

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА**

**Государственный астрономический институт
имени П.К. Штернберга**

На правах рукописи

УДК 520.84, 552.63, 523.44, 523.2

Бусарев Владимир Васильевич

**ИЗУЧЕНИЕ ПРИРОДЫ АСТЕРОИДОВ МЕТОДАМИ
СПЕКТРОФОТОМЕТРИИ**

Специальность:

01.03.02 - астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени доктора
физико-математических наук

МОСКВА 2012

Работа выполнена в Отделе исследований Луны и планет Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Официальные оппоненты

Доктор физико-математических наук

СВЕТЦОВ
Владимир Владимирович
(Ин-т динамики геосфер РАН)

Доктор физико-математических наук

ЗАХАРОВ
Александр Валентинович
(Ин-т космических исследований РАН)

Доктор физико-математических наук

ЖАРОВ
Владимир Евгеньевич
(ГАИШ МГУ)

Ведущая организация

Институт астрономии Российской академии наук

Защита состоится 22 марта 2012 г. в 14⁰⁰ часов на заседании Диссертационного совета Д501.000.86 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119992, Москва, Университетский проспект, 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга МГУ (Москва, Университетский проспект, 13).

Автореферат разослан 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

Алексеев С.О.

Общая характеристика работы

Массовые открытия экзопланет с помощью новейших наземных методов, а также при осуществлении космических проектов, подобных "Kepler" (NASA) [1], в последние годы вывели исследования Солнечной системы на передовые рубежи современной науки. С одной стороны, знание детальных характеристик ближайших к нам планетных тел дает возможность прогнозирования неизвестных пока свойств экзопланет. С другой стороны, некоторые общие параметры удаленных планетных систем, даже искаженные наблюдательной селекцией, помогают нам глубже понять природу самой Солнечной системы. Важные результаты для решения проблем происхождения и формирования всех планетных систем были получены и при исследованиях газо-пылевых дисков в окрестностях молодых звезд. Например, определение продолжительности существования массивной газо-пылевой компоненты вблизи молодых звезд позволило установить верхнюю границу времени образования Юпитера и других планет-гигантов (напр., [2, 3]), определивших временную шкалу формирования всей Солнечной системы. Кроме того, весьма вероятно, что возникновение жизни на Земле связано с образованием и эволюцией всей нашей планетной системы, (напр., [4]). Перечисленные проблемы в той или иной степени затрагиваются в представленной работе при обсуждении и анализе полученных наблюдательных данных.

Диссертационная работа выполнена в пограничной области между астрофизикой и планетными науками и посвящена развитию нового в России направления исследований – наземной спектрофотометрии астероидов и других твердых безатмосферных небесных тел. Полученные в видимом диапазоне (0,40-0,92 мкм) спектры отражения нескольких десятков астероидов Главного пояса (ГП) используются для оценки состава их вещества. В то же время изучение и интерпретация полученных результатов привела автора к рассмотрению ранних формационных и эволюционных процессов, следы которых, вероятно, сохранились на астероидах до настоящего времени.

Актуальность темы

Резкий рост количества открытых малых планетных тел в последнее время приводит к необходимости более широкого использования и развития дистанционных методов их исследования. Только в ГП астероидов, расположенном в основном на гелиоцентрических расстояниях 2,2-3,3 а. е. уже известно более 200000 малых планет, которым присвоены постоянные номера. Но у подавляющего большинства астероидов пока известны только элементы орбит и приближенные размеры. В то же время среди специалистов складывается мнение, что без знания физико-химических свойств, если не всех, то большинства этих тел невозможно успешное решение проблем космогонии Солнечной системы в целом. Например, при разработке новейших численных моделей формирования планет и ранней миграции планет-гигантов в Солнечной системе современная структура ГП астероидов используется как «пробный камень» или критерий правильности полученных результатов (напр., [5-7]).

С другой стороны, решение актуальных задач астероидно-кометной опасности и освоения внеземных природных ресурсов невозможно без точного знания физико-химических параметров сближающихся с Землей астероидов и ядер комет. Оперативные и достоверные данные о таких телах могут быть получены в большинстве случаев только дистанционными методами.

Реальный путь массового и эффективного изучения астероидов и других твердых безатмосферных небесных тел – широкое использование и развитие наземных дистанционных (астрофизических) методов их исследований. Те же методы могут быть применены (возможно, в упрощенном варианте) и при массовых космических обзорах этих тел.

Традиционными оптическими методами исследования твердых небесных тел являются фотометрия, спектрофотометрия и поляриметрия, которые давно используются и хорошо разработаны. Однако среди них необходимо выделить спектрофотометрию и основанные на ней методы, которые дают возможность прямого определения физико-химических и минералогических свойств поверхностного вещества твердых безатмосферных небесных тел. Кроме того известно, что элементный и минеральный состав твердого вещества определяется физико-химическими условиями его формирования (напр., [8]). Поэтому информация о составе вещества астероидов и других твердых небесных тел может быть использована для решения проблем их происхождения.

Цель работы

Автором была поставлена общая задача изучения особенностей состава поверхностного вещества астероидов Главного пояса с помощью спектрофотометрии. Но основное внимание было уделено астероидам высокотемпературных (с преимущественно высокотемпературной минералогией) типов по причине обнаружения на многих из них нетипичных гидросиликатов [9-14]. Для этого были проведены спектрофотометрические наблюдения 43 астероидов ГП и установлены особенности их спектров отражения, соответствующие разным относительным фазам вращения (всего получено 164 спектра). По спектрам отражения выполнена качественная оценка химико-минерального состава поверхностного вещества исследованных тел. Кроме того, с помощью разных измерительных методов (спектрального, электронно-зондового, мессбауэровского, рентгеновского и термического прокалывания) проведены исследования 21 образца земных гидросиликатов и оливинов, являющихся аналогами вещества углистых хондритов и низкотемпературных (с преимущественно низкотемпературной минералогией) типов астероидов. Выполнены также спектральные исследования 4 образцов наиболее примитивных каменных метеоритов, углистых хондритов Orgueil (CI), Mighei (CM2), Murchison (CM2) и Старое Борискино (CM2).

С целью рассмотрения возможных вариантов происхождения астероидов низкотемпературных типов (“С”, “D” и др.) осуществлено аналитическое моделирование ранней тепловой эволюции (вызванной распадом короткоживущих изотопов, в основном ^{26}Al) каменно-ледяных допланетных тел, находящихся за границей конденсации водяного льда. Результаты, полученные для тел Эджворта-

Койпера [15], обобщены для подобных тел, имевшихся в зонах формирования всех планет-гигантов. В частности показано, что такие тела в зоне формирования Юпитера были поглощены прото-Юпитером или выброшены им за пределы этой зоны, а выброшенные тела были раздроблены (вследствие их неоднородности и непрочности) при столкновениях с другими телами и, в первую очередь, – с родительскими телами астероидов (РТА).

Научная новизна и практическая значимость

Как уже отмечалось, в представленной работе развивается новое в России направление спектrophотометрических исследований твердых тел Солнечной системы, которому уделялось большое внимание за рубежом (особенно в США) уже начиная с середины 60-х годов XX в. Тем не менее, автору удалось получить ряд перечисленных ниже новых результатов.

1) Для большинства исследованных в этой работе астероидов спектры отражения получены при разных относительных фазах вращения. По этим спектрам впервые установлено, что на многих астероидах имеются значительные вариации состава вещества, связанные либо с процессами формирования и последующего дробления их родительских тел, либо с более поздней ударной эволюцией поверхностного вещества. Данный факт означает, что при определении фотометрическим методом геометрического альbedo астероида, как интегрального параметра, зависящего от состава его вещества, требуется усреднение нескольких значений этого параметра, полученных на интервале времени, сопоставимом с периодом вращения исследуемого тела, что необходимо для нахождения достоверной величины его диаметра (или точнее – среднего размера).

2) Впервые обнаружена высокая относительная интенсивность (до 25%) полосы поглощения с центром у 0,44 мкм в спектрах отражения земных образцов низкожелезистых серпентинов (лизардитов и хризотилов), слоистых силикатов, содержащих воду в связанном состоянии. Впервые установлена высокая корреляция (с коэффициентом корреляции $\sim 0,90$) эквивалентной ширины этой полосы поглощения с суммарным содержанием Fe^{3+} (в октаэдрической и тетраэдрической координациях) в исследованных образцах серпентинов. Из этого следует, что полоса поглощения у 0,44 мкм может быть использована не только как спектральный индикатор наличия Fe^{3+} (как переходного металла, обладающего оптически активными электронами), но и Fe^{3+} -содержащих серпентиноподобных гидросиликатов на поверхности астероидов и других безатмосферных небесных тел. Таким образом, найден новый спектральный индикатор следов ранних водных процессов на твердых небесных телах.

3) В спектрах отражения многих высокотемпературных астероидов впервые обнаружены полосы поглощения с центрами у 0,43-0,46 мкм (соответствующие вышеупомянутой полосе у 0,44 мкм в спектрах образцов-аналогов) и в диапазоне 0,60-0,90 мкм, интерпретированные автором как полосы поглощения гидросиликатов – широко распространенных в природных условиях соединений, являющихся продуктами водного преобразования силикатов [9-11]. Обнаруженная несколько раньше Вилас и др. [16] полоса поглощения у 0,43 мкм в спектрах

отражения низкотемпературных астероидов была приписана в указанной работе редкому Fe^{3+} -содержащему гидратированному минералу жароситу, относящемуся к группе сульфатов.

4) Автором разработан новый спектрально-частотный метод (СЧМ), который был впервые применен при спектрофотометрических исследованиях 21 Лютеции и 4 Весты в "НИИ КрАО" [17, 18]. При этом в качестве анализируемого частотными методами спектрального параметра была использована эквивалентная ширина полосы поглощения у 0,44 мкм (как индикатора гидросиликатов типа серпентина) в рядах спектров отражения Лютеции и Весты. Определение всего спектра частот при вариациях этой полосы поглощения, связанных с вращением астероидов, позволило оценить размеры пятен гидросиликатов (в диапазоне от нескольких единиц до десятков километров) и их распределение на поверхностях Лютеции и Весты [18]. Получение такой принципиально новой информации стало возможно именно благодаря применению СЧМ. Космические съемки Лютеции (при осуществлении миссии "Rosetta", ESA, 10 июля 2010 г.) [19] и Весты (при выполнении миссии "Dawn", NASA, начиная с июля 2011 г.) [20] подтвердили наличие на поверхностях этих астероидов пятен темного материала, подобного углистым хондритам группы CI, состоящих в основном из гидросиликатов.

5) Впервые аналитически (с помощью решения уравнения теплового баланса) обоснована возможность образования внутреннего водного океана и водной дифференциации крупных тел Эджворта-Койпера (>200 км) в результате их первоначальной тепловой эволюции при распаде короткоживущих изотопов (преимущественно ^{26}Al), находящихся в транс-нептуновой области [15]. При условии аккреции таких тел за достаточно короткое время $\sim 10^6$ млн. лет (напр., [21]) их внутренний жидкий океан (покрытый ледяной корой с толщиной ~ 10 км) мог существовать минимум 2-3 млн. лет при температуре воды около 4 °C [15]. Это должно было привести к водной дифференциации рассматриваемых тел, гидратации имевшихся там силикатов и образованию крупных силикатно-органических ядер ($\sim 0,7R$) [15]. Эти оценки, полученные аналитическим методом, не противоречат численным моделям ранней тепловой эволюции недр кометоподобных тел (напр., [22, 23]). Кроме того, более детальные численные модели позволили получить значения температур до нескольких сотен градусов в силикатно-органических ядрах таких тел (при повышенной концентрации ^{26}Al) [23], что должно было создать там благоприятные условия для формирования гидросиликатов, сложных органических, предбиологических соединений и/или даже простейших биологических структур. Описанная ранняя тепловая эволюция рассматриваемых каменно-ледяных объектов подтверждается, вероятно, обнаружением в спектрах отражения некоторых транснептуновых тел полос поглощения гидросиликатов [24, 25], которые могут быть признаками экскавации таких материалов в результате взаимных столкновений тел [15]. В диссертационной работе приведена аргументация возможности применения этих результатов для описания ранней тепловой эволюции каменно-ледяных допланетных тел, существовавших в зонах роста Юпитера и других планет-гигантов.

