МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

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

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
д.ф.-м.н. В.В. Бусарев.

Москва – 2020

Оглавление

Введение 6

Актуальность работы и степень разработанности. 6

Цели и задачи работы 8

Объект и предмет исследования. 8

Научная новизна 9

Теоретическая и практическая значимость. 9

Методология 9

Положения, выносимые на защиту 10

Степень достоверности и апробация результатов 11

Публикации 13

Личный вклад 14

Структура и объем диссертации 15

Содержание работы 15

Глава 1. Получение спектров отражения астероидов и их качественная интерпретация 17

1.1 Методика измерения спектров твердых безатмосферных небесных тел 17

1.2 Источники помех при получении спектров отражения 22

1.3 Таксономические классификации астероидов и их использование при изучении происхождения и эволюции малых планет 27

1.4 Основные особенности в спектрах отражения астероидов и их химико-минералогическое значение 32

1.5 Общая минералогическая характеристика астероидных классов Толена 34

1.6 Основные группы метеоритов и их минералогия 36
1.6.1 Каменные метеориты 36
1.6.2 Железо-каменные метеориты 41
1.6.3 Железные метеориты 42
1.7 Астероиды, сближающиеся с Землёй, и потенциально опасные астероиды 45
1.8 Обработка наблюдений и получение спектров отражения 49
1.8.1 Обсерватории и инструменты, используемые для получения наблюдательных данных 49
1.8.2 Программное обеспечение 50
1.8.3 Краткий порядок работы 50
1.8.4 Оценка спектрального типа астероида 51
1.9 Результаты и их обсуждение 53
1.9.1 Астероиды Главного Пояса 54
1.9.1.1 11 Парфенопа 54
1.9.1.2 225 Генриетта 55
1.8.1.3 307 Ника 58
1.9.1.4 345 Терцидина 60
1.9.1.5 381 Мирра 62
1.9.1.6 482 Петрина 63
1.9.1.7 488 Креуса 64
1.9.1.8 712 Боливиана 66
1.9.1.9 787 Москва 69
1.9.1.10 788 Гогенштейна 71
1.9.1.11 863 Бенкоэла 73
1.9.1.12 1264 Летаба 75
1.9.2 Астероиды, сближающиеся с Землёй, а также марс-кроссеры 77
1.9.2.1 4450 Пан (1987 SY) 77

1.9.2.2 20826 (2000 UV13) 79
1.8.2.3 24445 (2000 PM8) 82
1.9.2.4 68216 (2001 CV26) 84
1.9.2.5 93768 (2000 WN22) 86
1.9.2.6 112493 (2002 PR6) 87
1.9.2.7 337866 (2001 WL15) 88
1.9.2.8 468738 (2010 TN54) 89
1.9.2.9 518810 (2010 CF19) 91
1.10 Выводы 92
Глава 2. Сублимационная активность астероидов 95
2.1 Возможные механизмы активности астероидов и наблюдаемые эффекты 95
2.2 Сублимационная активность астероидов примитивных типов и влияние эксцентриситетов орбит этих тел 99
2.2.1 Характеристики 145 Адеоны, 704 Интерамнии, 779 Нины, 51 Немаузы и 65 Кибелы 100
2.2.1.1 145 Адеона 100
2.2.1.2 704 Интерамния 102
2.2.1.3 779 Нина 104
2.2.1.4 51 Немауза 105
2.2.1.5 65 Кибела 107
2.2.2 Спектры отражения астероидов 145 Адеоны, 704 Интерамнии, 779 Нины, 51 Немаузы и 65 Кибелы и проявление сублимационной активности 109
2.2.2.1 145 Адеона 109
2.2.2.2 704 Интерамния 114
2.2.2.3 779 Нина 117
2.2.2.4 51 Немауза 119
2.2.2.5 65 Кибела 120

2.2.3 Механизм возникновения необычного максимума на спектрах отражения 145 Адеоны, 704 Интерамнии и 779 Нины и оценка подсолнечных температур их поверхности 121
2.2.4 Особенности спектров отражения 51 Немаузы и 65 Кибелы 127
2.3 Возможные особенности строения и состава вещества астероидов с сублимационной активностью 127
2.4 Предполагаемое происхождение астероидов с сублимационной активностью 129
2.5 Механизм поддержки эффекта сублимационной активности 130
2.6 Влияние солнечной активности на величину наблюдаемого эффекта сублимации льдов 130
2.7 Выводы 132
Заключение 133
Благодарности 135
Список литературы 136
Приложение А 149
Приложение В 154
Приложение С 158

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы и степень разработанности

Астероиды входят в число наименее измененных объектов Солнечной системы со времени ее образования. Данный факт был установлен согласно результатам 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 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 более однородный состав вещества, чем крупные тела. 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 крайне 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 M 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 ~ 100) в диапазоне 0,38-0,90 мкм и расчет спектров отражения 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 $16\text{-}17^m$).

Для этого необходимо было решить следующие задачи:

- получение спектрофотометрических наблюдательных данных низкого разрешения (R ~ 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 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 пополнения базы 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, Шемахы, 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., Irsmambetova 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., Irsmambetova 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
14. Спектрофотометрическое исследование ряда околоземных астероидов. **Щербина М.П.,** Резаева А.А. IV Международная научная конференция молодых ученых «Метеориты. Астероиды. Кометы», г. Екатеринбург, Институт геологии и геохимии УрО РАН., Россия, 26 мая 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: 0,413.

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 сходство 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 137 ссылок.

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 дополнительной информации для интерпретации спектров отражения. Определен спектральный тип (таксономический класс) для 9 АСЗ, и марс-кроссеров, а также для 12 астероидов Главного пояса. Часть спектрофотометрических данных была получена в Терскольском филиале ИНАСАН (в обсерватории «Пик Терскол») лично автором. Результаты данной главы основаны на публикациях (3) и (5) из раздела **Публикации.**

Глава 2 посвящена обнаруженному у астероидов Главного пояса примитивных типов – 145 Адеоны, 704 Интерамнии и 779 Нины – эффекту сублимационной активности, 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, а в **приложении В** – АСЗ, и марс-кроссеров, в **приложении С** – астероидов с активностью, рассматриваемых в данной работе.

ГЛАВА 1. ПОЛУЧЕНИЕ СПЕКТРОВ ОТРАЖЕНИЯ АСТЕРОИДОВ И ИХ КАЧЕСТВЕННАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

1.1 Методика измерения спектров твердых безатмосферных небесных тел.

Астероиды, являясь твердыми, безатмосферными телами Солнечной системы, представляют собой идеальные объекты для наземных оптических измерений, за счет отсутствия помехообразующей газообразной оболочки вблизи поверхности наблюдаемого тела на пути проходящих сигналов. Как важнейший среди оптических методов можно выделить спектрофотометрию, которая выполняется в диапазоне от 0,38 до 1,1 мкм (видимый и ближний ИК), так как здесь находится «окно» земной атмосферы с наиболее высокой спектральной прозрачностью [15].

Основанием для использования именно спектрофотометрических методов является то, что отраженный от поверхности твёрдого тела солнечный свет несёт в себе изменённое спектральное распределение энергии относительно аналогичной характеристики в падающем свете. Такое изменение характеризует физические, химические и минералогические параметры верхнего раздробленного слоя вещества. Но следует отметить, что при диффузном отражении и преломлении света мельчайшими частицами твердого вещества, повышается доля прошедшего сквозь него света и появляется возможность регистрации в спектре отражения характеристических полос поглощения минералов и других входящих в вещество соединений. Кроме того, астероиды сравнительно небольших размеров (типичных для АСЗ), подвергаясь ударным процессам течение своей динамической эволюции, превращаются в «груды булыжников» с достаточно однородным состав. Поэтому, определяя характеристики верхнего слоя поверхности, можно приближенно судить о составе вещества таких тел в целом.

Проведение оценки состава вещества астероидов можно разделить на три этапа:

1. Регистрация спектров отражения астероидов и ближайших к нему стандартных звезд солнечного типа с помощью телескопа со спектрографом.
2. Расчет спектров отражения.
3. Качественная интерпретация спектров отражения (химико-минералогический аспект).

Для измерения спектра, то есть распределения энергии в абсолютных единицах, любого небесного объекта используется так называемый дифференциальный метод: сравнение световых потоков от этого объекта и стандартной звезды [16]:

$$E(\lambda) = k\, E_{сз}(\lambda)\, [I(\lambda)/\, I_{сз}(\lambda)]\, f(\lambda)^{-\Delta M}, \qquad (1)$$

где

k – поправочный коэффициент, зависящий от используемой наблюдателем аппаратуры;

$E_{сз}(\lambda)$ – освещенность стандартной звездой на длине волны λ на границе земной атмосферы;

$I(\lambda)$ – интенсивность излучения определенной длины волны от наблюдаемого объекта, измеряемая в количестве фотонов, регистрируемых за единицу времени (фон неба исключён);

$I_{сз}(\lambda)$ – интенсивность излучения фиксированной длины волны стандартной звезды (фон неба исключён);

ΔM – разность воздушных масс исследуемого объекта и стандартной звезды, которые вычисляются по формуле $M(z) = 1/cos\, z$, где z – зенитное расстояние;

$f(\lambda)$ – монохроматическая спектральная прозрачность атмосферы, уникальная для каждой наблюдательной ночи.

Величина монохроматической спектральной прозрачности атмосферы определяется следующим образом. Пусть $I_1(\lambda)$, $I_2(\lambda)$ – величины интенсивности излучения стандартной звезды в моменты времени t_1 и t_2 при воздушных массах M_1, M_2 соответственно (т. е. полученные при повторных наблюдениях). Подставив в (1), выразим искомую величину как:

$$f(\lambda) = [I_2(\lambda) \,/\, I_1(\lambda)]^{1/\Delta M}\,, \qquad (2)$$

где $\Delta M \equiv M_1 - M_2$ – разность воздушных масс. Таким образом, получили выражение для спектральной прозрачности атмосферы для фиксированной длины волны.

Исследуемые астероиды являются достаточно малыми и удалёнными, поэтому их можно считать точечными источниками света. Исходя из этого предположения, можно выразить освещенность (на длине волны λ) безатмосферного тела на границе земной атмосферы $E_n(\lambda)$, используя величину освещенности этого тела солнечным светом $E_c(\lambda)$ [15]

$$E_n(\lambda) = \frac{\pi\, \Gamma_\lambda \Phi(\alpha,\lambda)\, E_c(\lambda)\, r^2}{R^2}\,, \qquad (3)$$

где

Γ_λ – геометрическое альбедо, которое учитывает общие физико-химические свойства наблюдаемой полусферы;

α – фазовый угол, то есть Солнце-астероид-Земля (наблюдатель);

$\Phi(\alpha, \lambda)$ – фазовая функция астероида (условие нормировки: $\forall\lambda\colon \alpha = 0 \;\rightarrow\; \Phi(\alpha, \lambda) = 1$);

r – эффективный радиус астероида;

R – расстояние между астероидом и Землей.

Освещенность солнечным светом $E_c(\lambda)$ возможно выразить как

$$E_c(\lambda) = E_0(\lambda)\frac{{d_0}^2}{d^2}, \qquad (4)$$

где

$E_0(\lambda)$ – известная освещенность солнечным светом на границе земной атмосферы;

d_0 и d – дистанции между Землей и Солнцем и между астероидом и Солнцем соответственно.

Далее введем обозначение

$$\rho(\alpha,\lambda) \equiv \Gamma_\lambda \Phi(\alpha,\lambda) \quad (5)$$

для спектрального коэффициента (фактора) яркости (сокращенно: СКЯ). Физическим смыслом данного коэффициента является эквивалентная яркость плоского абсолютно белого ламбертового экрана, расположенного в пространстве на месте астероида ортогонально направлению солнечного освещения и имеющему площадь, посчитанную из среднего радиуса астероида [15].

Выполнив подстановку выражений (4-5) в формулу (3) для монохромной освещенности безатмосферного тела, получим:

$$E_n(\lambda) = \frac{\rho(\alpha,\lambda)E_0(\lambda)\, {d_0}^2 r^2}{d^2 R^2}. \quad (6)$$

Из полученных формул (1) и (6) получаем формулу для расчета СКЯ в абсолютных единицах:

$$\rho(\alpha,\lambda) = \frac{k\, n\, E_{сз}(\lambda) I_a(\alpha,\lambda) \left(f(\lambda)\right)^{-\Delta M}}{E_0(\lambda) I_{сз}(\lambda)} \quad (7)$$

α – текущее значение фазового угла;

k – постоянный коэффициент, зависящий от аппаратуры;

n – безразмерная величина, выражаемая как $\frac{d^2 R^2}{{d_0}^2 \pi r^2}$;

$I_a(\alpha,\lambda) \equiv I(\alpha,\lambda)$ – величина интенсивности света от наблюдаемого объекта – астероида (фон неба исключён);

$\Delta M \equiv M_a - M_{сз}$ – разность воздушных масс астероида и стандартной звезды;

Основной проблемой при получении спектра отражения астероида является то, что невозможно при одинаковых атмосферных условиях одновременно или хотя бы с разницей в несколько часов наблюдать сам объект и Солнце. Поэтому используют особенную группу звезд солнечного типа – солнечные аналоги. Данный термин в 1978 году впервые предложил Д. Хардорп [17]. Аналогичность Солнцу определялась из сравнения спектров

низкого разрешения и из показателей цвета. В настоящее время добавляются ещё критерии отбора: металличность может отличаться не более, чем в два раза, температура – в пределах 500 К, кроме того, звёзды не должны быть компонентами ТДС и находиться далее 1 звездной величины от начальной главной последовательности [18].

Если при наблюдении астероида использовать солнечный аналог в качестве стандартной звезды, то возможно преобразовать формулу (7) в более простой и удобный для дальнейшей работы вид (считая, что $E_{сз}(\lambda) \approx E_0(\lambda)$):

$$\rho(\alpha,\lambda) = \frac{k\, n\, I_a(\alpha,\lambda)\left(f(\lambda)\right)^{-\Delta M}}{I_{сз}(\lambda)} \qquad (8)$$

Использование для расчёта СКЯ выражения (8) позволяет исключить постоянные или медленно меняющиеся погрешности в спектрах объектов и стандартов, а также не требуется знать распределение энергии в стандартной звезде.

Если СКЯ представлена в ограниченном спектральном диапазоне, а так оно и есть, так как применяемая аппаратура задаёт этот самый диапазон, то данная функция и есть спектр отражения при определенном фазовом угле α. Величина данного фазового угла влияет на их спектры отражения, как показывают спектральные исследования раздробленных образцов-аналогов. Однако вариация угла в ограниченном диапазоне может привести к погрешностям не более нескольких процентов. В первом приближении или на качественном уровне можно утверждать, что спектры отражения астероидов правильно описывают химико-минералогические особенности тел при наблюдении этих объектов при малых фазовых углах $\alpha \approx 0 \div 20^{\circ}$ [19], [20].

Для исключения из спектров отражения вариаций яркости, связанных, например, с изменением формы астероида, принято нормировать спектры на значение спектрального фактора яркости, соответствующего максимуму в распределении энергии излучения Солнца $\rho(\alpha, \lambda = 0{,}55$ мкм). Тогда нормированный спектр отражения астероида можно представить

следующей формулой:

$$\rho'(\alpha,\lambda) = \frac{\Gamma_\lambda \Phi(\alpha,\lambda)}{\Gamma_{\lambda_0} \Phi(\alpha,\lambda_0)} \quad (9)$$

1.2 Источники помех при получении спектров отражения.

Как было показано выше, имеет место значительное упрощение расчета спектров отражения астероидов при использовании солнечных аналогов как стандартных звёзд. Однако даже у звезд одного спектрального типа имеются различия в физических и химических параметрах [18]. На данный момент имеется около двадцати достаточно близких аналогов Солнца и несколько десятков звезд-кандидатов. Они имеют звездные величины 4 – 9^m и спектральные подклассы G0 IV - G5 V. На Рис. 1 показано распределение энергии в спектрах излучения 10 таких звезд. Представленные спектры отнесены к средневзвешенному солнечному распределению энергии и нормированы на длине волны 0,5525 мкм.

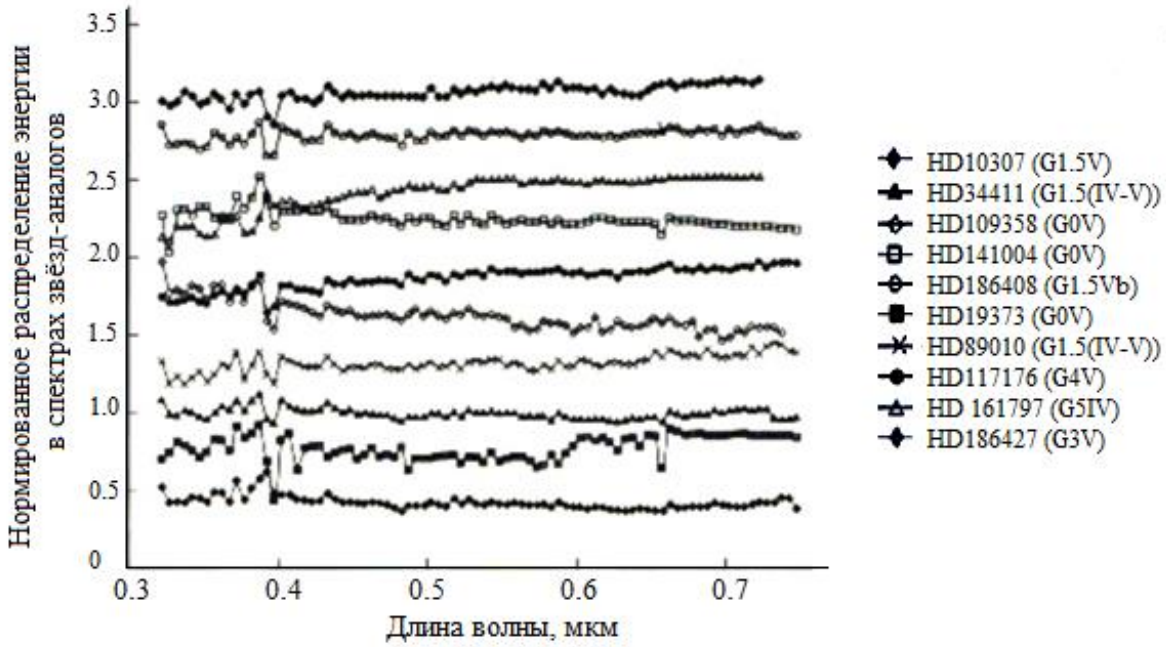

Рисунок 1 – Распределение энергии в спектрах излучения звезд - солнечных аналогов, отнесенные к распределению энергии в спектре Солнца (по данным [21]) и нормированные к единице на длине волны 0,5525 мкм. Все кривые, за исключением распределения для HD 34411, специально смещены относительно друг друга на 0,3 ед. [15]

Общее сравнение спектральных распределений энергий данных звезд - аналогов обнаруживает, что каждая имеет свои особенности в параметрах наиболее интенсивных линий поглощений (H, K, H_α, H_β, H_γ, H_δ), а наиболее заметной деталью является излом в области бальмеровского скачка на 0,39-0,40 мкм. Такая разница вносит, к сожалению, некоторые погрешности в спектр отражения астероида, которые, к сожалению, полностью не удаётся устранить.

Единственный способ их уменьшения – это использовать звезды, которые представляют собой хорошие аналоги Солнца.

Однако данные погрешности не так велики, чтобы внести значительные искажения в форму спектра отражения. На Рис. 2 представлены расчётные спектры для одного и того же астероида 307 Ника с использованием разных звезд-аналогов: HD 9986 и HD 10307. Можно заметить некоторые различия в спектрах отражения, но они не влияют на форму, наклон спектра, а также характерные особенности.

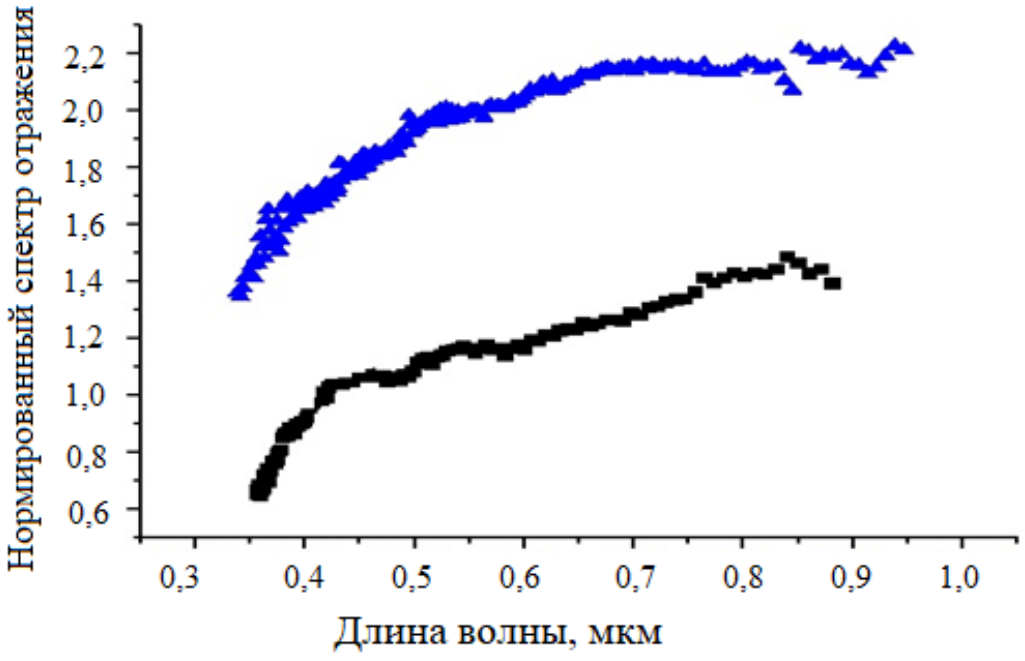

Рисунок 2 – Нормированный спектр отражения астероида 307 Ника.
Верхний спектр – 04.11.2018 с использованием в качестве солнечного стандарта HD 9986, нижний спектр – 09.11.2018 с использованием в качестве солнечного стандарта HD 10307. Спектры были получены на обсерватории «Пик Терскол» (филиал ИНАСАН)

Другой значительный источник помех – это земная атмосфера. При прохождении света от объекта из-за имеющихся в ней водяного пара, кислорода, озона и углекислого газа в видимом и ближнем ИК возникают теллурические линии (Рис.3) [22], поэтому при обработке и интерпретации спектров отражения с осторожностью стоит относиться к особенностям, проявляющимся на длинах волн влияния теллурических линий.

Очевидный и эффективный способ борьбы с помехами такого вида – это проведение наблюдений при устоявшейся «спектрофотометрической» погоде. Однако даже в чистой и спокойной атмосфере водяные и пылевые аэрозоли, неоднородности плотности вносят шумовую компоненту в итоговый спектр отражения.

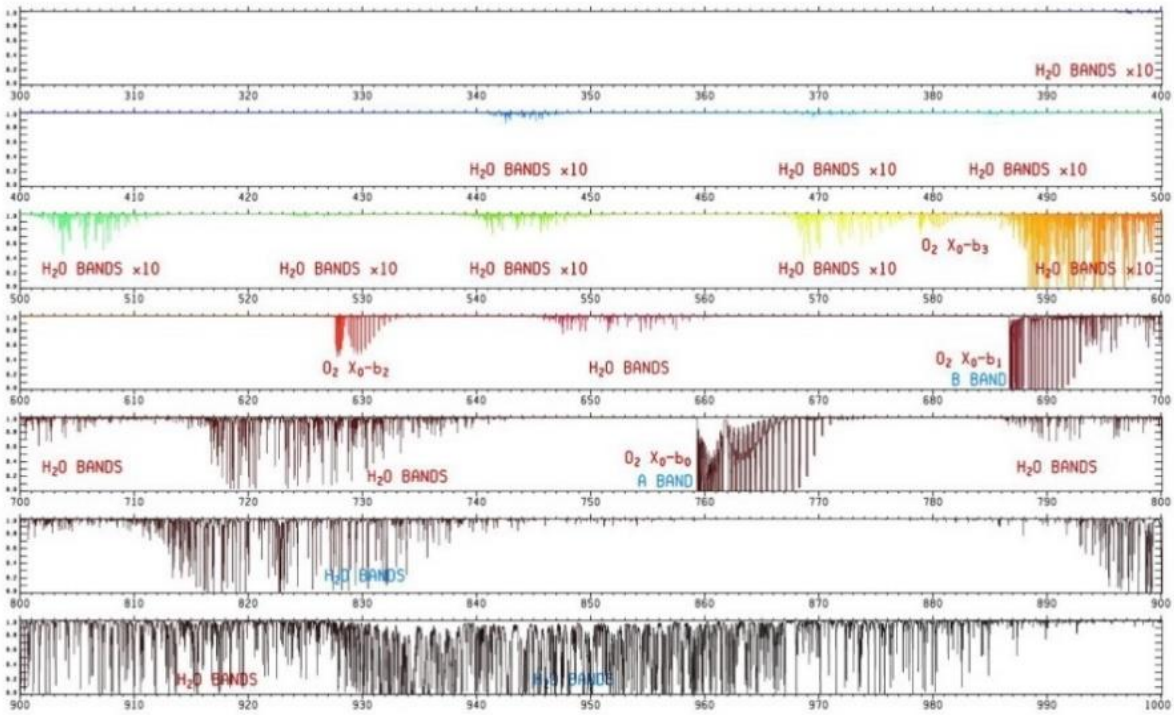

Рисунок 3 – Теллурические линии [22]

Конечно же, определенный вклад в шум вносят компоненты измерительно-регистрирующей аппаратуры: оптические компоненты телескопа, спектрограф, ПЗС-матрица приемника излучения. С целью уменьшения этих шумовых составляющих производится стандартная процедура съемки калибровочных данных для каждой наблюдательной ночи.

Влияние калибровочных данных заметно на Рис. 4.

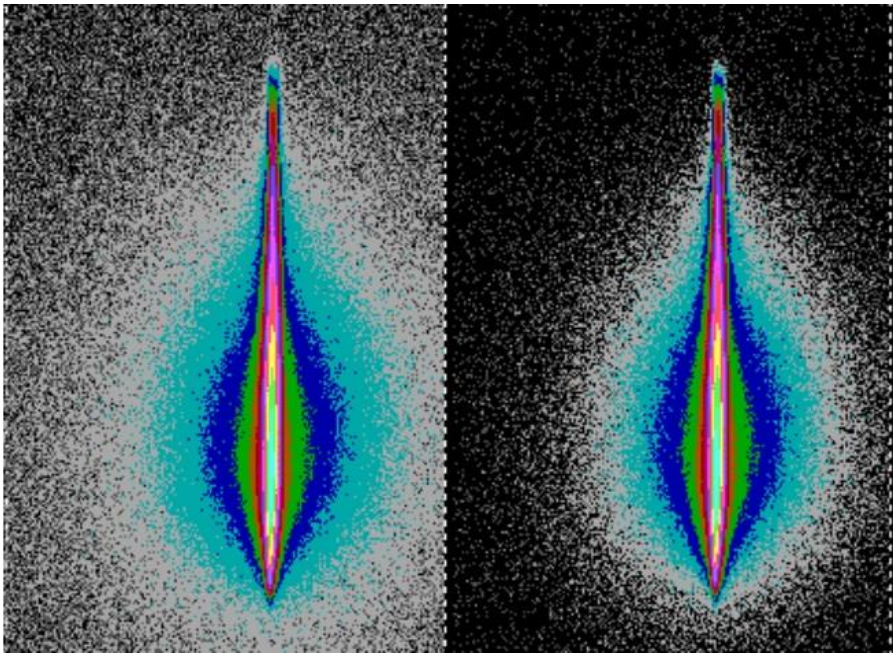

Рисунок 4 – Влияние калибровочных данных на снимок 1999 CF9 (2013.08.29 23:11)

Среди источников помех стоит упомянуть влияние треков космических частиц (КЧ), которые обычно охватывают несколько пикселей и увеличивают значение в зависимости от энергии и траектории частицы. На Рис.5 показано влияние КЧ на спектр астероида 2010 CF19 (около 0,52 мкм). Данное явление нельзя игнорировать, так как оно приводит к искажению результата, поэтому значения подобных пикселей или заменяются результатом интерполяции соседних пикселей, или вовсе не учитываются [23].

Для улучшения качества спектров отражения, дабы устранить остаточный шум, используется частотная фильтрация и сглаживание. Надо заметить, что особенности спектров отражения астероидов − полосы поглощения переходных металлов, окислов и более сложных соединений − имеют превосходящую шумовую составляющую ширину. Поэтому такая дополнительная обработка не влияет на дальнейшую интерпретацию. На Рис. 6a представлен спектр отражения астероида 407 Арахна, на Рис. 6b – тот же спектр, но после процедуры сглаживания.

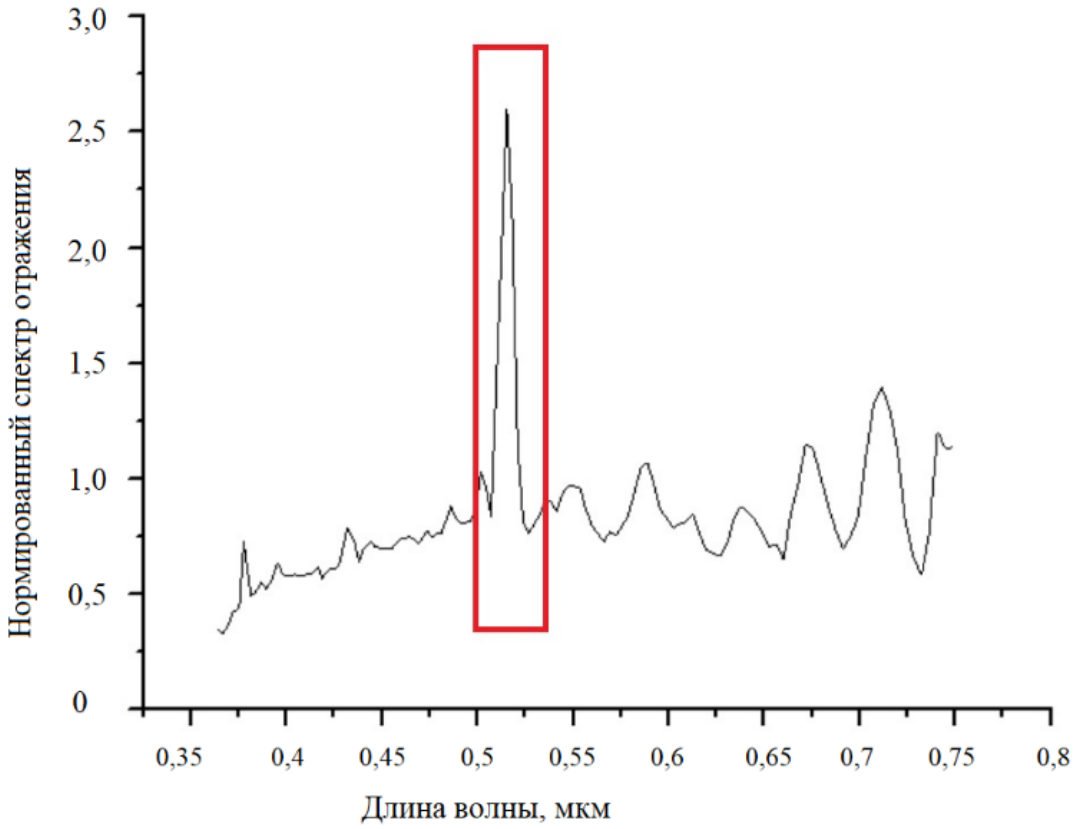

Рисунок 5 – Влияние космической частицы на спектр 2010 CF19 (2013.08.30 00:34)

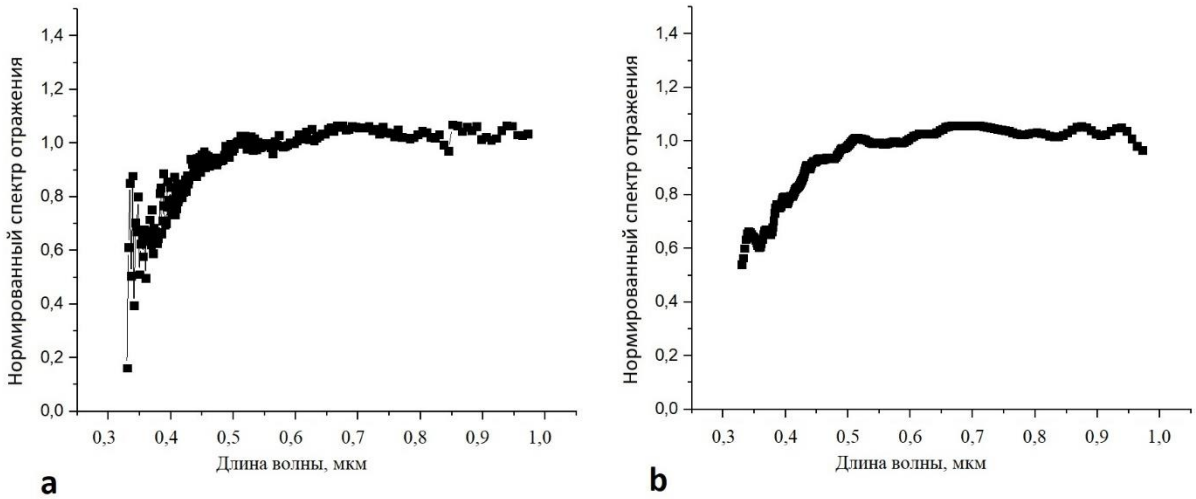

Рисунок 6 – Влияние процедуры сглаживания на спектр 407 Арахна (2018.11.04 20:42)
a) до проведения процедуры сглаживания; b) после проведения процедуры сглаживания

1.3 Таксономические классификации астероидов и их использование при изучении происхождения и эволюции малых планет

В 1975 году К. Чапмен, Д. Моррисон и Б. Целлнер разработали систему классификации астероидов. Базой предложенной классификации стали показатели цвета, альбедо и некоторые особенности спектров отражения [24].

Проанализировав результаты наблюдений 110 астероидов, сделанные поляриметрическим, радиометрическим и спектрофотографическим способами, учёные выделили три класса астероидов: «C» - тёмные углеродистые, «S» - каменные (кремниевые) и неизвестный класс «U» - объекты, которые не попали в две предыдущие категории. В Табл.1 приведены некоторые найденные ими оптические параметры для астероидов C и S классов.

Таблица 1 – Диапазоны для оптических параметров, определенные для C и S-классов в классификации Чапмена, где p (V) − визуальное геометрическое альбедо, B-V − показатель цвета (0,4-0,55 мкм), R / B – отношение излучения на длине волны 0,7 мкм к излучению на 0,4 мкм [24]

Параметр	C	S
p_v	≤ 0,09	≥ 0,09
B-V	≤ 0,77	≥ 0,77
R/B	≤ 1,35	1,35 ≤ R/B < 2,3

Грэди и Тедеско в 1989 г. предложили классификацию, использовав данные восьмицветного обзора Зелнера [25] (см. Табл.2), опираясь на три светофильтра (0,36; 0,55 и 0,85 мкм) и IRAS альбедо на базе 357 астероидов.

Таблица 2 – Значения эффективных длин волн и полуширин светофильтров [25]

Фильтр	Эффективная длина волны, мкм	Полуширина светофильтра, мкм
S	0,337	0,047
U	0,359	0,060
B	0,437	0,090
V	0,550	0,057
W	0,701	0,058
X	0,853	0,081
P	0,948	0,080
Z	1,041	0,067

Данная классификация содержала 11 классов [26]. В Табл.3 указаны полученные значения для альбедо (p_v), (v-x) и (U-V).

Толен, применяя метод кластерного анализа и метод «главных компонент» для статистического анализа показателей цвета (в диапазоне 0,34 - 1,04 мкм, используя данные из обзора Зелнера [26]), создал новую, расширенную классификацию астероидов и установил количественный критерий разграничения отдельных классов [13]. Толену удалось аппроксимировать средние спектры отражения выделенных типов астероидов и установить обобщенный химико-минералогический состав каждого из типов. Дополнительное использование значений альбедо способствовало выделению классов астероидов. Итак, в классификацию Толена вошли 14 спектральных классов. Спектры отражений астероидов каждого класса представлены на Рис.7 [27]. Именно их мы принимаем в дальнейшей работе за эталонные.

Таблица 3 – Значения используемых параметров для спектральных классов астероидов по Грэди и Тедеско, где p(V) − визуальное геометрическое альбедо, показатели цвета U – V (0,36 – 0,55 мкм), v – x (0,55 – 0,85 мкм) [27]

Класс	pv		U-V		v-x	
Min	max	min	max	min	max	min
C	0,02	0,088	0,87	1,19	-0,089	0,117
S	0,085	0,33	1,16	1,52	0,03	0,36
M	0,074	0,25	0,86	1,05	0,03	0,19
E	0,034	0,6	0,90	1,11	-0,02	0,21
A	0,2	0,6	1,55	1,75	0,14	0,35
G+K	0,062	0,16	1,13	1,26	-0,045	0,20
T	0,06	0,092	1,06	1,16	0,08	0,22
P	0,023	0,055	0,85	1,04	0,117	0,205
D	0,02	0,07	0,90	1,08	0,205	0,36
F	0,024	0,086	0,78	0,93	-0,08	0,06

В 2002 году Ш.Бас и Р.Бинзель представили расширенную классификацию астероидов, составленную на базе проекта SMASS («Спектрального изучения малых астероидов Главного пояса астероидов») [28], посвященного получению спектров отражения (в диапазоне длин волн 0,4-1,0 мкм) малых тел (диаметром менее 20 км) Главного пояса астероидов. Кроме увеличения числа исследуемых объектов, измерение спектров отражения проводилось со спектральным разрешением выше почти на два порядка, чем у Толена. Это позволило выявить новые особенности, которые стали основой для создания новой классификации, сохраняющей преемственность по отношению к классификации Толлена; в результате астероиды были разделены на 24 основных класса [14]. Однако, как будет показано далее, в данной работе использовались спектры низкого разрешения, поэтому выбор был сделан в пользу классификации Толена.

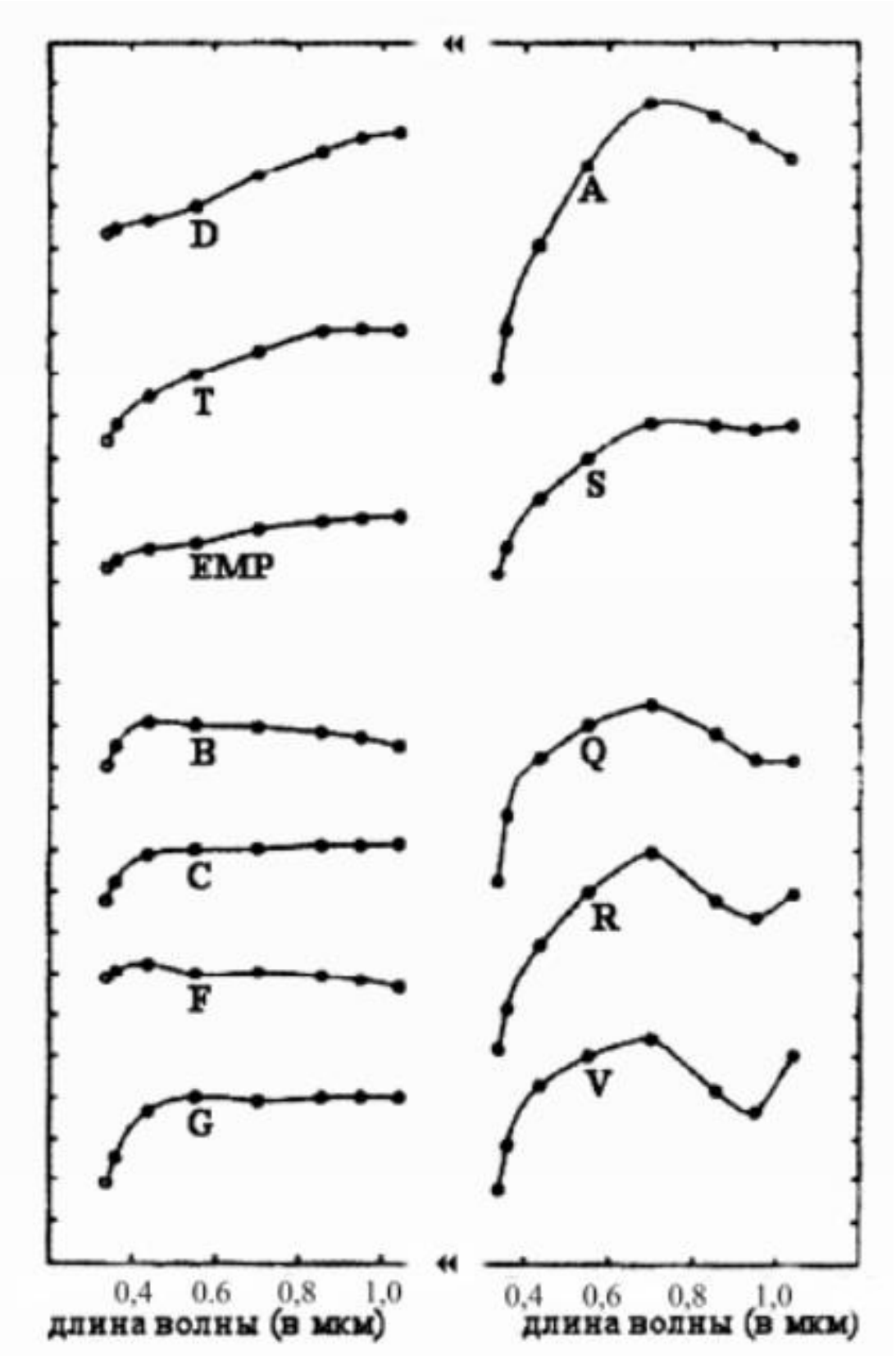

Рисунок 7 – Усредненные нормированные (на значение на длине волны 0,55 мкм) и смещенные относительно друг друга спектры отражения астероидов основных спектральных типов согласно таксономической классификации Д. Толена. Вертикальная ось − в безразмерных относительных единицах [27]

Рисунок 8 – Распределение различных спектральных типов астероидов по гелиоцентрическим расстояниям (с исправлением наблюдательной селекции) согласно Бэллу и др. [29]

По представленному на Рис.8 распределению различных спектральных типов астероидов по диапазонам гелиоцентрических расстояний, можно произвести анализ текущего изменения состава твёрдого вещества Солнечной системы [29].

