

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Щербина Марина Петровна

**Изучение спектральных характеристик и оценка состава вещества
астероидов, в том числе сближающихся с Землёй**

Специальность 01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2020

Работа выполнена на кафедре астрофизики и звёздной астрономии
физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

- Научный руководитель** — *Бусарев Владимир Васильевич,*
доктор физико-математических наук
- Официальные оппоненты** — *Ламзин Сергей Анатольевич —*
доктор физико-математических наук,
доцент, ГАИШ МГУ, лаборатория
новых фотометрических методов,
ведущий научный сотрудник
- Захаров Александр Валентинович —*
доктор физико-математических наук,
ИКИ РАН, отдел физики планет и
малых тел Солнечной системы,
лаборатория прямых физико-химических
исследований планет, главный научный
сотрудник
- Иванова Марина Александровна —*
кандидат геолого-минералогических
наук, ГЕОХИ РАН, лаборатория
метеоритики, старший научный
сотрудник

Защита диссертации состоится «17» декабря 2020 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета МГУ.01.02 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119234, г. Москва, Университетский проспект, дом 13, конференц-зал.

E-mail: morskayaa906@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27). Со сведениями о регистрации участия в защите в удаленном интерактивном режиме и с диссертацией в электронном виде также можно ознакомиться на сайте ИАС «ИСТИНА»:

<https://istina.msu.ru/dissertations/323117319/>

Автореферат разослан «02» октября 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

М.В. Пружинская

Общая характеристика работы

Актуальность работы и степень разработанности

Астероиды входят в число наименее измененных объектов Солнечной системы со времени ее образования. Данный факт был установлен как результат исследований упавших на Землю метеоритов, которые являются потенциальными фрагментами астероидов [1]. На данный момент только в Главном Поясе астероидов, расположенном на расстоянии 2,2 – 3,6 а.е. от Солнца, известно более 894 000 астероидов [2]. Однако для подавляющего числа этих тел известны в основном только элементы их орбит и приближенные размеры.

Неправильная форма большинства астероидов Главного пояса часто является следствием их взаимных столкновений. Длительный ударный процесс должен был способствовать перемешиванию как внешних, так и внутренних слоёв. Поэтому можно полагать, что малые астероиды имеют однородный состав вещества. Так как астероиды, как правило, являются безатмосферными телами, то это облегчает изучение физико-химических и минералогических свойств их поверхностного вещества наземными дистанционными методами.

Знание характеристик астероидов даёт возможность контролировать правильность решения космогонических проблем. В частности, с помощью статистического анализа свойств большого количества малых тел может быть выполнена апробация той или иной модели формирования и эволюции Солнечной системы [3].

Кроме чисто научных задач, связанных с расширением и углублением знаний, изучение астероидов имеет и чисто практическое значение. В настоящее время растет понимание актуальности проблемы астероидно-кометной опасности, особенно учитывая рост урбанизации и численности населения в последние годы. Столкновение с Землёй даже сравнительно небольшого 1-3-км космического объекта может привести к значительным разрушениям и многочисленным жертвам, вплоть до остановки развития человечества [4]. Часть небесных объектов, исследуемых в данной работе, входят в список потенциально опасных

(ПОО), так как имеют достаточно большие размеры и орбиты, допускающие сближение с Землёй на достаточно малое расстояние [5]. Для создания возможных вариантов предотвращения потенциальной катастрофы необходимо знать физические параметры и состав вещества каждого такого астероида.

С другой стороны, астероиды, сближающиеся с Землей, уже рассматриваются в качестве источников внеземных ресурсов (вода, металлы, минералы и др.) [6]. Например, в отчете о мировом производстве железной руды за 2004 год указано, что добыча превысила 1 млрд тонн [7]. Один небольшой астероид, принадлежащий к таксономическому классу М и имеющий диаметр 1 км, может содержать около 2 млрд тонн железоникелевой руды [8]. Для составления списка наиболее интересных астероидов для подобных проектов, разумеется, необходимо иметь оценку состава их вещества.