6) Впервые сформулирована гипотеза о формировании вещества, включающего гидросиликаты и органику (подобного веществу углистых хондритов группы CI),

при ранней тепловой эволюции и водной дифференциации каменно-ледяных допланетных тел в зоне формирования Юпитера (и, вероятно, Сатурна) вследствие распада ^{26}Al , также действия ряда дополнительных факторов. При выбросе этих тел прото-Юпитером на завершающем этапе его роста в ГП астероидов и их дроблении при столкновениях с РТА могли образоваться наиболее многочисленные астероиды С-типа (около 75% всех астероидов) и углистые хондриты. Таким образом, процесс формирования углистых хондритов мог начаться в недрах допланетных тел в зоне роста Юпитера, а закончиться – на поверхностях астероидов. Присутствие нетипичного гидратированного силикатного вещества, подобного углистым хондритам, обнаружено на многих астероидах высокотемпературных типов по представленным наблюдательным данным автора. Имеется также ряд других наблюдательных и экспериментальных результатов, упомянутых в тексте диссертации, подтверждающих эту гипотезу.

Основные результаты, выносимые на защиту

На защиту выносятся:

1) Обнаружение в спектрах отражения земных образцов низкожелезистых серпентинов (лизардите и хризотиле), являющихся аналогами вещества углистых хондритов, полосы поглощения с высокой относительной интенсивностью (до 25%) у 0,44 мкм и обнаружение высокой корреляции (с коэффициентом около 0,90) ее эквивалентной ширины с содержанием Fe^{3+} . Обоснование возможности использования этой полосы поглощения как спектрального индикатора наличия в поверхностном веществе астероидов гидросиликатов.

2) Обнаружение спектральных признаков (полос поглощения в спектрах отражения у 0,43-0,46 мкм и в диапазоне 0,6-0,9 мкм) гидросиликатов на большинстве исследованных астероидов высокотемпературных типов ("М", "S", "V" и "E"), что не согласуется с преимущественно высокими температурами их образования (до $\sim 1500^\circ\text{C}$) и может быть признаком переноса при ударных процессах на эти астероиды низкотемпературных материалов с больших гелиоцентрических расстояний.

3) Разработка нового спектрально-частотного метода (СЧМ) и его применение при исследованиях 21 Лютеции и 4 Весты в "НИИ КрАО" (имеется акт о внедрении метода в ГАИШ МГУ и "НИИ КрАО", Украина). Обнаружение с помощью СЧМ "пятнообразного" характера распределения гидросиликатов (указывающего на его связь с ударными процессами) на поверхности астероидов высокотемпературных типов 21 Лютеции и 4 Весты, а также оценка размеров этих пятен и их приближенной статистики.

4) Результаты аналитического моделирования ранней тепловой эволюции (в результате распада ^{26}Al) каменно-ледяных небесных тел, показывающие возможность образования внутреннего водного океана и водной дифференциации таких крупных тел (>200 км) в течение первых 5-10 млн. лет, находящихся в транс-нептуновой области и в зонах формирования всех планет-гигантов.

5) Обоснование гипотезы о доставке гидратированного углистого вещества каменно-ледяных допланетных тел, существовавших в зоне формирования

Юпитера, при выбросе этих тел на завершающем этапе роста Юпитера в ГП астероидов, что могло привести к их дроблению при столкновениях с РТА и образованию наиболее многочисленных астероидов С-типа и углистых хондритов.

Апробация работы

Согласно списку опубликованных автором тезисов конференций, включенные в диссертацию результаты докладывались и обсуждались на следующих международных конференциях:

1. 26-я Лунно-планетная конференция, Хьюстон, США, 1995 г. (заочно);
2. 22-й Микросимпозиум по сравнительной планетологии Институт Вернадского (ГЕОХИ) - Браунский университет (США), Москва, 1995 г.;
3. Конференция "Астероиды, кометы, метеоры" (АСМ-1996) (10-й коллоквиум КОСПАР), Версаль, Франция, 1996 г. (заочно);
4. 29-я Ежегодная конференция Отдела планетных наук Американского астрономического о-ва (AAS DPS), Кэмбридж, США, 1997 г. (заочно);
5. 26-й Микросимпозиум по сравнительной планетологии Институт Вернадского (ГЕОХИ) - Браунский университет (США), Москва, 1997 г.;
6. 31-я Лунно-планетная конференция, Хьюстон, США, 2000 г. (заочно);
7. 32-й Микросимпозиум по сравнительной планетологии Институт Вернадского (ГЕОХИ) - Браунский университет (США), Москва, 2000 г.;
8. 32-я Лунно-планетная конференция, Хьюстон, США, 2001 г. (заочно);
9. 198-я Конференция Американского астрономического о-ва (AAS), Пасадена, США, 2001 г. (заочно);
10. Всероссийская астрономическая конференция, С.-Петербург, 2001 г. (заочно);
11. 34-й Микросимпозиум по сравнительной планетологии Институт Вернадского (ГЕОХИ) - Браунский университет (США), Москва, 2001 г.;
12. 33-я Ежегодная конференция Отдела планетных наук Американского астрономического о-ва (AAS DPS), Новый Орлеан, США, 2001 г. (заочно);
13. Конференция "Астероиды, кометы, метеоры" (АСМ-2002), Берлин, 2002 г.;
14. 38-й Микросимпозиум по сравнительной планетологии Институт Вернадского (ГЕОХИ) - Браунский университет (США), Москва, 2003 г.;
15. 35-я Лунно-планетная конференция, Хьюстон, США, 2004 г. (заочно);
16. Всероссийская астрономическая конференция (ВАК-2004) «Горизонты Вселенной», Москва, 2004 г.;
17. 40-й Микросимпозиум по сравнительной планетологии Институт Вернадского (ГЕОХИ) - Браунский университет (США), Москва, 2004 г.;
18. 36-я Лунно-планетная конференция, Хьюстон, США, 2005 г. (заочно);
19. Международный симпозиум Евро-Азийского астрономич. о-ва «Астрономия-2005: состояние и перспективы развития», Москва, 2005 г.;
20. Конференция "Астероиды, кометы, метеоры" (АСМ-2005) (229 Симпозиум МАС), Рио-де-Жанейро, Бразилия, 2005 г. (заочно);
21. Конференция «Околоземная астрономия 2005», Казань, 2005 г.;

22. Совещание по проблемам пыли в планетных системах, Кауайя, Гавайские о-ва, США, 2005 г. (заочно);
23. 44-й Микросимпозиум по сравнительной планетологии Институт Вернадского (ГЕОХИ) - Браунский университет (США), Москва, 2006 г.;
24. Конференция «Околоземная астрономия 2007», п. Терскол, КБР РФ, 2007 г.;
25. Всероссийская астрономической конференции "Космические рубежи XXI века" (ВАК – 2007), Казань, 2007 г.;
26. Конференция "Тела Солнечной системы: от оптики до геологии", Харьков, Украина, 2008 г. (заочно);
27. Конференция Евро-Азийского астрономич. о-ва «Астрономия и астрофизика начала XXI века», Москва, 2008 г.;
28. Конференция "Астероиды, кометы, метеоры" (АСМ-2008), Балтимор, США, 2008 г. (заочно);
29. 37-я Научная ассамблея КОСПАР, Монреаль, Канада, 2008 г. (заочно);
30. 48-й Микросимпозиум по сравнительной планетологии Институт Вернадского (ГЕОХИ) - Браунский университет (США), Москва, 2008 г.;
31. Конференция «Астрономия и всемирное наследие: через время и континенты», секция В: «Околоземная астрономия», Казань, 2009 г.;
32. Конференция «Астероидно-кометная опасность 2009», С.-Петербург, 2009 г. (заочно);
33. 18-я Открытая конференция молодых ученых по астрономии и космической физике, Киев, 2011 г.;
34. Астрономический конгресс "Астроказань-2011", Казань, 2011 г.;
35. Конференция "Околоземная астрономия 2011", Красноярск, 2011 г.

Кроме того, содержащиеся в диссертации разные результаты докладывались на регулярном семинаре в ИНАСАН по проблемам околоземной астрономии и астероидно-кометной опасности.

Личный вклад автора

В соответствии с перечнем результатов, выносимых на защиту, личный вклад автора при их получении распределен следующим образом.

1) Автором предложена идея поиска новых диагностических полос поглощения в спектрах отражения образцов-аналогов астероидов, а также выполнена основная часть этой работы (поиск образцов в имеющихся геологических коллекциях, подготовка образцов для различных измерений и получение их спектров отражения). Измерения спектров отражения образцов проведены на оборудовании и при технической поддержке М. Н. Тарана (Ин-т геохимии минералогии и рудообразования, НАНУ, Киев), определение содержания окислов в составе образцов на микрозонде проведено [В. И. Фельдманом] (Геологический ф-т МГУ), мессбауэровские исследования образцов (определение содержания Fe^{2+} и Fe^{3+}) выполнены М. В. Воловецким (Физический ф-т МГУ), термическое прокаливание образцов гидросиликатов для определения содержания воды выполнено А. Н. Григорьевым (Химический ф-т МГУ), рентгено-фазовые измерения (определение

минералогического состава образцов) проведены Г. К. Кривоконевой (Всерос. ин-т минерального сырья (ВИМС), Москва).

2) Наблюдения астероидов проводились автором самостоятельно, на телескопе ЗТЭ (1,25-м) с ПЗС-спектрографом Крымской лаборатории ГАИШ МГУ, начиная с 2003 г. Также самостоятельно выполнены обработка наблюдательных данных, расчет спектров отражения и их интерпретация.

3) Автором предложена идея СЧМ и способ его реализации.

4) Исследования 21 Лютеции и 4 Весты СЧМ выполнены совместно с Прокофьевой-Михайловской В. В. и Бочковым В. В. ("НИИ КрАО", Украина) [17, 18], вклады соавторов делятся поровну.

5) Автором сформулирована общая идея, осуществлена постановка задачи для аналитического моделирования ранней тепловой эволюции каменно-ледяных допланетных тел (имевшихся в транс-нептуновой области и в зонах формирования планет-гигантов), а также выполнена оценка параметров их внутренней структуры после тепловой эволюции. Работа выполнена совместно с А. Б. Макалкиным (ИФЗ РАН) и В. А. Дорофеевой (ГЕОХИ РАН) [15], вклады соавторов делятся поровну.

6) Гипотеза о доставке гидратированного силикатно-углистого вещества в ГП астероидов из зоны роста Юпитера при выбросе им каменно-ледяных допланетных тел и возможности формирования из их вещества астероидов С-типа и углистых хондритов автором выдвинута самостоятельно.

Структура и содержание диссертации

Объем представленной работы составляет 301 страницу, включая 49 таблиц, 97 рисунков и список литературы из 237 наименований. Структура диссертации состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения.

Во Введении описана актуальность работы и выполнена постановка задачи. Вначале говорится, что, с одной стороны, резкий рост количества открытых малых планетных тел приводит к необходимости более широкого использования и развития дистанционных методов их исследования. С другой стороны, характеристики малых планет имеют особое значение, поскольку за все время существования нашей планетной системы (около 4,6 млрд. лет) их вещество по сравнению с веществом больших планет подверглось минимальным эволюционным изменениям, то оно содержит информацию о наиболее ранних этапах ее развития. Этот факт установлен по результатам многочисленных исследований упавших на Землю метеоритов – фрагментов астероидов. В отличие от фотометрии и поляриметрии спектрофотометрия и основанные на ней методы дают возможность прямого определения физико-химических и минералогических свойств поверхностного вещества твердых небесных тел, характеризующих условия их образования и последующей эволюции.