Диапазоны гелиоцентрических расстояний распределения почти всех спектральных классов перекрываются, а численное превосходство (≈75% общего количества тел) за астроидами С-типа, которые охватывают почти весь диапазон и имеют максимум у внешнего края. На основе спектральных характеристик и альбедо астероиды данного типа были образованы при температурах не более 200-300˚С, а их родительские тела могли сформироваться у внешней границы Главного пояса или даже за ее пределами. Максимумы же астероидов S-, M- и E- типов смещены к внутреннему краю Главного пояса, здесь они могли нагреваться до 1000-1500˚С.

1.4 Основные особенности в спектрах отражения астероидов и их химико-минералогическое значение

Оценка состава вещества астероидов основывается на сравнении рассчитанных спектров отражения этих небесных тел со спектрами отражения земных минералов, а также метеоритов, которые, как предполагается, в большинстве случаев являются фрагментами астероидов. В настоящее время существуют открытые базы данных, например, такие как RELab и HOSERLab [30], [31], содержащие в себе спектры отражений как чистых минералов, так и смесей в различных пропорциях и с разным размером частиц, так как измерение происходит в раздробленном состоянии.

Для спектров отражения силикатного вещества характерные следующие особенности. Самые выраженные спектральные полосы поглощения находятся в диапазоне 0,35 – 1,1 мкм: полоса с минимумом у длины волны 0,2 мкм, соотносящаяся с переносом электронного заряда O-Me, и полоса с минимумом у длины волны 1 мкм, соотносящаяся с переходом в катионах Fe^{2+} в кристаллическом поле. По сути, данная полоса поглощения является суперпозицией полос поглощения ортопироксена, клинопироксена и оливина [32]. Данные минералы имеют и слабые полосы поглощения: оливин – 0,50 мкм, пироксен – 0,506 мкм [33]. Две другие полосы поглощения, характерные для силикатного вещества: вблизи диапазона длин волн 0,75-0,80 мкм (возникает при переносе заряда у $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$ и типична для гидратированного или высокоокисленного вещества) и полоса поглощения у 0,44-0,45 мкм (соотносится с содержанием Fe^{3+}) [34].

Кроме перечисленных полос поглощения при интерпретации спектров отражения учитывались полосы, перечисленные в работе К. Фернандес (см. Табл. 4) [35].

Таблица 4 – Полосы поглощения некоторых минералов, а также возможный механизм их появления [35]

Минерал	Особенность	Возможный механизм
Оливины	0,32 мкм	неизвестно
Пироксены		
• Энстатит	0,3-0,34 мкм	Fe^{+2}
• Авгит	0,27 мкм, 0,295 мкм, 0,3 мкм	перенос Fe-O
	0,52 мкм, 0,62 мкм, 0,68 мкм	неизвестно
• Диопсид	0,33 мкм	перенос Fe-O
	0,6-0,7 мкм	неизвестно
• Волластонит	0,3 мкм	Ti^{4+} или Fe-O
	0,67 мкм, 0,72 мкм, 0,78 мкм	неизвестно
• Родонит	0,3 мкм	Mn^{3+} - O
	0,41 мкм	Mn^{3+}
	0,55 мкм	Fe^{2+}
	0,7 мкм	неизвестно
Полевые шпаты		
• Нефелин	0,28 мкм	Fe^{2+} - O
• Анортит	0,27 мкм	Fe^{2+} - O
• Альбит	0,4-0,5 мкм, 0,7 мкм	неизвестно
Оксиды		
• Шпинель	0,27 мкм	неизвестно
	0,32 мкм, 0,55-0,7 мкм	неизвестно
• Магнетит	0,27 мкм	Fe^{2+} - O
	0,305 мкм, 0,35 мкм, 0,62-0,64 мкм	неизвестно
• Гибонит	0,27 мкм	Fe^{2+} - O
	0,34 мкм	Ti^{4+} или Fe-O
Апатит	0,35 мкм	Mn^{5+} или Cr^{5+}
	0,49 мкм	неизвестно
Карбонаты		
• Арагонит	0,27 мкм, 0,49 мкм	неизвестно
• Доломит	0,27 мкм, 0,3 мкм, 0,34 мкм	Ti^{4+} или Fe-O
• Магнезит, • Сидерит	0,27 мкм, 0,3 мкм, 0,34 мкм	Fe^{2+} / Fe^{3+}
Филлосиликаты		
• Лизардит	0,27 мкм	неизвестно
• Монтморил-лонит	0,35 мкм	неизвестно
	0,26 мкм	Fe^{2+}
• Сапонит	0,3 мкм	Fe
	0,5 мкм, 0,62 мкм	Fe^{2+} / Fe^{3+}

1.5 Общая минералогическая характеристика астероидных классов Толена

Как уже описывалось в 1.3, астероиды разделяют на таксономические классы, отражающие, в первую очередь, различия в минералогии поверхности [36].

Основным классом, который охватывает порядка более 75% астероидов, является C-класс. Объекты данного типа имеют крайне малое альбедо (0,04-0,09), плоские нейтральные спектры отражения. Предполагаемая минералогия – филлосиликаты, углерод, органика. Наиболее подходящие метеоритные аналоги – углистые хондриты (Табл. 5), чей химический состав близок к составу протопланетной туманности Солнечной системы.

Второй по распространенности класс (около 17%) – это S-класс. Объекты данного класса имеют среднее значение альбедо (0,1-0,3), наклон спектра отражения в видимом диапазоне имеет наклон с положительным градиентом, что является следствием наличия широкой УФ-полосы поглощения. Вещество астероидов S-типа содержит оливин, пироксен. Наиболее подходящие аналоги – железо-каменные метеориты, обыкновенные хондриты и ахондриты.

M-класс – третий по численности класс, имеет умеренное визуальное альбедо (0,12-0,25) и высокое радарное, плоский спектр с небольшим наклоном, без заметных полос поглощения. Астероиды данного класса содержат железо, никель, силикаты (энстатит), а соответствующие метеоритные аналоги – железо-каменные и железные астероиды. Крайне вероятно, что эти астероиды являются фрагментами металлических ядер более крупных, которые были разрушены из-за столкновительного характера взаимодействия тел на первых стадиях формирования Солнечной системы. Однако, некоторые представители данного класса имеют значительную силикатную составляющую, проявляющаяся в наличии филлосиликатов [37]. Данное явление можно объяснить как возможный следствие столкновений с

телами примитивной минералогии [38]. Таким образом, анализируя распределение астероидов в Главном поясе, можно сделать вывод о влиянии физико-химических и динамических факторов, действовавших в ранней Солнечной системе, на особенности строения Главного пояса, помимо дробления родительских тел [29], [36], [39].

Таблица 5 – Общая минералогическая характеристика астероидных классов Толена и их метеоритные аналоги [36], дополнена материалами из работы [39]

Тип	Подразумеваемая поверхностная минералогия	Возможные метеоритные аналоги
A	оливин или оливин–металл	оливиновый ахондрит (уреилит, брашинит) или палласит
B	гидросиликаты + углерод/органика/непрозрачные фазы	CI1-CM2; а также предшествующие им семейства материалов
C		
F		
G		
D	Углерод / обогащенные органикой силикаты?	возможно: CI1-CM2; Частицы космической пыли, обогащенные органикой
P		
E	энстатит или другие безжелезистые силикаты	энстатитовые ахондриты (обриты)
M	металл (со следами силикатов) и/или металл + энстатит	железные метеориты (возможно, с силикатными включениями), энстатитовый хондрит
Q	оливин + пироксен + металл	обыкновенные хондриты

Окончание Таблицы 5

R	пироксен + оливин	пироксен-оливиновые ахондриты
S	металл ± оливин ± пироксен	палласиты с аксцессорным пироксеном и/или железо-каменные метеориты с преобладанием оливина и/или уреилиты и CV/CO - хондриты и/или примитивные ахондриты (винонаиты, акапулькоиты, лодраниты) + обыкновенные хондриты
V	пироксен ± полевой шпат	базальтовые ахондриты (говардиты, эвкриты, диогениты)
T	возможно, подобны типам P/D	возможно, подобны типам P/D

1.6. Основные группы метеоритов и их минералогия

Среди метеоритных аналогов в Табл.5 указаны представители всех типов метеоритов: железные (Fe-Ni), железо-каменные и каменные. Рассмотрим подробнее каждый из типов (Табл.6).

1.6.1 Каменные метеориты

Каменные метеориты наиболее часто встречаются (92,8 % падений). Они состоят из так называемого примитивного вещества, не претерпевшего высокотемпературных преобразований и являющегося наиболее близким по составу к протопланетной туманности Солнечной системы [42]. Подавляющее большинство каменных метеоритов – это хондриты. Название они получили из-за сферических или эллиптических образований, преимущественно силикатного состава, имеющих обычно размер не более 1 мм в диаметре [43]. Хондры состоят из силикатных минералов, в основном из оливина ромбического пироксена и стекла плагиоклаз-пироксенового нормативного

состава. Остальная масса метеорита − матрица, которая представляет собой смесь оливина и пироксена с никелистым железом, троилитом и плагиоклазом. Реже встречается хромит и фосфат.

Таблица 6 – Классификация метеоритов [41]

<table>
<tr><td colspan="15">Хондриты</td></tr>
<tr><td>Класс</td><td colspan="8">Углистые</td><td colspan="3">Обыкно-венные</td><td colspan="2">Энста-титовые</td><td>R</td><td>K</td></tr>
<tr><td>Группа</td><td>CI</td><td>CM</td><td>CO</td><td>CR</td><td>CB-</td><td>CH</td><td>CV</td><td>CK</td><td>H</td><td>L</td><td>LL</td><td>EH</td><td>EL</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>Петрологический класс</td><td>1</td><td>1-2</td><td>3-4</td><td>1-2</td><td>3</td><td>3</td><td>3-4</td><td>3-6</td><td colspan="3">3-6</td><td colspan="2">3-6</td><td>3-6</td><td>3</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Подгруппа</td><td rowspan="3"></td><td rowspan="3"></td><td rowspan="3"></td><td rowspan="3"></td><td>CB_a</td><td rowspan="3"></td><td>CV_{OxA}</td><td rowspan="3"></td><td colspan="3" rowspan="3"></td><td colspan="4" rowspan="3"></td></tr>
<tr><td>CB_b</td><td>CV_{OxB}</td></tr>
<tr><td></td><td>CV_R</td></tr>
<tr><td colspan="15">Ахондриты и прочие группы</td></tr>
<tr><td colspan="3">Примитивные ахондриты</td><td colspan="3">Дифференцированные ахондриты</td><td colspan="3">Железные и железо-каменные</td><td colspan="4">Планетные</td></tr>
<tr><td colspan="3">Винонаиты</td><td colspan="3">Ангриты</td><td colspan="3">Мезосидериты</td><td colspan="4" rowspan="3">Группа SNC «Марсианские метеориты»</td></tr>
<tr><td colspan="3">Акапулькоиты</td><td colspan="3">Обриты</td><td colspan="3">Палласиты</td></tr>
<tr><td colspan="3" rowspan="2">Лодраниты</td><td colspan="3">Уреилиты</td><td colspan="3" rowspan="2">Основная группа</td></tr>
<tr><td colspan="3">Брашиниты</td></tr>
<tr><td colspan="3" rowspan="2"></td><td colspan="3" rowspan="2">Группа HED («Метеориты Весты»)</td><td colspan="3">Подгруппа Eagle Station</td><td colspan="4">Шерготтиты</td></tr>
<tr><td colspan="3">Пироксеновые палласиты</td><td colspan="4">Наклиты</td></tr>
<tr><td colspan="3"></td><td colspan="3">Говардиты</td><td colspan="3" rowspan="2">Химические группы железных</td><td colspan="4">Шассиньиты</td></tr>
<tr><td colspan="3"></td><td colspan="3">Эвкриты</td><td colspan="4">Ортопироксениты</td></tr>
<tr><td colspan="3"></td><td colspan="3">Диогениты</td><td colspan="3">IAB</td><td colspan="4" rowspan="3">Группа LUN «Лунные метеориты»</td></tr>
<tr><td colspan="3"></td><td colspan="3" rowspan="14"></td><td colspan="3">IC</td></tr>
<tr><td colspan="3"></td><td colspan="3">IIAB</td></tr>
<tr><td colspan="3"></td><td colspan="3">IIC</td><td colspan="4" rowspan="14"></td></tr>
<tr><td colspan="3"></td><td colspan="3">IID</td></tr>
<tr><td colspan="3"></td><td colspan="3">IIE</td></tr>
<tr><td colspan="3"></td><td colspan="3">IIG</td></tr>
<tr><td colspan="3"></td><td colspan="3">IIIAB</td></tr>
<tr><td colspan="3"></td><td colspan="3">IIICD</td></tr>
<tr><td colspan="3"></td><td colspan="3">IIIE</td></tr>
<tr><td colspan="3"></td><td colspan="3">IIIF</td></tr>
<tr><td colspan="3"></td><td colspan="3">IVA</td></tr>
<tr><td colspan="3"></td><td colspan="3">IVB</td></tr>
</table>

Хондриты разделяют на следующие группы: энстатитовые хондриты (E); обыкновенные хондриты (H, L, LL); углистые хондриты (C). Различные группы хондритов отличаются друг от друга содержанием железа и формой его выделения, а также различной степенью окисления вещества: в углистых хондритах наблюдается максимальное окисление, у энстатитовых – полное восстановление железа.

В 1956 году Г. Виик предложил классификацию углистых хондритов на три группы: C1, C2 и C3 [44], затем в 1980-х Дж.Вассон несколько уточнил разделение, основываясь на постепенном изменении свойств метеоритов: группы CI, CM, CO и CV. Первые две группы совпадают у обоих авторов, а CO и CV вместе образуют класс C3 Виика [45]. В Табл. 7 указан химический состав представителей разных типов хондритовых метеоритов. Поскольку наличие летучих элементов (S, C, O, H) в углистых хондритах усиливает химическое различие между ними и другими классами, то в таблице в скобках представлены данные за вычетом летучих, проявляющие основное химическое свойство хондритов всех групп [46]. В настоящее время клласс углистых хондритов содержит 8 классов (CI, CM, CO, CV, CK, а также CR, CH и CB, имеющие ряд отличительных особенностей строения и состава) [41].

CI1 хондриты, названные по главному представителю группы − метеориту Ivuna, имеют состав, близкий к солнечному. Они являются наиболее гидратированными среди хондритов и практически не содержат других компонентов и не испытали нагревания в родительском теле [42]. CM хондриты также гидратированы, но содержат примерно половину матрицы и половину хондр и тугоплавких включений (CAIs), имеют степень метаморфизма 2. CO и CV хондриты не содержат филлосиликатов, но обагащены CAIs и хондрами. Их степень метаморфизма 3. CK хондриты отличаются высокой степенью окисления и метаморфизма, которые варьирует от 3 до 6 стадии.

Обыкновенные хондриты разделяют на три группы − H, L и LL − по содержанию железа и отношению окисленного железа к металлическому

(Рис. 9 (а)), по среднему диаметру хондр и содержанию Co в камасите. Другой критерий – железная составляющая оливинов (Fa) и пироксенов (Fs) (Рис. 9 (б)). Согласно минералогическим и структурным особенностям, можно заметить, что данные метеориты претерпели термальный метаморфизм в разной степени, от 3 до 6 типа [42].

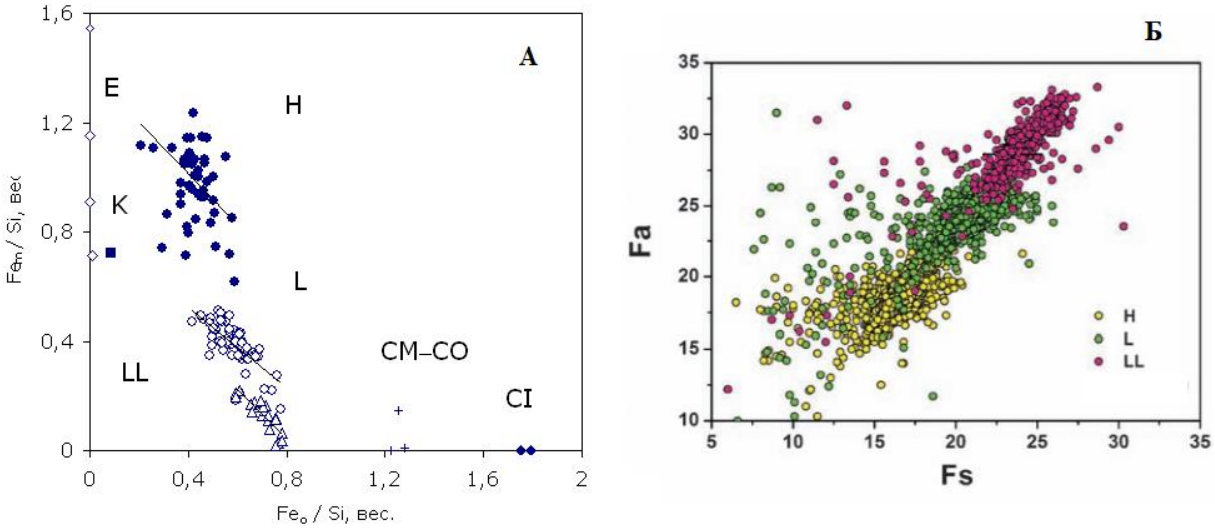

Рисунок 9 – (а) Диаграмма Прайора - соотношение содержаний окисленного и восстановленного Fe - для хондритов [47]; (б) Содержание железа, выраженное в мол.% Fe_2Si0_4 (фаялит = Fa) в оливине и $FeSiO_3$ (ферросилит = Fs) низкокальциевом пироксене равновесных обыкновенных хондритов [48]

Энстатитовые хондриты имеют уникальный минералогический состав, указывающий на экстремально высокие восстановительные условия формирования. Отличаются резким преобладанием энстатита в минеральном составе, обилию сульфидов, а по содержанию железа разделяют на 2 подгруппы (EH и EL). По степени метаморфиза E хондриты подразделяются на 3 – 6 типы, в зависимости от температуры в родительском теле [42].

Группа К-хондритов по высокому содержанию матрицы (70–77 об.%) подобна С хондритам, по высокому содержанию металлической фазы (6–9 об.%) подобна Н хондритам, а по среднему составу оливина и энстатита занимает промежуточное положение между Н и Е хондритами.

Таблица 7 – Представительные (для энстатитовых хондритов) и средние составы хондритов выделенных групп (в %). В скобках курсивом отмечены представительные и средние анализы хондритов, приведенные к 100% после вычета летучих (S, C, H, O) [46]

Класс	*Энстатитовые (E)*		*Обыкновенные (O)*		*Углистые*			
Группа			H	L(LL)	I	M	O	V
%								
Si	16,47	20,48	17,08	18,76	10,40	12,96	15,75	15,46
	(25,15)	*(33,49)*	*(26,40)*	*(30,76)*	*(24,31)*	*(25,33)*	*(25,46)*	*(26,01)*
Ti	0,03	0,04	0,06	0,07	0,04	0,06	0,10	0,09
	(0,05)	*(0,07)*	*(0,09)*	*(0,12)*	*(0,09)*	*(0,12)*	*(0,16)*	*(0,15)*
Al	0,77	1,06	1,22	1,27	0,84	1,17	1,41	1,44
	(1,18)	*(1,73)*	*(1,89)*	*(2,09)*	*(1,96)*	*(2,29)*	*(2,28)*	*(2,42)*
Cr	0,24	0,23	0,29	0,31	0,23	0,29	0,36	0,35
	(0,37)	*(0,38)*	*(0,45)*	*(0,51)*	*(0,54)*	*(0,57)*	*(0,58)*	*(0,59)*
Fe	33,15	22,17	27,81	21,64	18,67	21,56	25,82	24,28
	(50,62)	*(36,26)*	*(43,00)*	*(35,65)*	*(43,64)*	*(42,14)*	*(41,75)*	*(40,85)*
Mn	0,19	0,12	0,26	0,27	0,17	0,16	0,16	0,16
	(0,29)	*(0,20)*	*(0,40)*	*(0,44)*	*(0,40)*	*(0,31)*	*(0,26)*	*(0,27)*
Mg	10,40	13,84	14,10	15,01	9,60	11,72	14,52	14,13
	(15,88)	*(22,63)*	*(21,80)*	*(24,73)*	*(22,44)*	*(22,91)*	*(23,48)*	*(23,78)*
Ca	1,19	0,96	1,26	1,36	1,01	1,32	1,57	1,57
	(1,82)	*(1,57)*	*(1,95)*	*(2,24)*	*(2,36)*	*(2,58)*	*(2,54)*	*(2,64)*
Na	0,75	0,67	0,64	0,70	0,55	0,42	0,46	0,38
	(1,15)	*(1,10)*	*(0,99)*	*(1,15)*	*(1,29)*	*(0,82)*	*(0,74)*	*(0,64)*
K	0,09	0,05	0,08	0,09	0,05	0,06	0,10	0,03
	(0,14)	*(0,08)*	*(0,12)*	*(0,15)*	*(0,12)*	*(0,12)*	*(0,16)*	*(0,05)*
P	0,30	0,15	0,15	0,15	0,14	0,13	0,11	0,13
	(0,46)	*(0,25)*	*(0,23)*	*(0,25)*	*(0,33)*	*(0,25)*	*(0,18)*	*(0,22)*
Ni	1,83	1,29	1,64	1,10	1,03	1,25	1,41	1,33
	(2,79)	*(2,11)*	*(2,54)*	*(1,81)*	*(2,41)*	*(2,44)*	*(2,28)*	*(2,24)*
Co	0,08	0,09	0,09	0,06	0,05	0,06	0,08	0,08
	(0,12)	*(0,15)*	*(0,14)*	*(0,10)*	*(0,12)*	*(0,12)*	*(0,13)*	*(0,13)*
S	5,78	3,19	1,91	2,19	5,92	3,38	2,01	2,14
H	0,13	Сл	Сл	Сл	2,08	1,42	0,09	0,38
C	0,43	0,84	Сл	Сл	3,61	2,30	0,31	1,08
$Fe_0 / Fe_{общ}$	0,70	0,75	0,60	0,29	0,00	0,00	0,09	0,11
Число образцов	1	1	36	68	3	10	5	7

Группа R-хондритов отличается составом, указывающим на высокоокисленное состояние вещества, и характеризуется достаточно высоким содержанием матрицы, высоким содержанием NiO в оливинах и практически полным отсутствием металла [42].

Ахондриты – группа каменных метеоритов, у которых отсутствуют хондры (за редким исключением). Обычно ахондриты отличаются полнокристаллической структурой и имеют большое сходство с лунными базальтами и земными изверженными горными породами [49]. По степени плавления и дальнейшей эволюции разделяют на две группы: примитивные ахондриты и дифференцированные.

Примитивные ахондриты близки по составу к хондритам, но имеют структуры перекристаллизации. К ним относят акапулькоиты, лодраниты и винонаиты. Первые две группы, вероятно, были образованы в едином родительском теле и при едином ударном событии. Эти весьма сходные группы различаются в основном размерами зерен [42]. Винонаиты по минеральному составу занимают промежуточное положение между E- и H-хондритами, но имеют значительные отличия по структуре.

Дифференцированные ахондриты − результат разогрева в родительских телах за счет энергии деления радиогенных изотопов, в результате которого происходило плавление вещества метеоритов с последующей дифференциацией. Среди таких ахондритов можно отдельно отметить говардиты, эвкриты и диогениты, образующие группу HED. Они имеют признаки, указывающие на формирование в едином родительском теле, а именно − астероид (4) Vesta [50]. Минеральный состав представлен в Таблице 10.

1.6.2 Железо-каменные метеориты

Железо-каменные метеориты состоят почти из равных частей силикатного и металлического материала. Металлическая часть состоит из камасита (α-железо) и тэнита (γ-железо).

Данный тип метеоритов подразделяется на два вида, а именно на мезосидериты и палласиты. Минеральный состав представлен в Таблице 10. Силикатная часть мезосидеритов по составу подобна ахондритам группы HED [51].

1.6.3 Железные метеориты

Железные метеориты по структуре подразделяют на три большие группы: гексаэдриты, октаэдриты и атакситы. Химический состав данного типа метеоритов достаточно прост и однообразен, основные минералы – камасит и тэнит в разных пропорциях.

Гексаэдриты состоят из крупных кристаллов камасита, содержание никеля от 4 до 6%. Октаэдриты имеют большее содержания никеля и тэнита. Данные метеориты имеют особое строение, а именно показывают наличие видманштеттеновой структуры: камасит находится в виде пластинок твердого раствора, которые ориентированы параллельно плоскостям октаэдра в тэните. В зависимости от толщины этих пластинок октаэдриты делять на ряд классов: от весьма грубоструктурных до весьма тонкоструктурных (Табл 8). Атакситы содержат более 12% никеля, что приводит к еще большему уменьшению количества камасита [46].

Дж.Вассон предложил классифицировать железные метеориты по содержанию никеля, германия и галлия [52] на 4 группы, обозначенные римскими числами I, II III и IV (Рис. 10). Стоит заметить, что структурная и химическая группы не всегда однозначно соответствуют друг другу (Табл. 9).

Таблица 8 – Структурная классификация железных метеоритов [46]

Структурны тип	Символ	Ширина пластинок камасита, мм
Гексаэдриты	H	> 50
Октаэдриты		
Весьма грубоструктурные	Ogg	> 3,3
Грубоструктурные	Og	1,3-3,3
Среднеструктурные	Om	0,5-1,3
Тонкоструктурные	Of	0,2-0,5
Весьма тонкоструктурные	Off	< 0,2
Плесситовые	Opl	< 0,2
Атакситы	D	

Таблица 9 – Структурная и химическая классификация железных метеоритов [46]. Расшифровки обозначений для структурной классификации даны в Таблице 8. Anom - аномальные, которые по своим характеристикам не соответствуют однозначно какой-либо из групп

	IA	IB	IC	IIA	IIB	IIC	IID	IIE	IIIA	IIIB	IIIC	IIID	IIIE	IIIF	IVA	IVB
H				X												
Ogg	X		X		X									X		
Og	X							X					X	X		
Om	X	X					X	X	X	X				X		
Of		X					X				X			X	X	
Off		X									X	X				
Opl		X				X						X				
D		X										X				X
Anom			X					X								

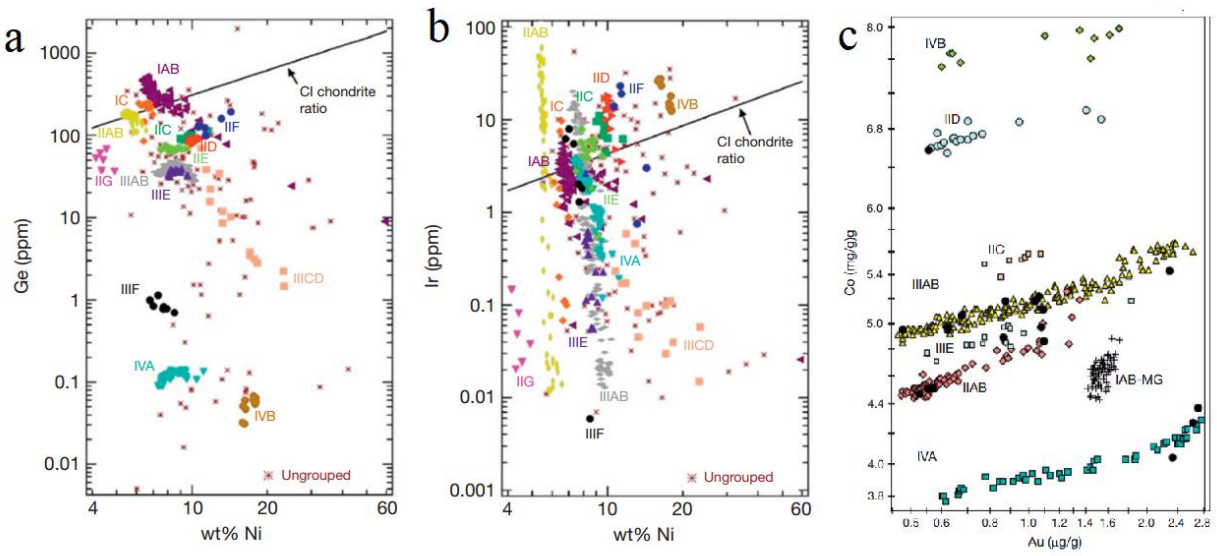

Рисунок 10 – Графики Ge-Ni (a) и Ir-Ni (b), показывающие состав железных метеоритов разных групп [53], (c) - логарифмическая диаграмма Log Co и log Au, показывающая изменения состава железных метеоритов в семи крупных группах [54]

Минеральный состав ахондритов, железо-каменных и железных метеоритов представлен в Таблице 10 [51]. Можно проследить близость некоторых классов метеоритов, так, например, силикатные включения железных метеоритов IAB подобны ахондритам класса винонаитов, что может служить указанием на единое родительское тело.

Таблица 10 – Минеральный состав разных групп метеоритов (ахондриты, железо-каменные, железные) [51]

Группа	Минералогия
Акапулькоиты Лодраниты	Оливин, ортопироксен, клинопироксен, Fe-Ni-металл, ± троилит, ± Na-плагиоклаз
Винонаиты	Оливин, ортопироксен, клинопироксен, Na-плагиоклаз, троилит, Fe-Ni- металл, шрейберзит, добреелит, графит

Группа	Минералогия
IAB, IIE, IIICD металлическая фаза	Fe-Ni- металл, троилит, шрейберзит, ± графит
Силикатные включения IAB-IIICD	Оливин, ортопироксен, клинопироксен, Na-плагиоклаз, троилит, Fe-Ni- металл, шрейберзит, добреелит, графит

Продолжение Таблицы 10

Ангриты	Al-Ti-диопсид, анортит, Ca-оливин, кирштейнит	IIE силикатные включения	Оливин, ортопироксен, клинопироксен, Na-плагиоклаз, троилит, Fe-Ni- металл
Обриты	Энстатит, пижонит, диопсид, форстерит, Si-содержащий камасит, Na-плагиоклаз, Fe, Mn, Mg, Cr, Ti, Na, K-сульфиды		
Брашиниты	Оливин, авгит, ± ортопироксен, Fe-сульфид, ± Na-плагиоклаз	Мезосидериты	Ортопироксен, оливин, хромит, пижонит, Ca-плагиоклаз, фосфаты, диоксид кремния
Уреилиты	Оливин, ортопироксен, пижонит, авгит	Силикаты и оксиды в палласитах	Оливин, хромит, ± пироксен
HED (говардиты, эвкриты, диогениты)	Ортопироксен, оливин, хромит, пижонит, Ca-плагиоклаз, диоксид кремния	Палласиты и мезосидериты металлическая фаза	Fe-Ni- металл, троилит, шрейберзит, ± графит

1.7 Астероиды, сближающиеся с Землёй, и потенциально опасные астероиды.

В данной работе рассматриваются представители не только Главного пояса, но и так называемые астероиды, сближающиеся с Землей, или АСЗ. Они имеют перигельные расстояния, меньшие или равные 1,3 а.е. [55]. К настоящему времени открыто более 20000 таких объектов, однако постоянные номера из них имеют только около 2800 [56]. От прочих астероидов АСЗ кроме малых расстояний их отличают еще и малые размеры: самым крупным из них является 1036 Ганимед (диаметр 38,5 км).

Классификация АСЗ осуществляется по отношению перигелийных и афелийных расстояний орбит астероидов и Земли, и длинам больших полуосей орбиты. Наименования групп принято осуществлять по характерным представителям: 1221 Амур, 1862 Аполлон, 2062 Атон, 163693 Атира [55].

- Тип Амура. Не заходят внутрь орбиты Земли, так как перигельные расстояния представителей данного типа больше, чем афельное расстояние Земли (Рис. 11 (a)).
- Тип Аполлона. Могут проникать внутрь орбиты Земли. Большие полуоси орбит больше, чем у Земли, а перигелийные расстояния меньше, чем афельное расстояние Земли (Рис.11 (b)).
- Тип Атона. Находятся в основном внутри орбиты Земли, лишь в окрестности афелиев выходят за ее пределы. Афельные расстояния таких астероидов больше перигельного расстояния Земли, а большие полуоси меньше, чем у Земли (Рис.11 (c)).
- Тип Атиры. Орбиты полностью лежат внутри орбиты Земли (Рис.11 (d)).

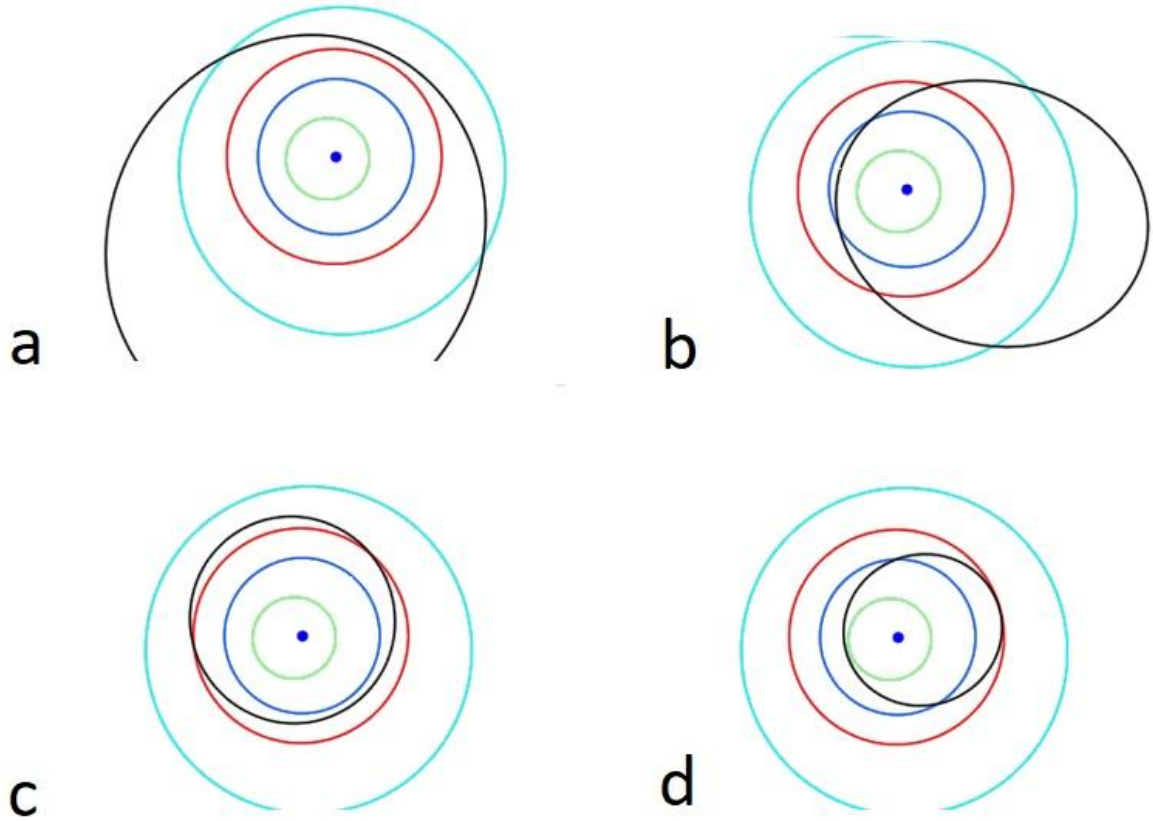

Рисунок 11 – Приблизительная орбита астероидов Амура 1221 (a), Аполлона 1862 (b), Атона 2062 (c) и Атиры 163693 (d) [57]. Орбита Земли обозначена красным цветом, Марса - бирюзовым, астероида - черным

Если астероиды данных групп имеют орбиты, позволяющие им в настоящую эпоху сближаться до расстояний около 0,05 а.е. и меньше с

орбитой Земли (такое значение связано со сложностью определения точного положения астероида), и их абсолютная звездная величина объектов не превышает 22,0, то такие тела причисляют к потенциально опасным астероидам (ПОА). Ограничение по звездной величине соответствует размеру тела около 150 м и больше. Считается, что тела меньшего размера неспособны причинить серьёзную угрозу Земле [55].

Классификация АСЗ, а также число открытых астероидов каждого типа с указанием количества ПОА среди них представлены в Табл.11.

Таблица 11 – Классификация АСЗ и число открытых АСЗ и ПОА (на декабрь 2018). a – афелийное расстояние, q- перигелийное расстояние [56]

Тип	Область движения	Всего открыто	Из них занумеровано	ПОА	Из них занумеровано
Атиры	a < 1,0 a.e. q < 0,983 a.e	18	6	6	2
Атоны	a < 1,0 a.e. q ≥ 0,983 a.e	1433	224	169	91
Аполлоны	a > 1,0 a.e. q ≤ 1,0167 a.e	10562	1409	1654	604
Амуры	a > 1,0 a.e. 1,0167 < q ≤ 1,3 a.e	7265	1153	120	31
Всего		19278	2792	1949	728

В рамках астероидно-кометной безопасности крайне важна информация о спектральном классе, а значит, и предполагаемой минералогии АСЗ. В настоящее время идет активное пополнение баз данных этой информацией. На основании анализа 1040 астероидов, сближающихся с Землёй, Р.Бинзель и Ф.ДеМео составили гистограмму распределения АСЗ и ПОА в зависимости от их таксономического класса (Рис. 12) [40]. Спектральные классы представлены согласно таксономии Бас-Бинзеля, однако она лишь расширяет определенные Толеном группы, разделяя их на более мелкие таксономические единицы. Отметим явное преобладание в данной выборке высокотемпературного класса S и Q, что согласуется с данными по всем астероидам относительно гелиоцентрического расстояния (Рис. 8): смещение высокотемпературных классов к внутренней части Главного пояса астероидов.

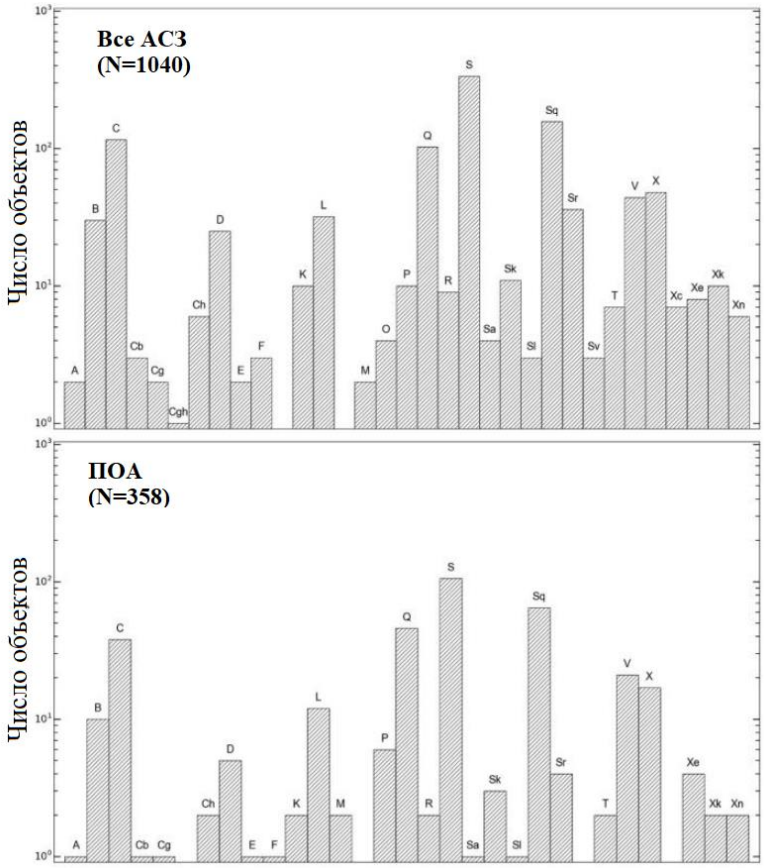

Рисунок 12 – Гистограмма распределения таксономических классов, характерных (сверху) для АСЗ в целом (для 1040 объектов) и (снизу) для ПОА (для 358 объектов) [40]

1.8 Обработка наблюдений и получение спектров отражения

1.8.1 Обсерватории и инструменты, используемые для получения наблюдательных данных.

Бóльшая часть спектрофотометрических данных была получена с помощью 2-м телескопа с призменным ПЗС-спектрометре (WI CCD 1240x1150) Терскольского филиала ИНАСАН с разрешающей силой R≈100 в диапазоне 0,35-0,90 мкм. Наблюдения получены как лично автором, так и коллегами из ИНАСАН в течение 2016-2019 гг.