Необходимо отметить, что в последнее время получили значительное развитие прямые исследования астероидов с помощью космических аппаратов, например 25143 Итокавы, 4 Весты, 1 Цереры, 162173 Рюгу, 101955 Бенну, в том числе и с доставкой вещества на Землю [9], [10], [11], [12]. Однако выбор целей космических миссий, а также основные данные об объектах были предварительно получены с помощью наземных наблюдений. Кроме того, исследование астероидов, общее число которых стремится к миллиону, возможно только дистанционными методами, позволяющими осуществить оценку основных физических и химико-минералогических характеристик этих тел в течение относительно короткого времени и с минимальным бюджетом.

Цели и задачи

Целью данной работы является:

- получение спектров низкого разрешения ($R \sim 100$) в диапазоне 0,38-0,90 мкм и расчет спектров отражения избранных астероидов до видимой звездной величины 14^m ;
- качественная интерпретация полученных спектров отражения для определения или уточнения таксономического типа астероидов и оценки их химико-минерального состава вещества;
- выявление и исследование спектральных особенностей астероидов, связанных с неоднородностью вещества поверхности или возникновением сублимационной активности;
- использование *UBVRI*-данных астероидов для расчета их отражательной способности на эффективных длинах волн указанных светофильтров с целью аппроксимации спектров отражения слабых объектов (до $16-17^m$).

Для этого необходимо было решить следующие задачи:

- провести наблюдения с целью получения спектрофотометрических наблюдательных данных низкого разрешения ($R \sim 100$) в диапазоне 0.38-0.90 мкм;
- обработка наблюдательных данных и расчет спектров отражения астероидов;
- проведение качественной оценки таксономического типа каждого объекта с помощью классификаций Толена и Бас-Бинзела [13], [14];
- интерпретация и изучение возможных механизмов возникновения обнаруженных спектральных особенностей в спектрах отражения астероидов.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования являются некоторые астероиды Главного пояса и астероиды, сближающиеся с Землёй (АСЗ). Предмет исследования – спектральные характеристики данных тел, позволяющие оценить состав вещества их поверхности, а также интерпретация обнаруженного явления сублимационной активности ряда астероидов.

Научная новизна

В данной работе представлены новые спектры отражения 21 астероида и выполнена их химико-минералогическая интерпретация. Определён таксономический класс всех этих астероидов, из них для 8 объектов - впервые.

Стоит отдельного упоминания рассмотрение нового наблюдаемого эффекта – сублимационной активности астероидов примитивных типов Главного пояса, обсуждение и исследование данного эффекта, а также механизмов, влияющих на интенсивность его проявления.

Теоретическая и практическая значимость

Полученные результаты работы могут быть использованы как для накапливаемой в мире базы данных физико-химических свойств астероидов, для расширения статистики распределения тел разных таксономических типов, так и для решения проблемы астероидно-кометной опасности и планирования будущих космических миссий.

Кроме того, результаты части работы, посвященной сублимационной активности астероидов со значительным эксцентриситетом орбиты, могут уточнить наши представления о содержании льдов (в первую очередь H_2O) в составе их вещества, происхождении и эволюции астероидов примитивных типов и внести ограничения на модели эволюции малых тел Солнечной системы.

Методология

Теоретико-методологической базой диссертационной работы являются труды российских и зарубежных ученых, посвященных определению химико-минерального состава раздробленных образцов твердого природного вещества по наблюдаемым минералогическим полосам поглощения в их спектрах отражения, а также методика измерения и расчёта спектров отражения твердых безатмосферных небесных тел. При решении поставленных задач использовались как общенаучные, так и специальные методы, реализация части которых была осуществлена с помощью специальных программных пакетов.

Положения, выносимые на защиту

1. Астероиды 307 Ника, 345 Терцидина, 381 Мирра, 488 Креуса, 787 Москва, 1264 Летаба и 2010 TN54 являются астероидами низкотемпературных классов, что подтверждается наличием в спектрах отражения полос поглощения гидросиликатов.

2. Астероиды 11 Парфенопа, 482 Петрина, 863 Бенкоэла, 20826, 24445, 68216, 93768, 112493 и 337866 являются астероидами высокотемпературных классов, что подтверждается наличием в спектрах отражения полос поглощения минералов оливин-пироксеновой группы.

