотические льды, физико-механические и реологические свойства которых радикально отличаются от свойств водного льда (Слюта, 2009). Современные данные по отношению массы пыль/лед для кометы Темпеля 1 также показывают, что модель “грязь со льдом” (icy dirtballs) более предпочтительна, чем модель “грязный снежок” (dirty snowball) (Küppers и др., 2005). Масса и плотность кометных ядер разными исследователями оценивалась с помощью различных методов. Оцененная плотность кометных ядер находится в пределах от 180 до 800 кг м⁻³ (табл. 2).

Для койперовских комет Борелли и Вильда-2, и аналогичных по составу комет семейства Юпитера Темпеля-1 и Чурюмова-Герасименко, и кометы Галлея (семейство Нептуна) (рис. 13) оцененная величина девиаторного напряжения на два порядка ниже предела прочности на растяжение материала кометного ядра, равного 2 кПа (табл. 2).

Таблица 2. Девиаторные напряжения (τ_{max}) в кометных ядрах (Слюта, 2009)

Комета	Полуоси ($a \times c$), км	Средний радиус, км	Плотность, кг /м ⁻³	Эксцентриситет фигуры, ϵ_{cp}	τ_{max} , Па
Борелли	4×1.6	2.17	300	0.917	14.49
Чурюмова-Герасименко	2.43×1.85	2.03	500	0.648	21.32
Вильда-2	2.75×2×1.65	1.96	600	0.800	35.79
Темпеля-1	3.8×2.45	2.84	600	0.764	70.70
Галлея	8×4×4	5.04	280	0.866	59.54

Оцененный средний радиус ядра кометы, при котором величина девиаторного напряжения будет равна пределу прочности на растяжение кометного материала (~2 кПа), составляет 29 км, а с учетом эксцентриситета фигуры - 41×24.6 км. Полученное значение соответствует размеру ядра самой крупной кометы Хейла-Боппа (60 км) (Fernández, 2002). Показано, что эффективный предел прочности на растяжение кометных ядер со средним радиусом больше 29 км определяется уже не составом, а массой тела и резко возрастает по квадратичному закону (рис. 14). Соответственно и усилие, необходимое для разрушения таких тел и формирования вторичной популяции, также значительно возрастает. Повышение эффективной прочности вполне может объяснить наблюдаемое отсутствие (или дефицит)

кометных ядер размером более ~60 км, поскольку будет оказывать значительное влияние на параметры разрушения родительских тел и, соответственно, на численность вторичной популяции.



Рис. 13. Кометные ядра, показанные в одном масштабе. Фото АМС «Giotto» (ESA), «Deep Space» и «Stardust» (NASA).

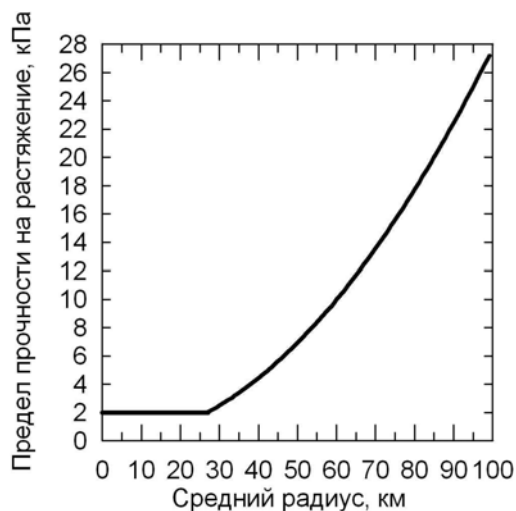


Рис. 14. Зависимость эффективного предела прочности на растяжение от размеров (массы) кометного ядра (Слюта, 2009).