В Главе I (разделы 1.1-1.4) выполнено изложение и обоснование спектрофотометрического метода изучения астероидов. В зарубежных спектральных исследованиях астероидов и подобных им объектов практикуется «эмпирический» подход (напр., [26]), при котором спектр отражения твердого безатмосферного тела определяется с помощью деления его спектра на спектр

звезды-солнечного аналога и используется в относительном виде. В представленной работе формула для расчета спектра отражения астероида или его спектрального коэффициента яркости (СКЯ) выведена из основных фотометрических принципов и общего определения геометрического альbedo планеты [27], что позволяет рассчитать СКЯ астероида в абсолютных единицах (если используется звездный стандарт с известным распределением энергии в спектре) [28]:

$$\rho(\alpha, \lambda) = k n E_{c3}(\lambda) I_a(\alpha, \lambda) f(\lambda)^{-\delta M} / (E_0(\lambda) I_{c3}(\lambda)), \quad (1)$$

где α - текущее значение светового фазового угла малой планеты; $E_0(\lambda)$ и $E_{c3}(\lambda)$ – монохроматические освещенности верхней границы земной атмосферы Солнцем и стандартной звездой, соответственно, в $\text{эрг}/\text{см}^2 \times \text{с} \times \text{Å}$, известные из каких-либо публикаций; $I_a(\lambda)$ и $I_{c3}(\lambda)$ – величины интенсивности света от астероида и стандартной звезды на приемнике, из которых исключен фон неба; $f(\lambda)$ – функция спектральной прозрачности атмосферы, рассчитанная для данной наблюдательной ночи; $\delta M = M_a - M_{c3}$ – разность воздушных масс, соответствующих астероиду и стандартной звезде; k – постоянный коэффициент, зависящий, от регистрирующей аппаратуры, $n = (R^2 \Delta^2) / (\pi r^2 R_0^2)$ – безразмерный множитель.

Из выражения (1) наглядно видно, от каких параметров и функций зависит СКЯ астероида. Кроме того, из (1) легко получить используемую на практике «эмпирическую» формулу для спектра отражения, когда в качестве звездного стандарта берется солнечный аналог. В этом случае при условии $E_{c3}(\lambda) \approx E_0(\lambda)$ имеем

$$\rho(\alpha, \lambda) \approx k n I_a(\alpha, \lambda) f(\lambda)^{-\delta M} / I_{c3}(\lambda) \quad (2)$$

Следует отметить, что использование формулы (2) обеспечивает исключение из наблюдательных данных всех постоянных мультипликативных погрешностей.

Поскольку спектр отражения астероида является не измеряемой, а *расчетной характеристикой*, то источники его ошибок можно проанализировать с помощью общей формулы (1). Из этой формулы видно, что при расчете СКЯ астероида значительным источником ошибок или спектрального шума являются используемая звезда-стандарт или солнечный аналог при выполнении операции деления спектра астероида (а, фактически, – Солнца) на спектр солнечного аналога. Причина этого – неточное совпадение спектральных деталей (параметров линий, формы и наклона континуума и т. п.) Солнца и используемых звезд-аналогов из-за неизбежного различия их физико-химических свойств. Еще один значительный источник «внешнего» высокочастотного спектрального шума – это земная атмосфера, кратковременные локальные флуктуации которой вызывают в спектрах отражения астероидов похожие эффекты. Для нахождения и отождествления реальных спектральных деталей, связанных с веществом астероида (например, минералогических полос поглощения) этот шум необходимо уменьшить, так как полностью его устранить невозможно. Действенными мерами по снижению спектрального шума является подбор хороших солнечных аналогов и сглаживание спектров отражения астероидов [29]. В то же время подчеркивается, что возможность обнаружения слабых минералогических полос поглощения (с

относительной интенсивностью от 2-3%) в спектрах отражения астероидов базируется на значительной ширине этих полос, превышающей на 2-3 порядка типичный размер шумовых флуктуаций.

Для учета влияния фазовой функции безатмосферной планеты ее спектр отражения или СКЯ наблюдаемой полусферы определяется в системе плоского абсолютно белого ламбертового экрана с размером равным среднему размеру планеты, находящегося (условно) рядом с ней ортогонально направлению солнечного освещения [27]:

$$\rho(\alpha, \lambda) = \Gamma_\lambda F(\alpha, \lambda), \quad (3)$$

где Γ_λ – монохроматическое геометрическое альbedo, учитывающее интегральные физико-химические свойства наблюдаемой полусферы планеты, $F(\alpha, \lambda)$ – фазовая функция планеты (при нулевом фазовом угле, т. е. $\alpha = 0$, $F(\alpha, \lambda) = 1$). Как следует из многочисленных публикаций по изучению фазовой зависимости показателей цвета твердых тел, а также из авторского опыта анализа спектров отражения астероидов, $F(\alpha, \lambda)$ слабо влияет на СКЯ при малых фазовых углах. В представленной работе все спектры отражения астероидов получены при фазовых световых углах $< 20^\circ$.

В разделах 1.5 – 1.7 Главы I по результатам обзора публикаций дано описание основных минералогических полос поглощения и других особенностей в спектрах отражения астероидов в спектральном диапазоне 0,4-1,0 мкм, а также влияние на них таких постоянных космогенных факторов, как солнечное корпускулярное и УФ-излучение и микрометеоритная переработка вещества. Изучение доставленных на Землю лунных образцов и моделирование действия космических процессов на образцы-аналоги астероидного вещества позволило обнаружить ряд спектральных эффектов. Длительное влияние космогенных факторов вызывает уменьшение интенсивности и искажение формы полос поглощения в спектрах отражения астероидов, а также их общее "покраснение". Как следует из изучения спектров отражения астероидов разных типов, при значительных ударных событиях на астероидах, вероятно, происходит более существенная переработка вещества (например, его дегидратация, плавление или даже испарение), следствием которой может быть образование альбедных пятен [30]. В то же время, исследования метеоритов показывают (напр., [31]), что даже при очень сильном ударе, близком к разрушительному, на поверхности астероидов в эпицентре удара происходит не полное (как на больших планетах), а только частичное плавление вещества.

В Главе II изложены результаты спектральных исследований 4 образцов углистых хондритов (групп CI и CM), как возможных фрагментов примитивных (низкотемпературных) астероидов, и результаты разносторонних (спектральных, электронно-зондовых, мессбауэровских и рентгено-фазовых) исследований 21 образца земных гидросиликатов (серпентинов и хлоритов) и оливинов, как потенциальных аналогов вещества астероидов. В начале главы подчеркивается, что изучение образцов-аналогов – это один из необходимых этапов при дистанционной оценке состава вещества астероидов с помощью спектрофотометрии. Указанная подборка образцов была произведена с учетом обнаружения на поверхности многих высокотемпературных астероидов нетипичных для них гидросиликатов [9-14].

Измерения спектров отражения раздробленных образцов (с размером частиц $\leq 0,25$ мм) были выполнены в диапазоне 400-1000 нм на однолучевом спектрофотометре с диаметром светового пучка 5 мм. Падающий и отраженный световые лучи составляли соответственно углы 45° и 0° по отношению к нормали к поверхности образца. В качестве отражательного стандарта использовалась пластинка из спрессованного порошка MgO. Относительная средне-квадратичная ошибка этих измерений не превосходила 0,5–1,0 % в видимом диапазоне и нарастала до 2% на концах используемого диапазона [32]. Автором был подтвержден ранее известный факт, что общей особенностью спектров отражения образцов углистых хондритов и всех образцов гидросиликатов является широкая полоса (или иногда пара полос) поглощения в диапазоне 600-1000 нм, вызываемая электронным переносом заряда $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$ [33], которая придает вогнутую форму спектрам отражения перечисленных материалов. Новым результатом явилось обнаружение значительной (с относительной интенсивностью до 25%) полосы поглощения с центром у 440 нм в лабораторных спектрах отражения низкожелезистых (до 2-3 вес. % FeO по микрондовым данным) серпентинов (лизардитов и хризотилов) [11]. На рисунке 1 изображены нормированные спектры отражения 7 низкожелезистых серпентинов, в порядке нарастания интенсивности полосы поглощения с центром у 440 нм (сверху вниз), а на рисунке 2 – исправленная форма этой полосы в спектрах отражения 6 образцов после исключения континуума. Электронно-зондовые и мессбауэровские исследования образцов показали, что в такой же последовательности в них нарастает содержание Fe^{3+} . Изучение регрессионных линейных зависимостей содержаний Fe^{2+} и Fe^{3+} в этих образцах от величины эквивалентной ширины полосы поглощения с центром у 440 нм W_{440} (определенной стандартным способом как интегральной остаточной интенсивности по отношению к континууму, см. рис. 2) привело к

Рис. 1.

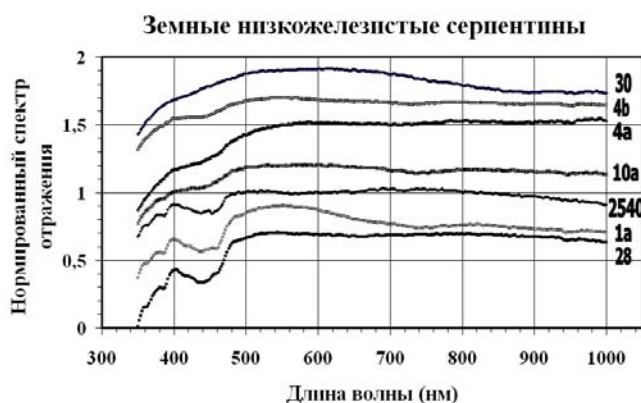
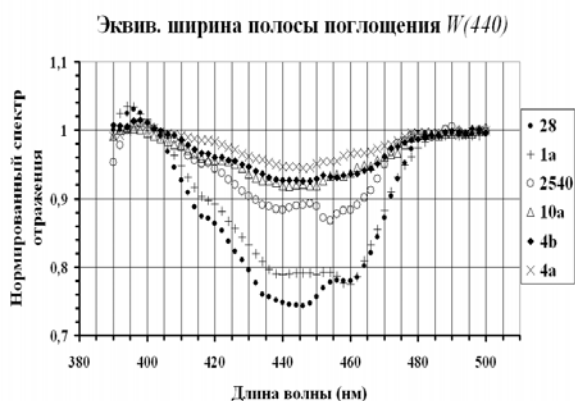


Рис. 2.



обнаружению сильной корреляции Fe^{3+} (в октаэдрической и тетраэдрической координациях; коэффициент корреляции 0,9) с W_{440} . Как следует из теоретического моделирования [34], высокая интенсивность этой полосы поглощения может объясняться магнитным взаимодействием электронных орбиталей ионов Fe^{3+} , находящихся в соседних кристаллографических позициях, при их повышенном содержании. В то же время в спектрах отражения высокожелезистых серпентинов и хлоритов (в которых общее содержание FeO находится в пределах 6-9 вес. %) обнаружению сильной корреляции Fe^{3+} с W_{440} не удалось.

полоса поглощения у 440 нм отсутствует или имеет низкую интенсивность, Можно предполагать, что в последнем случае электронный механизм, ответственный за возникновение этой полосы поглощения блокируется. В то же время, у высокожелезистых образцов серпентинов и хлоритов, как следует из представленных в работе спектров отражения, имеются более интенсивные (чем у низкожелезистых серпентинов) полосы поглощения в диапазоне 0,6-0,9 мкм, вызываемые переносом заряда $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$ [33].