3. Астероиды 225 Генриетта, 712 Боливиана, 788 Гогенштейна, 4450 Пан и 518810 имеют смешанный состав вещества, указывающий на их интенсивную ударную эволюцию, связанную, вероятно, с падениями на их поверхность тел с составом вещества, отличающимся от состава астероидов-мишеней, так как их спектры отражения имеют как признаки низкотемпературной, так и высокотемпературной минералогии.

4. Наблюдательное подтверждение периодической сублимационной активности астероидов примитивных типов Главного пояса 145 Адеона, 704 Интерамния и 779 Нина вблизи перигелийных расстояний и обнаружение признаков такой активности у 51 Немаузы и 65 Кибелы является указанием на высокое содержание водяного льда в составе их вещества.

Степень достоверности и апробация

Результаты были доложены на следующих российских и международных конференциях:

1. Моделирование спектров отражения астероидов по базам данных образцов-аналогов. **Щербина М.П.**, Бусарев В.В., Резаева А.А. VIII конференция молодых ученых с международным участием «Метеориты. Астероиды. Кометы» Екатеринбург, Россия, 25 - 27 мая 2020
2. Modeling of asteroid reflectance with laboratory databases of analog samples. **M.P. Shcherbina**, A.A. Rezaeva, V. V. Busarev. The Tenth Moscow Solar System Symposium (10MS3) Москва, Россия, 7-11 октября 2019
3. Последние результаты исследований астероидов с сублимационной активностью. **Щербина М.П.**, Бусарев В.В. XI Международная конференция «Околоземная астрономия», Казань, Россия, 30 сентября-4 октября 2019
4. Research of the reflection spectra of a series of the Main belt asteroids. **Shcherbina M.P.**, Busarev V.V., Barabanov S.I. Physics of stars and planets, ШАО, Шемахи, Азербайджан, 16-20 сентября 2019
5. Confirmations of ice sublimation process near perihelion on primitive main-belt asteroids 779 Nina, 704 Interamnia and 145 Adeona: A search for common reasons. Busarev V.V., **Scherbina M.P.**, Barabanov S.I., Irmambetova T.R., Kokhirova G.I., Khamroev U.Kh, Khamitov I.M., Bikmaev I.F., Gumerov R.I., Irtuganov E.N., Melnikov S.S. The Ninth Moscow Solar System Symposium (9MS3) Москва, Россия 8-12 октября 2018
6. Confirmations of (704) Interamnia's sublimation activity near perihelion. **Scherbina M.P.**, Kokhirova G.I., Khamroev U. Kh., Mullo-Abdolov A.Sh, Busarev V.V., Irmambetova T.R., Pavlyuk N.N. 49th Lunar and Planetary Science Conference, The Woodlands, Texas, США, 19-23 мая 2018
7. Confirmation of sublimation and dust activity on 779 Nina and 704 Interamnia. Busarev V.V., **Scherbina M.P.**, Barabanov S.I. The Eighth Moscow Solar System Symposium, Москва, ИКИ РАН, Россия, 9-13 октября 2017

8. Asteroid reflectance spectra modeling with laboratory databases of analog samples. **Scherbina M.P.**, Busarev V.V., Rezaeva A.A. The Eighth Moscow Solar System Symposium, Москва, ИКИ РАН, Россия, 9-13 октября 2017
9. Спектрофотометрия астероидов в 2015-2016 гг. и интерпретация их спектров отражения. **Щербина М.П.**, Барабанов С.И., Бусарев В.В. X Международная конференция «Околоземная астрономия», п. Агой, Краснодарский край, РФ, п. Агой, Краснодарский край, Россия, 2-6 октября 2017
10. Спектрометрические наблюдения астероидов, сближающихся с Землёй, и Главного Пояса с качественной и количественной интерпретацией их спектров отражения. **Щербина М.П.**, Резаева А.А., Бусарев В.В., Барабанов С.И. Всероссийская астрономическая конференция - 2017 «Астрономия: познание без границ», Ялта, Крым, Россия, 17-22 сентября 2017
11. Sublimation activity of (145) Adeona, (704) Interamnia, (779) Nina and (1474) Beira and some confirmations. Busarev V.V., Barabanov S.I., **Scherbina M.P.**, Puzin V.B. Lunar and Planetary Science Conference, 48th, The Woodlands, Texas, USA, США, 20-24 марта 2017
12. Спектрометрические наблюдения АСЗ с качественной и количественной интерпретацией спектров отражения. **Щербина М.П.**, Резаева А.А., Бусарев В.В., Барабанов С.И. Конференция молодых ученых с международным участием «Метеориты. Астероиды. Кометы», Екатеринбург, Россия, 2-4 февраля 2017
13. Спектрометрическое исследование ряда АСЗ. Резаева А.А., Бусарев В.В., **Щербина М.П.**, Барабанов С.И. XIV Всероссийская Открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов" Москва, ИКИ РАН, Москва, Россия, 14-18 ноября 2016