В системе Сатурна присутствует еще один койперовский объект, который является захваченным гравитационным полем Сатурна (Johnson, Lunine, 2005; Turrini и др., 2009). В отличие от кометных ядер, которые имеют небольшие размеры и неправильную фигуру, характерную для малых тел (рис. 13), спутник Сатурна Феба является достаточно крупным телом радиусом 106.5 км и с фигурой, близкой к шарообразной (рис. 15). Состав Фебы аналогичен составу комет и койперовских объектов (Johnson, Lunine, 2005). По своим параметрам фигуры Феба принадлежит к планетным телам (Porco и др., 2005; Slyuta, 2006) (рис. 16). Это означает, что минимальное пороговое значение девиаторных напряжений в случае с Фебой превышает предел текучести материала, и Феба прошла стадию гравитационной деформации. Кометные ядра и малые койперовские объекты характеризуются высокой пористостью и низкой плотностью. Плотность вещества кометного ядра, сжатого до отсутствия пористости, т.е. подвергшегося гравитационной деформации, составит около 1650 кг м^{-3} (Greenberg, 1998). Плотность Фебы равна 1638 кг м^{-3} (Porco и др., 2005; Castillo-Rogez и др., 2012), и хорошо соответствует значению для плотно упакованного вещества кометного ядра после гравитационного сжатия и деформации. Оцененная современная величина максимальных девиаторных напряжений на Фебе соответствует 0.49 МПа. Найденный диапазон значений предела текучести для реального состава койперовских объектов составляет $0.002 < \sigma_p < 0.49 \text{ МПа}$, где нижнее значение соответствует величине предела прочности на растяжение материала кометного ядра (2 кПа).



Рис. 15. Спутник Сатурна Феба. Фото АМС «Кассини», NASA.

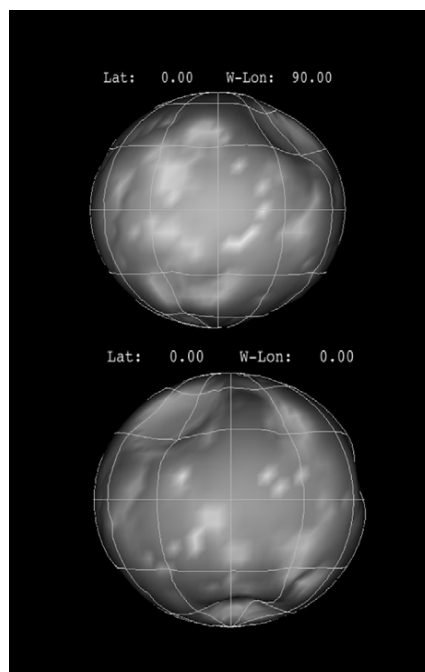


Рис. 16. Форма спутника Сатурна Фебы. Высоты в виде серой полутоновой отмычки показаны относительно эквипотенциальной поверхности (Castillo-Rogez и др., 2012).

Основной вывод и третье защищаемое положение: Предел текучести материала койперовских объектов находится в диапазоне $0.002 < \sigma_p < 0.49$ МПа. Койперовские объекты обладают самой низкой прочностью и самым низким пределом текучести в Солнечной системе, а спутник Сатурна Феба с диаметром 213 км, состав которого аналогичен составу койперовских объектов, является самым маленьким известным планетным телом в Солнечной системе. Предел прочности койперовских объектов размером более 60 км увеличивается по квадратичному закону в зависимости от массы и размеров этих тел, что приводит к наблюдаемому дефициту кометных ядер диаметром более 60 км.

4.3. Химический и минеральный состав, физико-механические и реологические свойства и гравитационная деформация металлических астероидов

В этом разделе подробно рассматривается зависимость физико-механических и реологических свойств железных метеоритов от особенностей химического и минерального состава, оценивается температурная зависимость реологических свойств (предела текучести) и параметры гравитационной деформации наблюдаемых металлических малых тел. Было показано, что исследованные железные метеориты, как правило, характеризуются отсутствием пластических деформаций и, соответственно, отсутствием долговременной статической нагрузки (девиаторных напряжений), превышающей предел текучести. Следует отметить, что ударная и статическая деформация железных метеоритов различается достаточно хорошо. Отсутствие пластических деформаций в железных метеоритах указывает

на то, что вещество метеоритов с момента образования минеральных фаз никогда не подвергалось гравитационной деформации. По-видимому, эти метеориты никогда не были частью какого-либо металлического планетного тела, либо частью массивного железного ядра, образовавшегося в родительском теле в результате его дифференциации на железное ядро и каменную мантию. Таким образом, рассмотренные физико-механические данные так же, как и современные данные по химическому составу, скоростям охлаждения и др. (Слюта, 2013; Slyuta, 2013c), являются серьезным аргументом против гипотезы происхождения железных метеоритов и металлических астероидов из железного ядра дифференцированного родительского тела.