Очевидно, что для нахождения более точной количественной зависимости содержания Fe^{3+} от величины эквивалентной ширины полосы поглощения у 440 нм в спектрах отражения низкожелезистых серпентинов необходимо проведение исследований на большем количестве образцов. Но уже полученные результаты позволяют утверждать, что полоса поглощения у 440 нм (или 0,44 мкм), вместе с полосами поглощения в диапазоне 600-900 нм (или 0,6-0,9 мкм), может использоваться как признак наличия гидросиликатов на твердых небесных телах.

Глава III. В этой главе представлены в графической форме и описаны 164 спектра отражения избранных 43 астероидов ГП до 12^m в соответствии с предшествующей публикацией [14]. Эти спектры измерены в разное время с августа 2003 г. по апрель 2010 г. на 1,25-м телескопе Крымской обсерватории ГАИШ с ПЗС-спектрографом (с ПЗС-камерой SBIG ST-6) в диапазоне 0,40–0,92 мкм со спектральным разрешением $\sim 8\text{Å}$. Спектрограф был изготовлен В. Ф. Есиповым по стандартной схеме, включающей дифракционную решетку. Регистрация каждого спектра объекта, как правило, проводилась последовательно в двух интервалах длин волн (0,40–0,67 и 0,65–0,92 мкм, или наоборот) и занимала от 10-15 минут до полутора часов в зависимости от времени экспозиции. Первоначальная обработка наблюдательных данных выполнялась с использованием стандартного пакета программ для ПЗС-камеры SBIG ST-6. Привязка и расчет шкалы длин волн в используемом спектральном диапазоне осуществлялись по Бальмеровским линиям водорода в спектрах первичного стандарта α Lyr. Последующие операции, связанные с получением спектров отражения астероидов, их сглаживанием и другими преобразованиями, производились с помощью стандартных программ "Excel" и "Origin".

Вместе с астероидами наблюдались также стандартные звезды, являющиеся одновременно и аналогами Солнца по спектрофотометрическим параметрам (16 Cyg B, HD 117176 и HD10307), а также α Lyr [35]. Эти звезды использовались также для определения функции спектральной прозрачности земной атмосферы на каждую наблюдательную ночь. Средние моменты времени (по всемирному времени), условия наблюдения астероидов и стандартных звезд (разность воздушных масс), эфемериды астероидов, а также относительные средне-квадратические ошибки (ОСКО) спектров отражения приведены в таблице 6 в Приложении диссертации. Расчет спектров отражения астероидов выполнялся по формуле (2), после чего они сглаживались (методом «бегущего среднего» по 5 точкам) во всем спектральном диапазоне для устранения высокочастотной шумовой компоненты. В случае больших ошибок на некоторых спектрах отражения вблизи границ рабочего спектрального диапазона (в пределах примерно 500 Å), а также в области остаточных теллурических полос выполнялась полиномиальная аппроксимация

континуума. И, наконец, спектры отражения нормировались на значение СКЯ на длине волны 0,55 мкм (если они были получены во всем спектральном диапазоне 0,40-0,92 мкм или только в коротковолновой части). Спектр отражения был получен только в длинноволновой части спектрального диапазона, то он нормировался на длину волны $\lambda = 0,65$ мкм. Эти спектры отражения в графическом виде представлены на рисунках 14-89 в Главе III, а в цифровом табличном виде – в таблицах 7-49 в Приложении диссертации. Информация об ошибках измерений для каждого из этих спектров помещена в таблицу 6 (Приложение диссертации). В среднем относительные ошибки полученных спектров отражения в центральной части видимого диапазона составляют 1-2% и возрастают до 5-7% вблизи границ используемого спектрального диапазона. Здесь для иллюстрации приведены два рисунка со спектрами отражения астероида М-типа 21 Лютеция и астероида S-типа 11 Партенопя (рис. 3 и 4).

Рис. 3.
21 Лютеция (05/06-11-04)

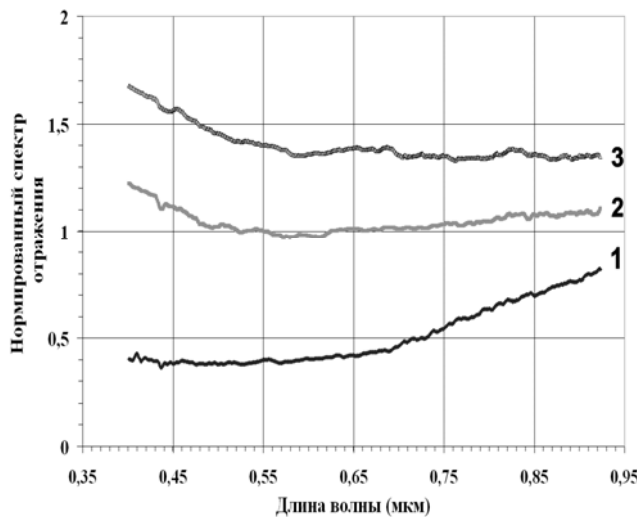
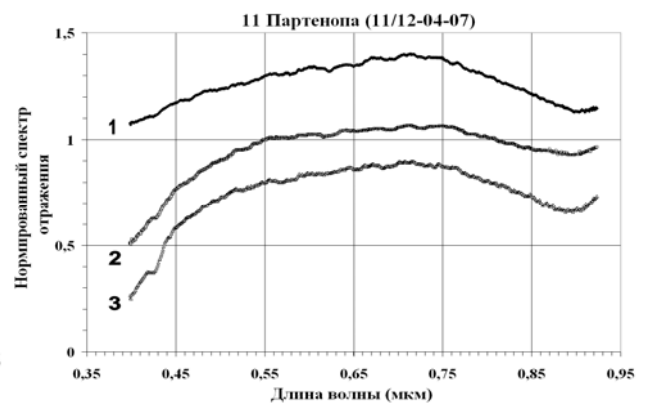


Рис. 4.



На рисунке 3 видно, как менялась форма спектра отражения Лютеции за ~15 минут (при периоде вращения $8,^h166$). Такая необычная вогнутая форма спектра отражения Лютеции, наблюдавшаяся при ее некоторых фазах вращения, нетипична для астероида М-типа и подобна спектрам отражения углистых хондритов и гидросиликатов. На рисунке 4 показаны изменения формы спектра отражения Партенопя в течение примерно получаса (при периоде вращения $13,^h729$). На обоих астероидах была уверенно зарегистрирована полоса поглощения с центром у 0,43-0,45 мкм (Fe^{3+}), форма и интенсивность которой менялась при вращении астероидов. Следует подчеркнуть, что общий критерий, установленный в работе для обнаружения слабых полос поглощения в спектрах отражения всех исследованных астероидов – это их относительная интенсивность в центральной части видимого диапазона не менее 3-4%, то есть на уровне 3σ , с учетом указанных погрешностей в таблице 6 в тексте диссертации.

Специально обсужден вопрос об отличии параметров (центральной длины волны, интенсивности и ширины) наблюдаемых в спектрах отражения астероидов

слабых полос поглощения в диапазоне 0,42-0,46 мкм (которые были в работе интерпретированы как признаки наличия в веществе Fe^{3+}) и обнаруженной полосы поглощения с центром у 0,44 мкм в лабораторных спектрах отражения низкожелезистых серпентинов. В спектрах отражения астероидов ширина этой полосы в большинстве случаев значительно меньше (не более 200-300Å), в отличие от соответствующей полосы в лабораторных спектрах отражения низкожелезистых серпентинов, где ее ширина составляет ~700Å (рис. 1, 2). Лазерная спектроскопия твердого вещества показывает, что уширение спектральных линий входящих в него отдельных элементов происходит преимущественно из-за неоднородностей кристаллической решетки и ее температурных колебаний (напр., [36]). Основываясь на этих результатах, можно предполагать, что значительное уменьшение ширины наблюдаемой полосы поглощения у 0,44 мкм в спектрах отражения астероидов по сравнению с лабораторным значением ее ширины является результатом действия низких температур, которые на этих телах не превышают $-73 \div -123$ °С в соответствии с гелиоцентрическими расстояниями 2-3 а. е. [37]. Кроме того, как видно из рисунка 2, форма рассматриваемой полосы у всех изученных образцов низкожелезистых серпентинов является «ступенчатой» с расстоянием между выступами ~150-200Å. По указанной причине возможны смещения наблюдаемого центра этой полосы (до ~150-200Å) при частотной фильтрации или сглаживании спектров отражения. Но некоторые сдвиги могут быть и вполне реальными. В частности, необходимо учитывать обнаруженный эффект небольшого смещения центров минералогических полос поглощения при ударной нагрузке минералов [38]. Таким образом, можно сделать вывод, что слабые полосы поглощения, обнаруженные в спектрах отражения астероидов интервале 0,42-0,46 мкм, вероятно, являются признаками наличия в веществе Fe^{3+} . Но очевидно, что проблема спектральных «сдвигов» слабых полос поглощения в спектрах отражения астероидов нуждается в дополнительных исследованиях.

В то же время есть и благоприятный фактор при поиске спектральных признаков гидросиликатов, входящих в углистые хондриты. При попадании низкоальбедного углисто-хондритового вещества на астероиды высокотемпературных типов (например, “M”, “E” и “S” со средним геометрическим альбедо в пределах ~0,15-0,25 [39]) его перемешивание с более светлым материалом приводит к увеличению доли прошедшего сквозь вещество рассеянного света в общем диффузно-отраженном световом потоке, что повышает вероятность обнаружения слабых полос поглощения.

Общий вывод, который может быть сделан в результате изучения всех полученных спектров отражения астероидов, – это наличие многочисленных спектральных признаков нетипичных гидросиликатов на поверхности большинства астероидов высокотемпературных типов (29 из 33 или 88% исследованных). Значение этого факта обсуждается в Главе V и в Заключении диссертации.

В Главе IV описаны СЧМ и его применение при изучении полученных при наземных наблюдениях спектров отражения 21 Лютеции (объекта космической миссии «Rosetta», ESA) и 4 Весты, объекта исследований космического аппарата (КА) «Dawn» (NASA).

Важную дополнительную информацию о степени однородности вещества астероидов, как и других твердых небесных тел, дают их непрерывные спектральные наблюдения на промежутке времени, соизмеримом с периодом вращения (для астероидов ГП он составляет в основном от нескольких часов до нескольких десятков часов). По ряду последовательных спектров отражения исследуемого объекта (с примерно равными интервалами времени) с помощью частотных методов можно проследить изменения общей формы его спектра отражения или параметров отдельных минералогических полос поглощения [29]. Необходимым условием частотного анализа полученных спектральных данных является их абсолютизация. То есть данные, полученные в разное время и при разных условиях (аппаратурных, атмосферных и астрономических) приводятся в единую систему с помощью их калибровки, привязки к звездным стандартам, учета атмосферной экстинкции и пересчета на стандартные (1 а. е.) расстояния между Землей, объектом и Солнцем. После такой коррекции исходных данных в спектрах отражения исследуемого объекта может быть найдена какая-то характерная деталь (например, полоса поглощения или некоторый участок спектра с определенным наклоном континуума), для описания которой рассчитывается один, два или несколько параметров.