Обсерватория «Пик Терскол» находится на высоте 3150 м н.у.м. на южном плече г. Эльбрус (Кабардино-Балкария, Эльбрусский район, Приэльбрусье, Россия). Используемый инструмент, 2-м Ричи - Кретьен – Куде телескоп производства Carl Zeiss Jena GmbH, является основным для обсерватории. Фокусное расстояние главного гиперболического зеркала 5,6 м. Эквивалентные фокусные расстояния Ричи - Кретьен и Куде системы 16 м и 72 м, соответственно. Соответствующие поля зрения являются 108 и 5 угловых минут [58].

Фотометрические наблюдения, в основном используемые в Главе 3, были получены на обсерваториях «Крымская лаборатория ГАИШ МГУ имени Э. А. Дибая» и «Санглок», Таджикистан.

Крымская обсерватория ГАИШ МГУ находится в пос. Научный, Крым, на высоте 600м. Используемый инструмент - Цейсс-600 (D = 600 мм, F = 7200 мм) [59].

Обсерватория Санглок — астрономическая обсерватория, находящаяся на одноимённой горе в 90 км от Душанбе на высоте 2300 м н.у.м. Используемый инструмент - 1-м RCC (Ричи-Кретьена-Куде) (D=1 м, F=13м) [60].

1.8.2 Программное обеспечение

Запись выходных спектрофотометрических данных осуществлялась в формате .fts. Обработка данных осуществлялась с использованием программного обеспечения DECH (пакеты DECH20T и DECH95) [61]. DECH позволяет обрабатывать спектральные данные любого типа и является достаточно простым для использования. В дальнейшем производилась реструктуризация данных в форматы файлов .100 и .data. Кроме данного программного обеспечения использовался Origin 2015 – программное обеспечение для обработки данных и научной графики [62].

Для обработки фотометрических данных использовалось программное обеспечение для обработки астрономических изображений MaxIM DL. В этой программе применяется метод апертурной фотометрии [63].

1.8.3 Краткий порядок работы

В первую очередь для каждого астероида собиралась информация о его орбите и принадлежности к определенной группе астероидов, сближающихся с Землей, а также дополнительные данные, такие как альбедо, период вращения и обращения, перигелийное расстояние и фазовый угол на момент наблюдений. Данная информация необходима для дополнительного косвенного подтверждения правильности определения таксономического класса.

Перед началом работы с данными была проведена поправка на калибровочные данные, а также, опираясь на стандартные звезды, выбранные для каждого астероида, посчитаны атмосферные коэффициенты. Калибровка шкалы длин волн осуществлялась по бальмеровской серии спектральных линий водорода в спектрах излучения ярких звезд ранних спектральных классов. При наблюдениях такой звездой преимущественно являлась α Peg (класса B9III).

С помощью программного пакета DECH осуществлялась экстракция спектров и их привязка к длинам волн. СКЯ вычислялся по Формуле 8. Полученные спектры нормировались на значение на длине волны 0,55 мкм (Формула (9)). С помощью фильтров Origin для подавления остаточного шума проводилась частотная фильтрация и сглаживание спектров отражения.

Имея в распоряжении нормированные сглаженные спектры отражения астероидов, можно качественно судить об отношении их к тому или иному таксономическому классу. Результаты расчетов представлены в разделах далее, приведены лучшие полученные спектры отражения с отношением сигнал/шум не менее 4.

Как и при спектральных измерениях с фотометрическими данными проводились стандартные процедуры обработки с помощью пакета MaxIM DL, а затем применялся тот же алгоритм, описанный в начале главы, с применением в виде стандартных звезд – звезд-аналогов Солнца. Отражательная способность астероидов, состоящая из 4-5 точек в каждом из используемых фильтров, соединена отрезками и нормирована на значение в полосе V.

1.8.4 Оценка спектрального типа

Для сравнения, а также подтверждения полученной оценки спектрального класса астероида использовались данные из базы SMASS [28].

Спектроскопическое исследование астероидов Главного пояса (SMASS) было начато в 1990 году с целью получения спектров в области видимых длин волн для значительного числа малых (D <20 км) астероидов главного пояса. Вторая цель – сделать возможным измерение околоземных астероидов. Наблюдения в основном выполнялись с помощью 2,4-метрового телескопа Хилтнера, расположенного в обсерватории Мичиган-Дартмутского Массачусетского технологического института (MDM) на юго-западном гребне Китт-Пик в Аризоне. Наблюдения выполнены с использованием спектрографа низкого разрешения, чтобы охватить диапазон длин волн от 4000 до 10000 Å

за одну экспозицию с дисперсией ~ 10 Å / пиксель. Эта методика позволяет отображать весь спектр за одну экспозицию и имеет много преимуществ по сравнению с объединением различных спектральных областей из отдельных изображений. В частности, эффектами, возникающими из-за поворота света астероида, можно пренебречь.

При создании базы SMASS прилагались значительные усилия для обеспечения правильной калибровки спектров астероидов. Калибровка длины волны осуществлялась по изображениям линий Hg, Ar и Xe, полученных от ламп в спектрографе. Наблюдались также солнечно-аналоговые звезды (обычно 16 Cyg B и Hya 64) для калибровки спектра относительного отражения астероида и звезд калибровки потока для мониторинга изменений в атмосфере. Астероиды наблюдались вплоть до V=19, время экспозиции - в диапазоне от 15 до 30 минут. Более длительные экспозиции не используются, чтобы минимизировать эффекты воздействия космических лучей. Когда это возможно, каждый астероид проверялся, по крайней мере, дважды, для согласованности. Для сравнения и мониторинга возможных систематических ошибок также наблюдались более яркие астероиды с известными спектральными характеристиками. Скорость движения астероида является контрольным параметром: идентичность астероида проверяется с помощью нахождения вектора его движения относительно ближайших звезд. Для слабых объектов спектры оказываются зашумленными как на крайнем синем, так и на ближнем инфракрасном концах из-за низкой чувствительности ПЗС в этих спектральных диапазонах.

Обработка данных и получение спектров отражения проводилась с помощью программного пакета IRAF. После деления на спектр звезды солнечного типа, которая наблюдалась в ту же ночь, и нормировки к единице на 0,55 мкм, были получены относительные спектры отражения для каждого астероида.

В качестве дополнительного косвенного подтверждения типа некоторых астероидов проводилась качественная оценка соответствия со схожими по

спектру метеоритами. Спектры отражения метеоритов взяты из базы данных университета Виннипег (Winnipeg Planetary spectrophotometer facility (PSF), или HOSERLab) [31].

1.9 Результаты и их обсуждение

В данном разделе приведены результаты качественной интерпретации рассчитанных спектров отражения астероидов. Наблюдательные данные были получены на терскольском филиале ИНАСАН обсерватории «Пик Терскол» автором вместе с коллегами. Представлены лучшие полученные спектры отражения с отношением сигнал/шум не менее 4, а также дано определение таксономического класса. На графике с полученными нами спектрами отражения ниже приведен спектр отражения из базы SMASS [28].

В случае, если удалось подобрать похожий спектр отражения метеорита, то на одном графике представлялись спектр отражения рассматриваемого астероида и метеорита. Кроме того, даётся краткая справка о характеристике и составе подобранных метеоритов из публикаций.

При работе над данным разделом диссертации использованы следующие публикации автора, в которых, согласно «Положению о присуждении ученых степеней в МГУ», отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

- ***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. [64]
- ***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. [65]

1.9.1 Астероиды Главного Пояса

1.9.1.1 11 Парфенопа

Период обращения 11 Парфенопы составляет 1402,9 сут., а период вращения – 13,72 ч. Геометрическое альбедо составляет 0,1803, диаметр – 153,3 км [2], [56].

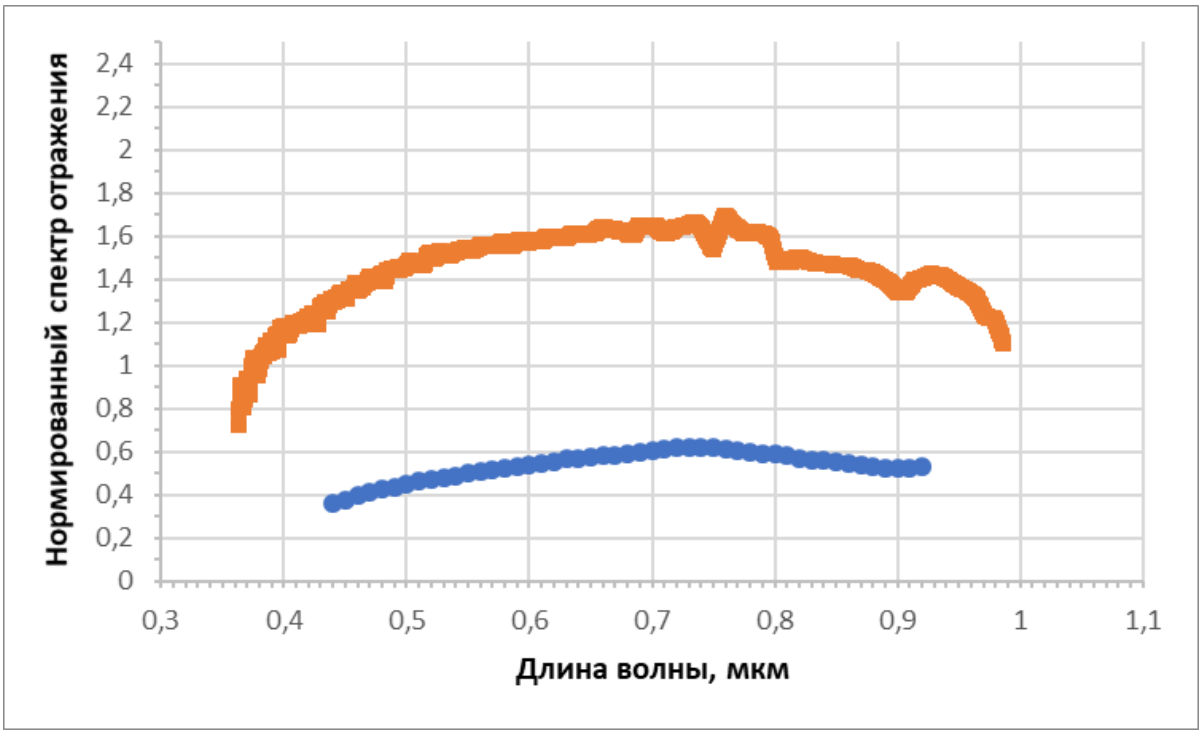

Рисунок 13 – Нормированный спектр отражения астероида 11 Парфенопа (2016.09.19 UTC 23:20) – верхний, нормированный спектр отражения из базы SMASS – нижний

Положительный градиент спектра отражения явственно указывает на высокотемпературную минералогию, что подтверждают и другие источники [14], [66], определяя астероид в класс S (Рис. 13), однако полученные нами данные скорее показывают A-Q-класс: на это указывает значительная ширина полосы поглощения у 1 мкм.

В качестве дополнительного подтверждения высокотемпературной минералогии возможно привести похожие спектры отражения метеоритов из базы университета Виннипег, а именно уреилитов Allan Hills 82130 и Grosvenor Mountain 95575 (Рис.14) [67]. Дифференцированные ахондриты

класса уреилиты состоят в основном из оливина и пижонита (пироксен). Их вещество претерпело частичное плавление и последующую дифференциацию вещества [42]. Уреилиты могут являться возможным метеоритным аналогом астероида класса A [36].

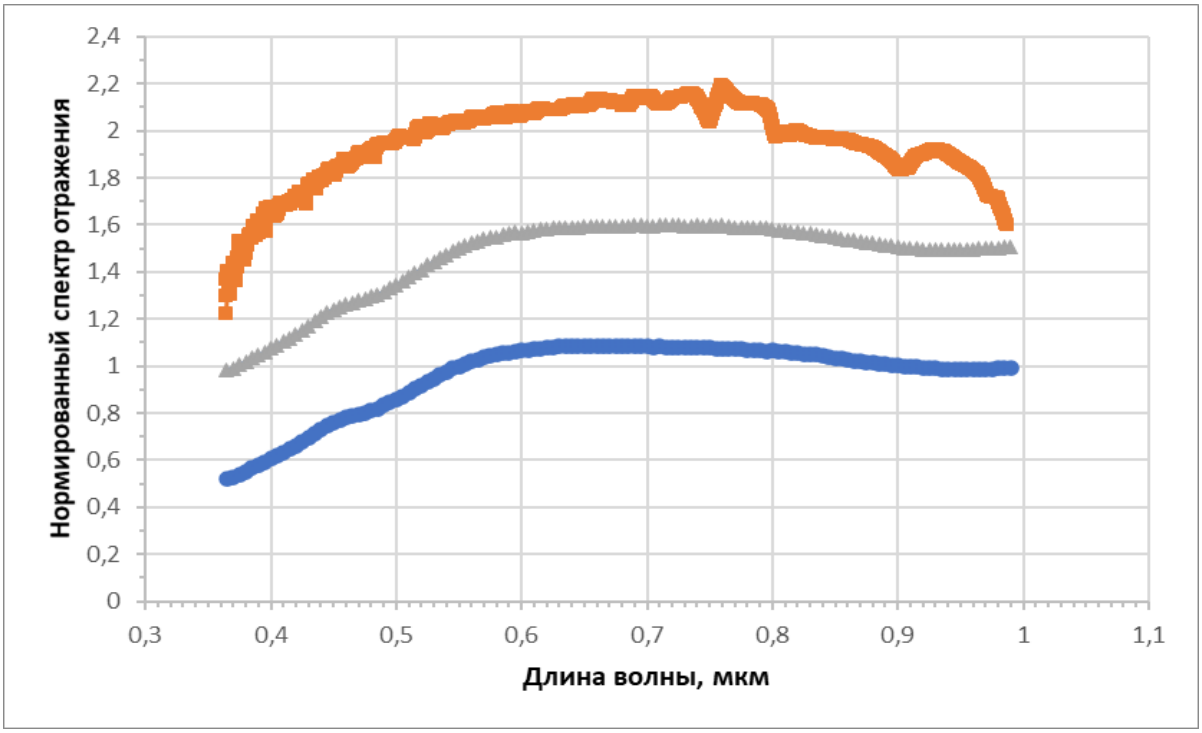

Рисунок 14 – Нормированный спектр отражения астероида 11 Парфенопа (2016.09.19 UTC 23:20) – верхний, нормированный спектр отражения метеорита Allan Hills 82130 (уреилит) из базы университета Виннипег – средний, нормированный спектр отражения метеорита Grosvenor Mountain 95575 (уреилит) из базы университета Виннипег – нижний

1.9.1.2 225 Генриетта

Астероид 225 является объектом внешней части Главного пояса. Геометрическое альбедо составляет 0,04-0,06 (данные из разных источников), диаметр – 120,49 км [2], [56]. Период обращения составляет 2282,12 сут, а период вращения астероида – 7,36 ч [68].

К сожалению, удалось наблюдать данный астероид только однажды, однако во время крайне благоприятных погодных условий, что позволяет относиться к полученному результату положительно (Прил. А).

Рисунок 15 – Нормированный спектр отражения астероида 225 Генриетта (2019.05.17 UTC 23:51)

Малое альбедо и постепенный рост спектра отражения указывают на низкотемпературный класс (Рис. 15), что подтверждается и другими авторами (Рис. 16(а)) [69], определяющими более редкий подкласс низкотемп ературных астероидов F. В работе [70] отмечается отрицательный градиент спектра отражения в длинноволновой области и даётся оценка как B-класса, характеризующегося также низкотемпературной минералогией (Рис.16 (б)).

В работе Виллас и др. [71] отмечается крайне слабый положительный градиент спектра. Однако стоит отметить полосу поглощения у 0,9 мкм, свидетельствующая о наличии пироксенов, а также полосу у 0,55 мкм. С другой стороны, появление полосы 0,55-0,6 мкм может свидетельствовать также о наличии гидросиликатов (по-видимому, вследствие переноса заряда $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$). Работа [71] также отмечает присутствие данной особенности и тоже связывает с переносом заряда в железе. Поэтому стоит говорить о возможном смешанном составе.

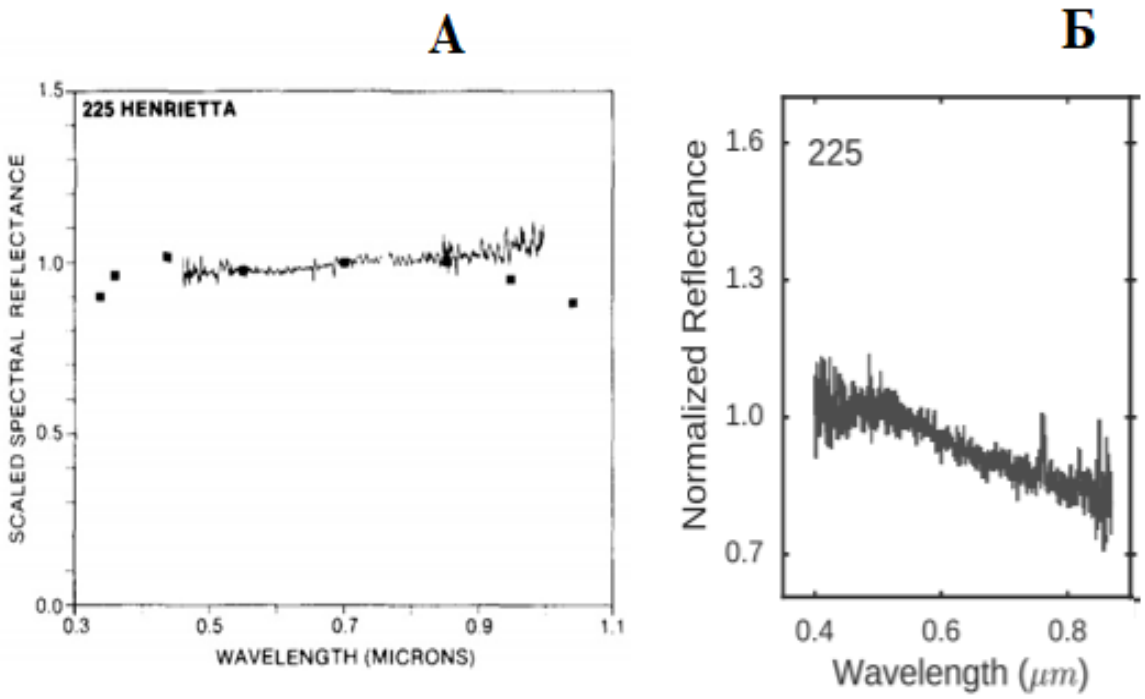

Рисунок 16 – (а) Нормированный спектр отражения 225 Генриетта по данным статьи [69] (б) Нормированный спектр отражения 225 Генриетта по данным статьи [70]

Кроме вышеуказанных источников можно привести схожий спектр отражения метеорита Alais (хондрит CI1) (Рис. 17) [67]. Хондриты CI1 обычно содержат большое количество воды (до 22%), что способствует наличию водосодержащих минералов – филлосиликатов, магнетита и оливина, присутствующих в матрице, и возможному отсутствию хондр [72]. Данный хондрит испытал высокую степень водного изменения [67].

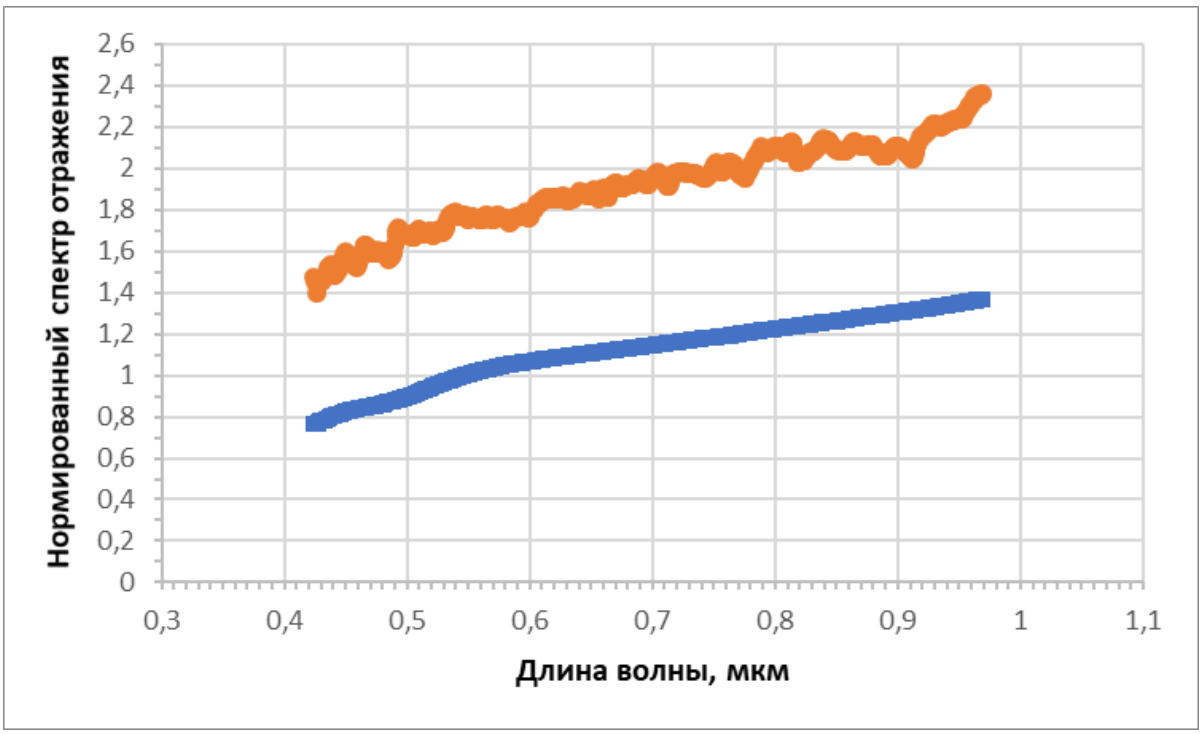

Рисунок 17 – Нормированный спектр отражения 225 Генриетта (2019.05.17 UTC 23:51)– верхний, нормированный спектр отражения метеорита Alais (хондрит CI1) из базы университета Виннипег – нижний

1.9.1.3 307 Ника

Астероид 307 Ника имеет период обращения в 1809,72 сут., а период вращения – в 11,857 ч. Геометрическое альбедо данного астероида составляет 0,043, диаметр - 61,3 км [2], [56].

Практически горизонтальный спектр отражения соответствует низкотемпературной минералогии, а именно классу C (Рис. 18). Данная оценка подтверждается и другими авторами [73] (Рис. 19).

Как дополнительное подтверждение указанного класса может служит соответствие спектру отражения метеорита класса CI1 Orgueil (Рис. 20) [67], взятого из базы университета Виннипег.

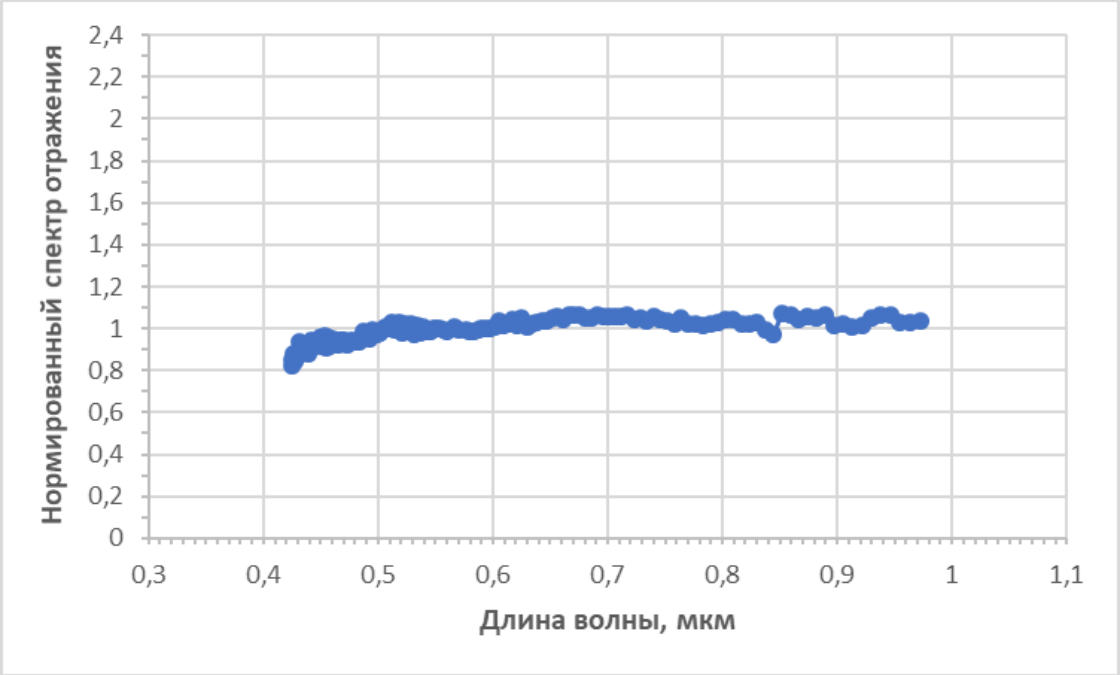

Рисунок 18 – Нормированный спектр отражения астероида 307 Ника (2018.11.04 UTC 20:42)

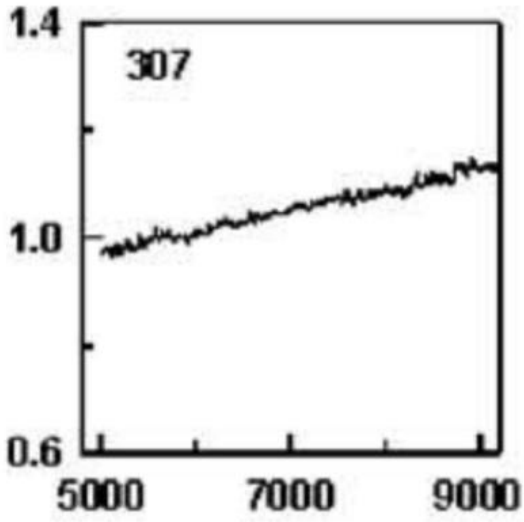

Рисунок 19 – Нормированный спектр отражения астероида 307 Ника [73]

CI тип примечателен тем, что характеризуется составом, наиболее близким к солнечному, а также наибольшим количеством гидратированных силикатов по сравнению с другими метеоритами [42]. Петрографическое исследование углистого хондрита Orgueil CI1 показывает, что его матрица состоит из Fe-Mg-серпентина и сапонита. Вещество данного метеорита

подверглось значительному изменению под влиянием воды на родительском теле [74].

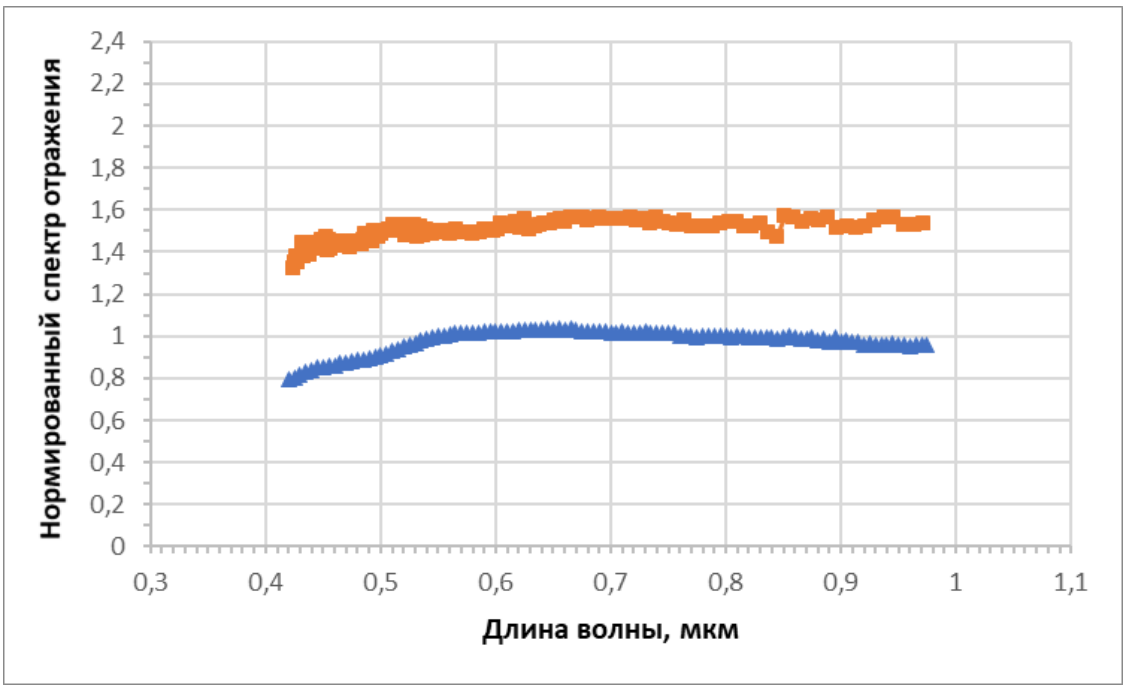

Рисунок 20 – Нормированный спектр отражения астероида 307 Ника (2018.11.04 UTC 20:42) – верхний, нормированный спектр отражения метеорита Orgueil (хондрит CI1) из базы университета Виннипег – нижний

1.9.1.4 345 Терцидина (1892 O)

Астероид 345 Терцидина наблюдался в сентябре 2016 года в течение одной ночи, удалось получить всего 5 спектров (Прил. А). Геометрическое альбедо данного астероида − 0,065, а его диаметр - 94,12 км. Период обращения составляет 1294,95 сут, период вращения астероида – 12,37 ч. [2], [56].

Спектр отражения астероида имеет небольшой положительный градиент (Рис. 21), что позволяет причислить данный астероид к таксономическому классу C, что совпадает с оценкой, сделанной другими исследователями [75], [76]. Подтверждающим признаком принадлежности к данному классу является слабая полоса поглощения в диапазоне длин волн 0,43-0,47 мкм (в гидратированных силикатах).

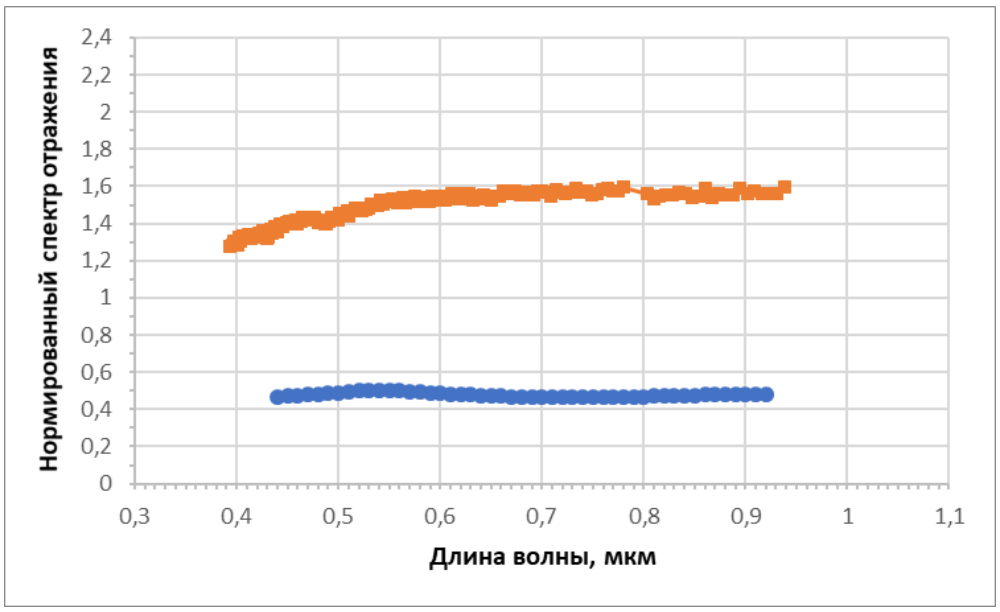

Рисунок 21 – Нормированный спектр отражения астероида 345 Терцидина (1892 O) (2016.09.26 UTC 00:20) – верхний, нормированный спектр отражения из базы SMASS – нижний

Дополнительным подтверждением может служить сходство со спектром отражения метеорита Orgueil класса CI1 [67], (Рис. 22), чье вещество не подвергалось значительному нагреву, а изменялось под действием воды [74].

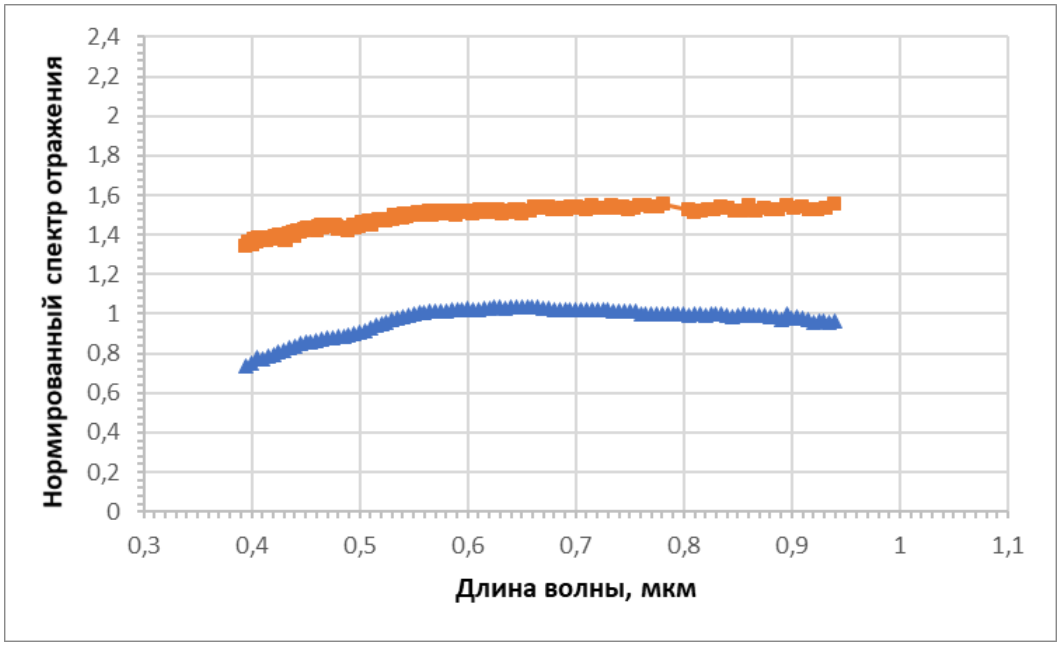

Рисунок 22 – Нормированный спектр отражения астероида 345 Терцидина (1892 O) (2016.09.26 UTC 00:20)– верхний, нормированный спектр отражения метеорита Orgueil (хондрит CI1) из базы университета Виннипег – нижний

1.9.1.5 381 Мирра (1894 AS)

381 Мирра является астероидом внешней части Главного Пояса. Период обращения данного астероида составляет 2114,6 сут, период вращения астероида – 6,57 ч. Геометрическое альбедо имеет значение 0,06, диаметр – 120,58 км [2], [56].

Астероид наблюдался одну ночь, 2016.05.29, всего 1 спектр (Прил. А).

Спектр отражения астероида имеет слабый положительный градиент, что соответствует низкотемпературному классу C (Рис. 23), который также подтверждает работа [75], [76].

Также заметим сходство спектра отражения астероида и спектра отражения метеорита группы CM2 – Murchison (Рис. 23) [67]. Данный тип метеорита отличается мелкими хондрами, тугоплавкими включениями, обильной мелкозернистой матрицей (~ 70 об.%), содержащей гидратированные минералы (филлосиликаты) [67], [77], [78].

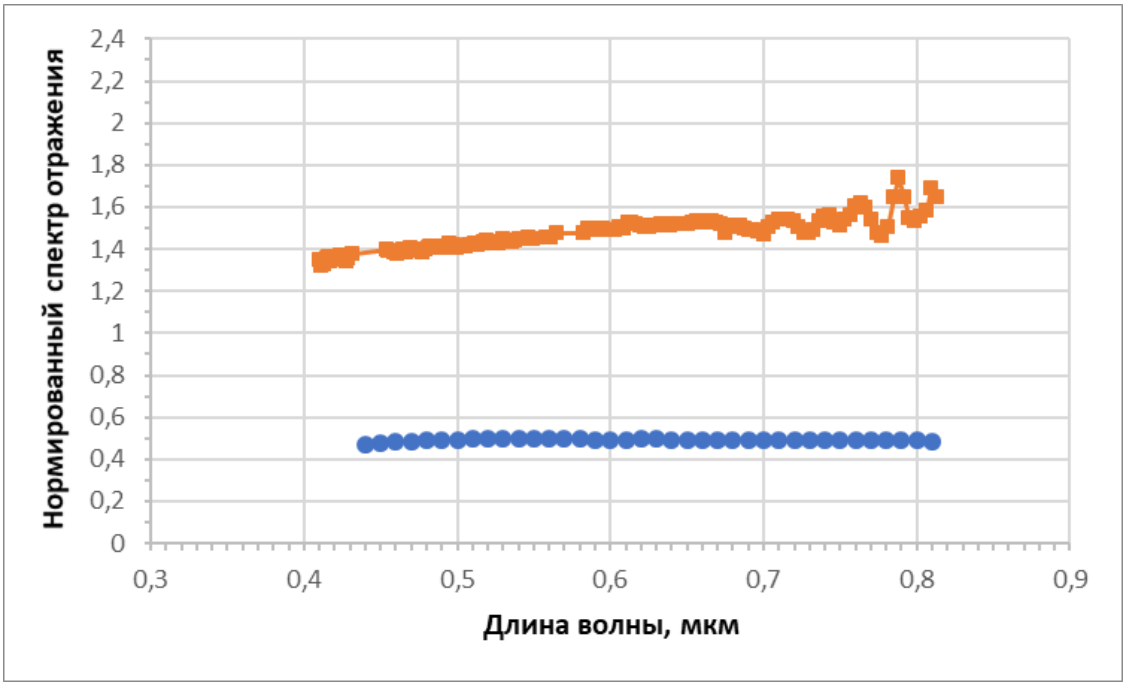

Рисунок 23 – Нормированный спектр отражения астероида 381 Мирра (1894 AS) (2016.05.28 UTC 23:32)– верхний, нормированный спектр отражения из базы SMASS – нижний

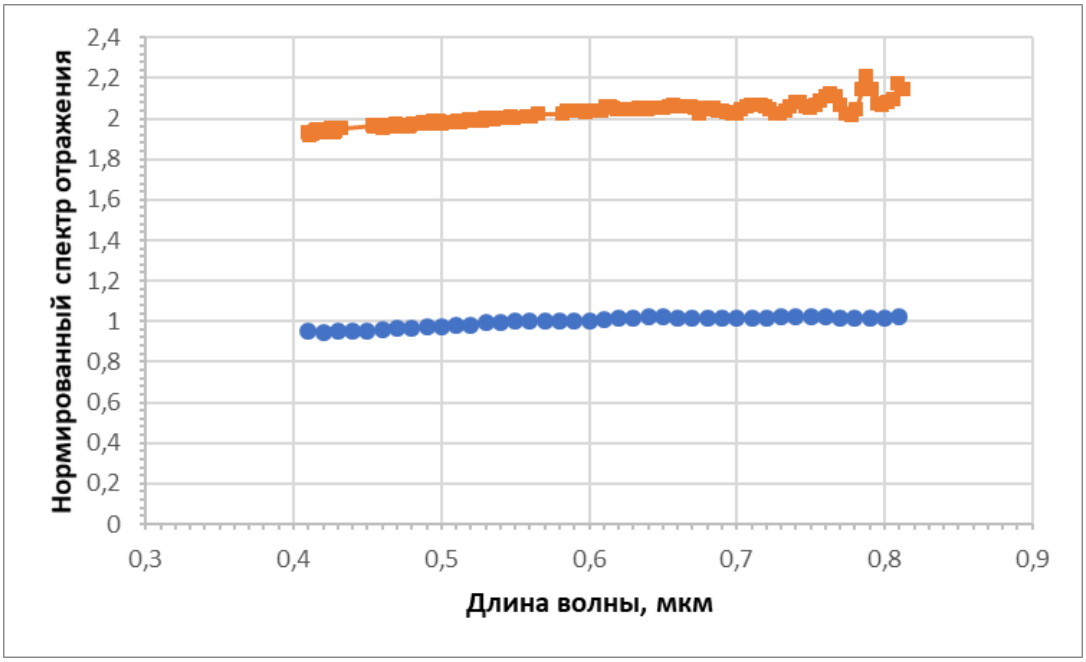

Рисунок 24 – Нормированный спектр отражения астероида 381 Мирра (1894 AS) (2016.05.29 UTC 23:32) – верхний, нормированный спектр отражения метеорита Murchison (хондрит CM2) из базы университета Виннипег - нижний

1.9.1.6 482 Петрина (1902 HT)

Астероид 482 Петрина наблюдался в течение двух ночей в июне 2017 года, всего было получено 4 спектра (Прил. А). Период обращения данного астероида составляет 1895,25 сут, а период вращения астероида – 11,79 ч. Диаметр составляет 46,57 км, геометрическое альбедо − 0,24 [2], [56].

Спектр отражения имеет хорошо выраженный рост в длинноволновой области, что указывает на высокотемпературную минералогию (Рис. 25). Согласно базе данных малых тел [56] астероид относится к классу S по Толену (на основании двух цветовых индексов), что согласуется с нашей оценкой. Об этом косвенно говорит высокое альбедо.