Публикации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 5 печатных изданиях, 3 из которых опубликованы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science и Scopus, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности

1. *Busarev V. V., Makalkin A. B., Vilas F., Barabanov S.I., **Scherbina M.P.*** New candidates for active asteroids: Main-belt (145) Adeona, (704) Interamnia, (779) Nina, (1474) Beira, and near-Earth (162,173) Ryugu // *Icarus*. — 2018. — Vol. 304. — P. 83–94. Импакт-фактор: 3,565.
2. *Бусарев В.В., **Щербина М.П.**, С.И. Барабанов и др.* Подтверждение сублимационной активности примитивных астероидов Главного пояса 779 Нины, 704 Интерамнии и 145 Адеоны и ее вероятные спектральные признаки у 51 Немаузы и 65 Цибелы // *Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы*. – 2019. – Т.53, №4 – С. 273 - 290. Импакт-фактор: 0,756.
3. ***Щербина М. П.**, Бусарев В. В., Барабанов С. И.* Спектрофотометрические исследования астероидов, сближающихся с Землей, и Главного пояса // *Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия*. — 2019. — № 6. — С. 93–96. Импакт-фактор: 0,580.

а 2 из которых - в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России:

4. *Бусарев В. В., **Щербина М. П.**, Кохирова Г. И. и др.* Confirmation of (704) Interamnia's sublimation activity // *ДАН Республики Таджикистан*. — 2018. — Т. 61, № 1. — С. 27–37
5. ***Щербина М. П.**, Бусарев В. В., Барабанов С. И.* Спектрофотометрия астероидов в 2016 г. и интерпретация их спектров отражения // *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*. – 2017. – №. 4-2. – С. 148-156 Импакт-фактор: 0,386.

Личный вклад

Автор диссертации совместно с коллегами получила большую часть спектрофотометрических данных, представленных в работе, используя оборудование обсерватории «Пик Терскол» (филиал ИНАСАН). Соискателем лично была проведена обработка данных согласно принятой методике, а также расчет спектров отражения астероидов. Далее автор провела качественную оценку таксономического класса и сделала оценку состава вещества астероидов согласно классификациям Толена [13] и Бас-Бинзела [14], опираясь на обнаруженные полосы поглощения минералов, а также на схожесть со спектрами отражения известных групп метеоритов из открытых баз данных.

Кроме того, автор обрабатывала полученные коллегами спектрофотометрические и UBVRI-фотометрические данные для расчета спектров отражения (или интерполированных спектров отражения) астероидов с сублимационной активностью. Соискатель принимала равное участие в обсуждении полученных результатов и объяснении механизмов, вызывающих и поддерживающих сублимационную активность астероидов примитивных типов.

Структура и объем диссертации

Диссертация подразделяется на Введение, две Главы, Заключение, Благодарности, Библиографию и три Приложения. Общий объем диссертации 162 страницы, включая 94 рисунка, 14 таблиц и 134 ссылки.

Содержание работы

Во **Введении** обсуждается актуальность диссертационной работы, её цель и новизна, практическая и теоретическая значимость исследования. Также формулируются положения, выносимые на защиту, приводится список работ, в которых опубликованы основные научные результаты диссертации.