Большое количество наблюдательных данных о Лютеции (50 спектров) и Весте (691 спектр), полученных в видимом диапазоне В. В. Бочковым на телескопе МТМ-500 с телевизионным комплексом («НИИ КрАО», Украина), позволило уверенно обнаружить в их спектрах отражения слабую полосу поглощения гидросиликатов у 0,44 мкм (Fe^{3+}) [40, 41]. В качестве параметра, характеризующего эту полосу поглощения, использовалась ее эквивалентная ширина $W_{0,44}$, рассчитанная стандартным образом. После вычисления рядов таких величин для полученных спектров отражения Лютеции и Весты был выполнен их частотный анализ методами Брегера, Лафлера-Кинмана, Юркевича и Диминга с целью определения набора частот их периодических изменений. Для нахождения всех независимых частот применялась процедура отбеливания каждого из рядов за наиболее выраженные частоты в порядке уменьшения их амплитуды [40]. Найденные частоты рассматривались как пространственные частоты на поверхности исследуемых вращающихся астероидов [40, 41]. При частотном анализе 40 величин $W_{0,44}$ Лютеции было найдено 16 независимых частот, последовательное вычитание которых позволило получить ряд, меняющийся на уровне шума. При несколько упрощающих предположениях (о сферической форме астероида и его диаметре равном 100 км) было установлено, что на уровне отношения сигнала к шуму $S/N = 4-5$ размеры пятен гидросиликатов на поверхности Лютеции находятся преимущественно в диапазоне от 70 до 3 км [40]. Но, так как в указанной работе для достижения необходимой точности частотного анализа было выполнено усреднение исходных спектров астероида на 18-минутных интервалах, то на астероиде могут быть пятна и меньших размеров. В первом приближении можно говорить о бимодальном характере распределения пятен на Лютеции, поскольку один (меньший) максимум числа частот соответствует пятнам с размером 30-40 км, а второй (большой) – пятнам с размером 6-10 км [40]. С целью достижения необходимой точности полученные наблюдательные данные для Весты были усреднены на временных

интервалах по 5 минут [41]. В итоге был получен ряд из 91 величины $W_{0,44}$. Частотный анализ этого ряда позволил, как и в случае с Лютецией, обнаружить 16 независимых частот и затем оценить размеры пятен гидросиликатов на поверхности Весты. Оказалось, что при среднем диаметре астероида 550 км более 50% размеров таких пятен составляют пятна в диапазоне от 50 км до 13 км [41]. Полученные с помощью СЧМ результаты по изучению поверхностей Лютеции и Весты были подтверждены недавно полученными космическими снимками [19, 20]. Поскольку, углистые хондриты имеют очень низкое альbedo (~0,05-0,07) [42], темные пятна на поверхностях Лютеции и Весты [19, 20], видимые на этих снимках, могут быть образованиями, подобными углистым хондритам, включающим гидросиликаты.

Глава V посвящена общей интерпретации всех полученных в работе результатов. В разделах 5.1 и 5.2 по литературным источникам выполнено обсуждение основных таксономических (или систематических) классификаций астероидов ГП, базирующихся преимущественно на их спектральных свойствах, – это классификации Толена [43], Бас [44] и Демео [45]. Их преимущество состоит в возможности описания происхождения и поиска эволюционных взаимосвязей большого количества астероидов разных спектральных классов, характеризующихся составом и минералогией вещества (напр., [46]). Обсуждается структура ГП астероидов по гелиоцентрическому расстоянию (в пределах ~2,0-3,5 а. е.) в соответствии с распределением основных спектральных типов астероидов [44, 47] и возможного влияния на нее ранних физико-химических и динамических процессов. Подчеркивается, что основными особенностями этой структуры являются: 1) смещение к внутреннему краю ГП высокотемпературных астероидов S-, M-, E- и некоторых других типов, которые могли при формировании быть разогреты до 1000-1500 °C [46, 48]; 2) смещение к внешнему краю ГП низкотемпературных астероидов C-, G-, P-типов и других, температуры которых при формировании не превышали нескольких сотен градусов [46, 48]; 3) «всеохватывающий» для ГП характер распределения наиболее многочисленных астероидов C-типа (около 75% всех); 4) «нарастающий» к внешней периферии характер распределения наиболее примитивных астероидов D-типа; согласно классификации Бас [44], выполненной по наибольшему количеству астероидов (1447 тел), такой же характер приобретает (после некоторого минимума на 3 а. е.) распределение астероидов C-комплекса (включающего кроме C-типа астероидов еще несколько близких к нему типов).

Рассмотрены динамические процессы, которые могли повлиять на структуру ГП. Согласно традиционной точке зрения, астероиды ГП, движущиеся в пределах гелиоцентрических расстояний 2,1–3,3 а. е., в основном образовались *in situ* в результате дробления их родительских тел [47, 49]. В соответствии с такими представлениями астероиды высокотемпературных типов (S-, M-, E- и др.) могут представлять собой фрагменты ядер их дифференцированных родительских тел [47]. Но какие причины и когда привели к резкому увеличению относительных скоростей РТА от десятков или сотен метров в секунду до современного значения ~5 км/с и их аккреция сменилась дроблением пока неясно. Это могло произойти как в период формирования Юпитера, в первые несколько миллионов лет существования Солнечной системы [49], так и позднее на ~30-100 млн. лет, в эпоху образования планет земной группы, когда в ГП могли проникать с высокими скоростями

большие допланетные тела с меньших гелиоцентрических расстояний (напр., [5, 50]). Кроме того, динамическое моделирование орбит планет-гигантов в рамках «нищцевской модели» [7] показывает, что в период роста этих планет и их резонансных взаимодействий была возможна миграция Юпитера на меньшие гелиоцентрические расстояния и, соответственно, – его более сильные гравитационные возмущения зоны астероидов.

Важнейшим физико-химическим процессом, протекавшим в ранней Солнечной системе и существенно изменившим состав РТА и, значит, существующих астероидов, была их первичная тепловая эволюция. Она проходила при распаде короткоживущих изотопов (в основном ^{26}Al , но также ^{60}Fe и др.), которые образовались при взрыве новой или сверхновой звезды, стимулировавшем образование Солнечной системы. Это событие подтверждается повышенной концентрацией ^{26}Al в плоскости нашей Галактики, где часто происходят взрывы новых и сверхновых звезд, обнаруженное при космических измерениях [51]. Такие изотопы вошли в состав каменной компоненты вещества (включающей силикаты и другие соединения типа окислов, сульфидов и т. д.) допланетных тел. Обнаружение в магматическом метеоритном веществе повышенного содержания ^{26}Mg , продукта распада ^{26}Al , является прямым подтверждением рассматриваемого процесса и его энергетического источника (напр., [52]). Причем, тепловая эволюция происходила в течение первых нескольких миллионов лет (с учетом периода полураспада ^{26}Al $\sim 0,73$ млн. лет) на всех телах Солнечной системы, включавших хоть какую-то долю каменного вещества. Чем большей была доля каменных и металлических соединений в составе тел (например, с приближением к Солнцу), тем значительнее могли быть разогреты их недра [48]. И напротив, если в состав исходного вещества входили льды (в частности, за границей конденсации водяного льда, находившейся, как предполагают, вблизи внешней периферии ГП), то это должно было резко снижать внутреннюю температуру родительских тел астероидов (РТА) [48]. Важно отметить, что моделирование аккреции планетезималей (напр. [21]) и изучение дифференцированных метеоритов (ахондритов) (напр., [53]) позволили установить, что тепловая эволюция РТА по времени практически совпала с их аккрецией из более мелких планетезималей.

В разделе 5.3 описаны результаты аналитического моделирования (на основе решения уравнения теплового баланса) первоначальной тепловой эволюции каменно-ледяных небесных тел, находившихся в области пояса Эджворта-Койпера (~ 30 -50 а. е.) [15]. Возможность тепловой эволюции таких тел за счет разогрева их недр ^{26}Al при условии достаточно быстрой аккреции (напр., [21]) и при крайне низких температурах (~ 15 -30 К) и давлениях (10^{-9} - 10^{-10} бар) внешнего края Солнечной системы была рассмотрена в качестве предельного случая. Обобщение имеющихся данных о составе ядер комет и частиц межпланетной пыли позволило сделать вывод [15], что вещество ранних тел Эджворта-Койпера могло состоять примерно из равных пропорций льдов (включающих $\sim 80\%$ водяного льда), частиц горных пород (в основном силикатов) и органики (преимущественно тугоплавкой, включающей алифатические, циклические и ароматические углеводороды с пропорцией элементов C:H:O:N = 1:1:0,5:0,12 [54]). Это позволило получить оценку содержания в веществе ^{26}Al с учетом величины отношения $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al} = 1 \times 10^{-5}$ на

момент времени через $\sim 1,5$ млн. лет (время, которое потребовались на аккрецию тел 100-км размера [21]) после начала распада этого изотопа в высокотемпературных кальций-алюминиевых включениях, обнаруженных в метеоритах [52, 53], и общего содержания алюминия, равного 1,3 вес. % в тугоплавких элементах каменной компоненты вещества (при его хондритовом или солнечном составе). При решении уравнения теплового баланса было показано, что в случае аккреции тел за минимальное время $\sim 10^6$ лет (напр., [21]) на самых крупных из них (с радиусом $R \geq 100-300$ км) должно было произойти полное плавление льда и образование внутреннего водного океана [15]. На рассматриваемых телах жидкий океан мог просуществовать при средней температуре ~ 4 °C до замерзания 2-3 млн. лет, и только внешняя кора из «грязного» пористого льда с толщиной ~ 10 км, вероятно, оставалась замерзшей [15]. Столь продолжительное время существования внутреннего водного океана на транснептуновых допланетных телах, вероятно, было достаточным для седиментации больших силикатно-органических ядер (размер которых с учетом содержания в веществе основных компонент мог достигать $\sim 0,7R$), а также для образования гидросиликатов и развития органических соединений [15]. Приведенные аналитические оценки согласуются с результатами численного моделирования тепловой эволюции подобных тел при распаде ^{26}Al [22, 23]. Но при указанных численных расчетах был установлен важный дополнительный факт: в ядрах таких тел температуры могли достигать нескольких сотен градусов [23] (по причине большей концентрации ^{26}Al). Взаимные столкновения рассматриваемых тел могли, с одной стороны, обеспечить их дополнительный разогрев и продлить время существования внутреннего водного океана, а с другой стороны (после замерзания океана) – привести к дроблению их ледяных оболочек и экскавации гидросиликатов и органики. Возможно, что действовал и механизм взрывной ломки и обновления ледяной коры тел Эджворта-Койпера при разогреве и переходе в газообразное состояние летучей органики [15], а также при образовании в водном океане гидросиликатов с выделением больших объемов H_2 и CH_4 [55, 56]. Это, вероятно, подтверждается обнаружением полос поглощения гидросиликатов на некоторых транс-нептуновых телах [24, 25].

С учетом подобия условий формирования и, следовательно, состава вещества каменно-ледяных допланетных тел во всей внешней периферии Солнечной системы за границей конденсации водяного льда можно утверждать, что для всех таких тел в основном применимы результаты моделирования [15]. В связи со значительным влиянием на астероиды ГП самого Юпитера, процесса его роста, а также множества допланетных тел, существовавших в зоне его формирования [49, 57], эти результаты были использованы для оценки параметров тел юпитерианской зоны (ТЮЗ). При условии более высокой доли каменного вещества (и ^{26}Al) на крупных ТЮЗ можно полагать, что возникший при распаде ^{26}Al внутренний водный океан был разогрет до более высоких температур и дольше оставался в незамерзшем состоянии (~ 10 млн. лет), чем на телах Эджворта-Койпера. В водном океане ТЮЗ должны были протекать аналогичные процессы дифференциации и седиментации вещества, образования гидросиликатов и формирования ядер из минералов, окислов, тугоплавкой органики и т. п. В то же время температура в ядрах ТЮЗ могла достигать нескольких сотен градусов, нарастая к центру, в соответствии с

численными моделями эволюции подобных тел [22, 23]. Таким образом, можно предполагать, что в силикатно-органических ядрах ТЮЗ имелись благоприятные условия для образования и аккумуляции не только гидросиликатов и простейшего органического вещества (типа керогена или битума), но и предбиологических соединений или даже простейших биологических структур.