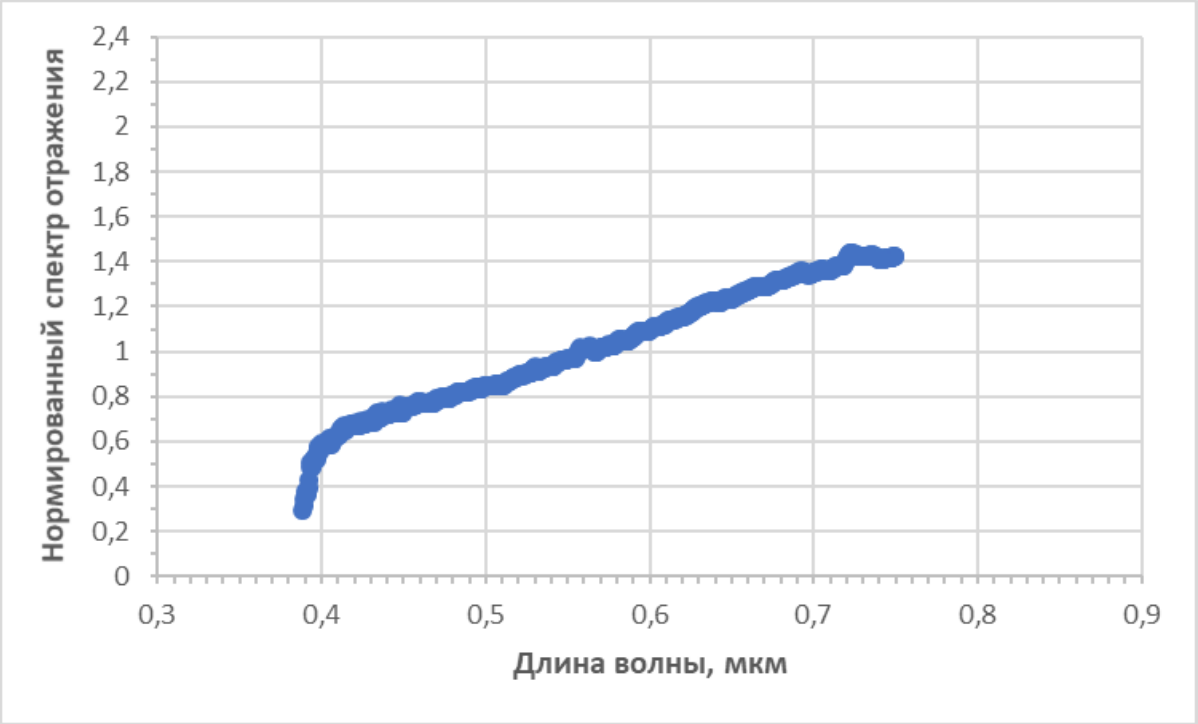

Рисунок 25 – Нормированный спектр отражения астероида 482 Петрина (1902 HT) (2017.06.24 UTC 19:57)

1.9.1.7 488 Креуса (1902 JG)

Период обращения 488 Креусы составляет 2058,42 сут., а вот данные о периоде вращения вокруг собственной оси противоречивы. Результат, полученный во время наблюдений в 1979-1981 гг, – более 28 часов [79], работа от 2000 года [80] дает оценку в 6 часов. Обсуждение такой разницы выходит за рамки данной работы, однако возможно предположить, что астероид пережил столкновение с другим объектом. Геометрическое альбедо составляет 0,047, диаметр – 168,117 км [2], [56].

Астероид наблюдался одну ночь, всего 3 спектра (Прил. А).

Спектр отражения имеет небольшой положительный градиент (Рис. 26), что соответствует низкотемпературной минералогии класса С, что согласуется с результатами других авторов, а также дополнительными наблюдения в более широком диапазоне [43], [81]. Так в работе [43] отмечается наличие достаточно широкой полосы поглощения с центром у 0,7 мкм (Рис. 27),

характерной для гидратированных соединений (филлосиликаты), а также наличие данных соединений подтверждается наличием полосы у 3 мкм [81].

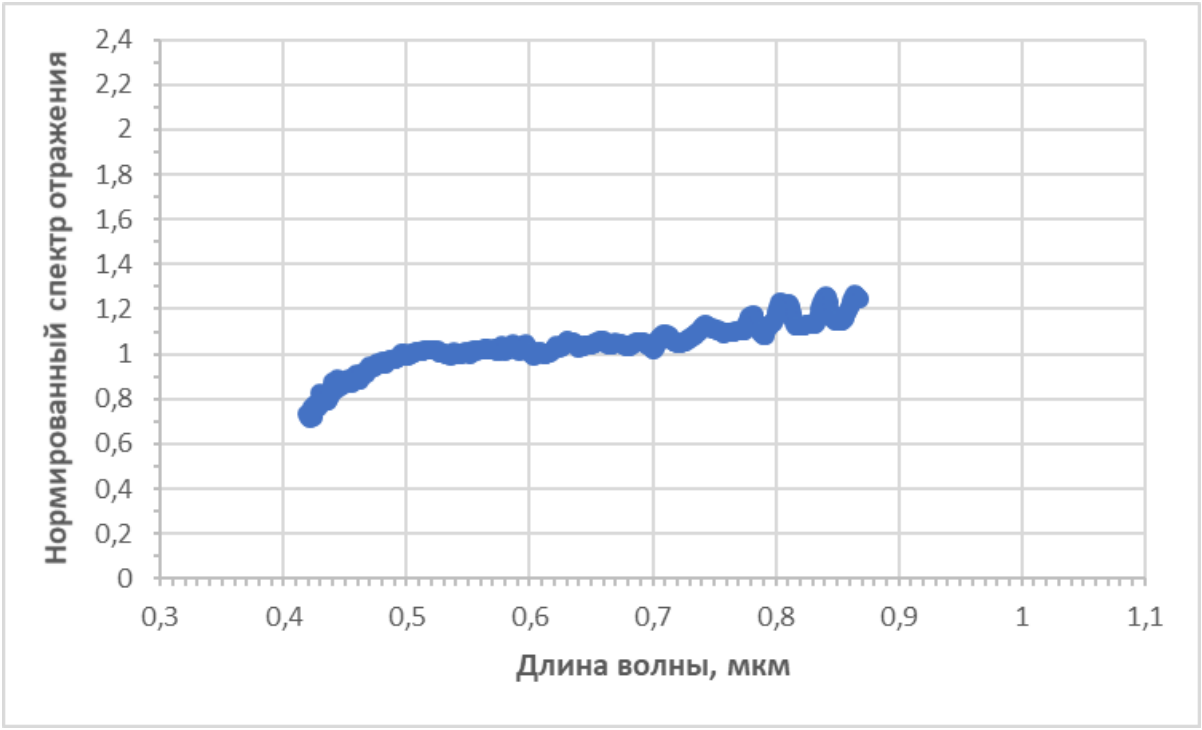

Рисунок 26 – Нормированный спектр отражения астероида 488 Креуса (2019.05.22 UTC 20:17)

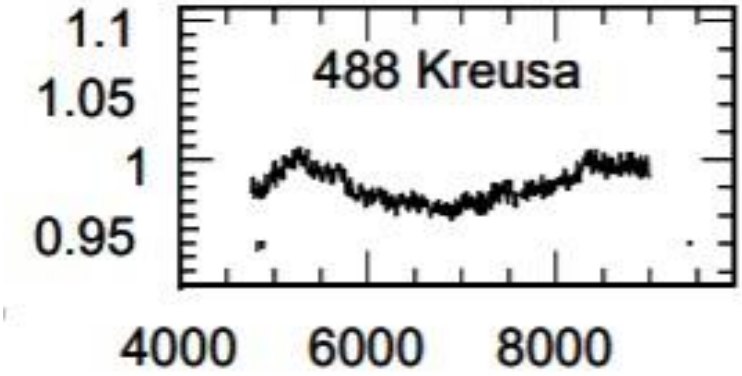

Рисунок 27 – Нормированный спектр отражения астероида 488 Креуса (1902 JG) [43]

В качестве метеорита-аналога можно привести Mighei (CM2) (Рис. 28). Данный метеорит содержит внеземные органические соединения (общее содержание C = 2,6%) и внеземную воду, которая связана с филлосиликатами железа-магния (общее содержание H_2O = 12%) [82].

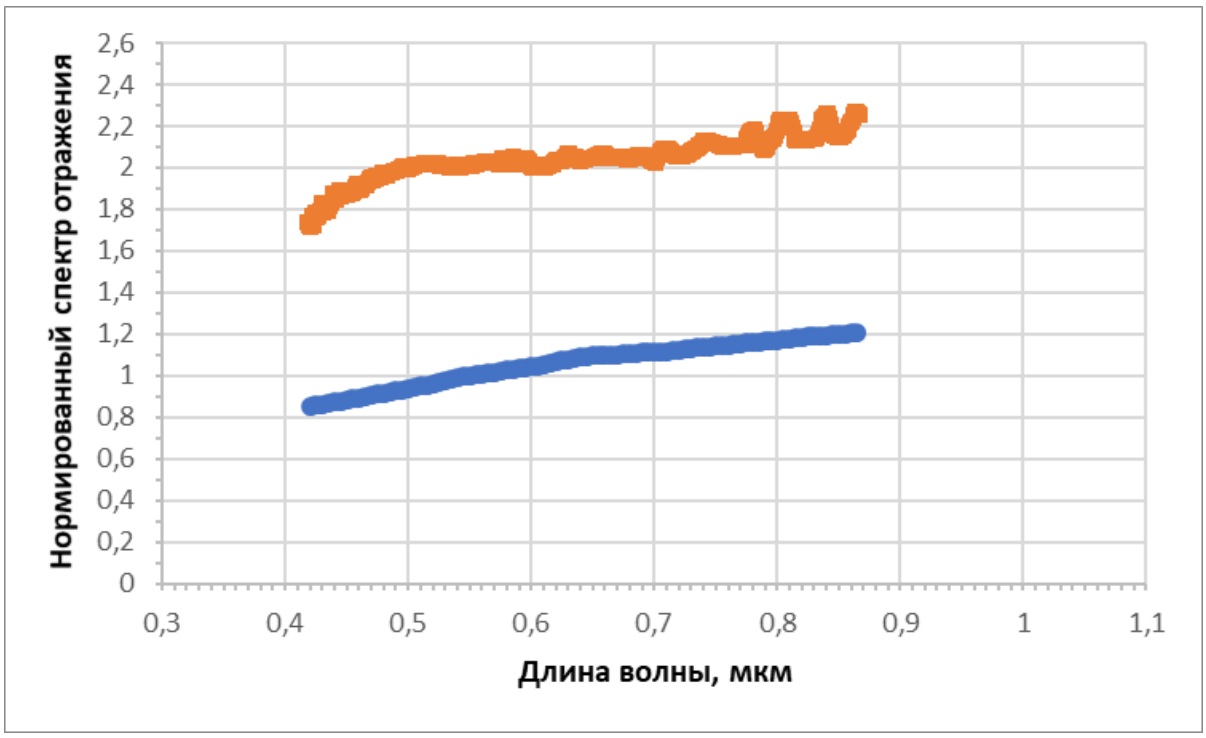

Рисунок 28 – Нормированный спектр отражения астероида 488 Креуса (2019.05.22 UTC 20:17) – верхний, нормированный спектр отражения метеорита Mighei (хондрит CM2) из базы университета Виннипег - нижний

1.9.1.8 712 Боливиана (1911 LO)

Период обращения астероида 712 Боливиана составляет 1509,48 сут, а период вращения астероида – 11,732 ч, геометрическое альбедо − 0,051, диаметр – 127,57 км [2], [56].

Астероид наблюдался две ночи, всего 3 спектра (Прил. А).

Низкое геометрическое альбедо сигнализирует о низкотемпературной минералогии, форма спектра отражения в диапазоне 0,55-0,67 мкм меняется от выпуклой до вогнутой (Рис. 29). Причиной появления этой значительной полосы поглощения (по-видимому, из-за переноса заряда $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$) может являться наличие гидросиликатов. Это утверждение подтверждается и другими авторами [43] (Рис. 30). Однако положительный градиент спектра отражения может указывать на неоднородность состава.

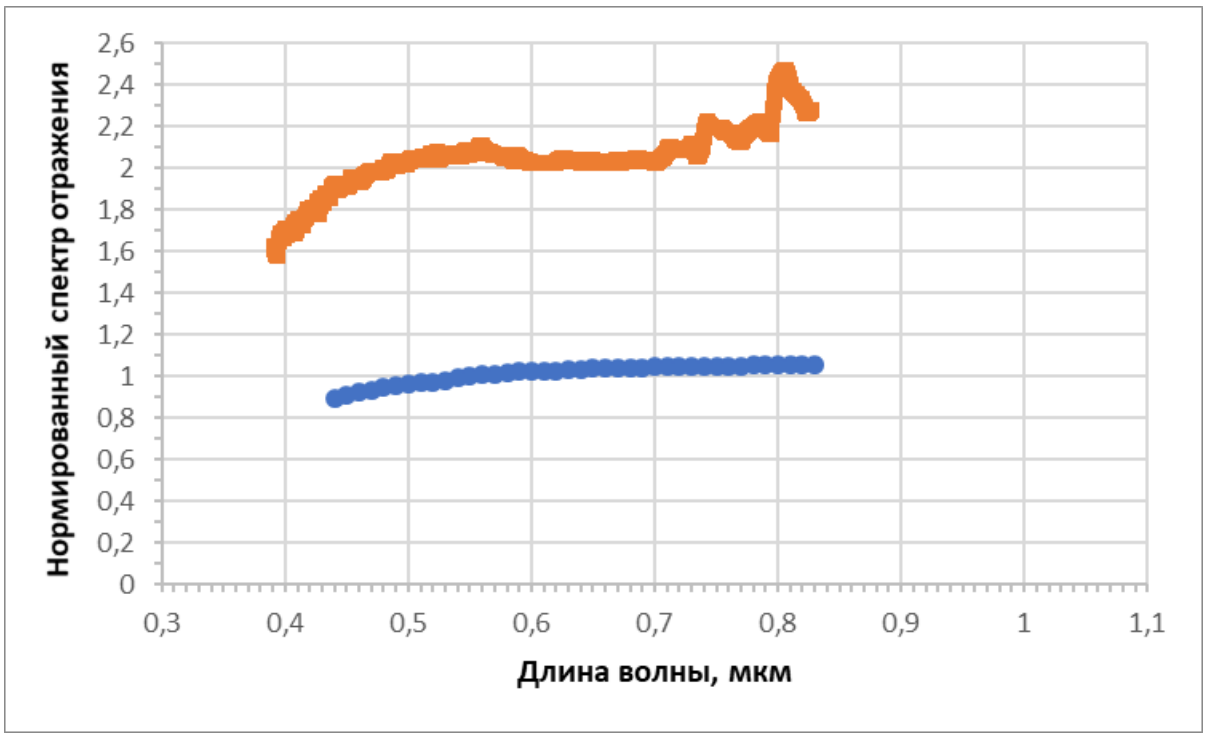

Рисунок 29 − Нормированный спектр отражения астероида 712 Боливиана (1911 LO) (2017.06.27 UTC 21:25) − верхний, нормированный спектр отражения из базы SMASS – нижний

Согласно [56] по классификации Толена астероид принадлежит классу C, по работе [14] согласно классификации SMASS II – классу X.

Сравнивая спектр отражения данного астероида и спектры отражения хондритов, представленных в базе университета Виннипег, можно отметить сходство со спектром хондрита Lewis Cliff (85311) (Рис. 31). Lewis Cliff (LEW) 85311 классифицируется как CM-хондрит, однако он обладает некоторыми необычными свойствами. Этот метеорит состоит из хондр, окружённых каймой, и тугоплавких включений, которые расположены в мелкозернистой богатой филлосиликатами матрице.

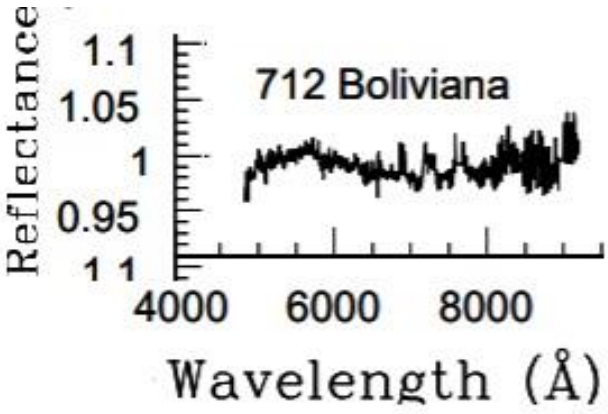

Рисунок 30 – Нормированный спектр отражения астероида 712 Боливиана (1911 LO (1892 O) [43]

LEW 85311 обогащен тугоплавкими элементами, в настоящее время определяют как CM - несгруппированный. Отличительное свойства этого метеорита - наличие обильных тугоплавких включений и объектов микрометрового размера, состоящих из игольчатого кальцита [83].

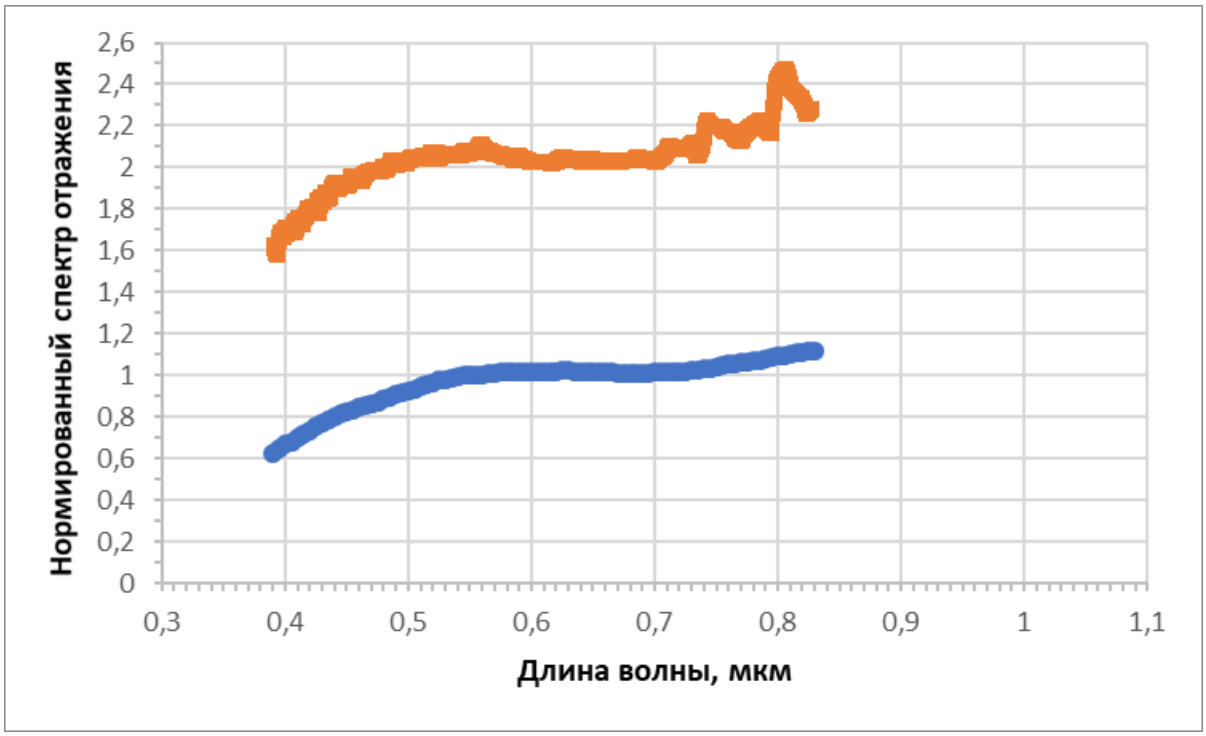

Рисунок 31 – Нормированный спектр отражения астероида 712 Боливиана (1911 LO) (2017.06.27 UTC 21:25)– верхний, нормированный спектр отражения метеорита Lewis Cliff 85311 (хондрит CM2 несгруппированный) из базы RELAB – нижний

1.9.1.9 787 Москва (1914 UQ)

Данный астероид наблюдался в течение двух ночей, получено 4 спектра отражения. Геометрическое альбедо составляет 0,19, диаметр - 27,9 км. Период обращения составляет 1477,74 сут, а период вращения астероида – 6,056 ч [2], [56].

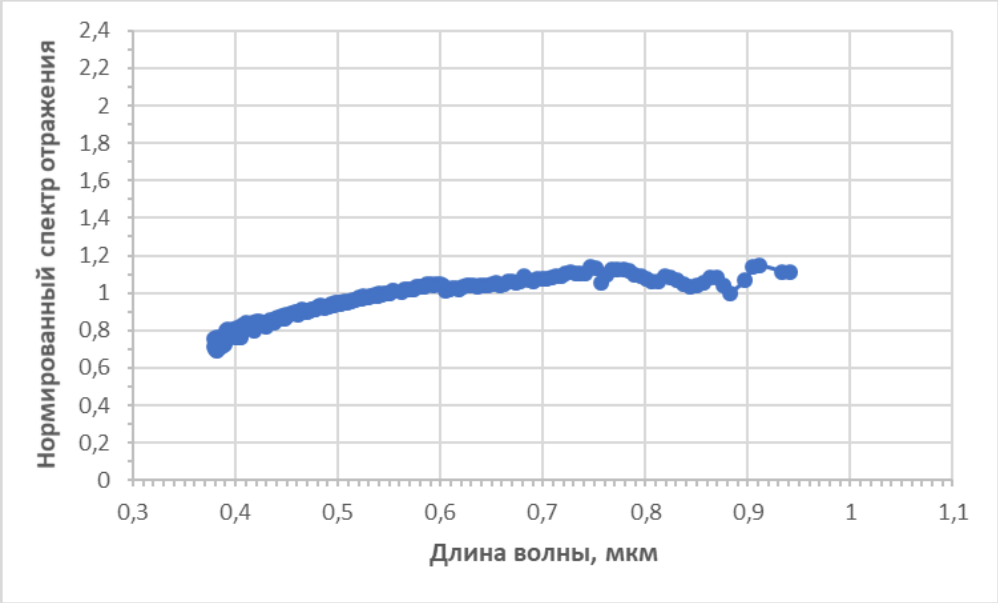

Рисунок 32 – Нормированный спектр отражения астероида 787 Москва (1914 UQ) (2016.09.26 UTC 21:19)

Сравнительно плоская форма спектра отражения имеет небольшой положительный градиент (Рис. 32). В совокупности с низким геометрическим альбедо (однако не позволяющим причислить его к С-типу), это позволяет сделать предположение о принадлежности данного астероида к промежуточному спектральному типу X. Дополнительно, небольшой период вращения предположительно указывает на монолитность структуры тела. На момент публикации нашей работы [65] другими исследователями не оценивался спектральный класс астероида 787 Москва. В настоящее время в работе [66] данный астероид относится к классу S на основании поляриметрических наблюдений. Однако полученный нами спектр отражения

не характерен для этого класса, поэтому делаем заключение о принадлежности к классу X.

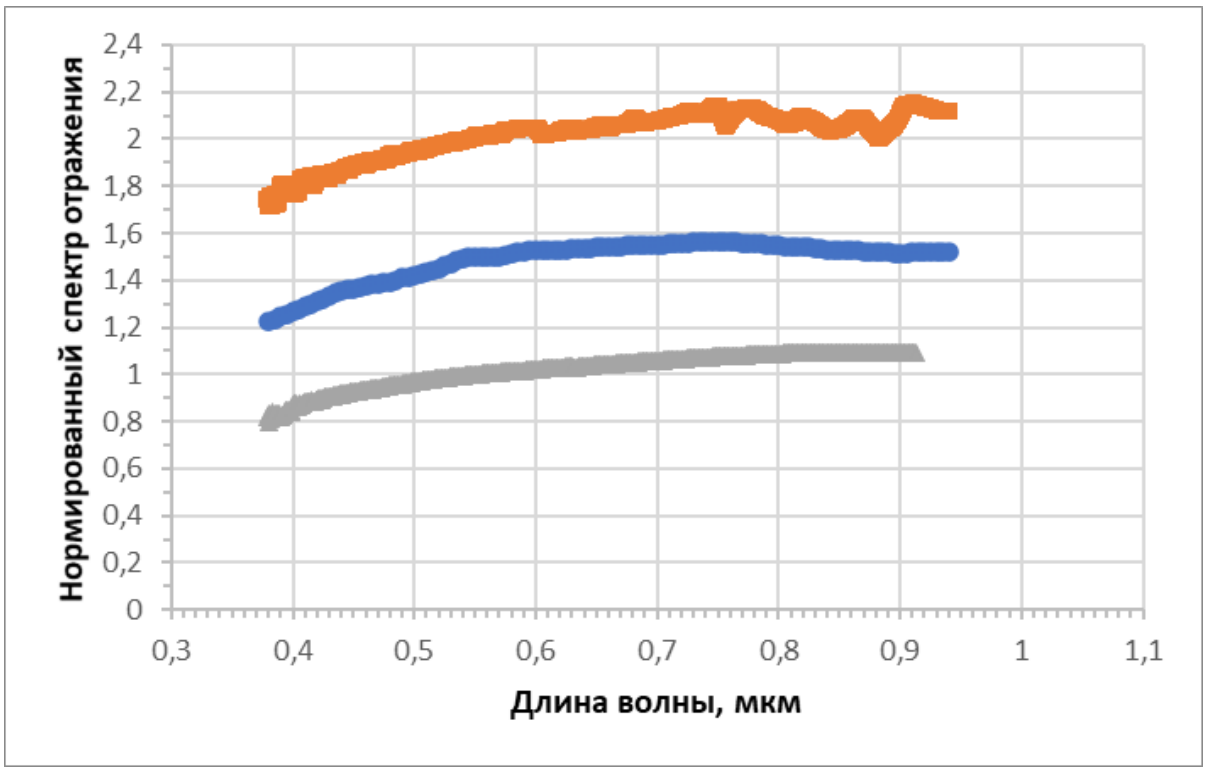

Рисунок 33 – Нормированный спектр отражения астероида 787 Москва (1914 UQ) (2016.09.26 UTC 21:19) – верхний, нормированный спектр отражения метеорита Vigarano (хондрит, CV3) из базы университета Виннипег – средний, нормированный спектр отражения метеорита Mokoia (хондрит CV3) из базы университета Виннипег – нижний

Отметим сходство спектра отражения данного астероида и подобранных из базы университета Виннипег спектров отражения метеоритов CV3 класса (Рис. 33). Метеорит Vigarano является типичным представителем данного класса углистых хондритов. Для него характерно высокое содержание тугоплавких включений [42]. Предполагается, что метеориты Vigarano и Mokoia могут происходить из одного и того же родительского тела с максимальной температурой 800-1100 ° C [84]. Сходство спектров отражения рассматриваемого астероида и данных метеоритов является дополнительным указанием неоднородного состава вещества поверхности 787 Москвы.

1.9.1.10 788 Гогенштейна (A914 HE)

Астероид 788 Гогенштейна имеет период обращения 2017,71 сут., период вращения – 33,2 ч [85]. Геометрическое альбедо составляет 0,041, диаметр - 111,295 км [2], [56].

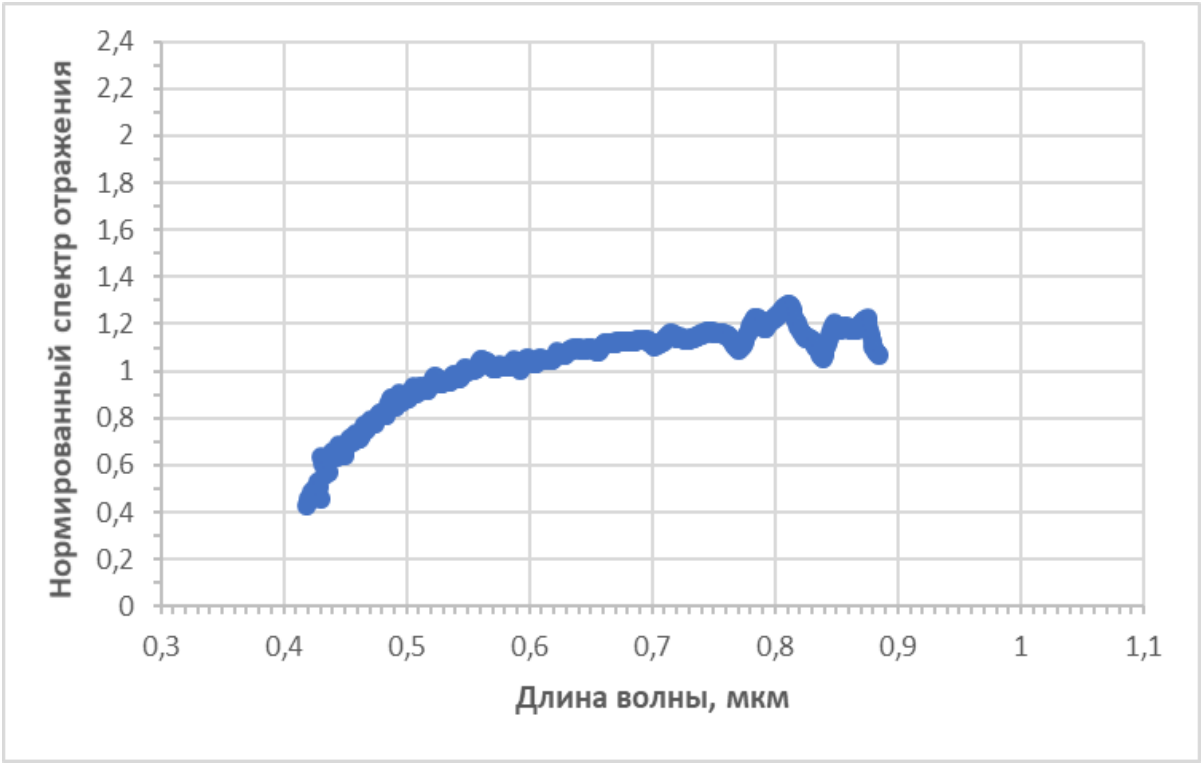

Рисунок 34 – Нормированный спектр отражения астероида 788 Гогенштейна (A914 HE) (2019.05.23 UTC 21:37)

Малое геометрическое альбедо, а также спектр отражения без ярко выраженного роста у 0,7 мкм характерно для низкотемпературных классов, однако спектр недостаточно плоский: наблюдается плавный рост спектра отражения астероида в длинноволновой области, что указывает на смешанный состав поверхностного вещества (Рис. 34).

На данный момент другим исследователями не было проведено спектрофотометрических наблюдений данного астероида для оценки его таксономического класса, но в работе [86] на основании показателей цвета делается вывод о принадлежности данного астероида к классу C.

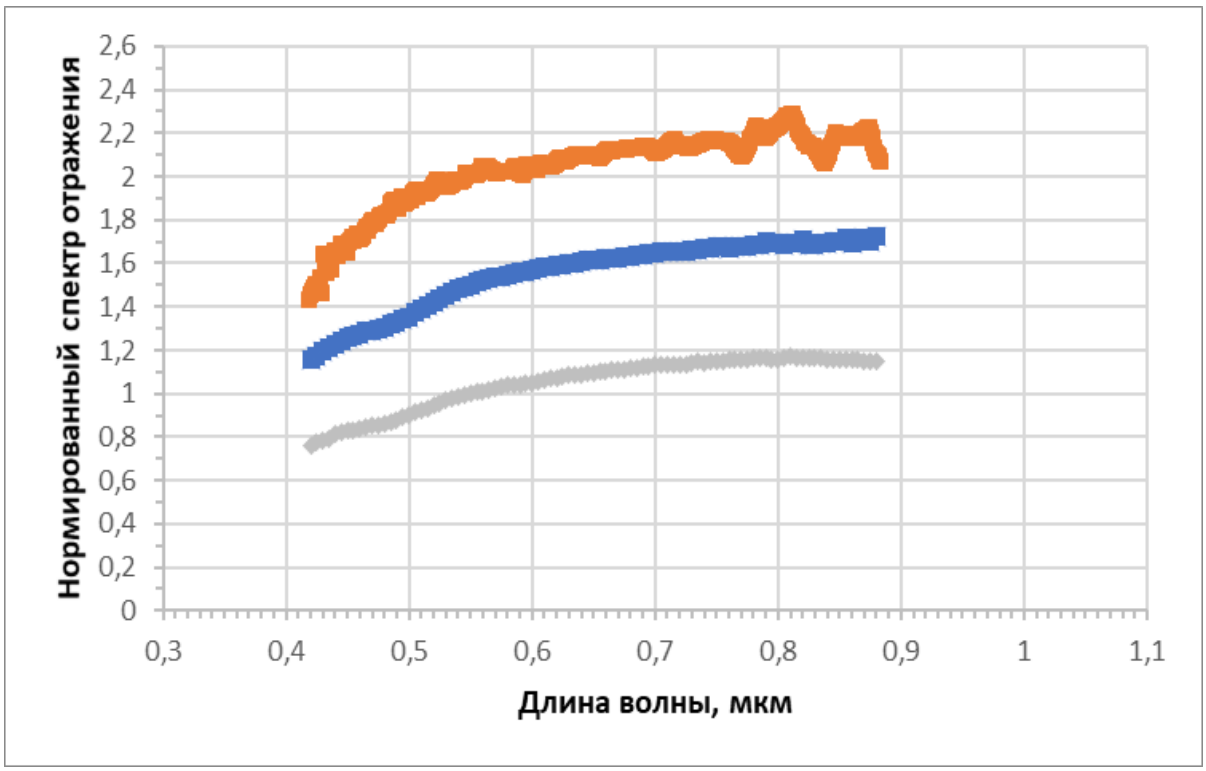

Рисунок 35 – Нормированный спектр отражения астероида 788 Гогенштейна (A914 HE) (2019.05.23 UTC 21:37) – верхний, нормированный спектр отражения метеорита Ivuna (хондрит CI1) из базы университета Виннипег – средний, нормированный спектр отражения метеорита Elephant Moraine 83389 (хондрит CO3) из базы университета Виннипег – нижний

В пользу низкотемпературной минералогии вещества может служить сходство спектра отражения астероида 788 Гогенштейна и метеорита Ivuna, являющегося типичным представителем CI1 класса [67]. Представители группы CI − наиболее гидратированы среди всех хондритов и обладают наиболее примитивным составом вещества [42]. Однако спектр отражения астероида не имеет характерной для гидросиликатов полосы поглощения у 0,46 мкм [34]. С другой стороны, в промежутке длин волн от 0,5 до 0,9 мкм имеет место явное сходство со спектром отражения метеорита CO3 Elephant Moraine 83389 (Рис. 35) с меньшим относительно предыдущего метеорита среднеквадратичным отклонением. Главной чертой типа CO3 в отличие от C I1 является отсутствие филлосиликатов и более выраженный температурный метаморфизм [42]. На основании сравнения со спектрами отражения

метеоритов делается заключение о смешанной минералогии астероида 788 Гогенштейна.

1.9.1.11 863 Бенкоэла (1917 BH)

Астероид 863 Бенкоэла является астероидом внешней части Главного Пояса. Период обращения этого тела составляет 2093,44 сут, а период вращения – 7,03 ч, геометрическое альбедо − 0,595, диаметр – 27,06 км [2], [56].

Астероид наблюдался одну ночь, 2016.06.03, всего 2 спектра (Прил. А)

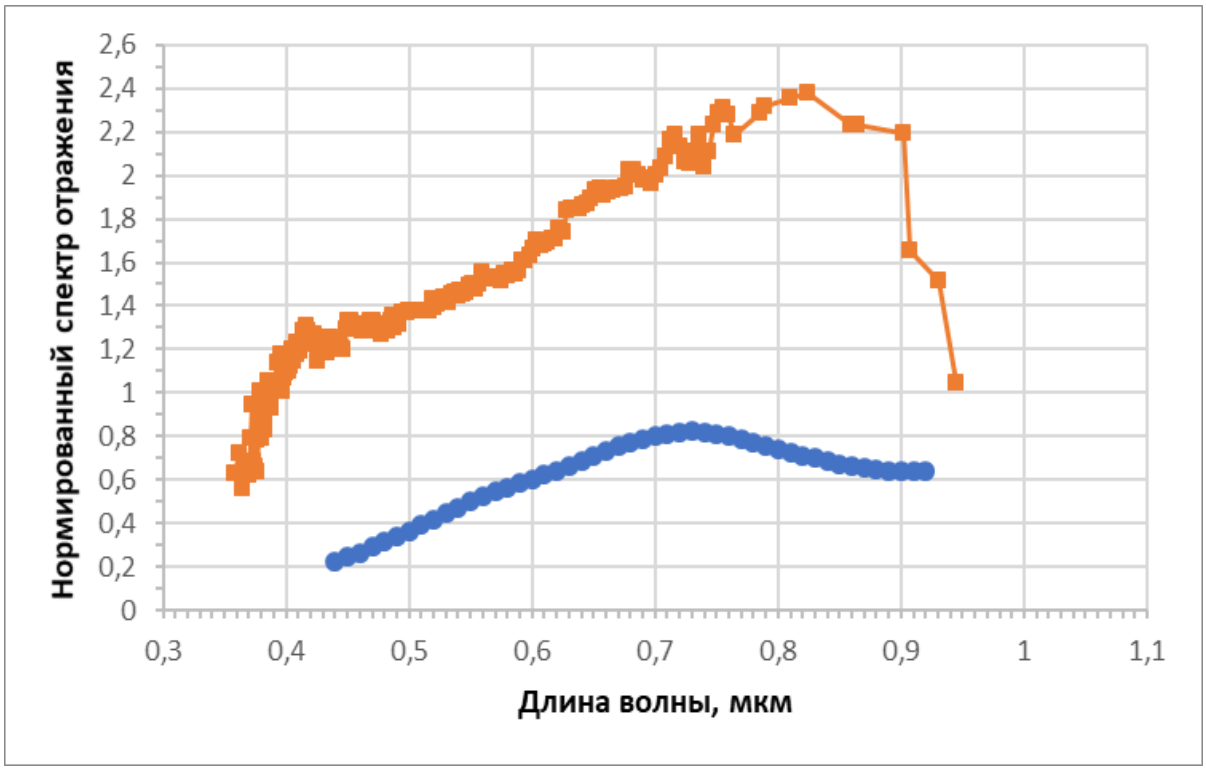

Рисунок 36 – Нормированный спектр отражения астероида 863 Бенкоэла (1917 BH) (2016.06.02 UTC 23:03) – верхний, нормированный спектр отражения из базы SMASS – нижний

Спектр отражения астероида имеет форму, которая присуща высокотемпературному классу A (Рис. 35). Дополнительное подтверждение дает высокое альбедо астероида. Стоит отметить сильную полосу поглощения Fe^{2+} у 1 мкм, которая характерна для высокотемпературных минералов

(оливинов, пироксенов и др.). Данный вывод подтверждают такие публикации, как [14], [75] и [87] (рис 36).