В настоящее время металлический состав с достаточно высокой степенью вероятности пока был подтвержден только для 10 астероидов М-типа (Слюта, 2013). Согласно рассматриваемой теории гравитационной деформации изменение температуры тела приводит к изменению предела текучести вещества и учитывается необходимой величиной порогового значения девиаторных напряжений, что, в свою очередь, приводит к изменению всех основных параметров гравитационной деформации. Соответственно, любые случаи внешнего и внутреннего термального воздействия всегда будут отличаться аномальными значениями параметров гравитационной деформации по сравнению с характерными для температур в данной области Солнечной системы (Slyuta, Voropaev, 1997). С уменьшением температуры от 300 до 100 К предел текучести метеорита Gibeon возрастает монотонно без перегибов (рис. 17). Линейная зависимость предела текучести σ_m от температуры T для метеорита Gibeon описывается уравнением (Слюта, 2013)

$$\sigma_m = -0.87T + 584.65. \quad (2)$$

Монотонное возрастание предела текучести наблюдается и при температурах от 300 до 4.2 К для метеорита Сихотэ-Алинь (рис. 17), которое описывается уравнением (Слюта, 2013)

$$\sigma_m = -0.54T + 289.32. \quad (3)$$

Таким образом, температура изменения их устойчивого состояния находится за пределами рассмотренного интервала температур (4.2-300 К). Т.е. в исследуемом интервале температур T -переход от пластичного к хрупкому состоянию у железных метеоритов не наблюдается, что обычно не характерно для технических сплавов и сталей, у которых при уменьшении температуры пластичность может снижаться до 0. Например, для железоникелевого сплава с содержанием Ni около 5% T -изгиб кривой наблюдается уже около 200 К (Petrovic, 2001).

Оцененная величина современных девиаторных напряжений на крупнейшем металлическом астероиде 16 Психея (радиус $240 \times 185 \times 145$ км) составляет 12.54 МПа. Если бы в своей прошлой геологической и геохимической истории в результате, например,

радиогенного разогрева или каких-либо других причин повышения температуры величина предела текучести материала астероида 16 Психея понизилась бы до величины девиаторных напряжений, т.е. до 12.54 МПа, или опустилась бы ещё ниже, то в результате гравитационной пластической деформации неправильная фигура астероида преобразовалась бы в сфероид вращения.

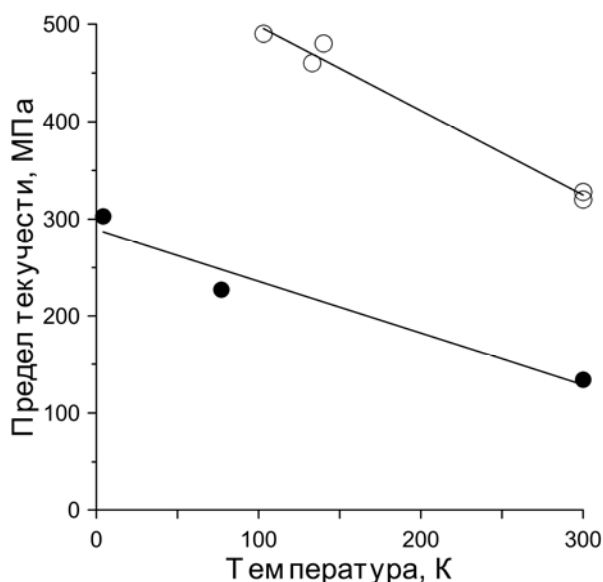


Рис. 17. Зависимость предела текучести железных метеоритов от температуры (Слюта, 2013): ● - метеорит Сихотэ-Алинь; ○ - метеорит Gibeon.