Примерно в тот же период масса прото-Юпитера должна была достичь ~5-10 масс Земли и аккреция им ТЮЗ сменилась выбросом большей их части за пределы его зоны формирования – как во внешнюю, так и во внутреннюю части СС [49, 57]. Диапазон относительных скоростей ТЮЗ, проникавших в зону астероидов, оценивается от 2-3 км/с до 30 км/с [57, 58]. Их прямые столкновения с самыми высокими скоростями с родительскими телами астероидов (РТА) должны были приводить к практически полному «выметанию» последних из ГП. Такой предельный случай взаимодействия ТЮЗ и РТА рассматривался как один из механизмов удаления основной массы вещества из зоны астероидов [49, 57]. Но как показывают расчеты и эксперименты, при любых вариантах столкновений тел в окрестности эпицентра удара всегда остается какая-то часть материала как "мишени", так и "ударника" [59, 60]. Это означает, что наряду с удалением вещества из зоны астероидов при столкновениях ТЮЗ и РТА происходила и его доставка. Под «доставленным веществом» мы понимаем раздробленное вещество ТЮЗ (от крупных фрагментов до пыли), оставшееся в зоне астероидов после столкновений. Очевидно, что доля «доставленного вещества» должна была быть наибольшей в случаях столкновений ТЮЗ и РТА при минимальных скоростях. Относительно невысокие скорости столкновений тел были также более благоприятны для «выживания» таких низкотемпературных материалов, как гидросиликаты и органика. Здесь важно подчеркнуть, что те ТЮЗ, которые проникали в ГП астероидов с минимальными скоростями, как раз имели наибольшую вероятность столкновения с РТА, поскольку двигались по орбитам с меньшими эксцентриситетами и могли чаще и большее количество раз сблизиться с РТА, чем ТЮЗ с высокими скоростями, движущиеся по более вытянутым орбитам. Решающее значение для последствий таких столкновений имели и различия механической прочности и структуры ТЮЗ и РТА. Если у первых в период проникновения в зону астероидов были неоднородное внутреннее строение и низкая прочность (как следует из теоретического моделирования [15] и других работ), то вторые, с учетом их преимущественно силикатного состава и вероятного плавления при высоких температурах (до ~1500 °С), наоборот, должны были обладать монолитной структурой и высокой прочностью. С другой стороны, пористые ледяные (или еще жидкие) мантии ТЮЗ, вероятно, служили своего рода «демпферами» и снижали катастрофические последствия столкновений этих тел с РТА. Еще одним благоприятным фактором в рассматриваемый ранний период времени Солнечной системы, вероятно, был небулярный газ (напр., [49, 61]), который мог эффективно снижать скорости разлета фрагментов ТЮЗ и РТА при столкновениях.

Раздел 5.4 Главы V. Сохранившиеся после катастрофических ударов крупные фрагменты ТЮЗ в случае потери большей части кинетической энергии могли остаться в ГП и пополнить число примитивных (низкотемпературных) астероидов. А частично переработанные в ударном процессе пыль и мелкие фрагменты ТЮЗ

(ледяного и углистого состава, включающего гидросиликаты) могли выпасть на РТА, рядом с которыми происходили рассматриваемые ударные события. Необходимо также учитывать, что в соответствии с законом сохранения количества движения основная масса раздробленного материала ТЮЗ должна была двигаться в направлении к центру Солнечной системы и могла достичь зоны планет земной группы. Эффект Пойнтинга-Робертсона, по-видимому, был еще одним фактором, способствующим переносу этого раздробленного вещества внутрь Солнечной системы.

На основе обнаружения многочисленных признаков наличия нетипичных гидросиликатов (как основной составляющей углистых хондритов) на поверхности астероидов высокотемпературных типов по представленным наблюдательным данным автора, можно предполагать, что предложенный механизм переноса вещества ТЮЗ в пояс астероидов привел к формированию наиболее многочисленных астероидов С-типа и углистых хондритов. Из этого следует, что ядра самых крупных современных С-астероидов могут быть дифференцированными в том случае, если изначально представляли собой высокотемпературные родительские тела астероидов или их фрагменты, на которые выпал толстый слой из раздробленных низкотемпературных материалов ТЮЗ. В то же время более мелкие С-астероиды могут быть сохранившимися фрагментами ТЮЗ. В рассматриваемый сценарий "вписывается" гипотеза об образовании углистых хондритов [14, 62]. Формирование разных групп этих метеоритов можно рассматривать как многостадийный процесс насыщения раздробленного вещества ТЮЗ высокотемпературными хондрами, как каплями расплавленного при столкновениях тел вещества [14, 60]. Следует подчеркнуть, что астероиды С-типа традиционно считаются родительскими телами углистых хондритов по причине сходства их спектров отражения (напр., [46]). Но в представленной работе лишь утверждается, что вещество астероидов С-типа и углистых хондритов произошло из общего "источника". Таким образом, рассматриваемый сценарий позволяет объяснить "всеохватывающий" для ГП астероидов характер распределения астероидов С-типа, взаимное перекрытие распределений астероидов высокотемпературных и низкотемпературных типов, а также нарастание количества последних к периферии ГП. Одним из подтверждений правильности выбранного в данной работе подхода при решении проблем происхождения и эволюции астероидов различных типов являются результаты динамического численного моделирования ранних резонансных взаимодействий и миграции планет-гигантов (напр., [6]). Эти результаты показывают возможность образования в ГП популяции астероидов D-типа, имеющих признаки более высокого содержания органики (чем в углистых хондритах) в результате "вброса" примитивных тел с периферии Солнечной системы [6].

В Заключении работы сделаны следующие выводы. Применение методов спектрофотометрии при изучении астероидов и других твердых безатмосферных небесных тел показывает, что это направление их исследований весьма продуктивно при решении фундаментальных и прикладных проблем.

Обнаруженные и представленные в этой работе многочисленные признаки наличия примитивного гидратированного вещества на поверхностях астероидов

высокотемпературных типов являются подтверждениями существования мощного потока углисто-хондритового вещества, направленного внутрь Солнечной системы. Интенсивность этого потока могла быть максимальной в период проникновения в ГП астероидов каменно-ледяных тел из зоны формирования Юпитера и их дробления при столкновениях с родительскими телами астероидов.

Гидратированное силикатно-органическое вещество, образовавшееся в первичных внутренних водных океанах каменно-ледяных тел, существовавших в зонах формирования Юпитера и других планет-гигантов, могло быть перенесено не только в пояс астероидов, но и на меньшие гелиоцентрические расстояния, в том числе на Землю. В связи с этим отмечается астробиологический аспект рассматриваемых проблем. В ядрах каменно-ледяных допланетных тел в период их ранней тепловой эволюции были благоприятные условия не только для образования гидросиликатов, сложных органических и предбиологических соединений, но и, возможно, простейших биологических структур. Такие материалы, будучи доставленными на прото-Землю в неповрежденном состоянии (например, в составе пыли), могли стать «строительными элементами» для возникновения и/или дальнейшего развития жизни. Вода, гидросиликаты (как разновидность глинистых минералов) и сложные органические соединения признаны необходимыми составляющими среды, в которой простейшая жизнь могла возникнуть на поверхности Земли [4].

Список основных публикаций по тематике диссертации

Монографии:

1. Бусарев В. В. (2011) Спектрофотометрия астероидов и ее приложения / LAP LAMBERT Acad. Publish. GmbH & Co. KG, Саарбрюккен, Германия, 250 с.

Статьи в рецензируемых журналах:

1. Busarev V. V. (1998) Spectral features of M-asteroids: 75 Eurydike and 201 Penelope // *Icarus*, v. 131, p. 32-40.
2. Бусарев В. В. (1999) Спектрофотометрия безатмосферных тел Солнечной системы // *Астрономический вестник*, т. 33, №2, с. 140-150.
3. Бусарев В. В. (2002) Гидратированные силикаты на астероидах М-, S- и E-типов как возможные следы столкновений с телами из зоны роста Юпитера // *Астрономический вестник*, т. 36, №1, с. 39-47.
4. Bochkov V., Busarev V., Prokof'eva V. (2003) Spectrophotometric observations of M-, S-, and E- asteroids at the Sternberg Astronomical Institute and the Crimean Astrophysical Observatory // *Astron. Astrophys. Transactions*, v. 22, p. 621-624.
5. Busarev V. V., Dorofeeva V. A., Makalkin A. B. (2003) Hydrated silicates on Edgeworth-Kuiper objects – probable ways of formation // *Earth, Moon and Planets*, v. 92, p. 345-357.
6. Прокофьева В. В., Бочков В. В., Бусарев В. В. (2005) Исследование структуры поверхности М-астероида 21 Лютеция спектральным и частотным методами // *Астрономический вестник*, т. 39, № 5, с. 457-468.

7. Бусарев В. В., Прокофьева-Михайловская В. В., Бочков В. В. (2007) Спектральный и спектрально-частотный методы исследования безатмосферных тел Солнечной системы // *Успехи физических наук*, т. 177, № 6, с. 663-675.
8. Бусарев В.В., Прокофьева-Михайловская В.В., Рублевский А.Н. (2008) Разработка и применение спектрально-частотного метода для исследований поверхностей безатмосферных тел // *Изв. Крымской Астрофизической Обсерватории*, т. 104, с. 95-102.
9. Прокофьева-Михайловская В.В., Бусарев В.В., Рублевский А.Н. (2009) От спектральных наблюдений астрономических объектов к спектрально-частотному методу // *Кинематика и физика небесных тел*, т 25, №6 (доп.), с. 434-438.
10. Бусарев В. В. (2010) Спектральные исследования астероидов 21 Лютеция и 4 Веста как объектов космических миссий // *Астрономический вестник*, т. 44, № 6, с. 539-551.
11. Busarev V.V., Prokofjeva-Mikhailovskaya V.V., Rublevskii A.N. (2010/2011) A new stage in remote sensing of atmosphereless bodies of the solar system. *Astron. Astrophys. Transactions*, v. 27, Issue 1, p. 138-143.
12. Бусарев В. В. (2011) О неоднородности вещества астероидов 10 Гигии, 135 Герты и 196 Филомелы по спектрам отражения // *Астрономический вестник*, т. 45. № 1. С. 45-54.
13. Бусарев В.В. (2011) Гипотеза о происхождении углистых хондритов на малых телах и ее подтверждения // *Вестн. Сиб. гос. аэрокосмического ун-та*, №6(39), с. 70-76.

Статьи в трудах конференций:

1. Бусарев В. В. (2000) Звезды - солнечные аналоги в спектральных исследованиях планет. Проблема «заменителей» Солнца // *JENAM-2000. Присоединенный симпозиум «Спектрофотометрические и фотометрические каталоги. Звезды-стандарты и аналоги Солнца»*. ГАО РАН, С.- Петербург, Труды (под ред. А. А. Архарова и А. В. Миронова), с. 128-136.
2. Busarev V. V., Taran M. N. (2002) On the spectral similarity of carbonaceous chondrites and some hydrated and oxidized asteroids. *Proceedings of Asteroids, Comets, Meteors (ACM 2002)*, Technical Univ. of Berlin (ESA-SP-500), Berlin, p. 933-936.
3. Бусарев В. В. (2003) Где могут быть скрыты родительские тела астероидов? *Сборник трудов конференции «Околосолнечная астрономия – 2003»* (под ред. Л. В. Рыхловой и др.), т. 1, Ин-т астрономии РАН – Спб.: ВВМ, с. 184 - 192.
4. Busarev V. V., Bochkov V. V., Prokofjeva V. V., Taran M. N. (2004) Characterizing 21 Lutetia with its reflectance spectra. *Proceedings of the workshop "The NEW ROSETTA targets. Observations, simulations and instrument performances"*, Italy (Capri), 2003, *Astrophys. Space Sci. Library*, v. 311 (L. Colangeli et al., eds.), Kluwer Acad. Publishers, p. 79-83.
5. Бусарев В. В., Дорофеева В. А., Макалкин А. Б. (2006) О первоначальной тепловой эволюции крупных объектов Эджворта-Койпера. *Труды*

- конференции «Околоземная астрономия 2005» (под ред. Ю. А. Нефедьева и др.), Казанский гос. ун-т, Казань, с. 56-61.
6. Бусарев В. В. (2008) Астероиды неоднозначных спектральных типов: 11 Партенопа, 198 Ампелла, 201 Пенелопа и 21 Лютетия. *Труды конференции «Околоземная астрономия 2007»* (под ред. Л. В. Рыхловой и В. К. Тарадия), ИНАСАН и МЦАМЭИ, Нальчик: Изд. М. и В. Котляровы, с. 79-84.
 7. Busarev V. V., Prokofjeva-Mikhajlovskaya V. V., Rublevsky A. N. (2010) Spots on asteroids as an evidence of collisions / Protecting the Earth against collisions with asteroids and comet nuclei, *Proc. of the International Conference ACH-2009* (Eds. A. M. Finkelstein, W. F. Huebner, V. A. Shor.), St. Petersburg: Nauka, p. 43-45.
 8. Бусарев В. В. (2011) О возможном источнике углисто-хондритового и предбиологического вещества / *Труды рабочего совещания-дискуссии "Активность звезд и Солнца на разных стадиях их эволюции"*, 17-18 декабря 2010, ГАИШ МГУ, Москва, (под ред. В.Н. Обридко и Ю.А. Наговицына), Астрономическое о-во, С.-Петербург, с. 205-218.