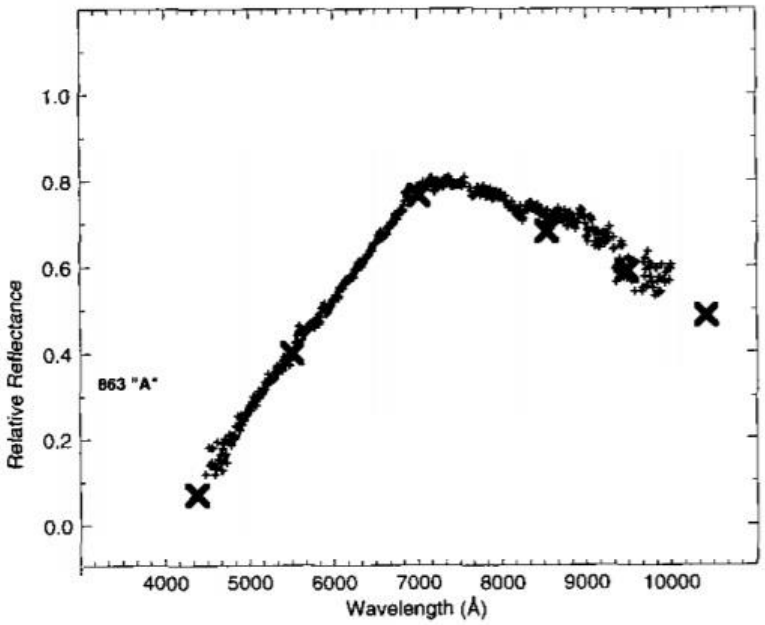

Рисунок 37 – Нормированный спектр отражения астероида 863 Бенкоэла (1917 BH) [73]

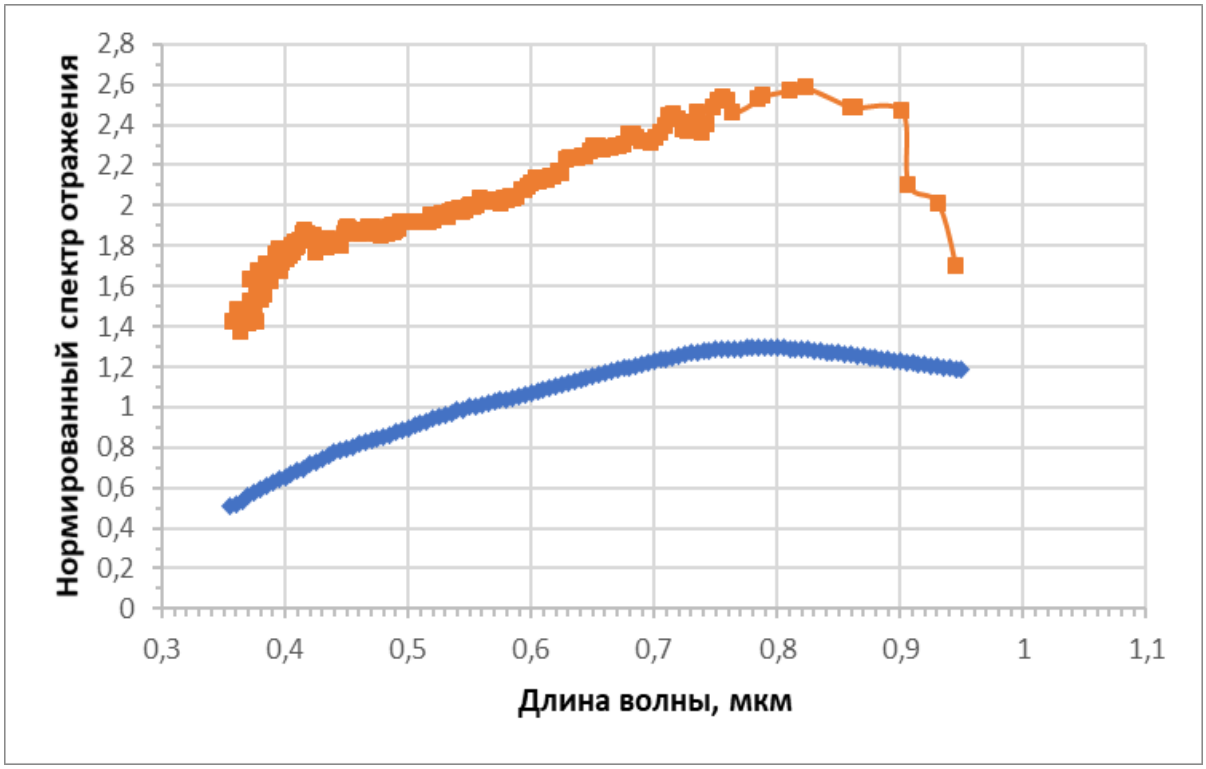

Рисунок 38 – Нормированный спектр отражения астероида 863 Бенкоэла (1917 BH) (2016.06.02 UTC 23:03) – верхний, нормированный спектр отражения метеорита Northwest Africa 1500 (ахондрит несгруппированный) из базы университета Виннипег – нижний

Метеорит Northwest Africa 1500, имеющий похожий спектр отражения, ранее относился к группе уреилитов, но в данное время является несгруппированным ахондритом [67]. Это метеорит, имеющий ультраосновной состав, в котором преобладает крупнозернистый (~100– 500 мкм) оливин (95–96%). Однако его существенно отличающаяся термическая история (по сравнению с уреилитами), из-за чего он был переведен в несгруппированные ахондриты, может быть более правдоподобно объяснена, если он образовался на другом материнском теле [88]. В работе [89] обсуждается возможная принадлежность данного метеорита к группе брашинитов. И уреилиты, и брашиниты являются предполагаемыми метеоритными аналогами астероидов класса А, поэтому можно считать сходство спектров отражения 863 Бенкоэлы и Nortwest Africa 1500 дополнительным подтверждением нашей оценки.

1.9.1.12 1264 Летаба

Геометрическое альбедо астероида 1264 Летаба достаточно низкое – 0,073, диаметр - 74,7 км. Период обращения составляет 1772,3 сут., период вращения – 32,2 ч [2], [56].

Спектр данного астероида горизонтален, имеет слабый наклон (Рис. 39). Вкупе с малым значением альбедо форма спектра отражения указывает на низкотемпературный класс – С. Форма в диапазоне 0,6 – 0,7 мкм слегка меняется от выпуклой до вогнутой, что может свидетельствовать о наличии гидросиликатов. Оценка спектрального класса подтверждается и другими авторами [14].

Спектр отражения астероида 1264 схож со спектров отражения метеорита класса CM2 Murchison (Рис. 40). Как упоминалось в 1.9.1.5 при описании астероода 381 Мирра, этот тип метеорита (CM2) отличается обилием гидратированных минералов. Кроме того, в данном образце содержатся в том числе и органические молекулы [90], что однозначно указывает на низкотемпературный минералогический состав, что в свою очередь служит

косвенным подтверждением правильности оценки спектрофотометрического класса астероида.

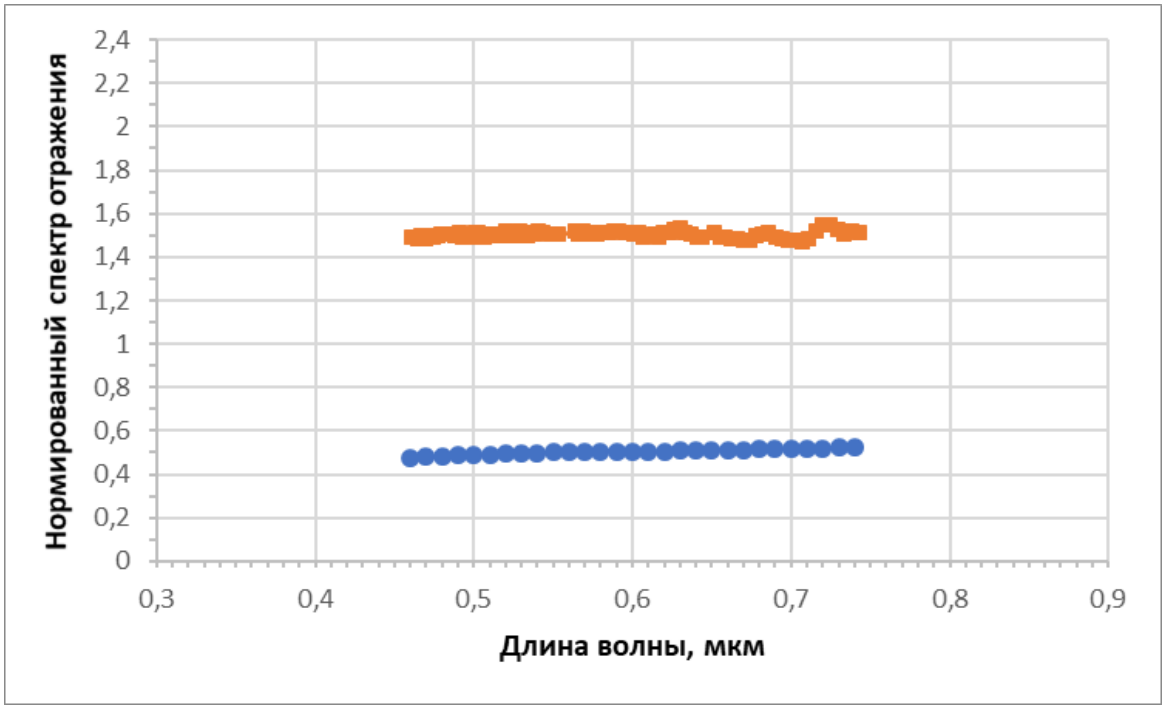

Рисунок 39 – Нормированный спектр отражения астероида 1264 Летаба (2016.05.25 UTC 22:05) – верхний, нормированный спектр отражения из базы SMASS – нижний

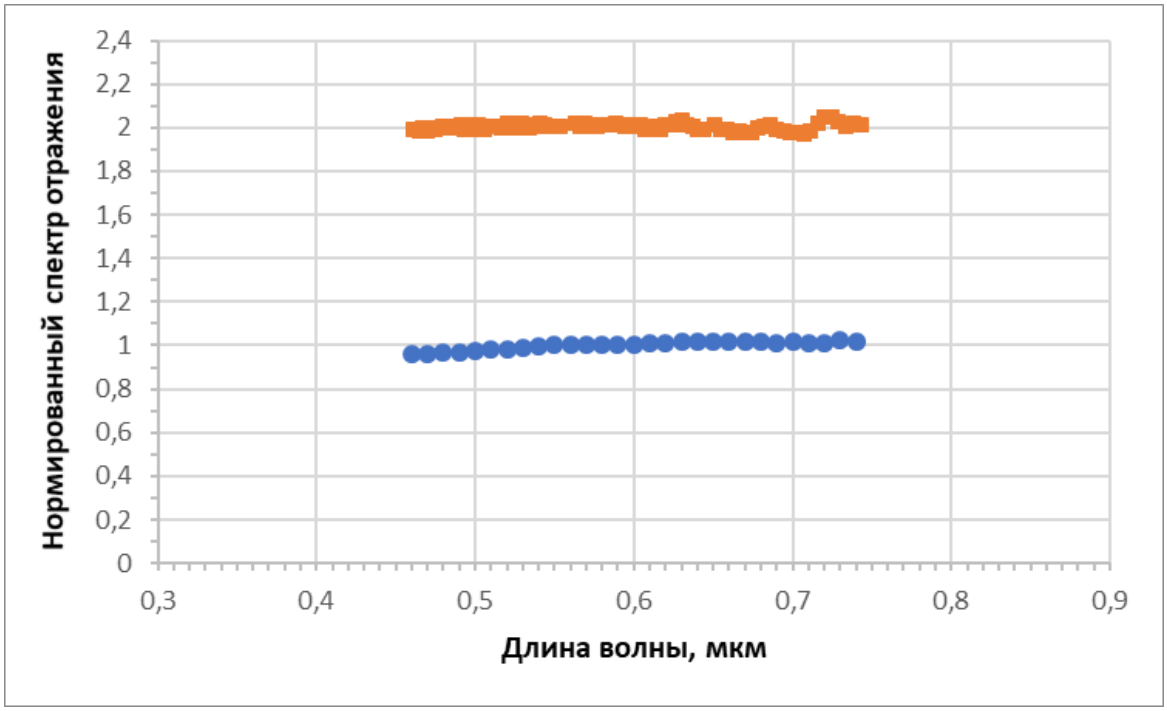

Рисунок 40 – Нормированный спектр отражения астероида 1264 Летаба (2016.05.25 UTC 22:05) – верхний, нормированный спектр отражения метеорита Murchison (хондрит CM2) из базы университета Виннипег - нижний

1.9.2 Астероиды, сближающиеся с Землёй, а также марс-кроссеры

1.9.2.1 4450 Пан (1987 SY)

Астероид 4450 Пан является АСЗ и входит в группу аполлонов, кроме того, является потенциально опасным астероидом. Период обращения астероида составляет 632,64 сут., а период вращения – 56,48 ч. Диаметр – около 1 км [2], [56]. Заметим, что астероид Пан может быть контактным двойным астероидом [91].

Данный астероид наблюдался три ночи, всего 7 спектров. (Прил. В)

Форма спектра отражения, вероятно, соответствуют низкотемпературному классу С (Рис. 41). На это так же указывает полоса поглощения с центром у 0,65 мкм (возможно, перенос заряда $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$ в гидратированных или окисленных силикатах). Однако обращает внимание наличие коротковолнового крыла полосы поглощения у 1 мкм, возникающей при электронных переходах в кристаллическом поле у Fe^{2+} в пироксене (и/или оливине), что характерно для высокотемпературных классов. Поэтому стоит сделать заключение о смешанной минералогии астероида. На момент публикации [64] другими исследователями не была проведена оценка таксономической принадлежности астероида Пан. В настоящее время в работе [40] указывается таксономический класс S (Рис. 42).

В пользу высокотемпературной минералогии вещества поверхности астероида выступает сходство со спектром отражения метеорита Talampaya класса эвкритов (Рис. 43). Метеориты данного класса − самый распространенный тип базальтового ахондрита. Основными минералами эвкритов являются богатый железом пироксен и бедный Na плагиоклаз [67]. Метеорит Talampaya, найденный в Аргентине в 1997 году, оказался сильно брекчиевидной структурой и содержал магниевый пироксен и кальциевый плагиоклаз [92].

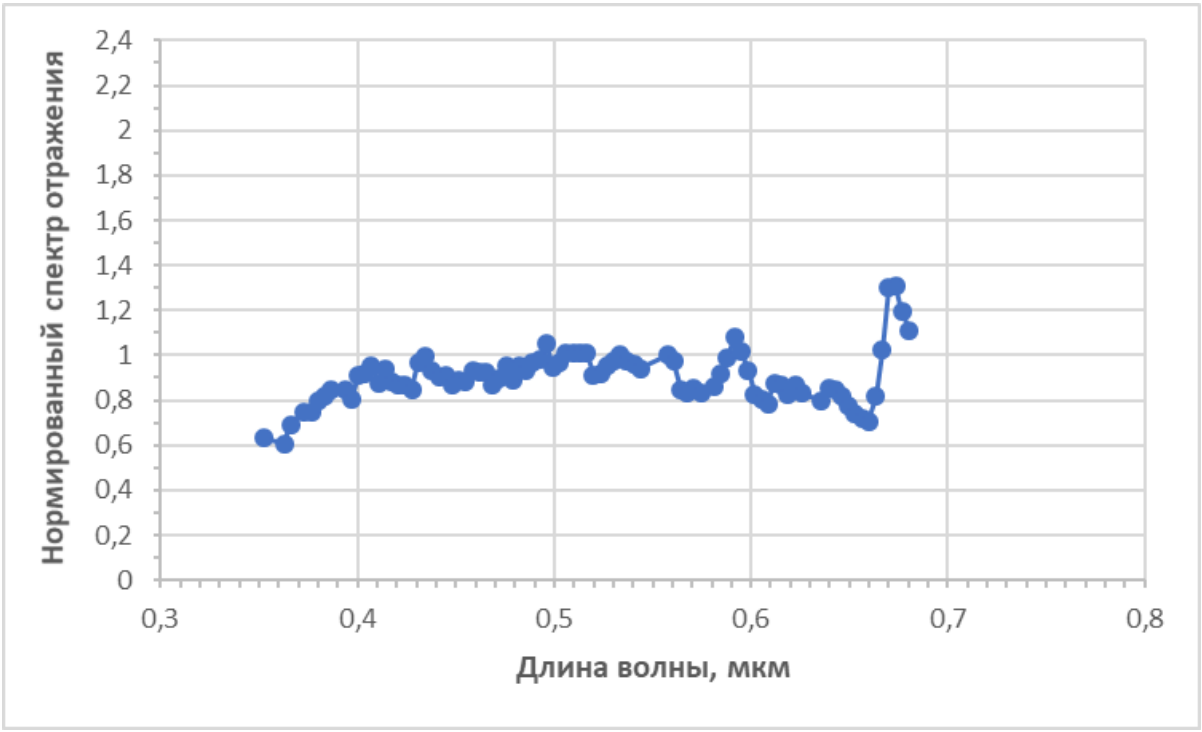

Рисунок 41 – Нормированный спектр отражения астероида 4450 Пан (1987 SY) (2013.09.11 UTC 22:33)

Не исключено, что неоднозначность определения спектрального типа связана с возможной особенностью строения астероида Пана (как контактный двойной астероид).

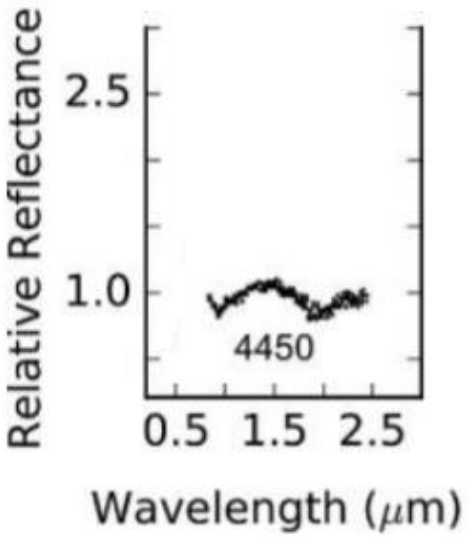

Рисунок 42– Нормированный спектр отражения астероида астероида 4450 Пан (1987 SY) [40]

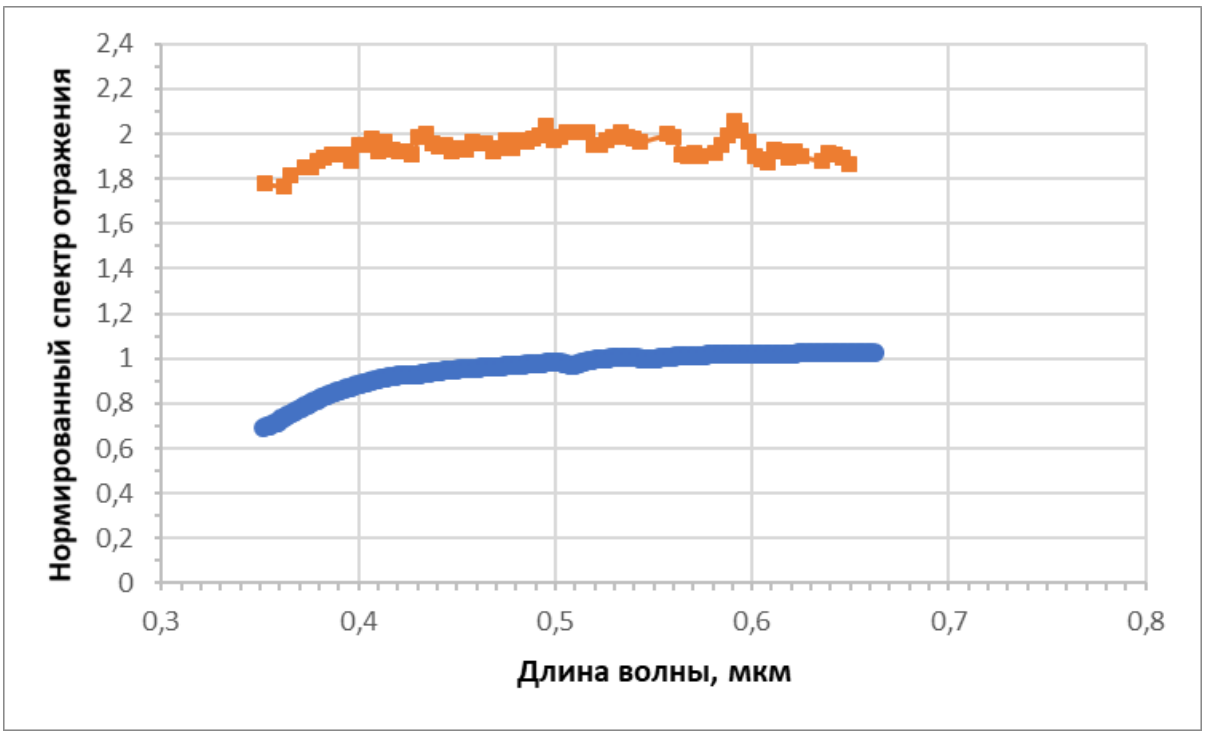

Рисунок 43 – Нормированный спектр отражения астероида 4450 Пан (1987 SY) (2013.09.11 UTC 22:33) – верхний, нормированный спектр отражения метеорита Talampaya (эвкрит) из базы университета Виннипег – нижний

1.9.2.2 20826 (2000 UV13)

Астероид 20826 является представителем группы аполлонов. Наблюдения проводились в 2016 году, всего получено 3 спектра отражения (Прил. В). Период обращения астероида составляет 1378,08 сут, а период вращения астероида - 12 ч [2], [56].

Градиент спектра отражения соответствует высокотемпературной минералогии, предположительно S-классу (Рис. 44). Это же подтверждает опубликованная оценка (Рис. 45) [93].

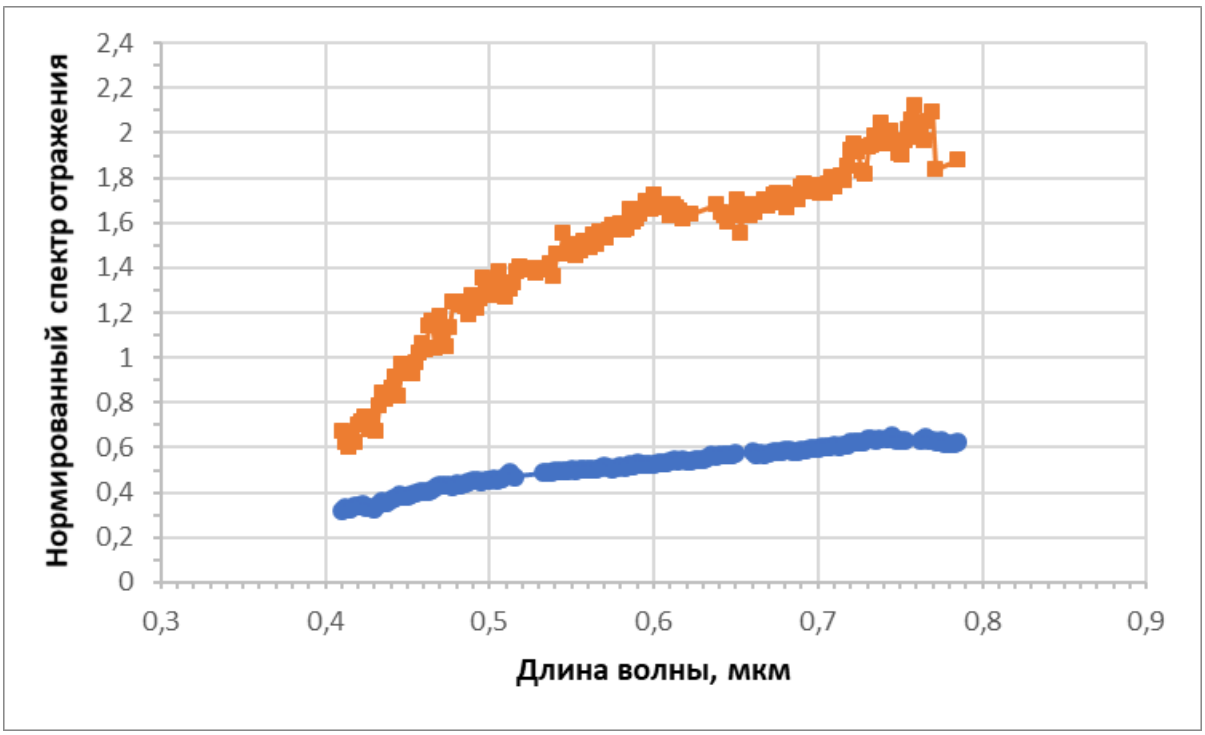

Рисунок 44 – Нормированный спектр отражения астероида 20826 (2000 UV13) (2016.02.09 UTC 19:59) − верхний, нормированный спектр отражения из базы SMASS – нижний

В работе [93] приводится сравнение со спектром отражения метеорита Soko-Banja класса LL4. Однако меньшим среднеквадратичным отклонением обладает спектр отражения другого представителя обыкновенных хондритов того же класса LL4 – Kelly (Рис. 46) [67]. Предполагается, что данный тип метеоритов является аналогами астероидов класса S или Q.

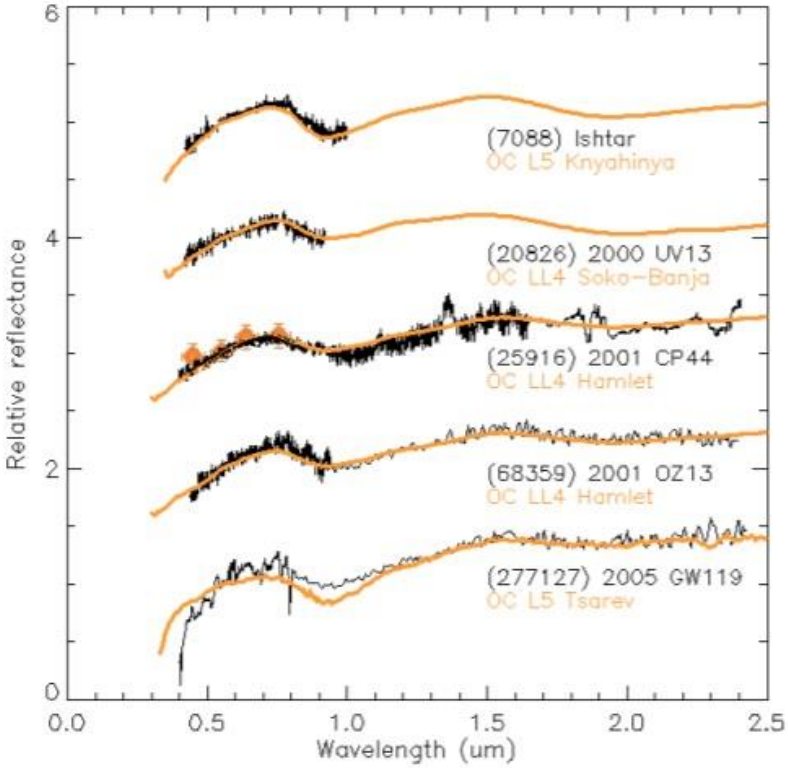

Рисунок 45 – Нормированный спектр отражения астероида 20826 (2000 UV13) (второй сверху) [93]. Данный спектр соответствует астероиду Sq- класса

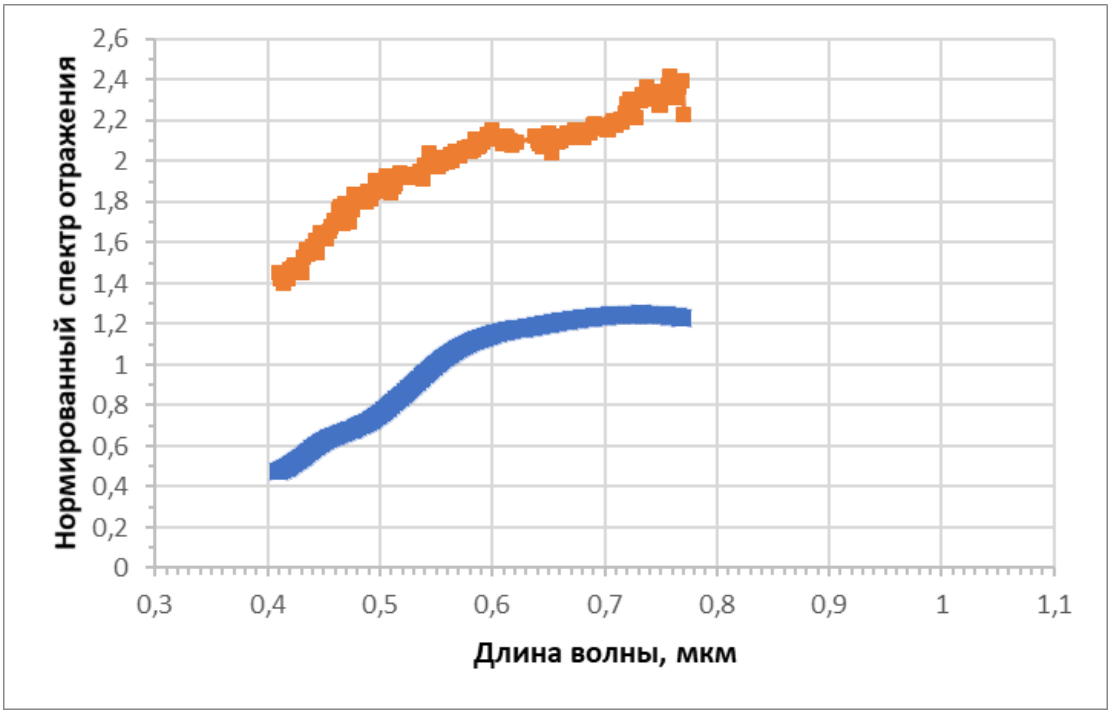

Рисунок 46 – Нормированный спектр отражения астероида 20826 (2000 UV13) (2016.02.09 UTC 19:59) – верхний, нормированный спектр отражения метеорита Kelly (LL4) из базы университета Виннипег - нижний

1.9.2.3 24445 (2000 PM8)

Астероид 24445 также относится к группе аполлонов. Его диаметр составляет ≈ 4 км, период обращения астероида – 1200,28 сут, а период вращения – 6,76 ч [2], [56].

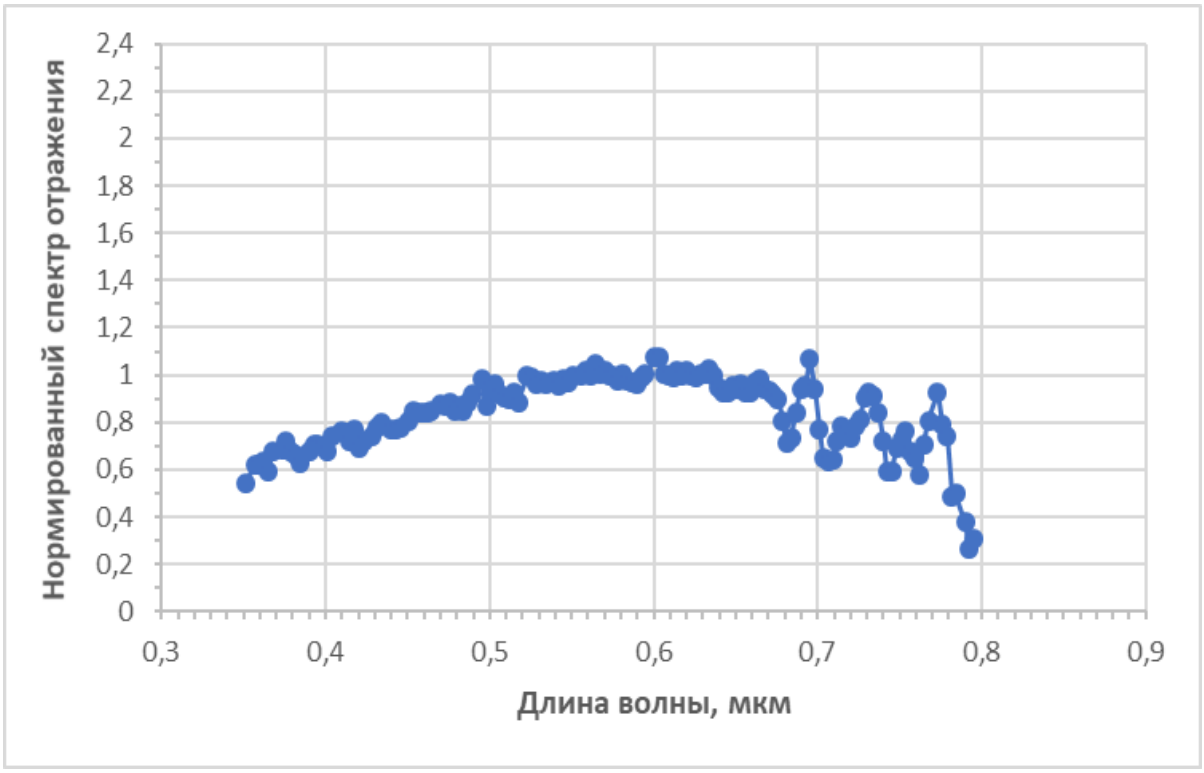

Рисунок 47 – Нормированный спектр отражения астероида 24445 (2000 PM8) (2013.09.08 UTC 00:18)

На длине волны ≈1 мкм спектр отражения астероида имеет выраженную полосу поглощения, характерную для пироксен-оливина.

Можно предполагать о том, что минералогия астероида является высокотемпературной, характерной для A-S классов (Рис. 47). К моменту представления данного результата научному сообщества в рамках конференций другими исследователями не оценивалась принадлежность к какому-либо таксономическому классу данного астероида. В настоящее время в работе [40] указывается S тип (Рис. 48).

В качестве метеоритного аналога одинаково хорошо подходят эвкрит Talampaya и уреилит Novo-Urei (Рис.49).

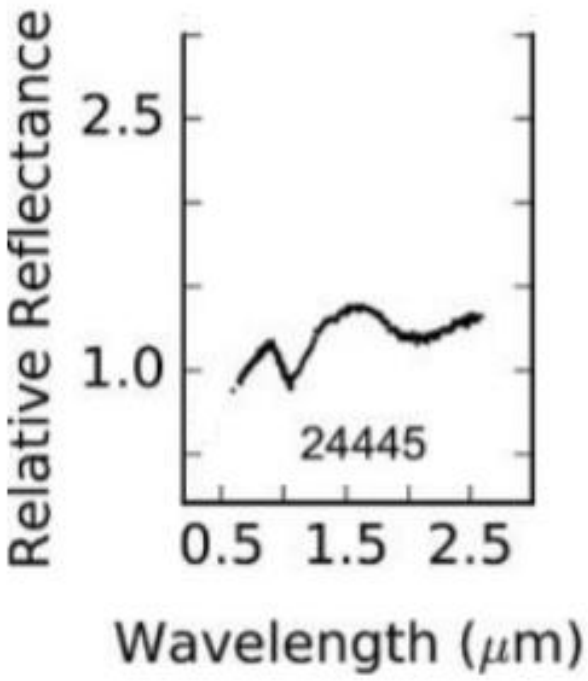

Рисунок 48 – Нормированный спектр отражения астероида 24445 (2000 PM8) [40]

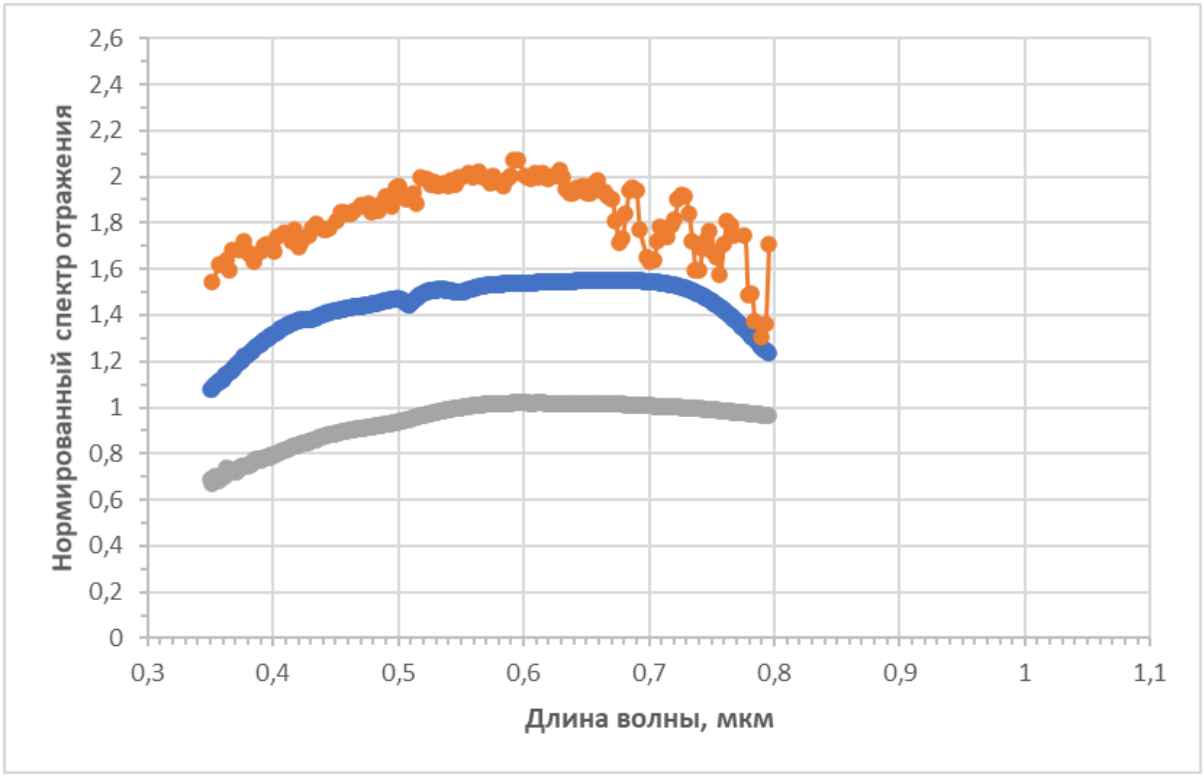

Рисунок 49 – Нормированный спектр отражения астероида 24445 (2000 PM8) (2013.09.08 UTC 00:18) – сверху, нормированный спектр отражения метеорита Talampaya (эвкрит) из базы университета Виннипег – средний, нормированный спектр отражения метеорита Novo-Urei (уреилит) из базы университета Виннипег – нижний

Уреилиты − ахондриты, богатые оливином и пижонитом (пироксеном), имеющие ультраосновной состав, эвкриты – базальтовые ахондриты. Сходство спектров отражения данных метеоритов и астероида 24445 является дополнительным указанием на высокотемпературную минералогию поверхностного вещества исследуемого астероида.

1.9.2.4 68216 (2001 CV26)

Астероид 68216 кроме того, что относится к группе аполлонов, также является потенциально опасным объектом. Период обращения 68216 составляет 553,63 сут, а период вращения астероида – 2,429 ч [2], [56]. Астероид наблюдался одну ночь (Прил.В).

Общий вид спектра отражения, а также малый период вращения указывают на высокотемпературный класс, скорее всего, S-класс (Рис. 50).

Рисунок 50 – Нормированный спектр отражения астероида 68216 (2001 CV26) (2016.02.10 UTC 23:03)

Нельзя не отметить заметную полосу поглощения у 0,65 мкм, которая, скорее всего, возникает из-за переноса заряда между разновалентными ионами

железа ($Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$) и других металлов, а также слабые полосы поглощения у 0,44 мкм (Fe^{3+}) и у 0,52-0,53 мкм (вероятно, связана с присутствием в веществе пироксена).

Данную оценку подтверждает публикации [94] и [95]. В первой из них дана оценка S-Sq типа (Рис. 51), вторая же дает оценку высокотемпературного R-типа, астероиды которого богаты пироксеном и оливином.

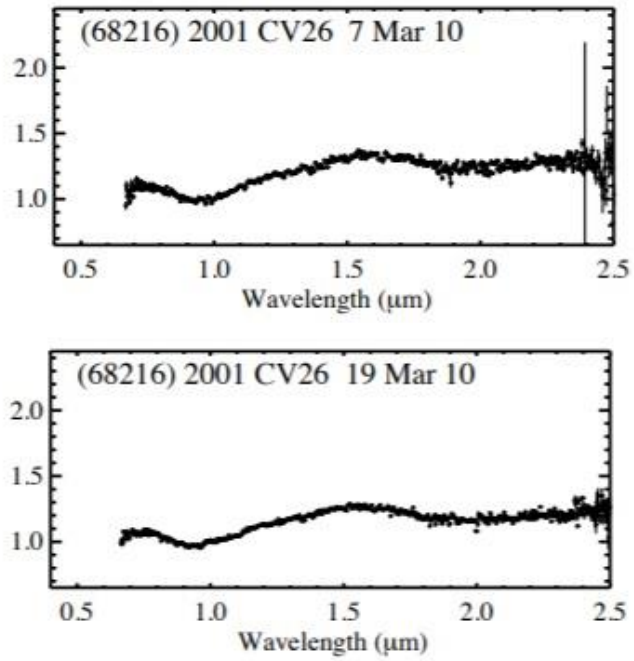

Рисунок 51 – Нормированный спектр отражения астероида 68216 (2001 CV26) [93]. Данный спектр соответствует астероиду Sq- класса

В качестве дополнительного подтверждения установленного класса может выступить сходство со спектрами отражения метеоритов уреилита Goalpara и ахондрита Northwest Africa 1500 (Рис. 52). Образец Northwest Africa (NWA) 1500 - богатый оливином ахондрит. Первоначально он был классифицирован как уреилит, но в настоящее время относится к несгруппированным. В работе [89] обсуждается возможная принадлежность данного метеорита к группе брашинитов.

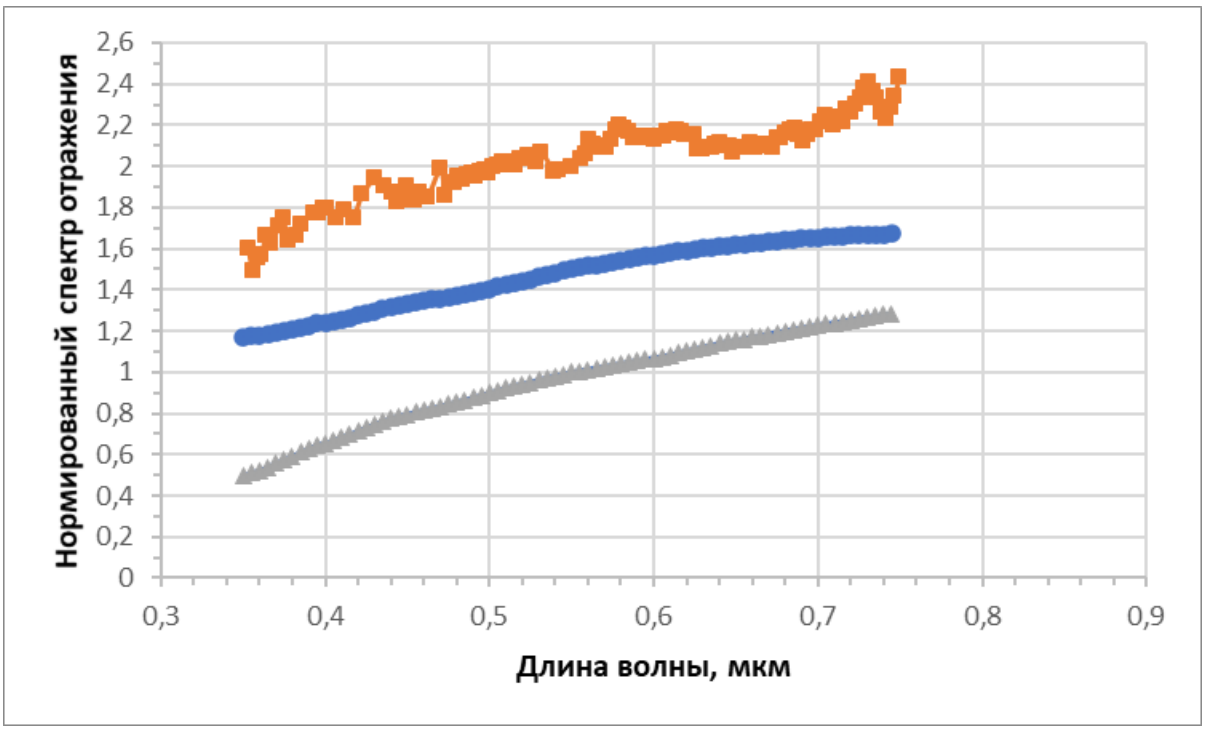

Рисунок 52 – Нормированный спектр отражения астероида 68216 (2001 CV26) (2016.02.10 UTC 23:03) – сверху, нормированный спектр отражения метеорита Goalpara (урелит) из базы университета Виннипег – средний, нормированный спектр отражения метеорита Northwest Africa 1500 (ахондрит) из базы университета Виннипег – снизу

1.9.2.5 93768 (2000 WN22)

Астероид 93768 наблюдался в 2016 году (Прил. В). Данный объект относится к группе астероидов, пересекающих орбиту Марса − марс-кроссеров. Период обращения − 297,73 сут, а период вращения астероида – 2,68 ч [2], [56].