В **Главе 1** дано подробное описание порядка работы, включая некоторые особенности обработки данных, используемых классификаций и дополнитель-

ной информации для интерпретации спектров отражения. Большая часть спектрофотометрических данных, используемых для построения спектров отражения, была получена автором в обсерватории «Пик Терскол». Для 12 астероидов Главного пояса, а также для 9 марс-кроссеров и АСЗ, установлен спектральный тип (таксономический класс). Результаты данной главы основаны на публикациях (3) и (5) из раздела **Публикации**.

Глава 2 посвящена подтверждению ранее обнаруженному другими авторами эффекту сублимационной активности у астероидов Главного пояса примитивных типов 145 Адеоны, 704 Интерамнии и 779 Нины, а также обсуждению возможности данного явления для двух других астероидов (51 Немаузы и 65 Кибелы). Для подтверждения зарегистрированного в 2012 г. явления были проведены повторные наблюдения 145 Адеоны, 704 Интерамнии и 779 Нины в 2016-2018 гг. как спектрофотометрическими, так и методом *UBVRI* (или *BVRI*) – фотометрии. Обработка части данных, в том числе и фотометрических, расчет спектров отражения и интерпретация были проведены автором. Для объяснения меньшей интенсивности сублимации при повторных наблюдениях было выдвинуто предположение о влиянии солнечной активности (более низкой в 2016-2018 гг.), что хорошо согласуется с полученными результатами. Обнаружение одновременной сублимационной активности указанных астероидов, а также периодичность эффекта указывают на массовость данного явления, что приводит к выводу о наличии в таких телах достаточно большого запаса льда H_2O , и следовательно, – о возможном формировании астероидов примитивных типов за границей конденсации водяного льда. Результаты данной главы основаны на публикациях (1), (2) и (4) из раздела **Публикации**.

Заключение посвящено перечислению основных результатов диссертации и обсуждению перспектив дальнейших исследований.

В **приложении А** представлены эфемериды и наблюдаемые параметры изученных астероидов Главного пояса, в **приложении В** – АСЗ и марс-кроссеров, в **приложении С** – астероидов с сублимационной активностью, рассматриваемых в данной работе.

Основные выводы

Данная диссертация посвящена спектрофотометрическим исследованиям ряда астероидов Главного пояса, а также астероидов, сближающихся с Землёй.

Наблюдательные данные являются новыми, большая часть которых получена автором в ходе наблюдений на обсерватории «Пик Терскол» (филиал ИНАСАН). В качестве личного вклада автора в работу следует отметить также проведение обработки данных (согласно принятым процедурам), расчета спектров отражения астероидов и их качественная интерпретация. В качестве итогов выполненного исследования можно считать определение спектрального типа (а значит и химико-минералогического состава на качественном уровне) согласно классификации Толена 12 астероидов Главного пояса и 9 астероидов, сближающихся с Землей, и марс-кроссеров, среди которых есть 4 потенциально опасных объекта. Для 8 астероидов спектральный тип был определен впервые. Кратко выводы представлены в Табл. 14. Отметим, что некоторые объекты имеют смешанный состав поверхности.

В Главе 2 рассматривался обнаруженный для астероидов Главного пояса примитивных типов – 145 Адеоны, 704 Интерамнии и 779 Нины – эффект сублимационной активности. Для подтверждения замеченного в 2012 г. явления были проведены повторные наблюдения в 2016-2018 гг как спектрофотометрическими, так и методами UBVRI (или BVRI) – фотометрии. Обработка части данных, в том числе и фотометрических, расчет спектров отражения и интерпретация были проведены автором. Для объяснения меньшей интенсивности сублимации при повторных наблюдениях было выдвинуто предположение о влиянии солнечной активности, что хорошо согласуется с полученными результатами. Кроме указанных выше астероидов признаки сублимационной активности проявляют астероиды 51 Немауза и 65 Кибела. Обнаружение одновременной сублимационной активности указанных астероидов, а также периодичность эффекта указывают на массовость данного явления, что приводит к выводу о наличии в таких телах достаточно большого запаса льда H_2O , а следовательно, о формировании астероидов примитивных типов за границей конденсации водяного льда.