Тезисы конференций:

1. Busarev V. V., Krugly Yu. N. (1995) A spot of hydrated silicates on the M- asteroid 201 Penelope? *Lunar Planet. Sci. Conf.*, 26th, Houston, abstracts, p. 197-198.
2. Busarev V. V. (1995) Spectral signs of hydrated silicates on asteroids of different types? *Vernadsky Inst. - Brown Univ. Microsymp. on Planetology*, 22nd, Moscow, abstracts, p.12-13.
3. Busarev V. V. (1996) On a role of volatiles in the asteroid belt. *Asteroids, Comets, Meteors (COSPAR Colloquium 10)*, Versailles (France), abstracts, p. 85.
4. Busarev V. V. (1997) A combination of hydrated and dehydrated silicates on the S-asteroid 11 Parthenope? *Bull. Amer. Astron. Soc.*, V. 29, p. 975.
5. Busarev V. V. (1997) The S-asteroid 11 Parthenope may be partly hydrated: Spectral data. *Vernadsky Inst. - Brown Univ. Microsymp. on Planetology*, 26th, Moscow, abstracts, p. 15-16.
6. Busarev V. V. (2000) On a possible way of hydrating some M-, E-, and S-class asteroids. *Lunar Planet. Sci. Conf.*, 31th, Houston, abstracts, #1428.
7. Busarev V. V., Krugly Yu. N. (2000) Optical properties of the S-asteroid 198 Ampella and their interpretation. *Vernadsky Inst. - Brown Univ. Microsymp. on Comparative Planetology*, 32nd, Moscow, abstracts, p. 24-25.
8. Busarev V. V. (2001) Oxidized and hydrated silicates on M- and S- asteroids: spectral indications. *Lunar Planet. Sci. Conf.*, 32nd, Houston, abstracts, #1927.
9. Busarev V. V. (2001) Why we need detailed visible-range spectral data on Kuiper belt objects? *Bull. Amer. Astron. Soc.*, V. 33, No. 2, p. 892.
10. Busarev V. V. (2001) Spectral properties of M-, S-, and E- asteroids - a key to history of the solar system formation? *All-Russian Astron. Conf.*, St.-Petersburg, abstracts, p. 22.
11. Busarev (2001) Some observational indications of the history and structure of our planetary system. *Vernadsky Inst. - Brown Univ. Microsymp. on Comparative Planetology*, 34th, Moscow, Abstract #12.

12. Busarev V. V., Burenkov A. N., Pramskij A. G. First asteroid spectrometric observations with BTA: 3045 Alois. *Bull. of Amer. Astron. Soc.*, v. 33, No. 3, p.1118.
13. Busarev V. V., Taran M. N. (2002) Reflectance spectra of carbonaceous chondrites and their application to asteroid investigation. *The International Conference "Asteroids, Comets, Meteors 2002"*, abstracts, Tech. Univ. of Berlin, abstracts, p. 169.
14. Makalkin A. B., Dorofeeva V. A., Busarev V. V. (2003) Formation of hydrated silicates in Edgeworth-Kuiper belt objects. *Vernadsky Inst. – Brown Univ. Microsimp. on Comparative Planetology*, 38th, Moscow, Abstract # 63.
15. Busarev V. V. (2004) Where some asteroid parent bodies? *Lunar Planet. Sci. Conf. 35th*, Houston, Abstract #1026.
16. Бусарев В. В. (2004) «Спектральные исследования безатмосферных тел Солнечной системы: достижения и перспективы», *Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2004 «Горизонты Вселенной»*, ГАИШ МГУ, Москва, Тезисы докладов (Труды ГАИШ, т. LXXV), с. 74.
17. Busarev V. V., Taran M. N., Fel'dman V. I., Rusakov V. S. (2004) Possible spectral signs of serpentines and chlorites in reflectance spectra of celestial solid bodies. *40th Vernadsky Inst. – Brown Univ. Microsimp. on Comparative Planetology*, Moscow, Abstract No. 15.
18. Busarev V. V., Dorofeeva V. A., Makalkin A. B. (2005) Possibility of separating silicates and organics in large Kuiper belt objects. *Lunar Planet. Sci. Conf. 36th*, Houston, #1074.
19. Бусарев В. В., Дорофеева В. А., Макалкин А. Б. (2005) Возможные наблюдаемые проявления первоначальной тепловой эволюции крупных Койперовских тел. *Тезисы Международного симпозиума «Астрономия -2005: состояние и перспективы развития»*, Москва (Труды ГАИШ, т. LXXVIII), с. 89.
20. Busarev V. V. (2005) Spectral features of some asteroids as insights into the history of our planetary system. *IAU Symposium 229: Asteroids, Comets, Meteorites*, Buzios, Rio de Janeiro, Brazil, abstracts, p. 2-3.
21. Busarev V. V., Dorofeeva V. A., Makalkin A. B. (2005) On consequences of possible water ocean existence in large Kuiper belt and similar objects. *IAU Symposium 229: Asteroids, Comets, Meteorites*, Buzios, Rio de Janeiro, Brazil, abstracts, p. 52.
22. Бусарев В. В., Дорофеева В. А., Макалкин А. Б. (2005) О возможности образования внутреннего водного океана на ранних объектах Эдворта-Койпера. *Тезисы докладов Международной конференции «Околоземная астрономия 2005»*, Казань, с. 5.
23. Busarev V. V. (2005) An internal water ocean on large early Edgeworth-Kuiper objects and observational properties of some comets. *Workshop on Dust in Planetary Systems*, Kaua'i, Hawai'i, abstract #4013.
24. Busarev V.V., Prokof'eva V.V., Bochkov V.V. (2006) A combined spectral-frequency method of investigations of small or distant planets. *44th Vernadsky-Brown Microsymposium on Comparative Planetology*, abstract #14.

25. Бусарев В. В. (2007) Спектральные исследования астероидов неоднозначных типов: 201 Пенелопа, 21 Лютеция, 198 Амелла и 11 Партенопа. *Тезисы Международной конференции «Околоземная астрономия 2007»*, п. Терскол, КБР РФ, с. 22.
26. Бусарев В. В., Прокофьева В. В. (2007) Изучение состава и структуры вещества астероидов спектральным и спектрально-частотным методами. *Материалы Всероссийской астрономической конференции "Космические рубежи XXI века" (ВАК – 2007)*, Казань: Изд. КГУ, с.78-80.
27. Prokofjeva-Mikhailovskaja V. V., Busarev V. V., Rublevskiy A. N. (2008) Spectral-frequency methods of investigating hydrosilicate spots on surfaces of atmosphereless bodies. *Conference "The Solar system bodies: from optics to geology"*, Kharkiv, Ukraine, abstracts, p. 101.
28. Бусарев В. В., Прокофьева-Михайловская В. В., Рублевский А. Н. (2008) Новый этап в дистанционном зондировании малых тел Солнечной системы. *Тезисы конференции «Астрономия и астрофизика начала XXI века»*, Москва, с. 39.
29. Busarev V. V. (2008) Spectral signs of carbonaceous chondritic material on (21) Lutetia. *Asteroids, Comets, Meteors 2008*, Baltimore, Maryland (USA), abstract # 8010.
30. Rublevskiy A. N., Busarev V. V., Prokofjeva-Mikhailovskaja V. V. (2008) Spectral-frequency method of distant investigations of atmosphereless bodies: 21 Lutetia and 4 Vesta. *37th COSPAR Scientific Assembly in Montreal (Canada)*, abstract #B04-0065-08.
31. Busarev V. V., Volovetskij M. V., Taran M. N., Fel'dman V. I., Hiroi T., Krivokoneva G. K. (2008) Results of reflectance spectral, Mössbauer, X-ray and electron microprobe investigations of terrestrial serpentine samples. *48th Vernadsky-Brown Microsymposium on Comparative Planetology*, Moscow, abstract No. 6.
32. Бусарев В.В. (2009) О неоднородности вещества астероидов 10 Гигии, 135 Герты и 196 Филоломелы. *Тезисы междунар. конфер. «Астрономия и всемирное наследие: через время и континенты»*, секция В: «Околоземная астрономия», Казань: Издат. Казан. гос. ун-та, с. 90-91.
33. Бусарев В.В., Прокофьева-Михайловская В.В., Рублевский А.Н. (2009) Пятна на астероидах как подтверждение падений малых примитивных тел. *Тезисы междунар. конфер. «Астероидно-кометная опасность 2009»*, С.-Петербург, ИПА РАН, с. 198-199.
34. Busarev V.V. (2011) Spectrophotometry of asteroids and some results of it. *Open Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics 18th*, Kyiv, abstracts, p. 20-21.
35. Busarev V.V. (2011) On the possibility of formation of carbonaceous chondrites on small bodies. *Reports of International Astronomical Congress "Astrokazan-2011"*, Kazan, 2011, p. 288-293.
36. Бусарев В.В. (2011) Гипотеза о формировании углистых хондритов на малых телах и ее наблюдательные подтверждения. *Тезисы конференции "Околоземная астрономия 2011"*, Красноярск, РИО СибГАУ, с. 67.