Дополнительным указателем, кроме общего градиента спектра отражения (Рис. 53), принадлежности к S-типу является достаточно короткий период вращения.

На данный момент таксономический класс данного астероида не был определен другими исследователями.

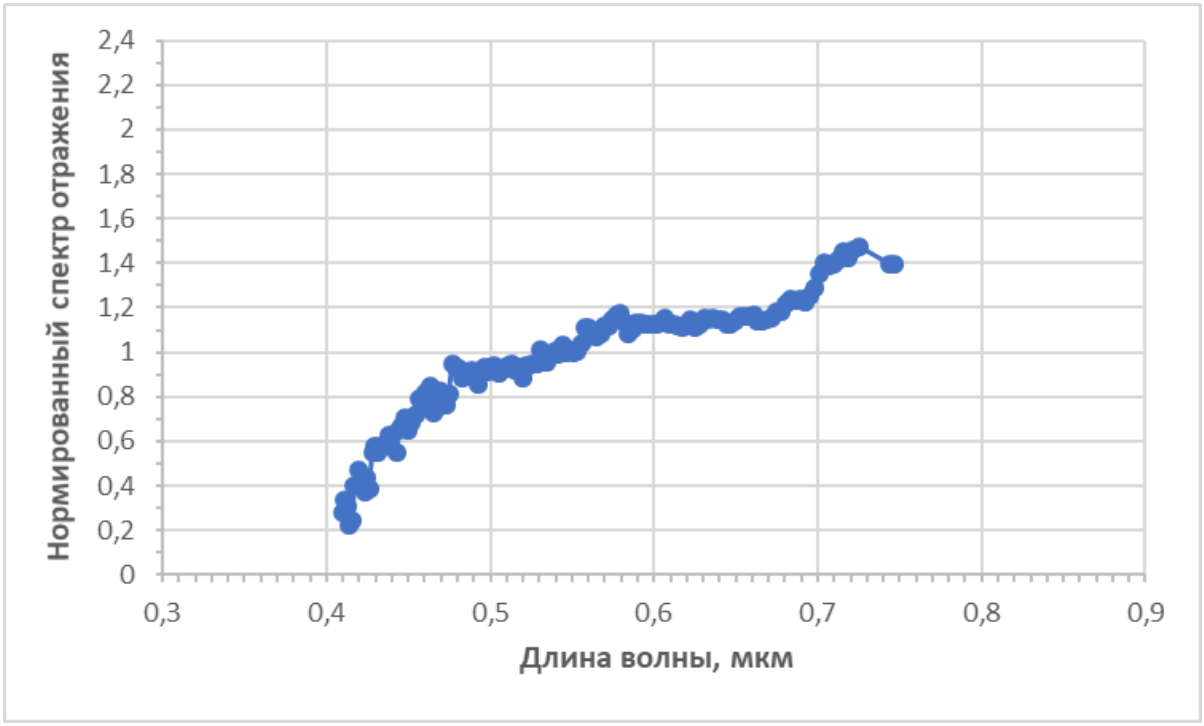

Рисунок 53 – Нормированный спектр отражения астероида 93768 (2000 WN22) (2016.02.10 UTC 20:44)

1.9.1.6 112493 (2002 PR6)

Астероид 112493 также является марс-кроссером. Период обращения 112493 составляет 124,77 сут [2], [56].

Астероид наблюдался две ночи, всего получено 5 спектров отражения. (Прил. В).

Положительный градиент спектра отражения позволяет предполагать высокотемпературную минералогию астероида (Рис. 54), однако для уточнения и подтверждения таксономического класса необходимо проведение дополнительных исследований астероида.

Рисунок 54 – Нормированный спектр отражения астероида 112493 (2002 PR6) (2016.02.054 UTC 22:55)

На данный момент астероид 112493 не был отнесен к какому-либо классу другими исследователями.

1.9.1.7 337866 (2001 WL15)

Данный астероид относится к группе амуров. Период обращения 337866 составляет 1024,74 сут, а период вращения астероида – 8,955 ч [2], [56], [96].

Астероид наблюдался одну ночь, всего 8 спектров. (Прил. В)

Судя по градиенту спектра отражения, можно сделать вывод о высокотемпературном классе S (Рис. 55), что подтверждает статья Р. Бинзеля [97]. Слабая полоса поглощения у 0,52-0,53 мкм, вероятно, связана с присутствием в веществе пироксена.

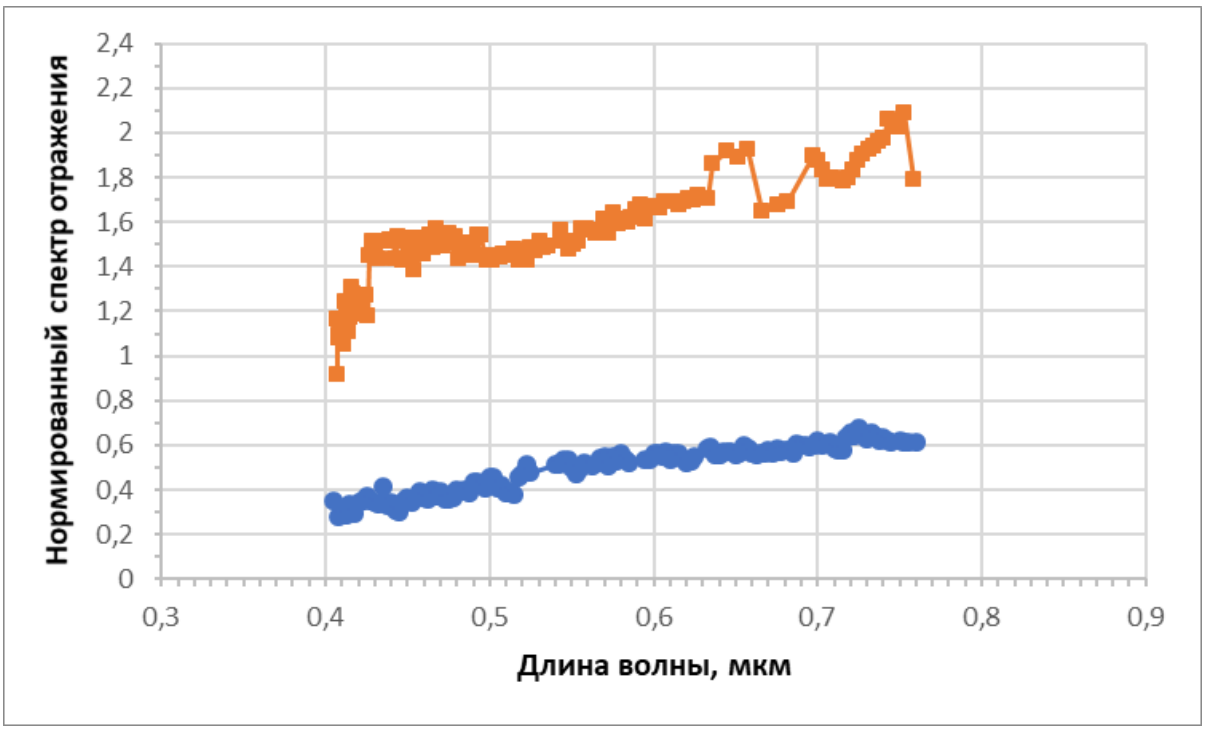

Рисунок 55 – Нормированный спектр отражения астероида 337866 (2001 WL15) (2016.02.10 UTC 00:26), нормированный спектр отражения из базы SMASS – снизу

1.9.1.8 468738 (2010 TN54)

Астероид 468738 относится к группе амуров и является потенциально опасным астероидом. Период обращения данного астероида составляет 1119, 45 сут, а период вращения астероида – 12,12 ч. Диаметр − около 0,5 км. [2], [56].

Наблюдения проводились 12.09.2013 в 23:39 (UTC) (Прил. В).

Отметим слабый положительный градиент спектра, характерный для низкотемпературных классов, вероятно, C, и полосу поглощения у 0,45 мкм (Fe^{3+}), что свидетельствует о гидросиликатах (Рис. 56). К текущему моменту принадлежность к тому или иному таксономическому типу не оценивалась другими исследователями.

Спектр отражения астероида 468738 имеет сходство со спектром отражения метеорита класса хондриты CI1 – Orgueil (Рис. 57), что является дополнительным косвенным подтверждением данной оценки спектрального класса астероида. Хондриты CI класса имеют состав, наиболее близкий к

солнечному, а также наиболее гидратированные среди всех хондритов [42], [74].

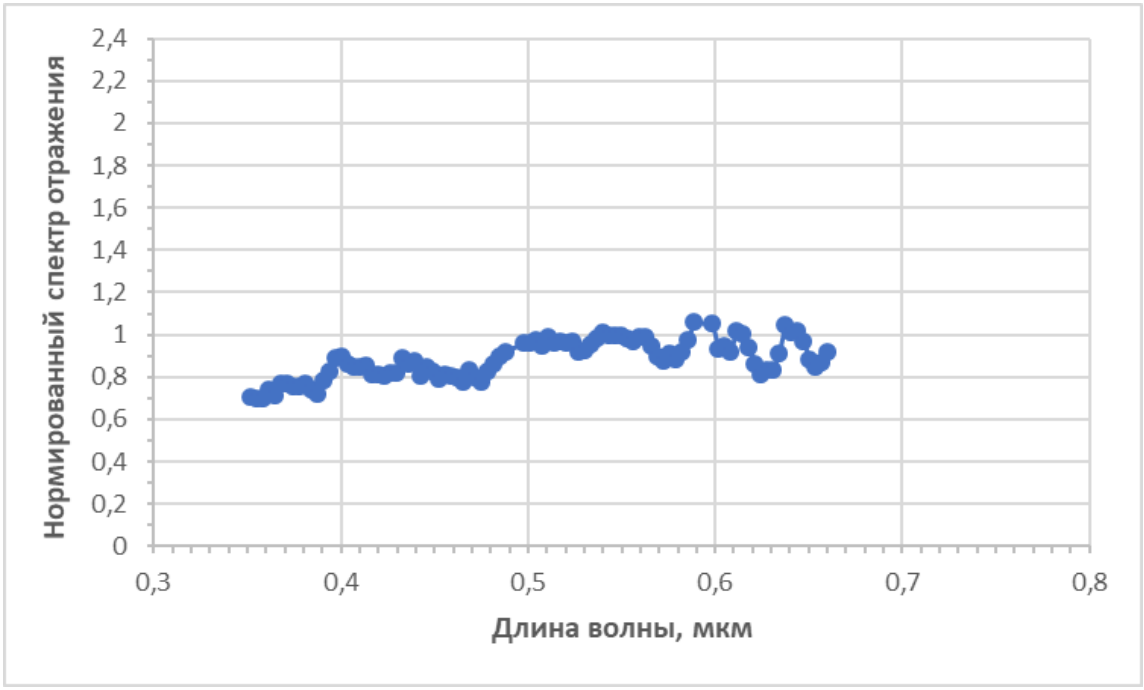

Рисунок 56 – Нормированный спектр отражения астероида 468738 (2013.09.12 UTC 23:39)

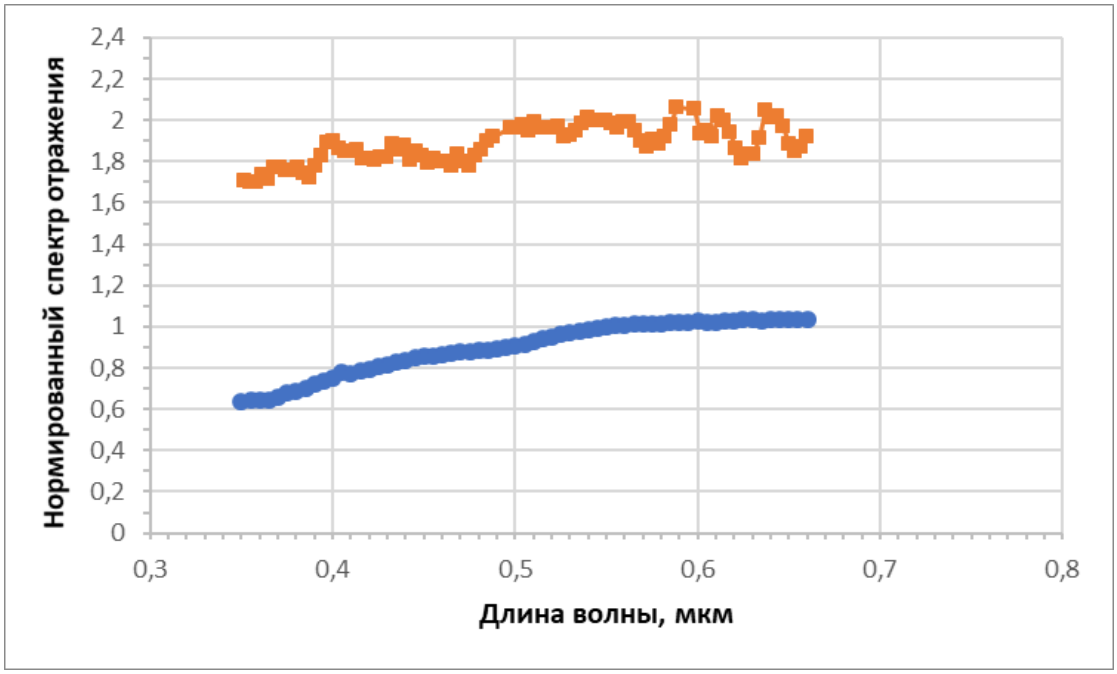

Рисунок 57 – Нормированный спектр отражения астероида 468738 (2013.09.12 UTC 23:39) – сверху, нормированный спектр отражения метеорита Orgueil (CI1) из базы университета Виннипег – снизу

1.9.1.9 518810 (2010 CF19)

Астероид-аполлонец 518810 является потенциально опасным астероидом. Его период обращения составляет 476,72 сут. [2], [56]. Диаметр 0,083 км, геометрическое альбедо 0,44 [57].

Наблюдения проводились 29.08.2013 в 21:34 (UTC) (Прил.В).

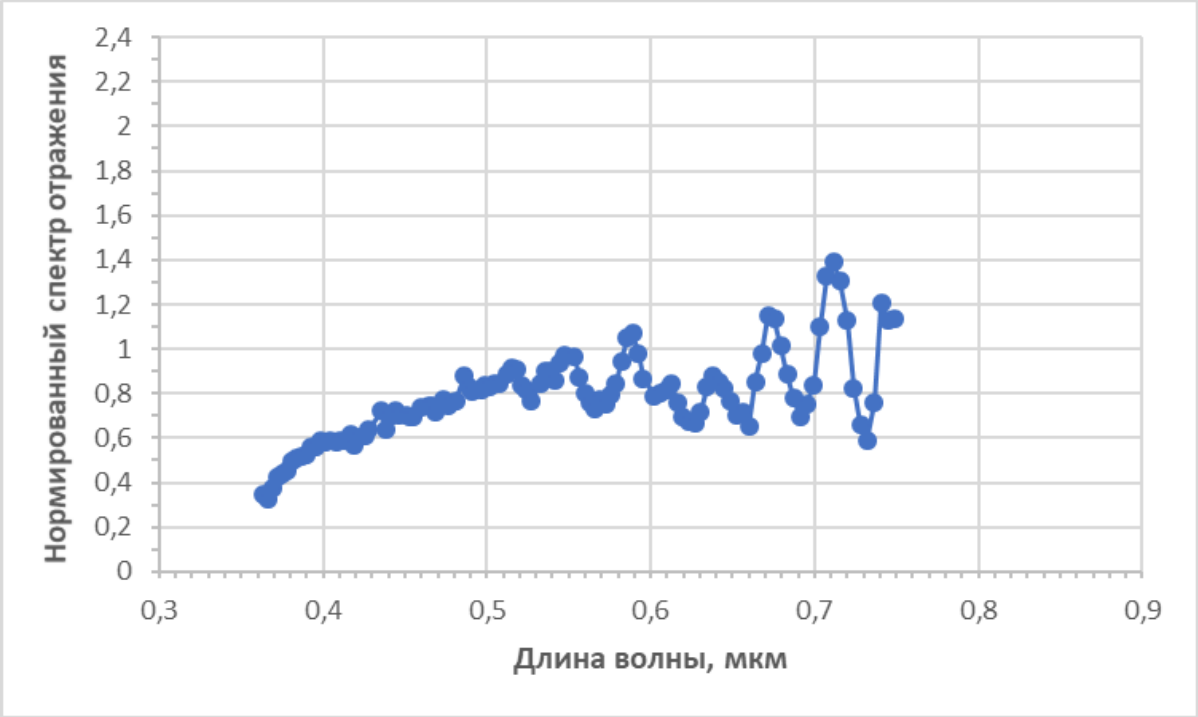

Рисунок 58 – Нормированный спектр отражения астероида 518810 (2013.08.29 UTC 21:34)

Общий вид спектра отражения, а также значение геометрического альбедо указывают на высокотемпературный класс, скорее всего, S-класс (Рис. 58). В то же время отметим широкую полосу поглощения с центром у 0,65 мкм. Вероятно, это полоса переноса заряда $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$ в гидратированных или окисленных силикатах [32]. На основании данных особенностей делаем заключение о смешанном составе поверхностного вещества астероида 518810.

К сожалению, за время наблюдения удалось получить только один спектр, поэтому требуются дополнительные исследования для подтверждения его предполагаемого класса.

1.10 Выводы

В первой главе подробно описаны методика обработки полученных спектрофотометрических данных и расчёта спектров отражения астероидов. Наблюдательные данные были получены на обсерватории «Пик Терскол» (филиал ИНАСАН) автором совместно с коллегами. Наблюдательные параметры астероидов указаны в приложениях А и В.

В работе представлены полученные спектры отражения для 12 астероидов Главного пояса и 9 астероидов, сближающихся с Землей, (АСЗ) и марс-кроссеров, среди которых есть 4 потенциально опасных объекта. В результате на основании общего градиента спектра отражения, а также определённых полос поглощения было дано заключение о спектральном классе согласно таксономии Толена. Полученные оценки хорошо согласуются с известными данными о данных объектах, а также с некоторыми косвенными характеристиками, такими как период вращения, геометрическое альбедо и сходство со спектрами отражения метеоритов разных групп. Для 8 астероидов спектральный тип был определен впервые. Не для всех астероидов удалось подобрать подходящий метеоритный аналог, а также иногда наблюдалось несоответствие минералогическим свойствам вещества метеоритного вещества при похожих спектрах отражения. Это может быть вызвано как смешанным составом поверхностного вещества астероида, например, в результате столкновений с отличающимися по минералогии телами, так и неполнотой коллекций метеоритного вещества.

Кратко результат представлен в Табл. 12

Таблица 12 – Результаты Главы 1

Объект	Орбитальная группа	Спектральный тип по Толену (известный по др. источникам)	Установленный спектральный тип по Толену в рамках данной работы	Комментарий
11 Парфенопа	Главный Пояс	S	A-Q	Значительная ширина полосы поглощения у 1 мкм.
225 Генриетта	Внешняя часть Главного пояса	F	C-S	Смешанный состав
307 Ника	Главный Пояс	C	C	–
345 Терцидина	Главный Пояс	C	C	Наличие гидратированных силикатов
381 Мирра	Внешняя часть Главного пояса	C	C	–
482 Петрина	Главный Пояс	S	S	–
488 Креуса	Главный Пояс	C	C	–
712 Боливиана	Главный Пояс	C	C-S	Смешанный состав, наличие филлосиликатов
787 Москва	Главный Пояс	?	X	–
788 Гогенштейна	Главный Пояс	?	C-S	Смешанный состав поверхностного вещества
863 Бенкоэла	Внешняя часть Главного пояса	A	A	Наличие пироксенов / оливинов
1264 Летаба	Главный Пояс	C	C	Наличие гидросиликатов

Окончание Таблицы 12

4450 Пан	Группа Аполлона	?	C - S	Потенциально опасный, Контактный двойной, Наличие гидратированных силикатов
20826	Группа Аполлона	S	S	–
24445	Группа Аполлона	?	A-S	Наличие пироксенов/оливинов
68216	Группа Аполлона	S	S	Потенциально опасный, Наличие пироксенов/оливинов
93768	Марс-кроссер	?	S	–
112493	Марс-кроссер	?	S	–
337866	Группа Амура	S	S	Наличие пироксенов
468738	Группа Амура	?	C	Потенциально опасный, Наличие гидросиликатов
518810	Группа Аполлона	?	S-C	Потенциально опасный, Смешанный состав

ГЛАВА 2. СУБЛИМАЦИОННАЯ АКТИВНОСТЬ АСТЕРОИДОВ

2.1 Возможные механизмы активности астероидов и наблюдаемые эффекты

В настоящее время известно, что существуют так называемые активные астероиды, представляющие собой небесные тела, движущиеся по орбитам, характерным для астероидов, но, в то же время, демонстрирующие временную активность, подобную активности кометы [98].

Среди околоземных астероидов имеется небольшая доля «дремлющих», или «вымерших» комет, и проблемы, связанные с их изучением, существуют давно, так как они представляют собой малые тёмные тела, больше не образующие кому, что осложняет их обнаружение и наблюдение [99]. Другими объектами Солнечной системы, которые сочетают в себе свойства как астероидов, так и комет, являются кентавры. Однако орбитальные характеристики кентавров и вымерших комет существенно отличаются от таковых характеристик активных астероидов, находящихся в Главном поясе.

Считается, что активность может быть вызвана комбинацией нескольких различных механизмов (например, ударное событие, подвергающее подземный лед сублимации). Основной диагностический признак причины – сколько раз объект проявил активность. Например, единственное (не повторяющееся) событие, вероятно, происходит от ударного события, как проявляет себя астероид 596 Шейла. В 2010 году, 11 декабря, во время наблюдений в обсерватории Маунт-Леммон в рамках обзора неба Каталины (Аризона, США) было замечено, что яркость этого астероида увеличилась почти в 2 раза, кроме того, образовалась кометоподобная кома, и затем появились три пылевых хвоста [100] (Рис. 59). Однако несмотря на это столкновение, 596 Шейла продолжает демонстрировать более ранние значения абсолютной яркости и других характеристик, что позволяет предположить, что не произошло катастрофических изменений поверхности или существенной фрагментации. Вероятно, астероид остался практически

прежним, а в результате удара появились кратеры на поверхности и выброс пылевого облака, проявившегося как кометная активность [101].

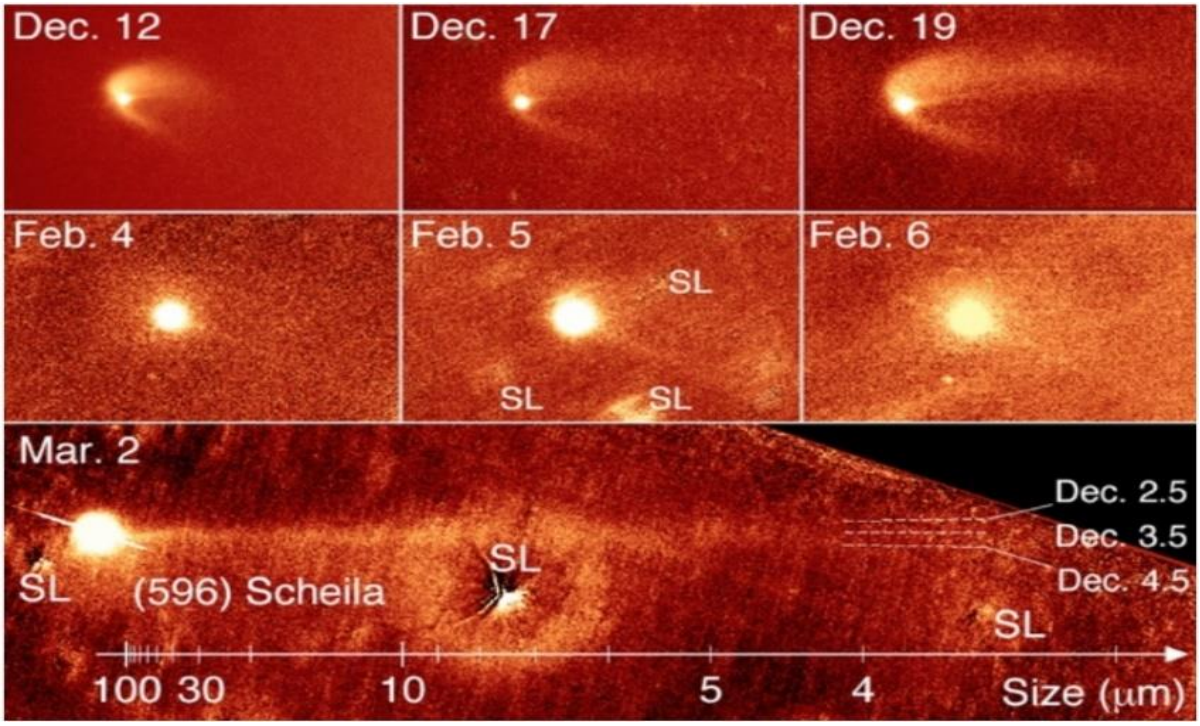

Рисунок 59 − Оптические изображения (596) Шейлы. Снимки были сделаны в 2010, 12, 17 и 19 декабря 2011 года 4 февраля (IAO), 5 (UH 2,2 м) и 6 (IAO) (слева направо в верхний правый угол) и 2011 марта 2 (Subaru; внизу). Верхнее и среднее изображения имеют стандартную ориентацию на небе: север вверху, а восток слева. Их поле зрения 3’5 × 5’8. Эти изображения были показаны в произвольном масштабе для усиления слабых структур. Фоновые звезды и галактики были удалены из исходных данных, хотя несколько ярких звезд (помеченных как "SL") не были стерты должным образом. Нижнее изображение было повернуто так, что хвост лежит горизонтально; поле зрения 3’9 × 13’4. Показан угол положения локуса пылевых частиц, выброшенных в декабре 2.5, 3.5 и 4.5 UT, и соответствующий радиус частиц [100]

Разрушение тела при быстром вращении может быть разовым катастрофическим событием или потенциально повторяющимся событием, если, например, вырывается только небольшой фрагмент, но родительское тело остается вблизи и становится причиной активности, как, например, в случае P2013/R3 [102]. (Рис. 60).

Текущая или периодическая активность, например, 7968 Эльст-Пизарро (Рис. 61) [103], наводит на мысль о сублимации или, в случае 3200 Фаэтона

[105], о термическом разрушении. Эти два последних механизма (сублимация и термическое разрушение) должны быть более вероятны, когда объект находится ближе к Солнцу, то есть в перигелии.

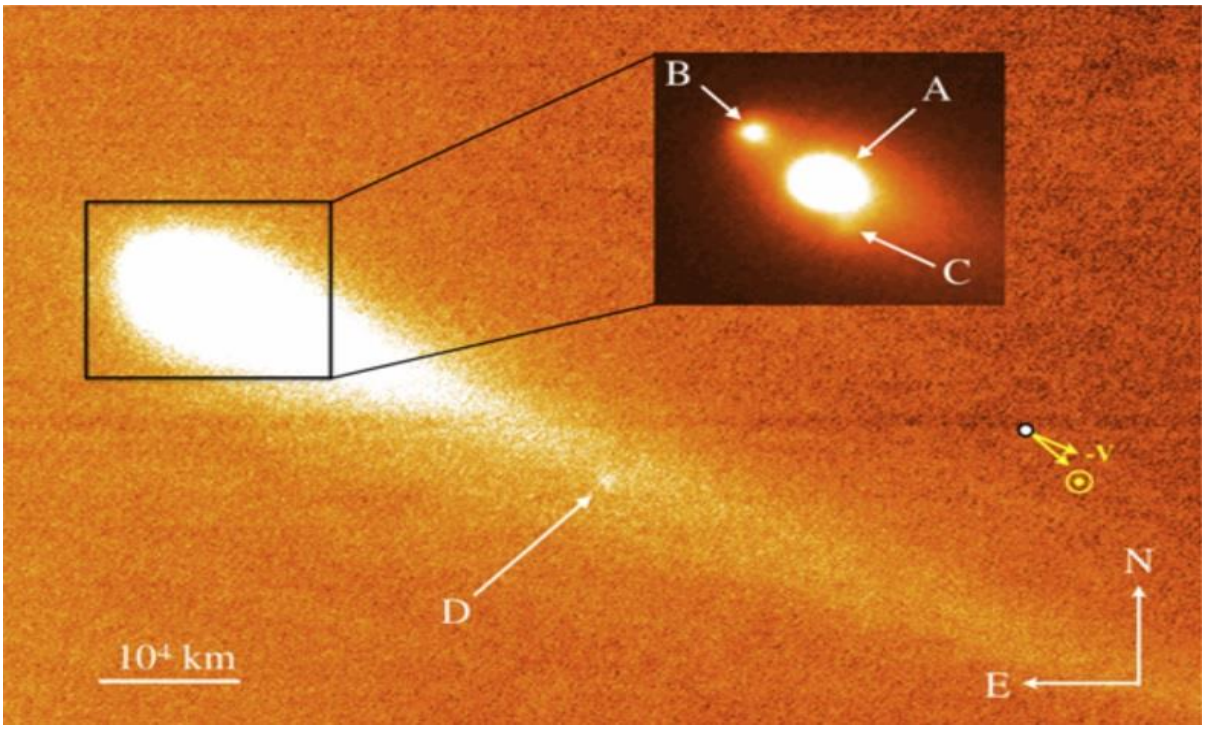

Рисунок 60 − Составлено из 22 снимков Keck в R-диапазоне, сделанных в 2013 году 02 октября с общим временем экспозиции 5720 с. Основные компоненты обозначены на вставке, а нижний компонент D также отмечен. Изображение имеет север сверху, восток слева. Углы положения антисолярного вектора (обозначены ⊙) и отрицательного вектора гелиоцентрической скорости (обозначены -V) показаны желтым цветом [102]

В работе К. Чандлера приведена статистика механизма возникновения кометоподобной активности на основании ее наблюдения у 36 тел. (Табл.13) [105].

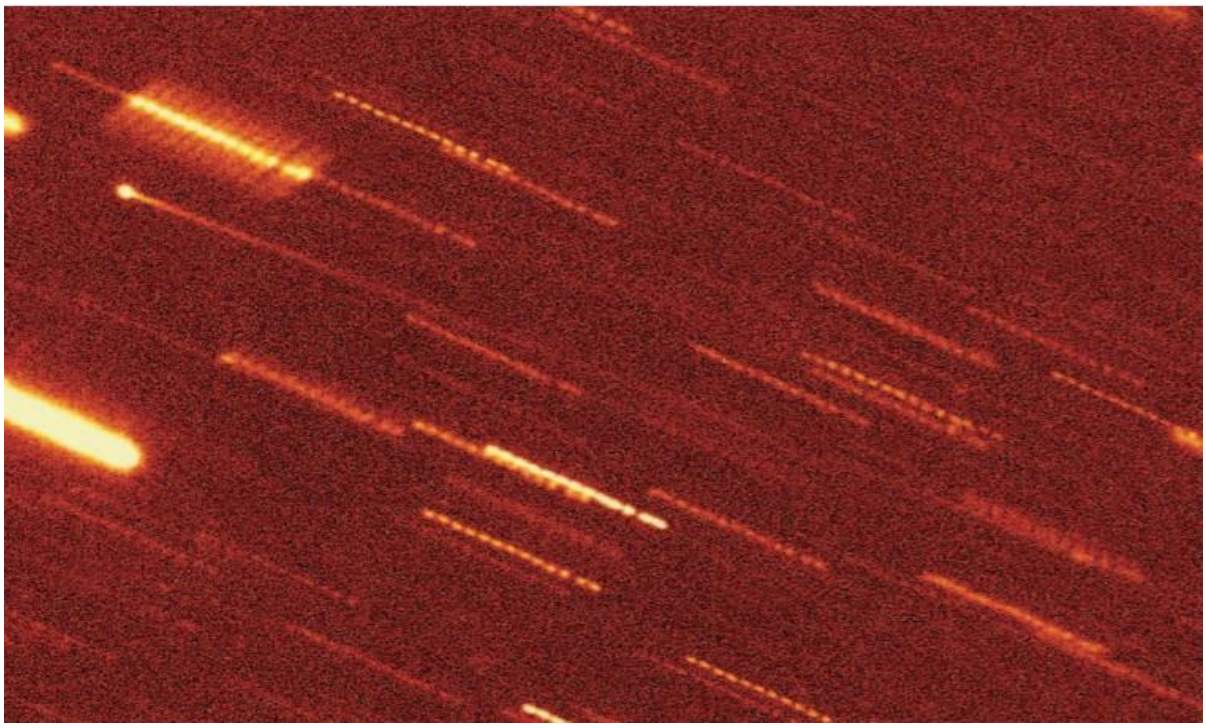

Рисунок 61 − Составное изображение R-диапазона 133P / Эльст-Пизарро от 2002 г. 7 сентября, наблюдения на 2,2-метровом телескопе Гавайского университета. Ядро находится в верхнем левом углу, а след пыли проходит по всему полю вниз и вправо. Размер изображения 2’5 на 3’5, север вверху и восток слева [103]

Таблица 13 − Статистика механизмов активности астероидов [105]

Подозреваемый механизм	Количество объектов	%
Сублимация	***15***	***44***
Разрушение из-за вращения	7	21
Столкновение	4	12
Термическое разрушение	1	3
Криовулканизм	1	3
Взаимодействие двойных астероидов	1	3
Неизвестно	5	15

Лидирующим механизмом по числу подтвержденных явлений является сублимационная активность астероида. Конечно, подобные находки кометоподобных тел в большинстве случаев интерпретировались как случайные события, связанные с «динамическим» загрязнением семейства астероидов атипичными ледяными объектами (например, вымершим ядром кометы), которые становятся активными только вследствие спорадических столкновений или гравитационного воздействия планет [106]. Однако частота событий склоняет к другой точке зрения, что свободный водяной лед первоначально широко распространен в недрах самих примитивных астероидов Главного пояса [107].

2.2 Сублимационная активность астероидов примитивных типов и влияние эксцентриситетов орбит этих тел

Начиная с сентября 2012 года, на телескопе обсерватории «Пик Терскол» (см. раздел 1.7.1) выполняется спектрофотометрия астероидов Главного пояса и АСЗ (астероидов, сближающихся с Землёй), с целью уточнения или определения таксономического класса объектов. Во время данной работы для астероидов 145 Адеона, 704 Интерамния, 779 Нина и 1474 Бейра были получены необычные результаты [107]. На спектрах отражения данных объектов имеется максимум рассеяния при 0,4-0,7 мкм, который вызван, предположительно, сублимационной активностью данных астероидов [108]. Для подтверждения замеченной особенности в 2016-2018гг были проведены повторные наблюдения астероидов 145, 704 и 779, кроме того, наблюдались кандидаты в активные астероиды, а именно 51 Немауза и 65 Кибела. Использовались как спектрофотометрические наблюдения (обсерватория «Пик Терскол»), UBVRI (или BVRI) – фотометрические (Крымская лаборатория ГАИШ, обсерватория Санглок). Подробнее об инструментах данных обсерваторий рассказано в разделе 1.7.1. Кроме того, использовались данные, полученные коллегами в обсерватории ТЮБИТАК [109]. Автор проводила наблюдения части данных, полученных на обсерватории «Пик

Терскол», а также обработку спектрометрических и фотометрических данных. Приведем краткие данные об этих астероидах.

2.2.1 Характеристики 145 Адеоны, 704 Интерамнии, 779 Нины, 51 Немаузы и 65 Кибелы

2.2.1.1 145 Адеона

Орбита 145 Адеоны имеет большую полуось a = 2,6745 а.е. и эксцентриситет e=0,1442 [55]. Схематично его орбита представлена на Рис. 62 [2].

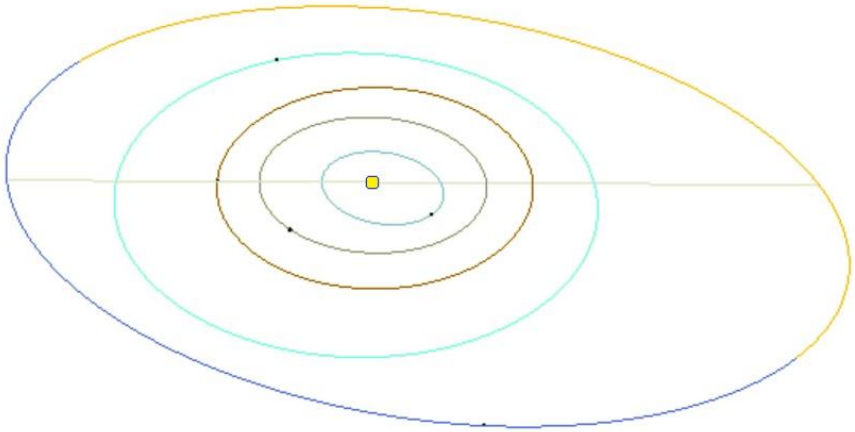

Рисунок 62− Приблизительная орбита 145 Адеоны. Синий / желтый указывают, где орбитальная плоскость объекта находится выше / ниже плоскости эклиптики, соответственно. Сплошные цветные дуги показывают орбиты планет. Серая линия показывает линию апсид, соединяющих точки перигелия и афелия вдоль главной оси орбиты объекта [2]

Диаметр астероида 127,783 км, геометрическое альбедо достаточно низкое – 0,061 [110], период вращения составляет 15,071 ч. [111]. Адеона возглавляет одноимённое семейство астероидов, являясь самым крупным его представителем [112]. Астероид 145 оценивается как представитель C-класса (Рис. 63) [14].

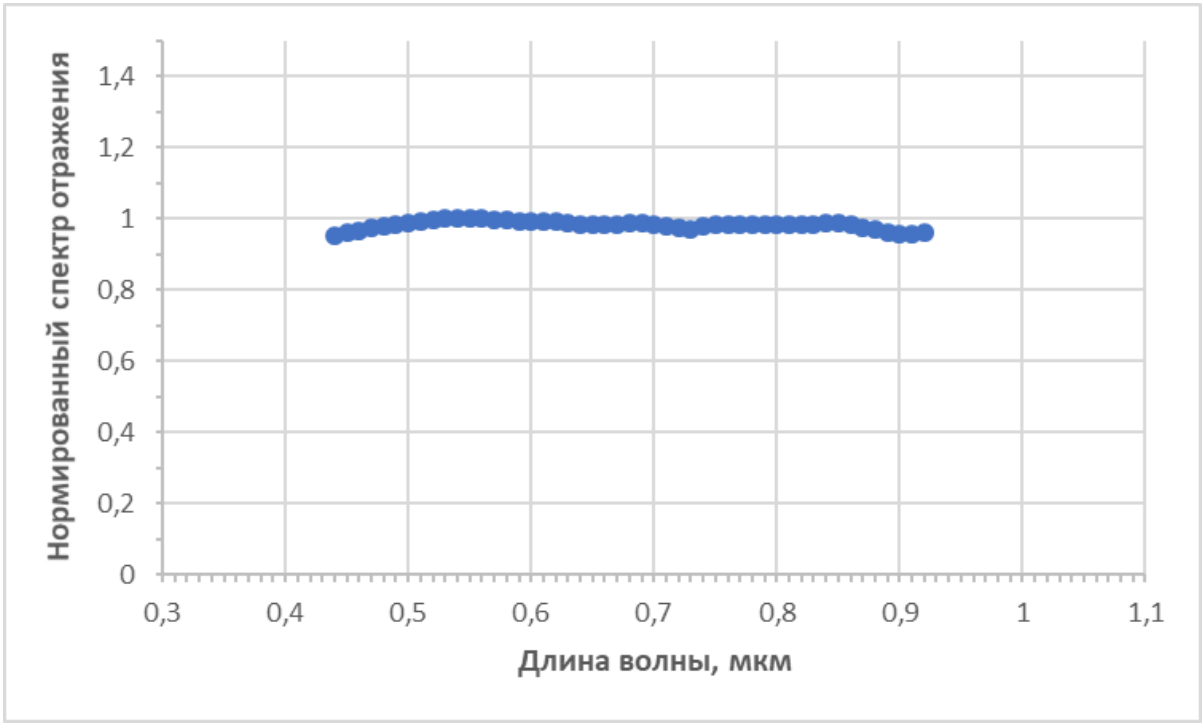

Рисунок 63 − Нормированный спектр отражения астероида145 Адеона по данным базы SMASS [28]

Отметим явно выраженную полосу поглощения с центром у 0,70 мкм. Её наличие подтверждает и работа [43] (Рис. 64). Вероятно, появление данной полосы вызвано переносом заряда $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$ [63] в гидратированных силикатных соединениях. В работе [113] указывается также присутствие полос поглощения у 0,37 и 0,46 мкм, вызванные, вероятно, обменными электронными взаимодействиями в парах соседних катионов Fe^{3+}- Fe^{3+} или Fe^{2+} - Fe^{2+}.