В качестве рекомендаций и перспектив дальнейшей работы отметим необходимость продолжения накопления наблюдательных данных для расширения базы данных, поиск активных астероидов среди астероидов примитивного типа, а также проведение спектроскопических наблюдений высокого разрешения для более детальной интерпретации спектров отражения.

Таблица 1 – Результаты определения таксономического класса астероидов, представленные в Главе 1. Звездочкой отмечены те объекты, для которых на данный момент не определен таксономический класс другими авторами

Объект	Класс по Толену
11 Парфенопа	A-Q
225 Генриетта	C-S
307 Ника	C
345 Терцидина	C
381 Мирра	C
482 Петрина	S
488 Креуса	C
712 Боливиана	C-S
787 Москва*	X
788 Гогенштейна*	C-S
863 Бенкоэла	A

Объект	Класс по Толену
1264 Летаба	C
4450 Пан*	C-S
20826	S
24445*	A-S
68216	S
93768*	S
112493*	S
337866	S
468738*	C
518810*	S-C

Список литературы

1. *Бусарев В.В.* Спектрофотометрия астероидов и ее приложения – LAP LAMBERT Acad. Publish. GmbH & Co. KG, Saarbrucken, Germany-Россия, 2011. – 250 с.
2. The International Astronomical Union Minor Planet Center [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.minorplanetcenter.net/> (дата обращения: 10.08.2020 г.)
3. *Morbidelli A. et al.* Evidence from the asteroid belt for a violent past evolution of Jupiter's orbit //The Astronomical Journal. – 2010. – Vol. 140, №. 5. – P. 1391–1401.
4. *Binzel R. P.* The Torino impact hazard scale // Planetary and Space Science. – 2000. – Vol. 48, №. 4. – P. 297-303.
5. *Board S. S. et al.* Defending planet Earth: Near-Earth-Object surveys and hazard mitigation strategies. – National Academies Press, 2010. – P. 152
6. Sonter M Mining Economics and Risk-Control in the Development of Near-Earth-Asteroid Resources [Электронный ресурс] //Department of Civil and Mining Engineering. Adelaide: University of Wollongong – 2006. – Режим доступа: http://www.spacefuture.com/archive/mining_economics_and_risk_control_in_the_development_of_near_earth_asteriod_resources.shtml (дата обращения: 10.12.2018 г.)
7. World Produces 1.05 Billion Tonnes of Steel in 2004 [Электронный ресурс] //International Iron and Steel Institute – 2005. – Режим доступа: https://www.newmaterials.com/News_Detail_World_produces_105_billion_tonnes_of_steel_in_2004_833.asp (дата обращения: 10.12.2018 г.)
8. *Lewis J. S.* Mining the sky: untold riches from the asteroids, comets, and planets // Reading, Mass.: Addison-Wesley Pub. Co., 1996 – P.2748.
9. *Fujiwara A. et al.* The rubble-pile asteroid Itokawa as observed by Hayabusa // Science. – 2006. – Vol. 312, №. 5778. – P. 1330-1334.
10. *Russell C. T. et al.* Dawn mission to Vesta and Ceres //Earth, Moon, and Planets. – 2007. – Vol. 101, №. 1-2. – P. 65-91.

11. *Tachibana S. et al.* Hayabusa2: Scientific importance of samples returned from C-type near-Earth asteroid (162173) 1999 JU3 // *Geochemical Journal*. – 2014. – Vol. 48, №. 6. – P. 571-587.
12. *Lauretta D. S. et al.* The OSIRIS-REx target asteroid (101955) Bennu: Constraints on its physical, geological, and dynamical nature from astronomical observations // *Meteoritics & Planetary Science*. – 2015. – Vol. 50, №. 4. – P. 834-849.
13. *Tholen D. J.* Asteroid taxonomy from cluster analysis of photometry. – The University of Arizona, 1984. – P.161.
14. *Bus S. J., Binzel R. P.* Phase II of the small main-belt asteroid spectroscopic survey: A feature-based taxonomy // *Icarus*. – 2002. – Vol. 158, №. 1. – P. 146-177.