Перечень ссылок в автореферате

1. <http://www.kepler.arc.nasa.gov/>
2. Lissauer J. J. (2005) Formation of the outer planets // *Space Sci. Rev.*, v. 116, p. 11–24.
3. Lissauer J. J., Hubickyj O., D'Angelo G. (2009) Models of Jupiter's growth incorporating thermal and hydrodynamic constraints // *Icarus*, v. 199, p. 338-350.
4. *Проблемы происхождения жизни* / Российская академия наук. Сборник научных статей (под ред. А. И. Григорьева и др.), М.: ПИН РАН, 2009, 258 с.
5. Petit J.-M., Morbidelli A., Chambers J. (2001) The primordial excitation and clearing of the asteroid belt // *Icarus*, v. 153, p. 338-347.
6. Levison H. F., Bottke W. F., Gounelle M. et al. (2009) Contamination of the asteroid belt by primordial trans-Neptunian objects // *Nature*, v. 460, p. 364-366.
7. Morbidelli A., Brasser R., Gomes R. et al. (2010) Evidence from the asteroid belt for a violent past evolution of Jupiter's orbit // *Astron. J.*, v. 140, p. 1391-1401.
8. Коржинский Д. С. (1957) *Физико-химические основы парагенезисов минералов* / М.: Издат. АН СССР, 184 с.
9. Busarev V. V., Krugly Yu. N. (1995) A spot of hydrated silicates on the M-asteroid 201 Penelope? *Lunar Planet. Sci. Conf.*, 26th, Houston, abstracts, p. 197-198.
10. Busarev V. V. (1995) Spectral signs of hydrated silicates on asteroids of different types? *Vernadsky Inst. - Brown Univ. Microsymp. on Planetology*, 22nd, Moscow, abstracts, p.12-13.
11. Busarev V. V., Taran M. N., Fel'dman V. I., Rusakov V. S. (2004) Possible spectral signs of serpentines and chlorites in reflectance spectra of celestial solid bodies. 40th *Vernadsky Inst. - Brown Univ. Microsimp. on Comparative Planetology*, Moscow, Abstract No. 15.
12. Rivkin A.S., Howell E.S., Britt D.T. et al. 3- μ m spectrophotometric survey of M- and E-class asteroids // *Icarus*, 1995, v. 117, p. 90-100.
13. Rivkin A.S., Howell E.S., Lebofsky L.A. et al. The nature of M-class asteroids from 3- μ m observations // *Icarus*, 2000, v. 145, p. 351-368.
14. Бусарев В. В. (2011) *Спектрофотометрия астероидов и ее приложения* / LAP LAMBERT Acad. Publish. GmbH & Co. KG, Саарбрюккен, Германия, 260 с.
15. Busarev V. V., Dorofeeva V. A., Makalkin A. B. (2003) Hydrated silicates on Edgeworth-Kuiper objects – probable ways of formation // *Earth, Moon and Planets*, v. 92. p. 345-357.
16. Vilas F., Hatch E. C., Larson S. M. et al. Ferric iron in primitive asteroids: A 0.43- μ m absorption feature // *Icarus*, 1993, v. 102, p. 225-231.
17. Прокофьева В. В., Бочков В. В., Бусарев В. В. (2005) Исследование структуры поверхности М-астероида 21 Лютеция спектральным и частотным методами // *Астрон. вестн.*, т. 39, № 5, с. 457-468.
18. Бусарев В. В., Прокофьева-Михайловская В. В., Бочков В. В. (2007) Спектральный и спектрально-частотный методы исследования безатмосферных тел Солнечной системы // *Успехи физ. наук*, т. 177, № 6, с. 663-675.
19. http://www.esa.int/esaMI/Rosetta/SEM44DZOFBG_1.html
20. <http://dawn.jpl.nasa.gov/>
21. Weidenschilling S. J. (1997) The Origin of Comets in the Solar Nebula: A Unified Model // *Icarus*, v. 127, p. 290-306.
22. Prialnik D., Bar-Nun A. (1990) Heating and melting of small icy satellites by the decay of ²⁶Al // *Astrophys. J.*, v. 355, p. 281-286.
23. McKinnon W. B., Prialnik D., Stern S. A., Coradini A. (2008) Structure and Evolution of Kuiper Belt Objects and Dwarf Planets / *The Solar System Beyond Neptune* (M. A. Barucci, H. Boehnhardt, D. P. Cruikshank, and A. Morbidelli (eds.), Tucson: Univ. Arizona Press, p. 213-241.
24. Boehnhardt H., Delsanti A., Hainaut O. et al. (2002) The ESO large program of physical studies of TNOs and Centaurs // *Proc. of "Asteroids, Comets, Meteors 2002"*, Berlin, p. 47-50.
25. Fornasier S., Doressoundiram A., Tozzi G. P. et al. (2004) ESO Large Program on physical studies of Trans-Neptunian objects and Centaurs: Final results of the visible spectrophotometric observations // *Astron. & Astrophys.*, v. 421, p. 353–363.

26. Маккорд Т. Б., Адамс Дж. Б. (1975) Использование наземных телескопов для определения состава поверхности тел Солнечной системы // *Космохимия Луны и планет / Труды Сов.-Амер. конф. по космохимии Луны и планет* / Под ред. А. П. Виноградова, М.: Наука, с. 547-573.
27. Шаронов В. В. (1958) *Природа планет* / М.: Гос. издат. физ.-мат. лит., 552 с.
28. Бусарев В. В. (1999) Спектрофотометрия безатмосферных тел Солнечной системы // *Астрон. вестн.*, т. 33, №2, с. 140-150.
29. Бусарев В. В., Прокофьева-Михайловская В. В., Бочков В. В. (2007) Спектральный и спектрально-частотный методы исследования безатмосферных тел Солнечной системы // *Успехи физ. наук*, т. 177, № 6, с. 663-675.
30. Бусарев В. В. (2011) О неоднородности вещества астероидов 10 Гигии, 135 Герты и 196 Филомелы по спектрам отражения // *Астрон. вестн.*, т. 45, № 1, с. 45-54.
31. Keil K. (2000) Thermal alteration of asteroids: Evidence from meteorites // *Planet Space Sci.*, v. 48, p. 887-903.
32. Busarev V. V., Taran M. N. (2002) On the spectral similarity of carbonaceous chondrites and some hydrated and oxidized asteroids // *Proc. of "Asteroids, Comets, Meteors 2002"*, ESA-SP-500, Berlin, p. 933-936.
33. Burns R. G. (1993) *Mineralogical applications of crystal field theory* / New York: Cambridge Univ. Press, 224 p.
34. Sherman D. M. (1985) The electronic structures of Fe³⁺ coordination sites in iron oxides; applications to spectra, bonding, and magnetism // *Phys. Chem. Minerals*, v. 12, p. 161-175.
35. Cayrel de Strobel G. (1996) Stars resembling the Sun // *The Astron. Astrophys. Rev.*, v. 7, p. 243-288.
36. Дьюли У. (1986) Лазерная технология и анализ материалов / М.: Мир, 504 с.
37. Low F. J., Beintema D. A., Gautier T. N. et al. (1984) Infrared cirrus: New components of the extended infrared emission // *Astrophys. J.*, v. 278, p. L19-L22.
38. Бусарев В. В., Питерс К. М., Козорезов К. И., Фельдман В. И. (1994) Влияние ударной нагрузки на спектральные свойства минералов из габбро-норитов // *Труды конф., посвящ. 100-летию со дня рожд. Н. П. Барабашова*, Харьков. гос. ун-т, Харьков, с. 30-32.
39. Ryan E. L., Woodward C. E. (2010) Rectified asteroid albedos and diameters from IRAS and MSX photometry catalogs // *Astron. J.*, v. 140, p. 933-943.
40. Прокофьева В. В., Бочков В. В., Бусарев В. В. (2005) Исследование структуры поверхности М-астероида 21 Лютеция спектральным и частотным методами // *Астрон. вестн.*, т. 39, № 5, с. 457-468.
41. Прокофьева-Михайловская В.В., Рублевский А.Н., Бочков В.В. (2008) Водные соединения на поверхности астероида 4 Веста // *Известия КрАО*, т. 104, №1, с. 218-228.
42. Zellner B., Leake M., Lebertre T. et al. (1977) The asteroid albedo scale. I. Laboratory polarimetry of meteorites // *Proc. Lunar Sci. Conf. 8th*, p. 1091-1110.
43. Tholen D. J. (1984) Asteroid taxonomy: From cluster analysis to photometry // *Ph. D. thesis*, The University of Arizona, 150 p.
44. Bus S. J., Binzel R. P. (2002) Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey. A Feature-Based Taxonomy // *Icarus*, v. 158, p. 146-177.
45. DeMeo F. E., Binzel R. P., Slivan S. M., Bus S. J. (2009) An extension of the Bus asteroid taxonomy into the near-infrared // *Icarus*, v. 202, p.160-180.
46. Gaffey M. J., Bell J. F., Cruikshank D. P. (1989) Reflectance spectroscopy and asteroid surface mineralogy // *Asteroids II* / Eds Binzel R. P., Gehrels T. and Matthews M. S. Tucson: Univ. of Arizona Press, p. 98-127.
47. Bell J. F., Davis D. R., Hartmann W. K., Gaffey M. J. (1989) Asteroids: The big picture // *Asteroids II* / Eds Binzel R. P., Gehrels T. and Matthews M. S. Tucson: Univ. of Arizona Press, p. 921-945.
48. Grimm R. E, McSween H. Y. Jr. (1993) Heliocentric zoning of the asteroid belt by aluminum-26 heating // *Science*, v. 259, p. 653-655.

49. Сафронов В. С. (1969) *Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет* / М.: Наука, с. 179-189.
50. Touboul M., Kleine T., Bourdon B. et al. (2007) Late formation and prolonged differentiation of the Moon inferred from W isotopes in lunar metals // *Nature*, v. 450, p. 1206-1209.
51. Mahoney W. A., Ling J. C., Wheaton W. A., Jacobson A.S. (1984) HEAO 3 discovery of ^{26}Al in the interstellar medium // *Astron. J.*, v. 286, p. 578-585.
52. Lee T., Papanastassiou D. A., Wasserburg G. J. (1976) Demonstration of ^{26}Mg excess in Allende and evidence for ^{26}Al // *Geophys. Res. Lett.*, v. 3, p. 109-112.
53. Wadhwa M., Srinivasan G., Carison R. W. (2006) Timescales of planetesimal differentiation in the early solar system // *Meteorites and the early solar system II* / Eds Lauretta D. S. and McSween H. Y. Jr., Tucson: University of Arizona Press, p. 715-731.
54. Jessberger E. K., Christoforidis A., Kissel J. (1988) Aspects of the major element composition of Halley's dust // *Nature*, v. 332, p. 691-695.
55. Wilson L., Keil K., Browning L. B. et al. (1999) Early aqueous alteration, explosive disruption, and reprocessing of asteroids // *Met. Planet. Sci.*, v. 34, p. 541-557.
56. Rosenberg N. D., Browning L., Bourcier W.L. (2001) Modeling aqueous alteration of CM carbonaceous chondrites // *Met. Planet. Sci.*, v. 36, p. 239-244.
57. Сафронов В. С., Зиглина И. Н. (1991) Происхождение пояса астероидов // *Астрон. вестн.*, т. 25, №2, с. 190-199.
58. Витязев А. В., Печерникова Г. В., Сафронов В. С. (1990) *Планеты земной группы. Происхождение и ранняя эволюция* / М.: Наука, 296 с.
59. Melosh H. J., Vickery A. H. (1991) Melt droplet formation in energetic impact events // *Nature*, v. 350, p. 494-496.
60. Меллош Г. (1994) *Образование ударных кратеров* / М.: Мир, 336 с.
61. Макалкин А. Б., Дорофеева В. А. Строение протопланетного аккреционного диска вокруг Солнца на стадии Т Тельца. II. Результаты расчета моделей // *Астрон. вестн.* 1996. Т. 30. С. 496-513.
62. Бусарев В.В. (2011) Гипотеза о происхождении углистых хондритов на малых телах и ее подтверждения // *Вестн. Сиб. гос. аэрокосмического ун-та*, №6(39), с. 70-76.

Благодарности

Автор благодарит А. Б. Макалкина (ИФЗ РАН), В. А. Дорофееву (ГЕОХИ РАН), В. В. Прокофьеву-Михайловскую и В. В. Бочкова (КраО, Украина), М. Н. Тарана (ИГМР НАНУ), Г. К. Кривоконеву (ВИМС), М. В. Воловецкого и В. С. Русакова (Физический ф-т МГУ), Т. Хирои (Браунский ун-т, США) и А. Н. Григорьеву (Химический ф-т МГУ) за участие в работе. Автор благодарен М. Н. Назарову (ГЕОХИ РАН) за образцы метеоритов, а также В. В. Наседкину и В. А. Павлову (ИГЕМ РАН), Д. И. Белаковскому (Минералогический музей РАН), Н. В. Скоробогатовой и Т. А. Смирновой (ВИМС), Л. Р. Колбанцеву (ВСЕГЕИ) – за предоставленные для исследований образцы-аналоги. Особо автор благодарит В. И. Шенаврина и других сотрудников Крымской лаборатории ГАИШ за помощь при подготовке наблюдений астероидов, а также всех сотрудников Отдела исследований Луны и планет ГАИШ – за постоянную и всестороннюю помощь.