Японский инфракрасный спутник Akari выявил наличие на астероиде Адеона гидратированных минералов, а именно наличие полосы поглощения на 2,76 мкм [114].

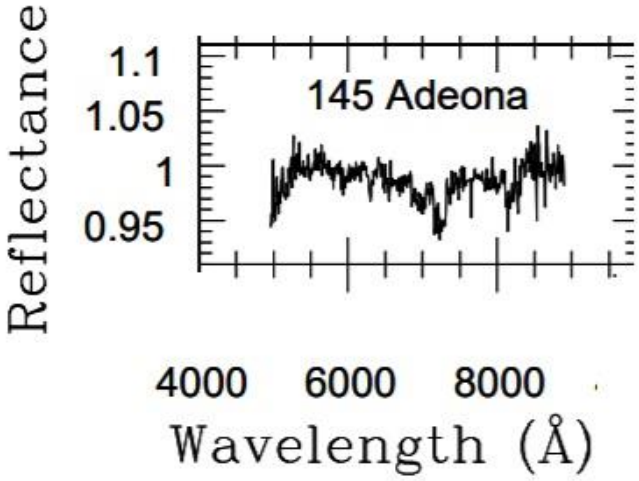

Рисунок 64 − Нормированный спектр отражения астероида 145 Адеона по данным работы [43]

2.2.1.2 704 Интерамния

Орбита 704 Интерамнии имеет большую полуось a = 3,0579 а.е. и эксцентриситет e=0,1547 [56]. Схематично его орбита представлена на Рис. 65 [2].

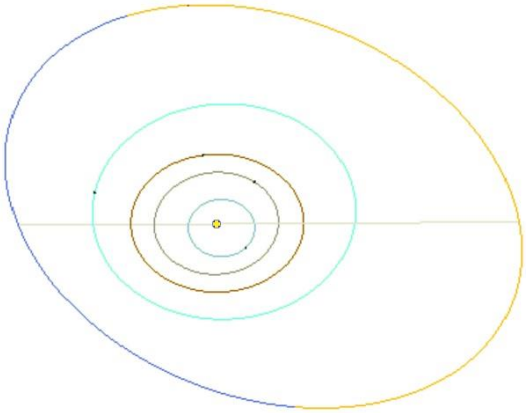

Рисунок 65 − Приблизительная орбита 704 Интерамнии. Синий / желтый указывают, где орбитальная плоскость объекта находится выше / ниже плоскости эклиптики, соответственно. Сплошные цветные дуги показывают орбиты планет. Серая линия показывает линию апсид, соединяющих точки перигелия и афелия вдоль главной оси орбиты объекта [2]

Диаметр астероида 306,313 км, геометрическое альбедо – 0,078, период вращения – 8,727 ч [109]. Спектральный класс данного астероида – F (по

Толену), или B (по Бинзелю) [14] (Рис. 66). Это одно из самых крупных тел в Главном поясе, но оно не связано с семейством астероидов.

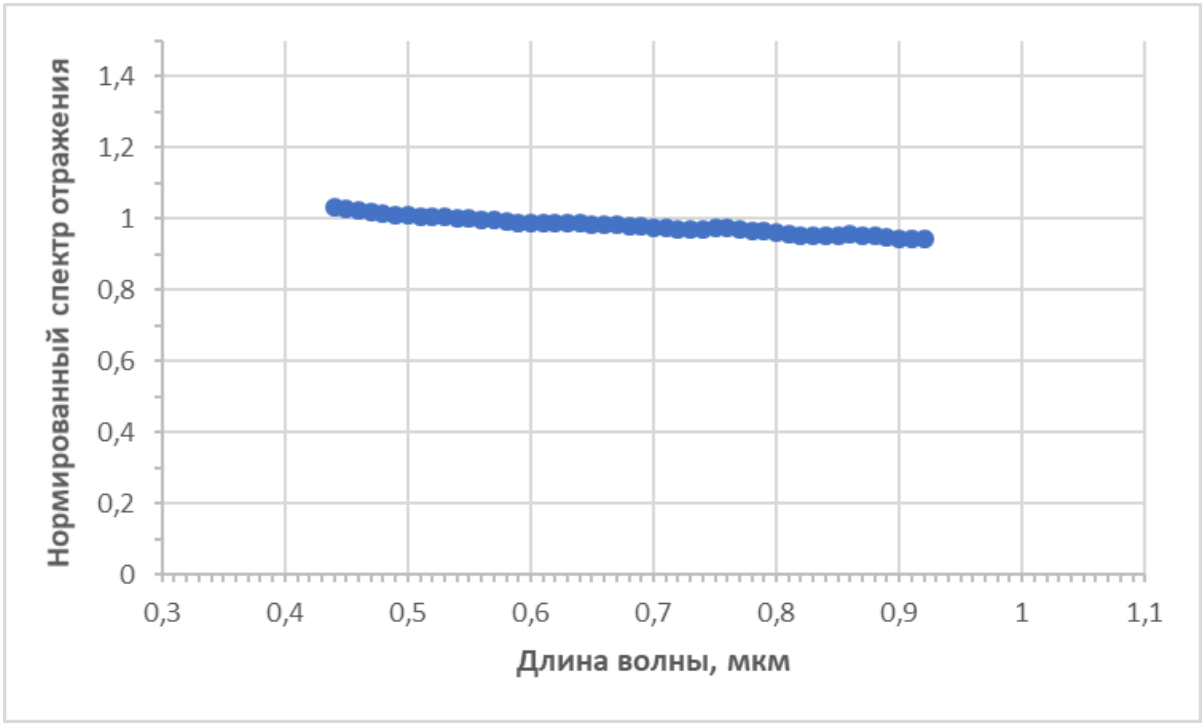

Рисунок 66 − Нормированный спектр отражения астероида 704 Интерамния по данным базы SMASS [28]

Поляриметрические наблюдения показывают, что этот объект обладает специфическими свойствами поверхности. Оптическая однородность реголита микроструктур поверхности рассматривается как возможное объяснение наблюдаемых поляриметрических свойств (особая зависимость степени поляризации от длин волны) [115].

В работе [116] отмечается сильная оптическая особенность на 3 мкм, которая связана с наличием гидратированных силикатов на поверхности астероида. Филлосиликаты (или «глинистые минералы») образуются в средах, где безводная порода и жидкая вода находятся в контакте, и варьируются от серпентина с двумя группами OH на Si до глин (например, талька) с одним OH на Si [117]. Присутствие данной полосы поглощения подтверждает и спутник AKARI, отмечая её около 2,7 мкм [114].

2.2.1.3 779 Нина

Орбита 779 Нины имеет большую полуось a= 2,663 а.е. и эксцентриситет e=0,2277 [56]. Схематично его орбита представлена на Рис. 67 [2].

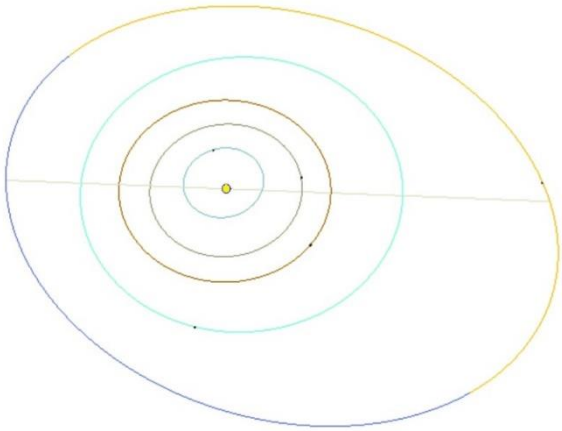

Рисунок 67 − Приблизительная орбита 779 Нины. Синий / желтый указывают, где орбитальная плоскость объекта находится выше / ниже плоскости эклиптики, соответственно. Сплошные цветные дуги показывают орбиты планет. Серая линия показывает линию апсид, соединяющих точки перигелия и афелия вдоль главной оси орбиты объекта [2]

Диаметр астероида 80,572 км, геометрическое альбедо – 0,157, период вращения составляет 11,186 ч. [56]. Спектральный класс данного астероида – X (Рис. 68) [14].

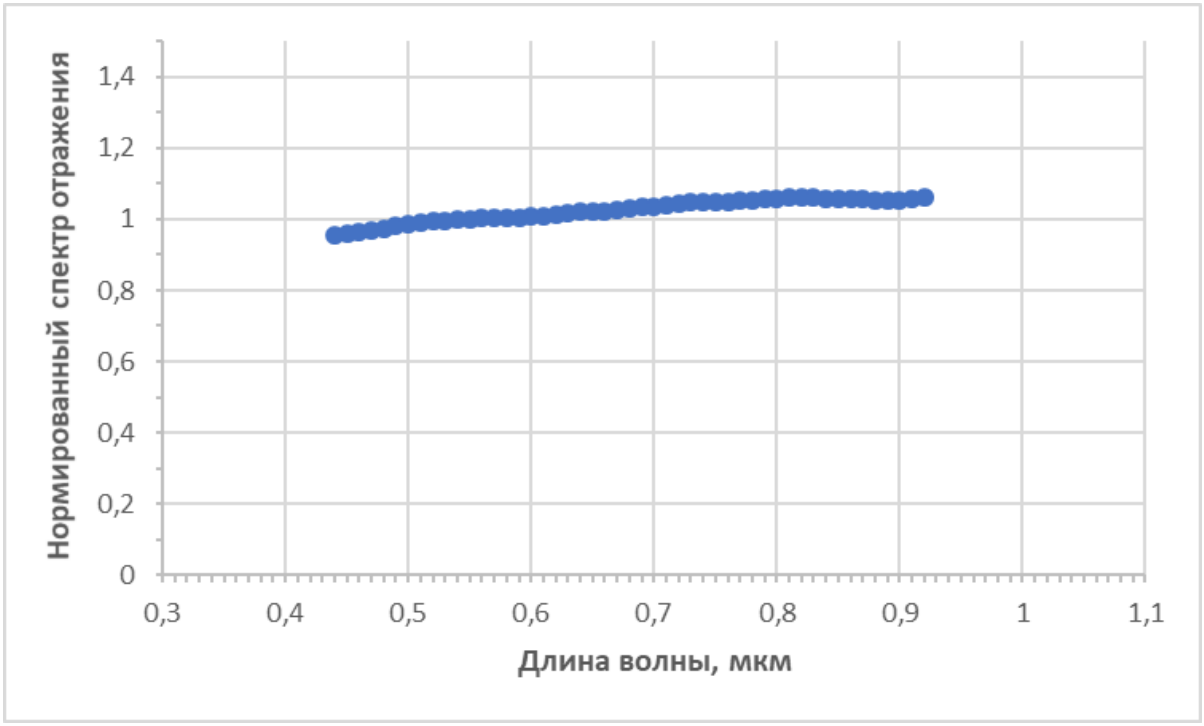

Рисунок 68 − Нормированный спектр отражения астероида 779 Нина по данным базы SMASS [28]

В работе [113] отмечается присутствие полос поглощения на 0,36–0,39, 0,40–0,47 и 0,50–0,85 мкм, вызванные переносом электронов в Fe^{3+}, Fe^{2+} – Fe^{3+}.

2.2.1.4 51 Немауза

Орбита 51 Немаузы имеет большую полуось a= 2,365 а.е. и эксцентриситет e=0,0678 [56]. Схематично его орбита представлена на Рис. 69 [2].

Диаметр астероида 147,86 км, геометрическое альбедо – 0,0928, период вращения составляет 7,783 ч. [56]. Спектральный класс данного астероида – Ch (Рис. 70) [14].

В работе [43] отмечается наличие полосы поглощения на 0,7 мкм, которая была замечена дважды при разных наблюдениях, что является показателем надежности данных (Рис. 71).

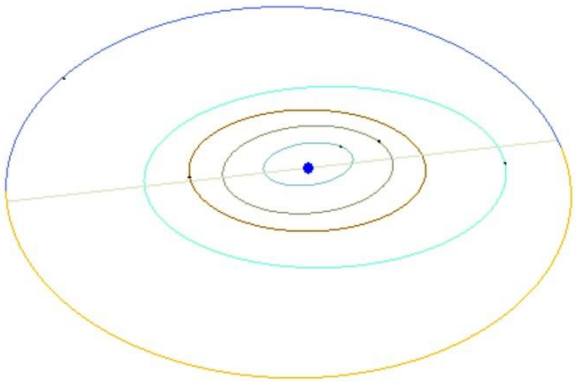

Рисунок 69 – Приблизительная орбита 51 Немаузы. Синий / желтый указывают, где орбитальная плоскость объекта находится выше / ниже плоскости эклиптики, соответственно. Сплошные цветные дуги показывают орбиты планет. Серая линия показывает линию апсид, соединяющих точки перигелия и афелия вдоль главной оси орбиты объекта [2]

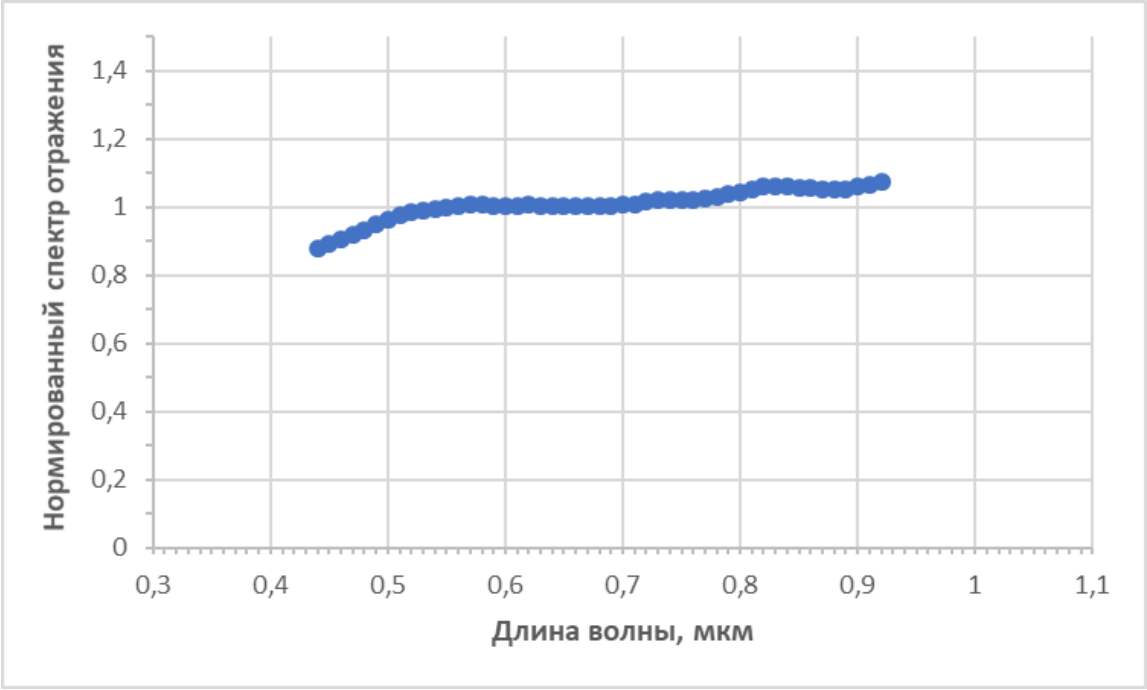

Рисунок 70 – Нормированный спектр отражения астероида 51 Немауза по данным базы SMASS [28]

Также спектр отражения имеет достаточно сильную полосу поглощения гидросиликатов и водяного льда на 3 мкм [118], что подтверждает исследования спутника AKARI, выделяющего эту полосу около 2,7 мкм. Глубина полосы крайне велика (47%) [114].

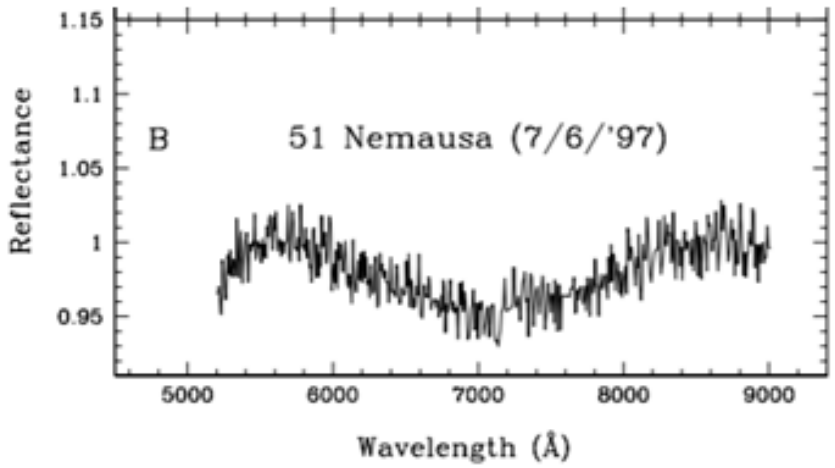

Рисунок 71 − Нормированный спектр отражения астероида 51 Немауза [40]

2.2.1.5 65 Кибела

Орбита 65 Кибелы имеет большую полуось a= 3,426 а.е. и эксцентриситет e=0,1098 [56]. Схематично его орбита представлена на Рис. 72 [2]. Диаметр астероида 237,26 км, геометрическое альбедо – 0,0706, период вращения составляет 6,082 ч. [120].

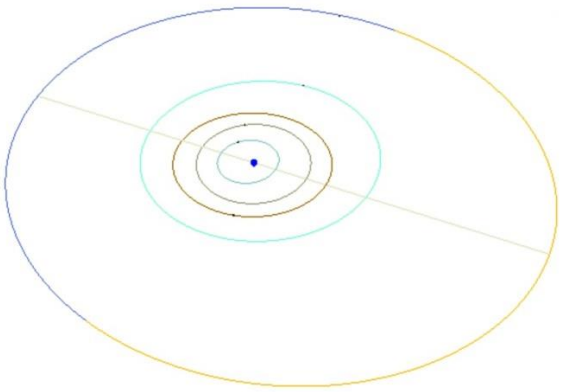

Рисунок 72 − Приблизительная орбита 65 Кибелы. Синий / желтый указывают, где орбитальная плоскость объекта находится выше / ниже плоскости эклиптики, соответственно. Сплошные цветные дуги показывают орбиты планет. Серая линия показывает линию апсид, соединяющих точки перигелия и афелия вдоль главной оси орбиты объекта [2]

Спектральный класс данного астероида – P (Рис. 73) [14]. Данный астероид возглавляет одноименное семейство [119].

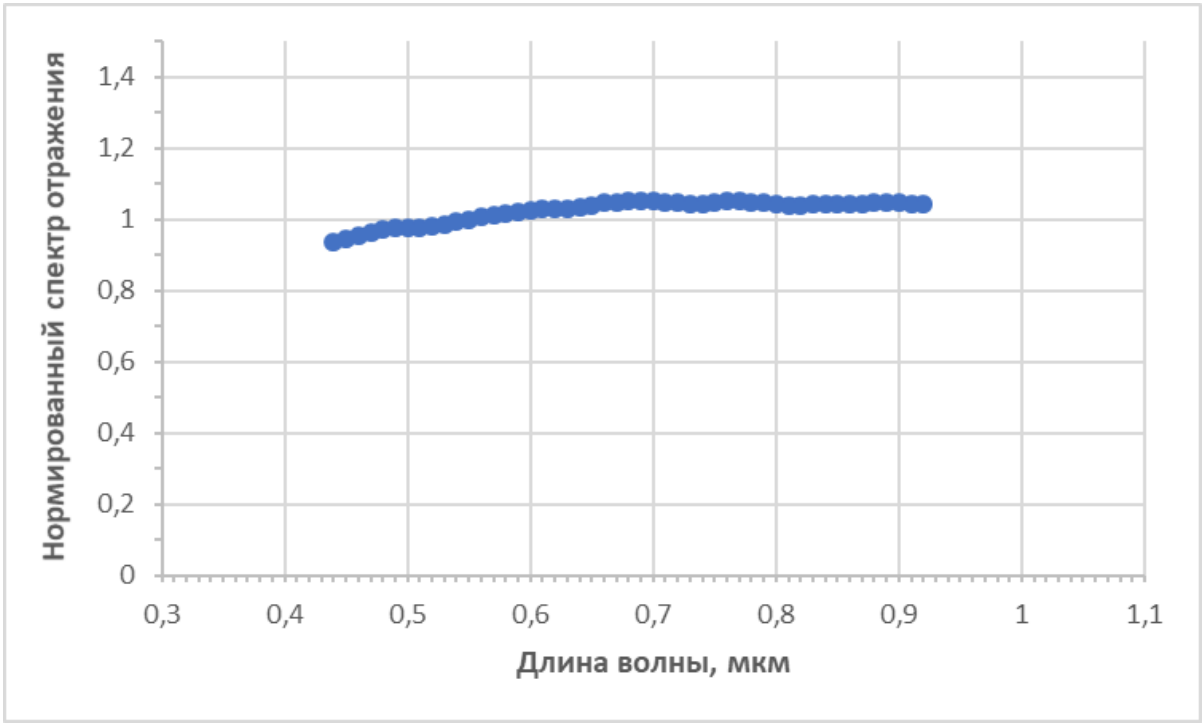

Рисунок 73 – Нормированный спектр отражения астероида 65 Кибела по данным базы SMASS [28]

В работе [43] отмечается возможное присутствие полосы поглощения у 0,6 мкм, однако глубина полосы слишком мала по сравнению с шумом, поэтому наличие этой особенности пока уточняется (Рис. 74).

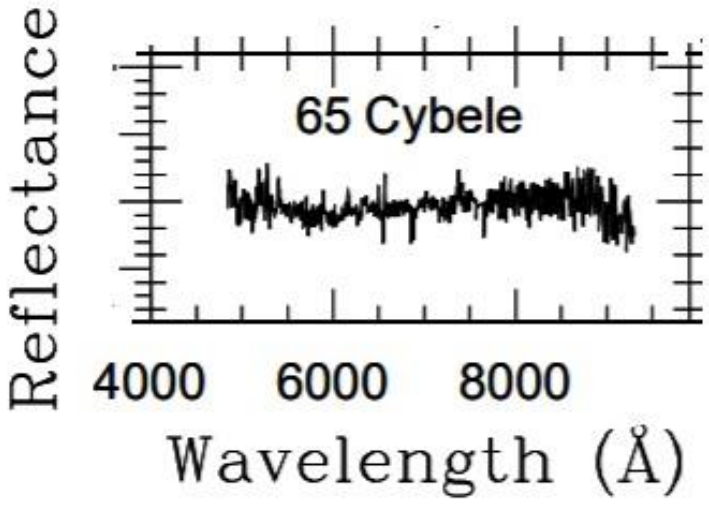

Рисунок 74 – Нормированный спектр отражения астероида 65 Кибела [43]

Кроме данной возможно присутствующей полосы поглощения работы [114], [116] и [121] указывают на наличие полосы поглощения, вызванной наличием гидросиликатов и водяного льда, у 2,7-3,1 мкм.

2.2.2 Спектры отражения астероидов 145 Адеоны, 704 Интерамнии, 779 Нины, 51 Немаузы и 65 Кибелы и проявление сублимационной активности

При работе над данным разделом диссертации использованы следующие публикации автора, в которых, согласно «Положению о присуждении ученых степеней в МГУ», отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

- *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 – 2019 – Т.53, №4, – С. 273- 290. [122]
- *Busarev V. V. et al.* 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. [118]
- *Бусарев В. В.,* ***Щербина М. П.****, Кохирова Г. И.* и др. Подтверждение сублимационной активности астероида 704 Интерамния // ДАН Республики Таджикистан. — 2018. — Т. 61, № 1. — С. 27–37. [123]

2.2.2.1 145 Адеона

В сентябре 2012 года с помощью оборудования Терскольского филиала ИНАСАН «Пик Терскол» были проведены спектрофотометрические наблюдения астероида 145 Адеона. Наблюдательные параметры представлены в Прил. С. Рассчитанный спектр отражения представлен на Рис. 75 [108].

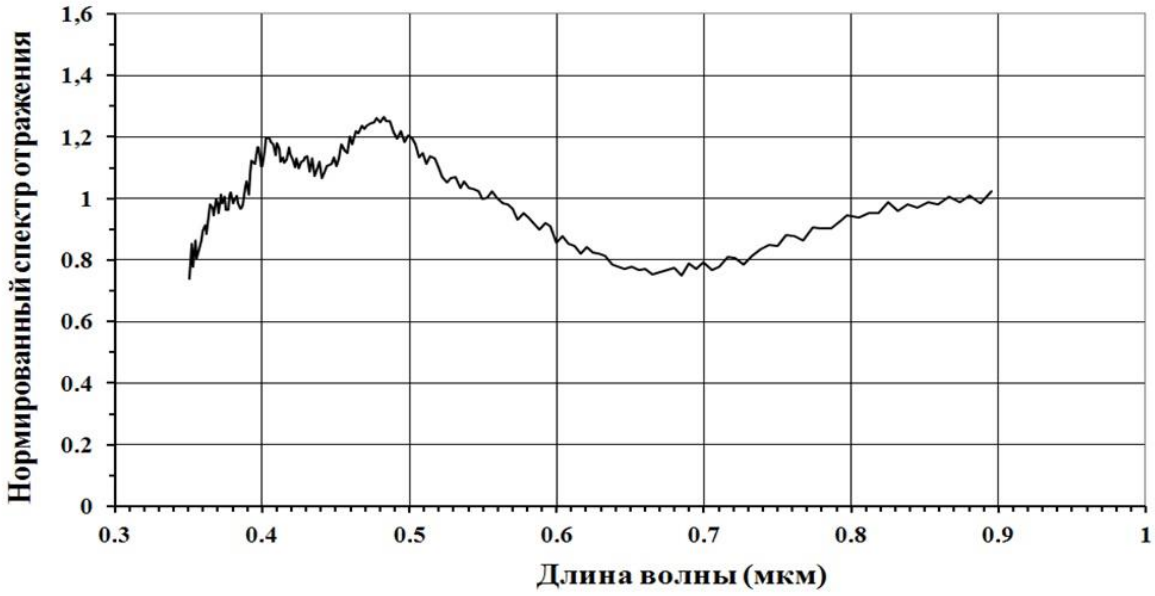

Рисунок 75 − Нормированный (на значение при 0,55 мкм) спектр отражения астероида145 Адеона (2012.09.14). Данный спектр является результатом усреднения двух последовательных спектров [108]

Повторные наблюдения были проведены с февраля по апрель 2018 г. в Крымской обсерватории ГАИШ МГУ (UBVRI или BVRI – фотометрия). Наблюдательные параметры представлены в Прил. С.

Рассчитанные спектры отражения представлены на Рис. 76-78 (a). Для дополнительного контроля устойчивости атмосферы и оценки корректности полученных результатов на одном кадре выбиралась непеременная звезда, расположенная недалеко от астероида. На Рис. 76-78 (b) представлены нормированные интенсивности света этих звезд.

Согласно Рис. 76-78, у астероида наблюдался значительный рост спектральной отражательной способности в диапазоне ~ 0,4-0,5 мкм, что является повторением наблюдаемого эффекта в 2012 г (Рис. 75).

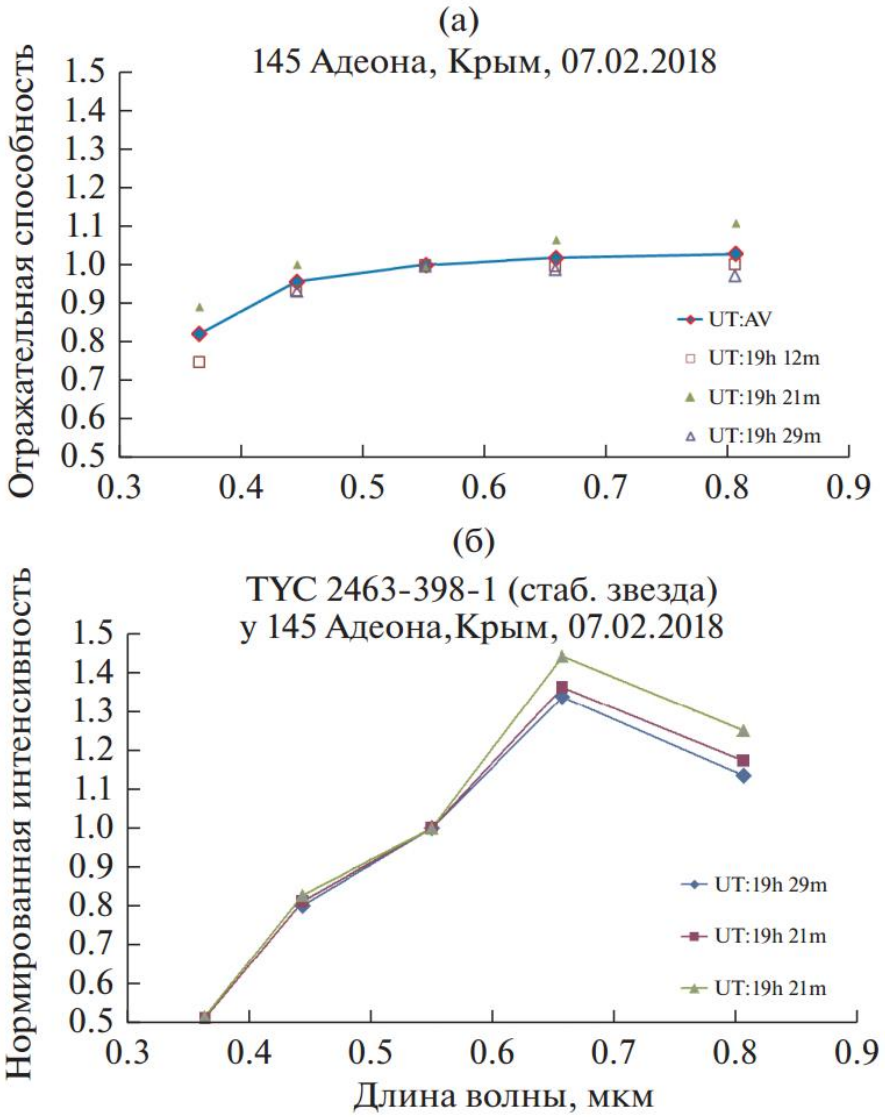

Рисунок 76 − (А) Усредненная и нормированная отражательная способность астероида 145 Адеона (непрерывная линия) по *UBVRI* –данным, 2018.02.07; (В) Усредненные и нормированные зависимости величин интенсивности для непеременной звезды TYC 2463-398-1, 2018.02.07;

На Рис. 76 (а) и 77 (а) эти изменения наибольшие. Заметим, что в данный период это ближайшие к моменту прохождения перигелия (11.02.2018) наблюдения.

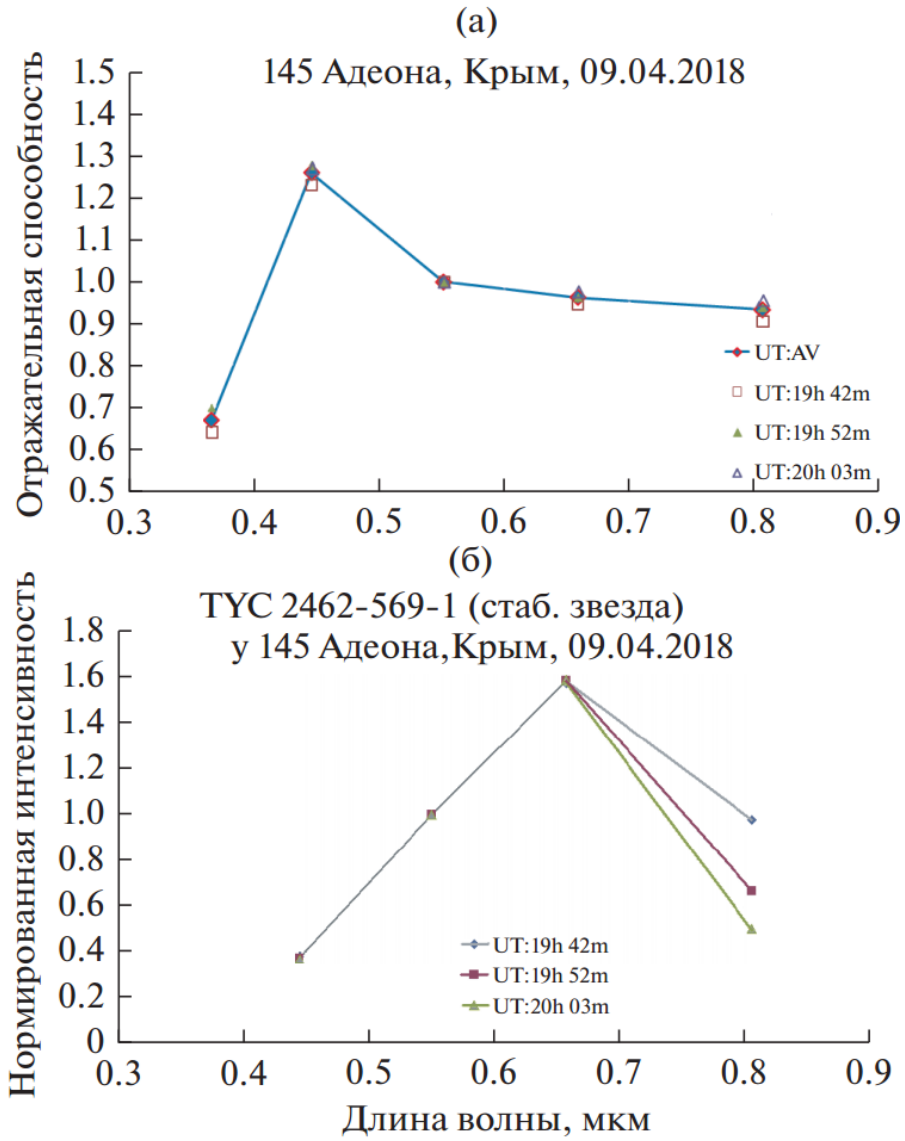

Рисунок 77 − (А) Усредненная и нормированная отражательная способность астероида 145 Адеона (непрерывная линия) по *UBVRI* –данным, 2018.04.09; (В) Усредненные и нормированные зависимости величин интенсивности для непеременной звезды TYC 2462-569-1, 2018.04.09.

Кроме данных фотометрических наблюдений в апреле и июне 2018 года были проведены спектрофотометрические наблюдения на телескопе РТТ-150 (1,5 м) обсерватории ТЮБИТАК [109]. На Рис. 79 представлены спектры отражения, полученные после прохождения астероидом перигелия.

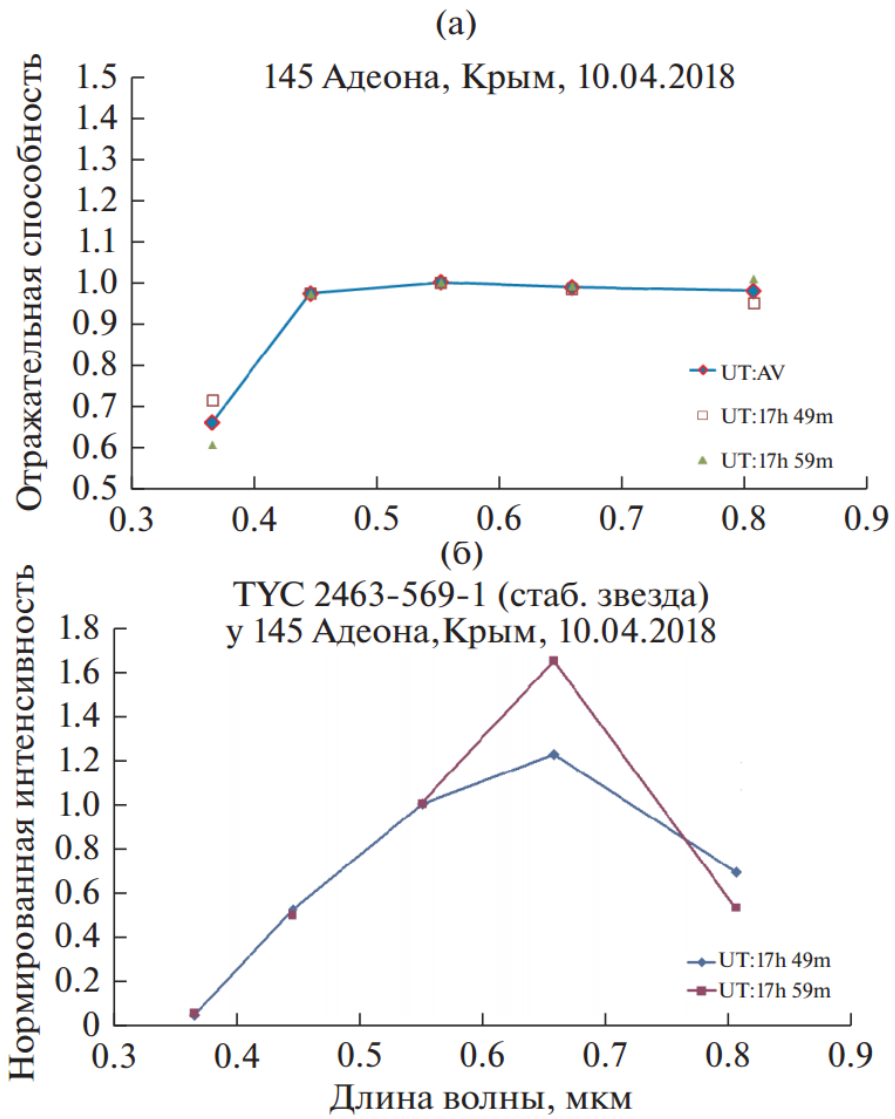

Рисунок 78 − (А) Усредненная и нормированная отражательная способность астероида 145 Адеона (непрерывная линия) по *UBVRI* –данным, 2018.04.10; (В) Усредненные и нормированные зависимости величин интенсивности для непеременной звезды TYC 2462-569-1, 2018.04.10.

Стоит отметить отличие наклона континуума спектра, характерного скорее для таксономического класса D или T, что может быть объяснено присутствием пылевой компоненты в коме из частиц водяного льда. Наблюдательные характеристики также даны в приложении С.

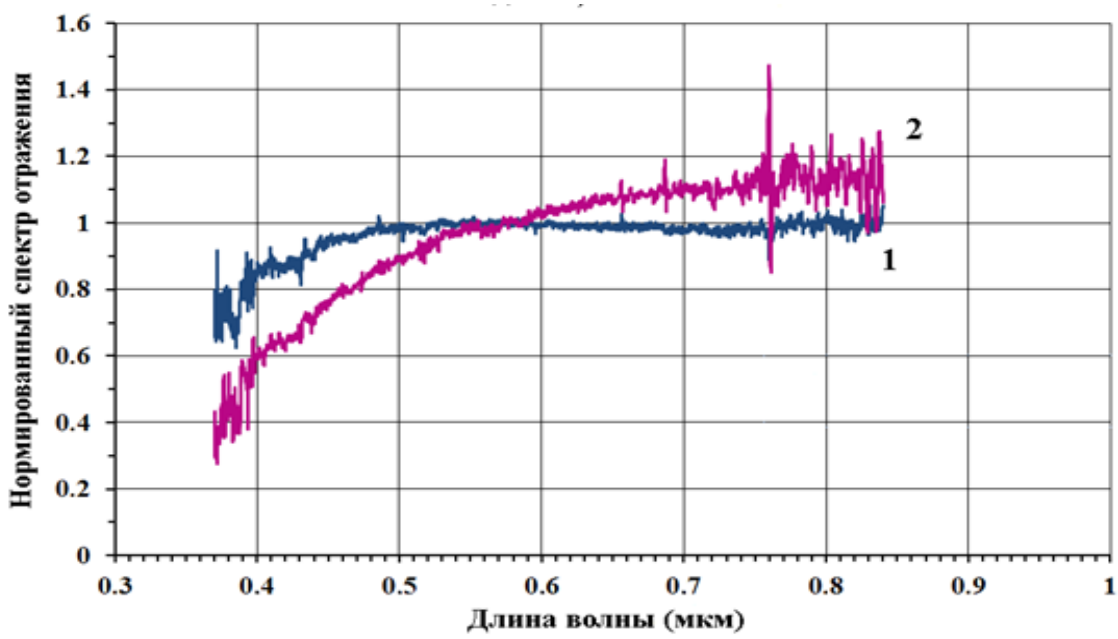

Рисунок 79 − Нормированные (на значение при 0,55 мкм) спектры отражения астероида 145 Адеона, получены в обсерватории ТЮБИТАК 12 апреля (1) и 13 июня (2) 2018 г. после прохождения астероидом перигелия

2.2.2.2 704 Интерамния

В сентябре 2012 года с помощью оборудования Терскольского филиала ИНАСАН «Пик Терскол» были проведены спектрофотометрические наблюдения астероида 704 Интерамния.