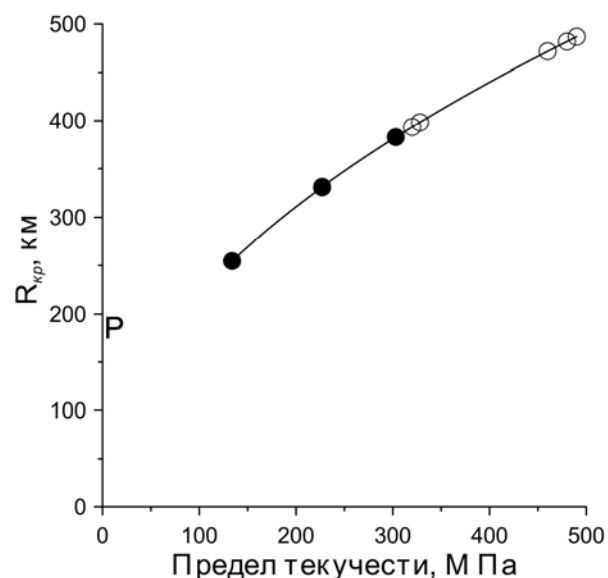


Рис. 18. Зависимость критических размеров металлических тел от предела текучести при разных температурах от 4.2 до 300 К (Слюта, 2013). Р – Психея.

Согласно найденной температурной зависимости (уравнение (3)) было установлено, что для химического и минерального состава метеорита Сихотэ-Алинь предел текучести в 12.54 МПа будет достигнут при температуре 240°C, а для состава метеорита Gibeon (уравнение (2)) - при температуре 385°C. Соответственно, с момента образования астероида 16 Психея его максимальная температура не могла превышать 400°C. Таким образом, с момента своего образования в виде отдельных тел с наблюдаемой фигурой металлические астероиды не подвергались ни частичному, ни тем более полному плавлению. Термальная история металлических астероидов, на которых наблюдается присутствие гидратной воды (Rivkin и др., 2000), ограничивается еще более низкими температурами – около 300°C (Keil, 2000).

С уменьшением температуры предел текучести железных метеоритов возрастает (рис. 17), соответственно, возрастает и необходимая критическая масса, при которой возможна гравитационная деформация металлических астероидов. Оцененный критический радиус металлических тел с составом, близким к железному метеориту Gibeon, при температурах от 300 до 103 К возрастает от 393 км до 487 км. Найденная эмпирическая зависимость

критических размеров малых металлических тел $R_{кр}$ от предела текучести σ_m при температурах ниже 300 К (рис. 18) описывается зависимостью

$$R_{кр}(\text{км}) = 22\sqrt{\sigma_m}(\text{МПа}).$$

Масса и размеры известных металлических астероидов значительно меньше критических размеров при температурах ниже 300 К. Масса металлического тела с минимальным критическим радиусом в 255 км (5.4×10^{20} кг) более чем на порядок (в 20 раз) превышает массу крупнейшего металлического астероида 16 Психея (2.562×10^{19} кг). Поэтому, существование на ранней стадии эволюции Солнечной системы каких-либо металлических родительских тел с массой, превышающей критическую, т.е. металлических планетных тел, следует признать событием маловероятным.

Основной вывод: С момента своего образования металлические астероиды не подвергались разогреву более 400°C, и тем более не подвергались частичному или полному плавлению. Металлические тела характеризуются высоким пределом текучести ($134 \leq \sigma_p \leq 490$ МПа), а критический радиус малого металлического тела, которое должно подвергнуться гравитационной деформации, превышает $R_{кр} \geq 255$ км.

4.4. Экспериментальные исследования физико-механических свойств обыкновенных хондритов и гравитационная деформация малых силикатных тел

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

Было обнаружено, что величина предела прочности на сжатие по одному из трех направлений сильно отличается от остальных двух направлений (рис. 19). 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. 3). Как правило, длинная ось (a) фигуры исследуемых

фрагментов метеоритов совпадает с длинной осью (a_c) эллипсоида анизотропии. Оцененный предел прочности на сжатие исследованных обыкновенных хондритов с учетом анизотропии составляет 105-203 МПа, а предел прочности на растяжение – 18-31 МПа (табл. 3). Оцененный предел прочности на сжатие углистых хондритов находится в диапазоне 35-85 МПа, а предел прочности на растяжения – в интервале 4-8 МПа.

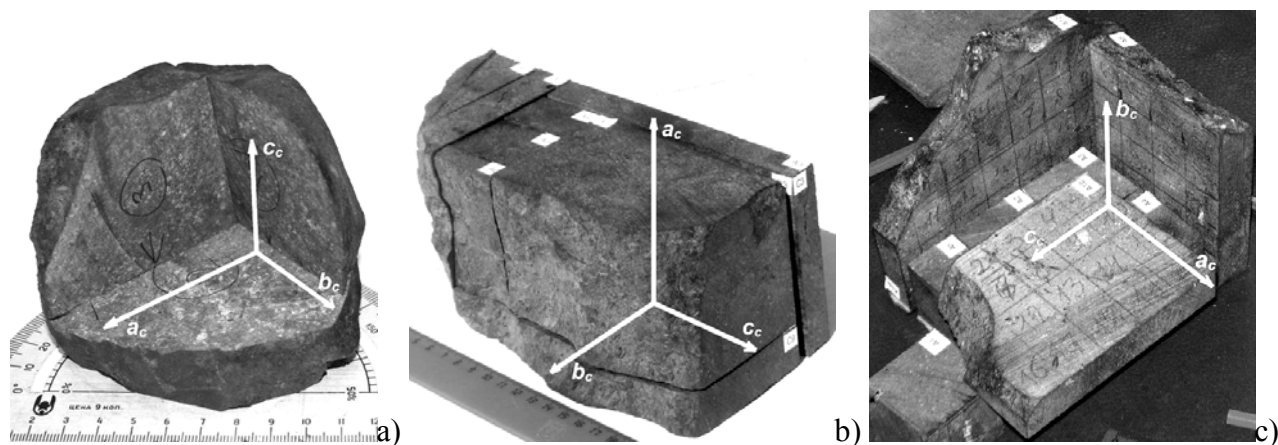


Рис. 19. Ориентация эллипсоида анизотропии физико-механических свойств с полуосями $a_c > b_c \geq c_c$ во фрагментах метеоритов: а) метеорит SAUH 001; б) метеорит Царев, фрагмент №15390.9; в) метеорит Царев, фрагмент №15384.1.

Таблица 3. Трехмерное распределение физико-механических свойств в обыкновенных хондритах

Название	Оси эллипсоида анизотропии			Среднее для Образца
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	
Метеорит SAUH 001 (<i>a,c</i> =1.6)				
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>a,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>a,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

Полученные данные по физико-механическим свойствам обыкновенных и углистых хондритов были использованы для оценки критической массы и размеров силикатных тел, которые подвергнутся гравитационной деформации. Критические размеры малых тел, состоящих из обыкновенных и углистых хондритов оцениваются как $R_{кр} \geq 673$ км и $R_{кр} \geq 675$ км соответственно. Обладая практически одинаковыми критическими размерами, тем не менее, обыкновенные и углистые хондриты значительно отличаются друг от друга по критической массе и пороговой величине девиаторных напряжений (рис. 20).

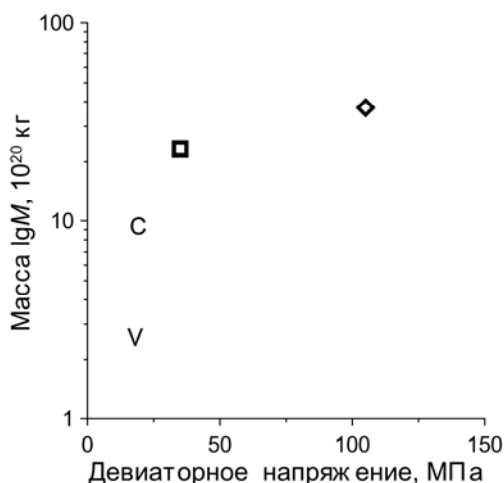


Рис. 19. Критическая масса силикатных малых тел в зависимости от предела текучести: ◆ - малые тела S-типа (обыкновенные хондриты); ■ - малые тела C-типа (углистые хондриты); V – астероид 4 Веста; C – астероид 1 Церера.

Астероид 4 Веста является самым маленьким силикатным планетным телом в Солнечной системе. Веста имеет шарообразную форму в виде эллипсоида вращения со средним радиусом 262.7 км и достаточно высокую плотность $\rho_0 = 3456$ кг м⁻³ (Russel и др., 2012). Дифференцированность Весты на базальтовую (эвкритовую) кору и диогенитовую мантию является результатом достаточно активной и сложной магматической эволюции астероида (Schenk и др., 2012), что характерно только для планетных тел.

Оцененная современная величина девиаторных напряжений на Весте по сравнению с пределом текучести силикатов аналогичного состава очень мала и составляет 18 МПа (рис. 20). Прочностные свойства базальтоидных ахондритов (эвкритов, диогенитов) соответствуют основным и ультраосновным земным породам (Slyuta, Voropaev, 1997) и обыкновенным хондритам. Значительная разница в величине девиаторных напряжений и предела прочности силикатов указывает на то, что Веста на ранней стадии существования подверглась сильному разогреву, а возможно, и полному плавлению. В противном случае Веста никогда бы не приобрела шарообразную равновесную форму и не продифференцировала бы на оболочки. Но на этом эволюция Весты не закончилась. Обнаруженная большая разница современных девиаторных напряжений по сравнению с пределом текучести силикатов означает, что в настоящее время на Весте механизмы гравитационной деформации и изостатической компенсации, которые являются необходимым атрибутом любого планетного тела, не работают. По мере остывания тела и повышения величины предела текучести вещества,

Веста из разряда планетных тел перешла в разряд малых тел, и в настоящее время представляет собой хотя и шарообразное и дифференцированное (следы горячего прошлого), но обычное холодное малое тело. Чтобы Веста оставалась планетным телом и на ней, как и на других планетных телах, продолжал работать механизм изостазии, т.е. по существу гравитационная пластическая деформация, масса Весты должна превышать её современное значение более чем на порядок (рис. 20) (Slyuta, Voropaev, 1997).

Рассматривается еще один астероид, который также принадлежит к классу планетных тел. Это Церера со средним радиусом 476.2 км, что примерно вдвое больше радиуса Весты (Thomas и др., 2005). Оцененная величина современных девиаторных напряжений также невелика и равна 19.2 МПа, что фактически в два раза ниже минимального предела прочности даже углистых хондритов (рис. 20). По-видимому, в составе Цереры в значительном количестве присутствует менее прочный материал, например, водный лед, что вполне согласуется с невысокой плотностью Цереры (2077 кг м^{-3}) (Russel и др., 2007).

Основной вывод и четвертое защищаемое положение: Все исследованные обыкновенные хондриты характеризуются сильной трехмерной анизотропией физико-механических свойств, которая аппроксимируется вытянутым эллипсоидом с соотношением главных полуосей $a:(b=c)=1.6:1$. Силикатные малые тела, состоящие из углистых и обыкновенных хондритов, характеризуются пределом текучести в интервале $35 \leq \sigma_p \leq 70$ МПа и $105 \leq \sigma_p \leq 203$ МПа соответственно, и критическим переходным радиусом $R_{кр} \geq 673$ км.

ОБЩИЙ ВЫВОД

В зависимости от химического и минерального состава, физико-механических и реологических свойств вещества малых тел в результате проведенных исследований впервые выделены пять основных групп тел Солнечной системы, которые характеризуются индивидуальными параметрами гравитационной деформации (рис. 20): I – койперовские объекты, которые характеризуются самым низким пределом текучести ($0.002 < \sigma_p < 0.49$ МПа) и, соответственно, самым малым размером планетного тела ($R=106.5$ км, спутник Сатурна Феба); II – ледяные тела, предел текучести которых находится в интервале $0.14 < \sigma_p < 0.87$ МПа, а минимальный наблюдаемый радиус планетного тела равен 198.2 км (спутник Сатурна Мимас); III – силикатные тела, состоящие из углистых хондритов с пределом текучести в интервале $35 \leq \sigma_p \leq 70$ МПа и с критическим переходным радиусом тела $R_{кр} \geq 675$ км; IV – силикатные тела, состоящие из обыкновенных хондритов, с пределом текучести в интервале $105 \leq \sigma_p \leq 203$ МПа и с переходным критическим радиусом $R_{кр} \geq 673$ км; V – группа металлических тел (класс железных метеоритов), характеризующихся высоким пределом текучести $134 \leq \sigma_p \leq 490$ МПа и критическим переходным радиусом между малым и планетным телом $R_{кр} \geq 255$ км.

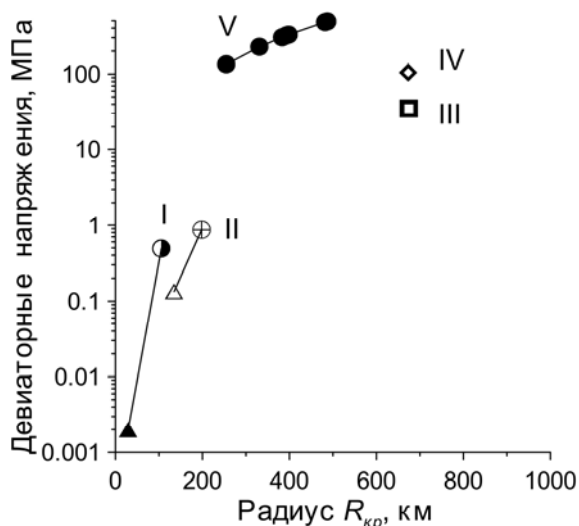


Рис. 20. Распределение твердых тел Солнечной системы различного состава в зависимости от основных параметров гравитационной деформации – величины девиаторных напряжений (предела текучести) и критических размеров (критического среднего радиуса):

I – койперовские объекты; II – ледяные тела; III – силикатные тела, состоящие из углистых хондритов; IV – силикатные тела, состоящие из обыкновенных хондритов; V – группа металлических тел (класс железных метеоритов).

Проведенное исследование позволяет лучше понять эволюцию и процесс формирования малых тел Солнечной системы различного состава, их морфологию и строение, время существования с момента образования и параметры их гравитационной деформации. Полученные данные также могут быть полезными для планирования будущих космических миссий к малым телам.

Список работ по теме диссертации

Монографии

1. **Слюта Е.Н.**, Иванов А.В., Иванов М.А. Сравнительная планетология: Основные понятия, термины и определения // М.: Наука. Изд. 2-е, испр. и доп. 1995. 141 с.
2. **Слюта Е.Н.** Разрушение крупных каменных и железных метеороидов в атмосфере Земли. В сб.: Защита населения и территорий от астероидно-кометной опасности (Основные подходы). Ред. Пучков В.А. Москва: МЧС. 2014.
3. **Слюта Е.Н.** Прочность на разрушение кометных ядер в зависимости от массы тел. В сб.: Защита населения и территорий от астероидно-кометной опасности (Основные подходы). Ред. Пучков В.А. Москва: МЧС. 2014.

Статьи

1. **Слюта Е.Н.**, Воропаев С.А. Малые и планетные тела Солнечной системы. Критическая масса ледяных тел // ДАН. 1992. Т. 325. №4. С. 692-696.
2. **Слюта Е.Н.**, Воропаев С.А. Малые и планетные тела Солнечной системы. Критическая масса ледяных тел // Астрономический вестник. 1993. Т. 27. №1. С. 71-82.
3. **Слюта Е.Н.**, Воропаев С.А. Наблюдаемый переход между малыми и планетными телами Солнечной системы: Эффект критической массы // ДАН. 1998. Т. 358. №4. С. 480-483.
4. **Слюта Е.Н.** Физико-механические свойства кометных ядер // Астрономический вестник 2009. Т. 43. №5. С. 459-469.
5. **Слюта Е.Н.** Физико-механические свойства и гравитационная деформация металлических астероидов // Астрономический вестник. 2013. Т. 47. №2. С. 122-140.
6. **Слюта Е.Н.** Форма малых тел Солнечной системы // Астрономический вестник. 2014. Т. 48. №3. С. 1-24.
7. **Слюта Е.Н.** Физико-механические свойства каменных метеоритов // Астрономический вестник. 2014 (В печати).
8. **Slyuta E.N.**, Voropaev S.A. Gravitational deformation in shaping asteroids and small satellites // Icarus. 1997. V. 129. P. 401-414.
9. **Slyuta E.N.**, Voropaev S.A. Physico-mechanical properties and gravitational deformation of Kuiper Belt Objects and icy small bodies // Icarus. 2014 (In press).

Тезисы и доклады

1. **Слюта Е.Н.** Анизотропия физико-механических свойств и механика разрушений метеоритов // Материалы 11-й межд. конф. Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле. Москва. 2010. С. 273-276.
2. **Slyuta E.N.** Shapes and small and planetary bodies: Case of Phoebe // 37th Lunar Planet. Sci. Conf. Houston, 2006. Abstr. #1088.
3. **Slyuta E.N.** Observed, analytical and experimental data on cometary nuclei strength properties: A review // 44th Int. Microsimp. on Comparative Planetology "Vernadsky - Brown". Moscow, 2006. Abstr. #m44_77.
4. **Slyuta E.N.** Self-gravity and rheology of Kuiper objects by the example of cometary nuclei and Phoebe // 38th Lunar Planet. Sci. Conf. Houston, 2007. Abstr. #1056.
5. **Slyuta E.N.** Self-gravity and rheology of small Solar system bodies // 46th Int. Microsimp. on Comparative Planetology "Vernadsky - Brown". Moscow, 2007. Abstr. #m46_66.
6. **Slyuta E.N., Nikitin S.M., Korochantsev A.V., Lorents C.A.** Preliminary data on physical and mechanical properties of Sayh Al Uhaymir 001 meteorite // 46th Int. Microsimp. on Comparative Planetology "Vernadsky - Brown". Moscow, 2007. Abstr. #m46_68.
7. **Slyuta E.N.** Physical and mechanical properties of cometary nuclei // 39th Lunar Planet. Sci. Conf. Houston, 2008. Abstr. #1015.
8. **Slyuta E.N.** The effective tensile strength of cometary nuclei and the cometary population // 48th Int. Microsimp. on Comparative Planetology "Vernadsky - Brown". Moscow, 2008. Abstr. #m48_37.
9. **Slyuta E.N., Nikitin S.M., Korochantsev A.V., Lorents C.A.** Physical and mechanical properties of Sayh Al Uhaymir 001 and Ghubara meteorites // 39th Lunar Planet. Sci. Conf. Houston, 2008. Abstr. #1056.
10. **Slyuta E.N., Nikitin S.M., Korochantsev A.V., Lorents C.A., Skripnik A.Ya.** Preliminary data on physical and mechanical properties of Tsarev // 48th Int. Microsimp. on Comparative Planetology "Vernadsky - Brown". Moscow, 2008. Abstr. #m48_38.
11. **Slyuta E.N.** Gravitational deformation of small Solar system bodies // 40th Lunar and Planetary Science Conference, Houston, 2009. Abstract #1050.
12. **Slyuta E.N., Nikitin S.M., Korochantsev A.V., Lorents C.A., Skripnik A.Ya.** Strong physical and mechanical anisotropy of ordinary chondrites // 40th Lunar and Planetary Science Conference, Houston, 2009, Abstract #1051.
13. **Slyuta E.N.** Physical-mechanical anisotropy of ordinary chondrites and the shape of small rocky bodies // 41th Lunar Planet. Sci. Conf. Houston, 2010. Abstr. #1103.
14. **Slyuta E.N.** Shape distribution of ordinary chondrites, iron meteorites and metallic asteroids // 43rd Lunar Planet. Sci. Conf. Houston, 2012. Abstr. #1088.
15. **Slyuta E.N.** Shape of ordinary chondrites, iron meteorites, metallic, S- and C-asteroids // Japan, Niigata. Asteroids, Comets, Meteors, 2012. Abstr. #6091.
16. **Slyuta E.N.** There's no creep in small Solar system bodies // 44th Lunar Planet. Sci. Conf. Houston, 2013. Abstr. #1117.
17. **Slyuta E.N.** To thermal history of metallic asteroids // 44th Lunar Planet. Sci. Conf. Houston, 2013. Abstr. #1129.
18. **Slyuta E.N., Voropaev S.A.** Physico-mechanical properties and gravitational deformation of Kuiper Belt Objects // Pluto Sci. Co., Laurel, Maryland, USA, 2013. Abstr. P. 150-151.
19. **Slyuta E. N.** Metallic asteroids: Remnants of primordial planetesimals or core fragments of a differentiated planetary body // Workshop on Planetesimal Formation and Differentiation. Washington, 2013. Abstr. #8016.
20. **Slyuta E.N., Voropaev S.A.** Gravitational deformation and thermal history of Vesta // Workshop on Vesta in the Light of Dawn. Houston, 2014. Abstr. #2012.
21. **Slyuta E.N., Voropaev S.A.** gravitational deformation of icy small solar system bodies // 45th Lunar Planet. Sci. Conf. Houston, 2014. Abstr. #1055.