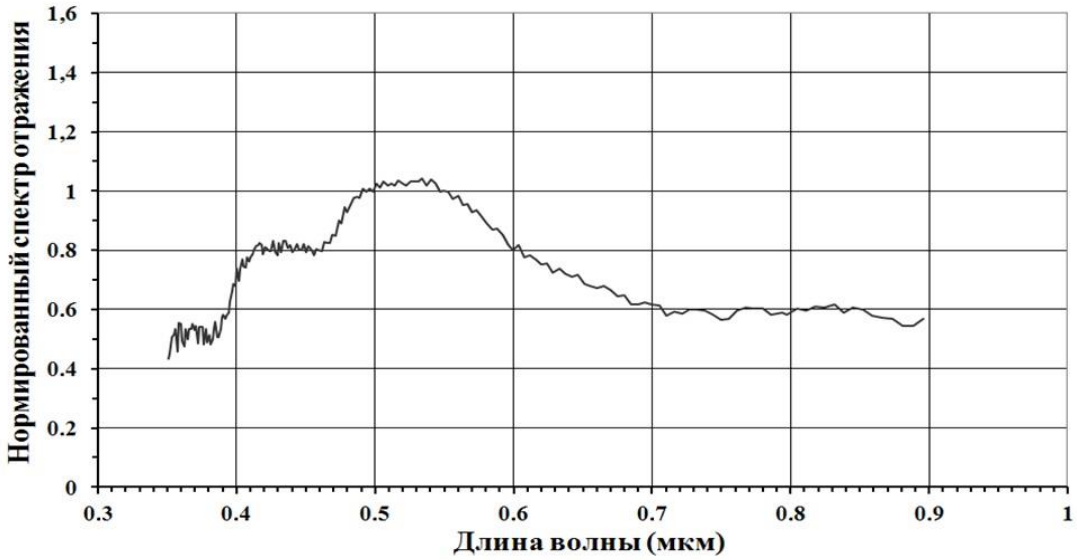

Рисунок 80 − Нормированный спектр отражения астероида 704 Интерамния (2012.09.13 г.), являющийся результатом усреднения 5 последовательных спектров [108]

Наблюдательные параметры представлены в Прил. С. Рассчитанный спектр отражения представлен на Рис. 80 [108]. Повторные наблюдения при прохождении перигелия были проведены в 2017 г. с помощью спектрофотометрических и *UBVRI* (или *BVRI*) – фотометрических наблюдений на обсерваториях «Пик Терскол», «Крымская обсерватория ГАИШ МГУ» и ИААН РТ, Санглок (см раздел 1.5.1). Наблюдательные Рассчитанные спектры отражения представлены на Рис. 81-83.

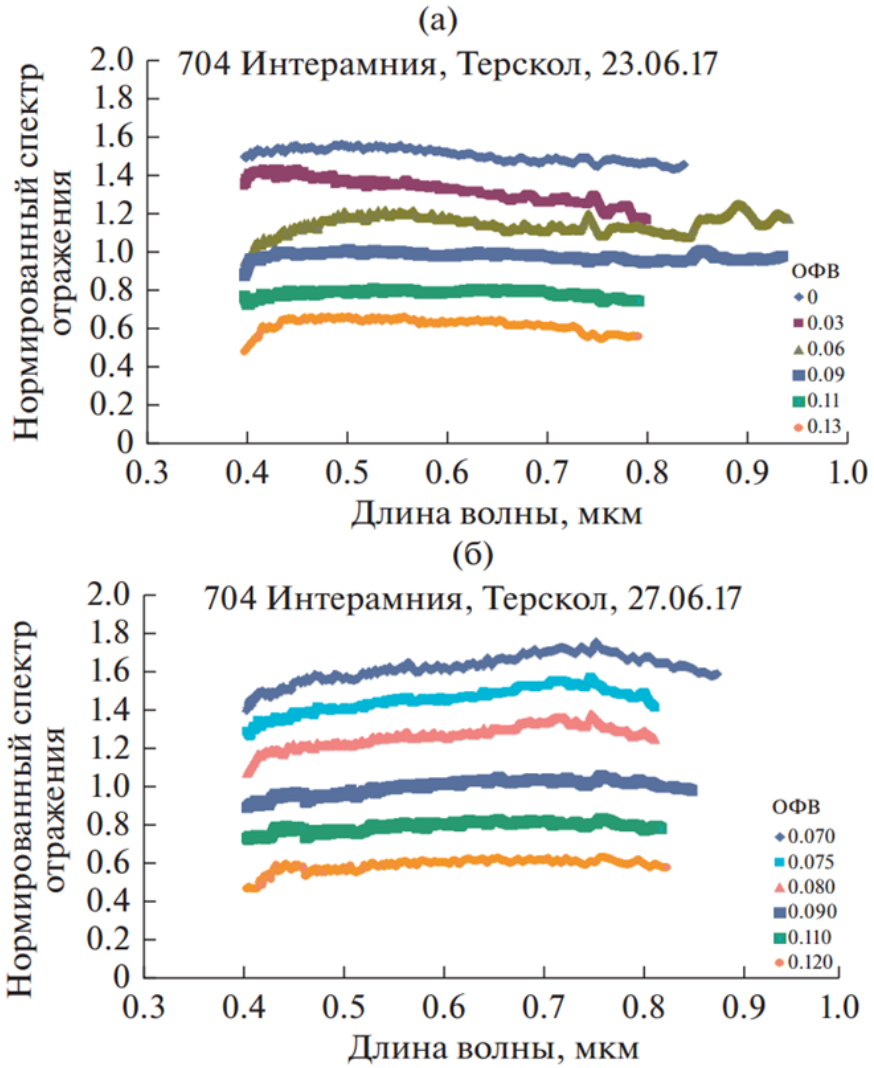

Рисунок 81 − (А): Нормированные спектры отражения астероида 704 Интерамния при близких значениях относительной фазы вращения 23.06.2017 (то есть за 4 месяца до прохождения перигелия); (В): Нормированные спектры отражения астероида 704 Интерамния 27.06.2017 со значениями относительной фазы вращения, практически совпадающими на (А)

Как показывает имеющийся на спектрах отражения пик около 0,4-0,45 км (Рис. 81), подтверждающий обнаруженный эффект активности в 2012 г. (Рис. 80), даже за 4 месяца до прохождения перигелия астроид проявляет сублимационную активность.

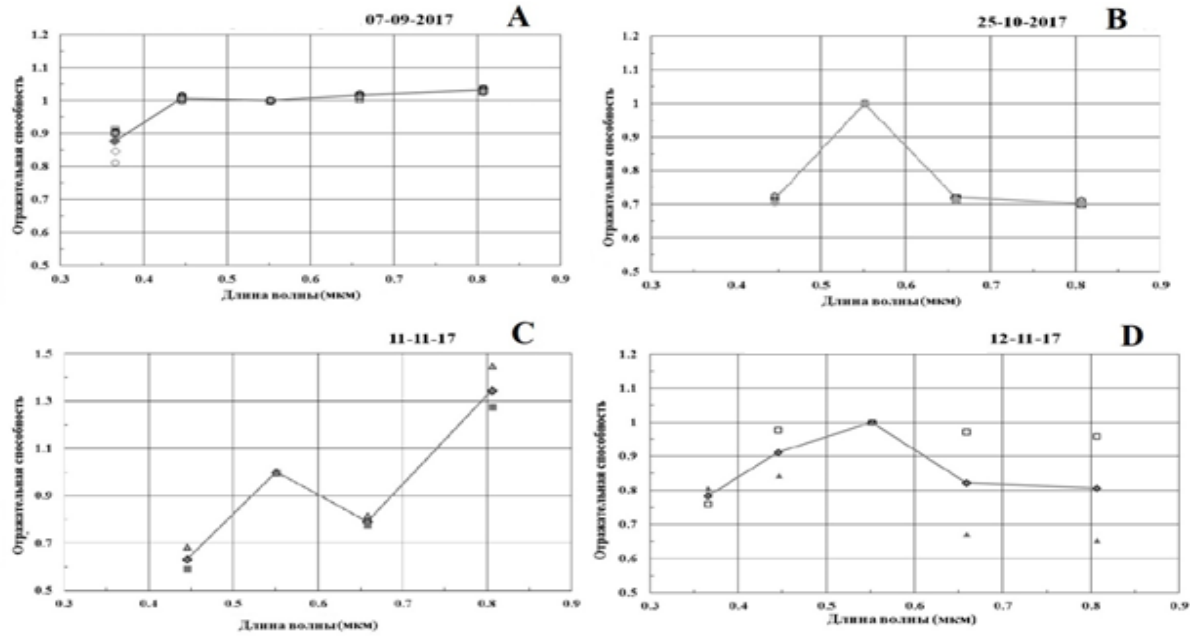

Рисунок 82 − (A,B,C,D). Усредненная и нормированная отражательная способность астероида 704 Интерамния (непрерывная линия) в 2017 г. по *UBVRI* (или *BVRI*) – данным. Близкие по времени (десятки секунд) величины отражательной способности изображены разными символами

В 2017 году астероид 704 Интерамния проходил перигелий 24 октября, поэтому на Рис.82-83 представлены как непосредственно до прохождения, так и сразу же после. Обратим внимание, что более ярко максимум отражательной способности у 0,55 мкм выражен рядом с датой прохождения (Рис. 82 (B) и (C)). Важно отметить, что были получены в разных обсерваториях похожие спектры отражения, что является дополнительным подтверждением существования активности астероида, а не результатом влияния атмосферы и приборных погрешностей.

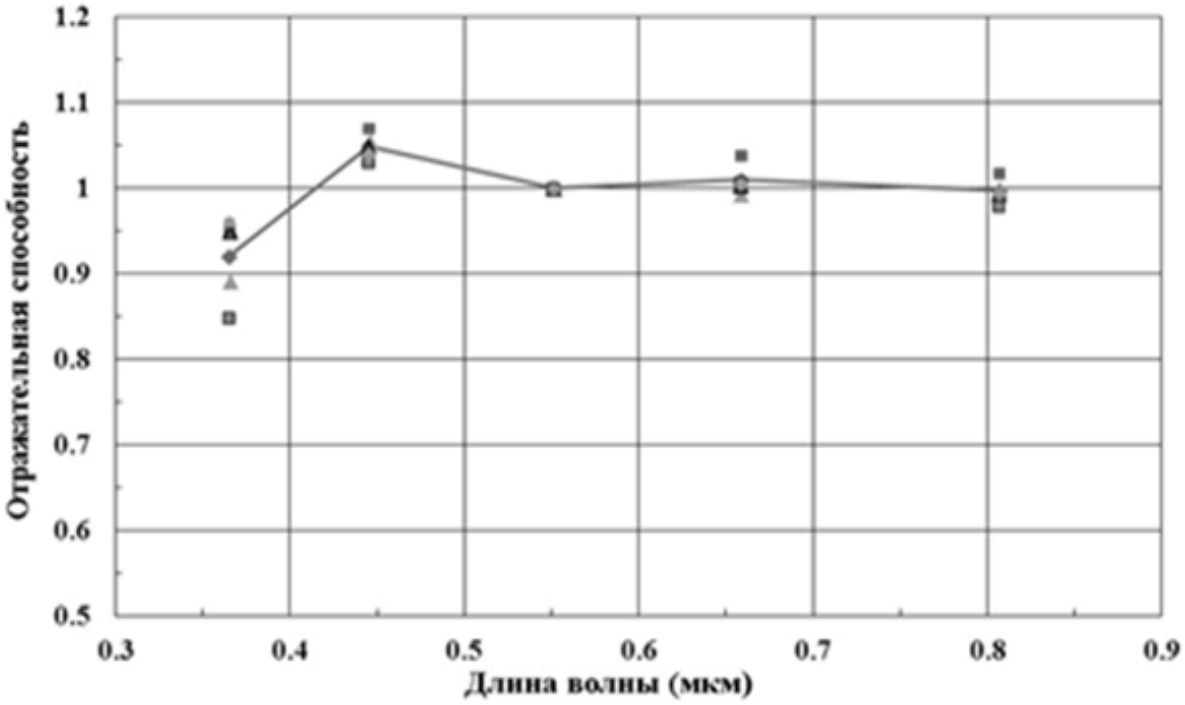

Рисунок 83 − Усредненная и нормированная отражательная способность астероида 704 Интерамния (непрерывная линия) в 2017 г. по *UBVRI* – данным, 24.10.2017, Санглок. Близкие по времени (десятки секунд) величины отражательной способности изображены разными символами

2.2.2.3 779 Нина

В сентябре 2012 года с помощью оборудования Терскольского филиала ИНАСАН «Пик Терскол» были проведены спектрофотометрические наблюдения астероида 779 Нина. Наблюдательные параметры представлены в Прил. С. Рассчитанный спектр отражения представлен на Рис. 84 [108].

К сожалению, в сентябре 2016 г. при прохождении астероидом перигелия наблюдения на обсерватории «Пик Терскол» проводились при низком положении объекта над горизонтом (воздушная масса ≈ 2,5), потому нельзя считать надёжным подтверждением сублимационной активности полученные данные [108] (Рис. 85).

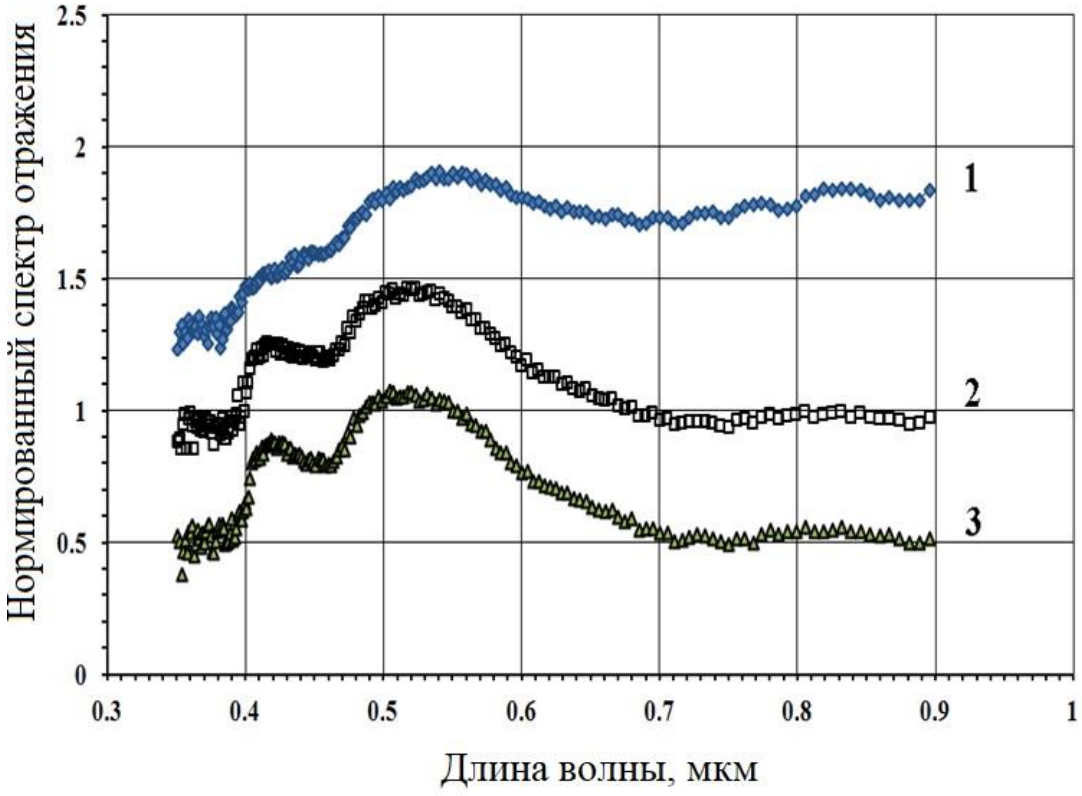

Рисунок 84 − Нормированные усреднённые спектры отражения астероида 779 Нина, полученные 2012.09.13 на интервале времени, соответствующем ~0,5 периода вращения астероида; спектры отражения 1 и 2 сдвинуты вдоль вертикальной оси для сравнения) [108]

Однако отметим информацию об изменении отражательной способности данного астероида, представленную в нескольких статьях 1991 года. Б. Вернер зафиксировал уменьшение звездной величины астероида Нина на $0,5\text{-}0,9^{m}$ (что означает увеличение яркости), чем было рассчитано ранее [124]. Данное изменение значения звездной величины (на 0.5^{m}) было подтверждено фотометрическими измерениями, проведенными Р. Бинзелом. Опираясь на эфемериды, можно утверждать, что в период с августа по сентябрь 1990 г. астероид 779 Нина только прошел перигелий. По данным 2012 года такой рост интегральной яркости может быть вызван сублимационной активностью с образованием комы.

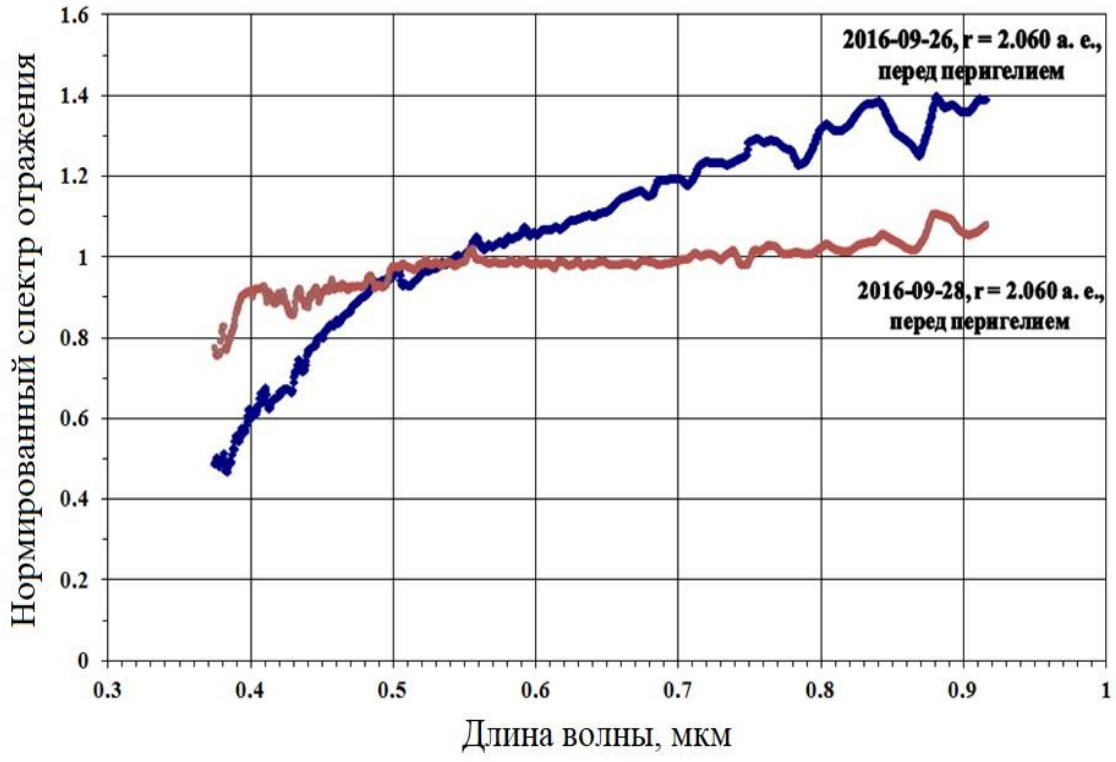

Рисунок 85 − Нормированные спектры отражения астероида 779 Нины, полученные в 2016 г. при нахождении астероида в ближайшей окрестности перигелия при близких значениях ОФВ (отличающихся на ~30%)

2.2.2.4 51 Немауза

Спектрофотометрические наблюдения астероида 51 Немауза были проведены на обсерватории «Пик Терскол» в 2016 году (Приложение С, Рис. 86).

В коротковолновой части верхнего спектра имеются слабые признаки максимума рассеяния, на нижних спектрах различимы резкие изменения градиента. Такие перепады на спектральной характеристике не свойственны относительно медленно вращающимся астероидам примитивного типа.

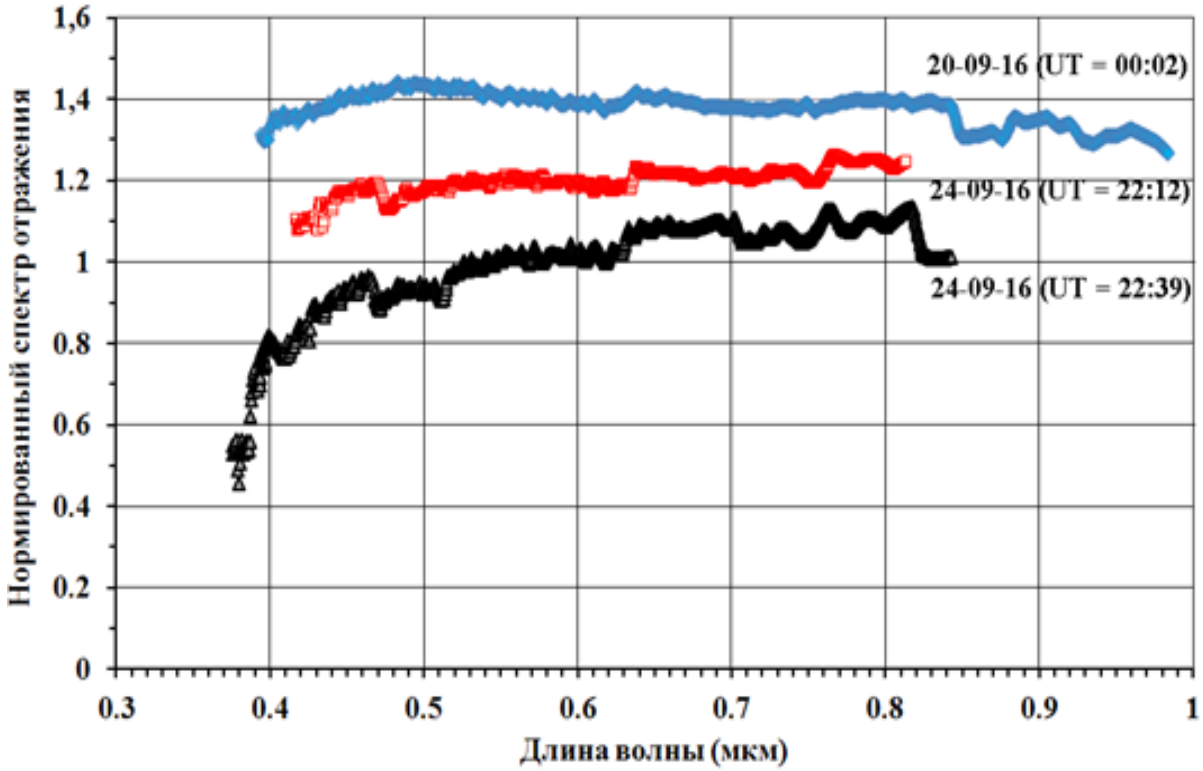

Рисунок 86 − Нормированные (на значение при 0,55 мкм) спектры отражения астероида 51 Немауза, полученные в 2016 г. на Терсколе при близких фазах вращения. Спектры смещены вдоль вертикальной оси

2.2.2.5 65 Кибела

Спектрофотометрические наблюдения астероида 65 Кибела были проведены в сентябре 2016 года на обсерватории «Пик Терскол». На Рис. 87 представлены спектры отражения, полученные на коротком интервале времени, имеющие максимум в диапазоне 0,4-0,7 мкм. Этот интервал характерен для рассеивания света на ледяных частицах воды микронного размера. Отметим разницу общего спектрального градиента между спектрами отражения на Рис. 73 и Рис. 87: согласно таксономическому классу градиент должен быть положительным, однако согласно полученным данным градиент обоих спектров отрицательный.

В качестве дополнительного доказательства предположения об активности астероида отметим ранее упомянутые работы, а также работу

Ликадро, в которых указывается наличие полосы поглощения водяного льда и органики на спектрах отражения [121].

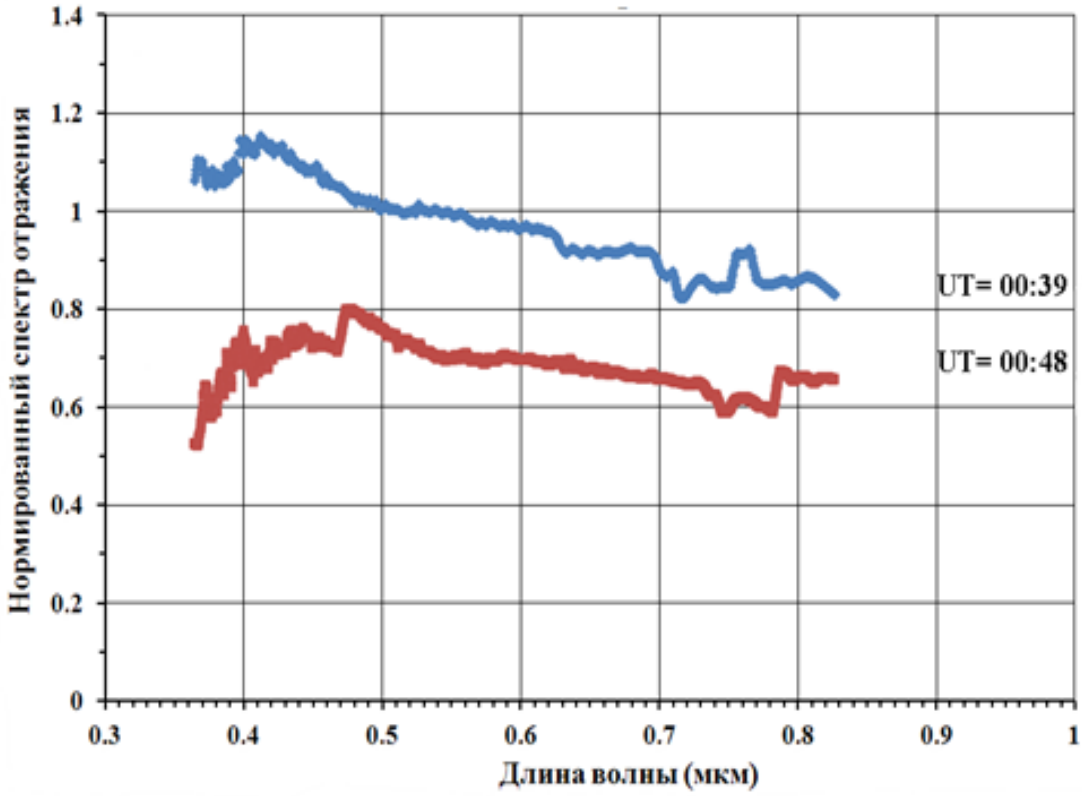

Рисунок 87 − Нормированные (на 0,55 мкм) спектры отражения астероида 65 Кибела, полученные в 2016 г. на Терсколе

2.2.3 Механизм возникновения необычного максимума на спектрах отражения 145 Адеоны, 704 Интерамнии и 779 Нины и оценка подсолнечных температур их поверхностей

Согласно Рис.75-85, на спектрах отражения выше рассмотренных астероидов наблюдался значительный рост спектральной отражательной способности в диапазоне 0,4-0,6 мкм. Тем не менее, такие особенности отсутствуют на спектрах отражения, полученных другими исследователями (Рис. 76, 78, 80). Как было отмечено выше, объекты наблюдения находились в относительной близости к перигелиям своих орбит во время проведения наших наблюдений. Для таких орбитальных положений характерен максимум подсолнечной температуры. Проведем оценку этих температур.

Считая, что астероиды излучают практически как абсолютно чёрные тела [125], возможно рассчитать температуру поверхности с помощью закона Стефана-Больцмана с помощью достаточно простой формулы:

$$T_{ss} = 394\ К \cdot ((1 - p_v)/r^2\ )^{1/4} \quad (10)$$

где

p_v – геометрическое альбедо объекта;

r – гелиоцентрическое расстояние.

Результаты расчетов данных подсолнечных температур представлены на Рис. 88-92. Часть результатов была представлена в работе [118].

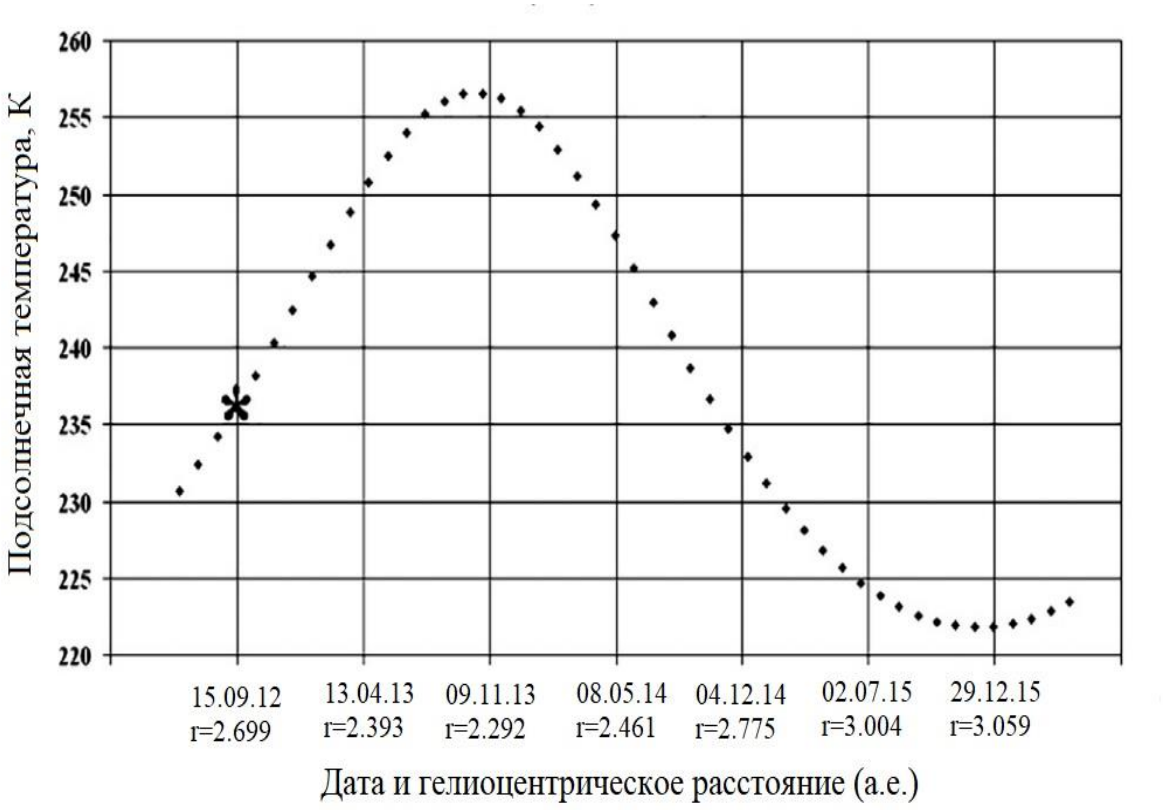

Рисунок 88 − Подсолнечные (экваториальные) колебания температуры на поверхности 145 Адеоны при вращении вокруг Солнца. Температура и гелиоцентрическое расстояние астероида на время наблюдений в 2012 году отмечено звездочкой [118]

Перепад подсолнечных температур для 145 Адеоны относительно положений апогелия и перигелия составляет с 222 до 257 К (Рис. 88). Во время наблюдений 2012 года температура не достигла максимума, что логично, так

как астероид не достиг перигелия. Наблюдения 2018 года проводились во время нахождения на перигелийном расстоянии, поверхность уже успела нагреться до максимума, что вскоре привело к началу сублимационной активности (Рис. 89).

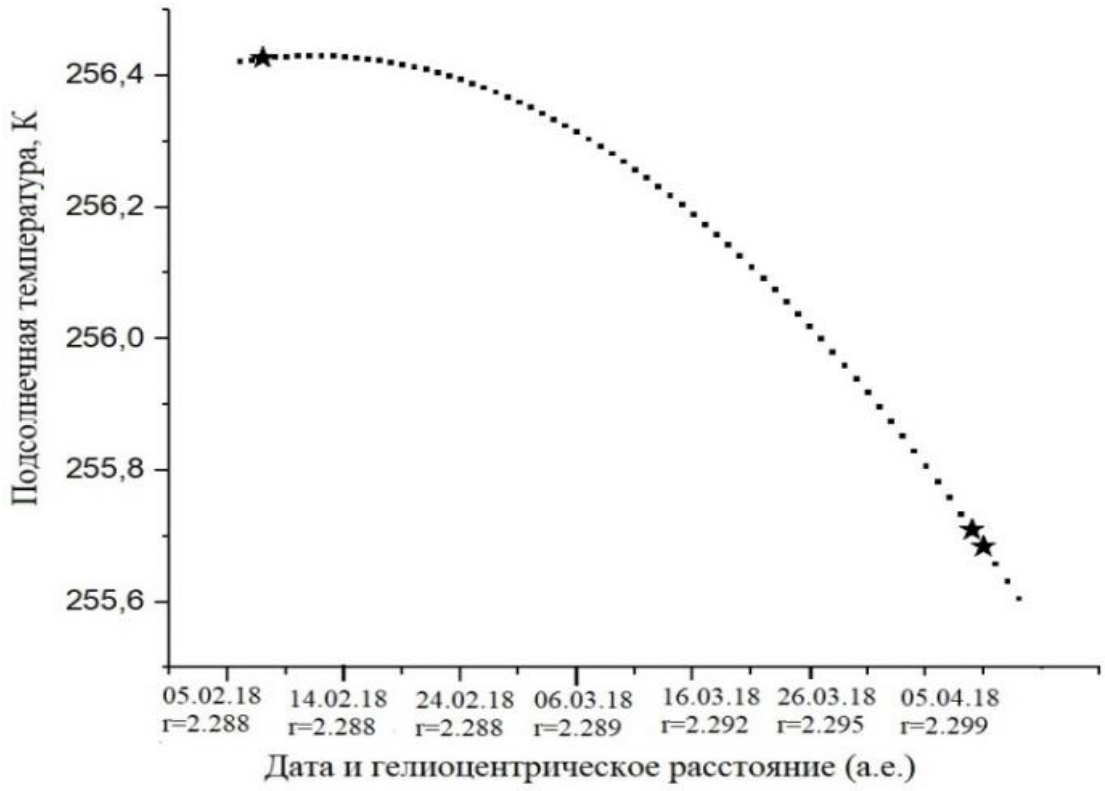

Рисунок 89 − Подсолнечные (экваториальные) колебания температуры на поверхности 145 Адеоны при вращении вокруг Солнца. Температура и гелиоцентрическое расстояние астероида на время наблюдений в 2018 году отмечено звездочкой

Перепад подсолнечных температур для 704 Интерамнии относительно положений апогелия и перигелия составляет с 206 до 240 K. Наблюдения астероида в 2012 году проводили сразу после прохождения перигелия, при достаточно высоких температурах поверхности, что привело к наблюдаемому эффекту сублимации (Рис. 90).

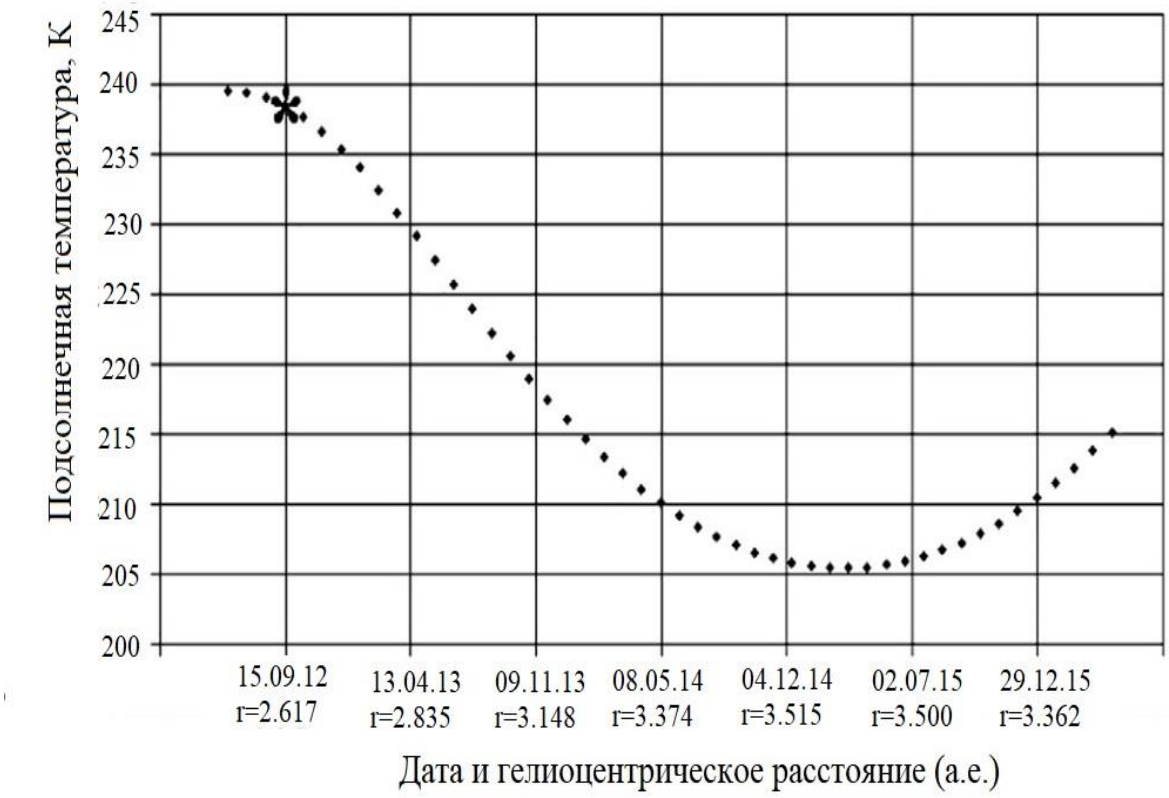

Рисунок 90 − Подсолнечные (экваториальные) колебания температуры на поверхности 704 Интерамнии при вращении вокруг Солнца. Температура и гелиоцентрическое расстояние астероида на время наблюдений в 2012 году отмечено звездочкой [118]

Наблюдения 704 Интерамнии 2017 года проводились как до прохождения перигелия, во время, так и сразу после (Рис. 81-88). На Рис. 91 звездочкой отмечены даты наблюдений и соответствующие им перигелийные расстояния и температуры. Стоит заметить, что еще до достижения максимальной температуры астероид начинает проявлять сублимационную активность (Рис. 85-88).

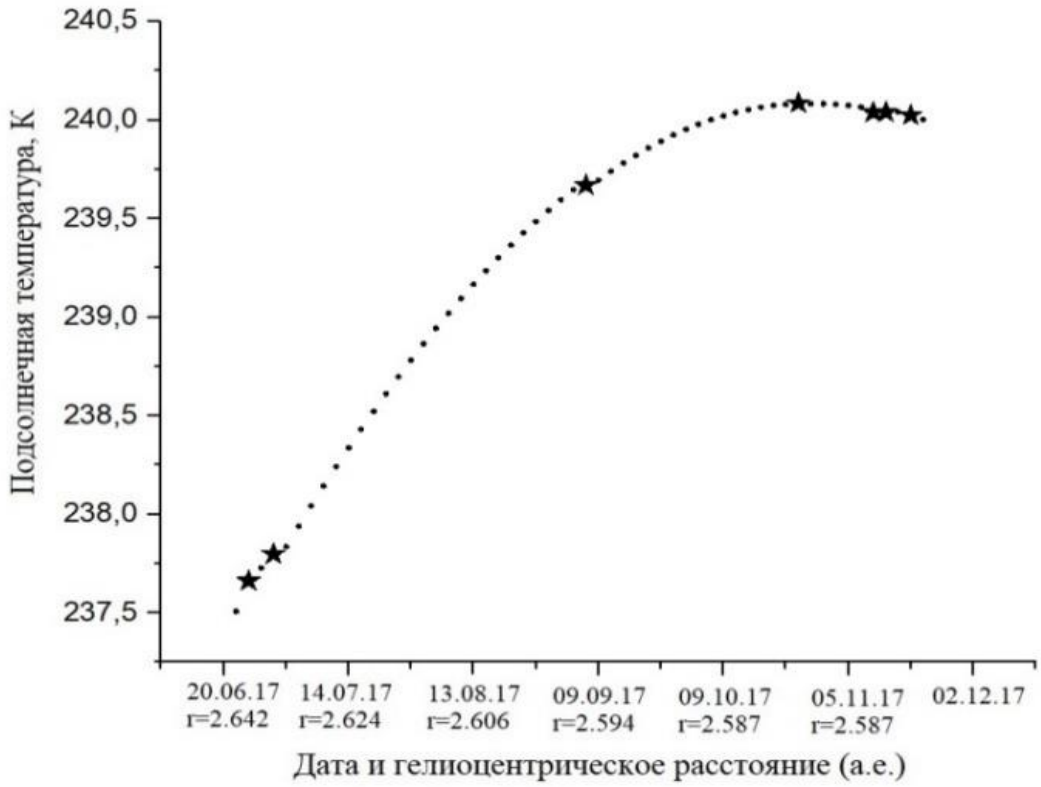

Рисунок 91 − Подсолнечные (экваториальные) колебания температуры на поверхности 704 Интерамнии при вращении вокруг Солнца. Температура и гелиоцентрическое расстояние астероида на время наблюдений в 2018 году отмечено звездочкой

Перепад подсолнечных температур для 779 Нины относительно положений апогелия и перигелия составляет с 208 до 262 K (Рис. 92). Наблюдения астероида в 2012 и 2016 году проводили около прохождения перигелия и, следовательно, около/во время максимального повышения температуры поверхности.

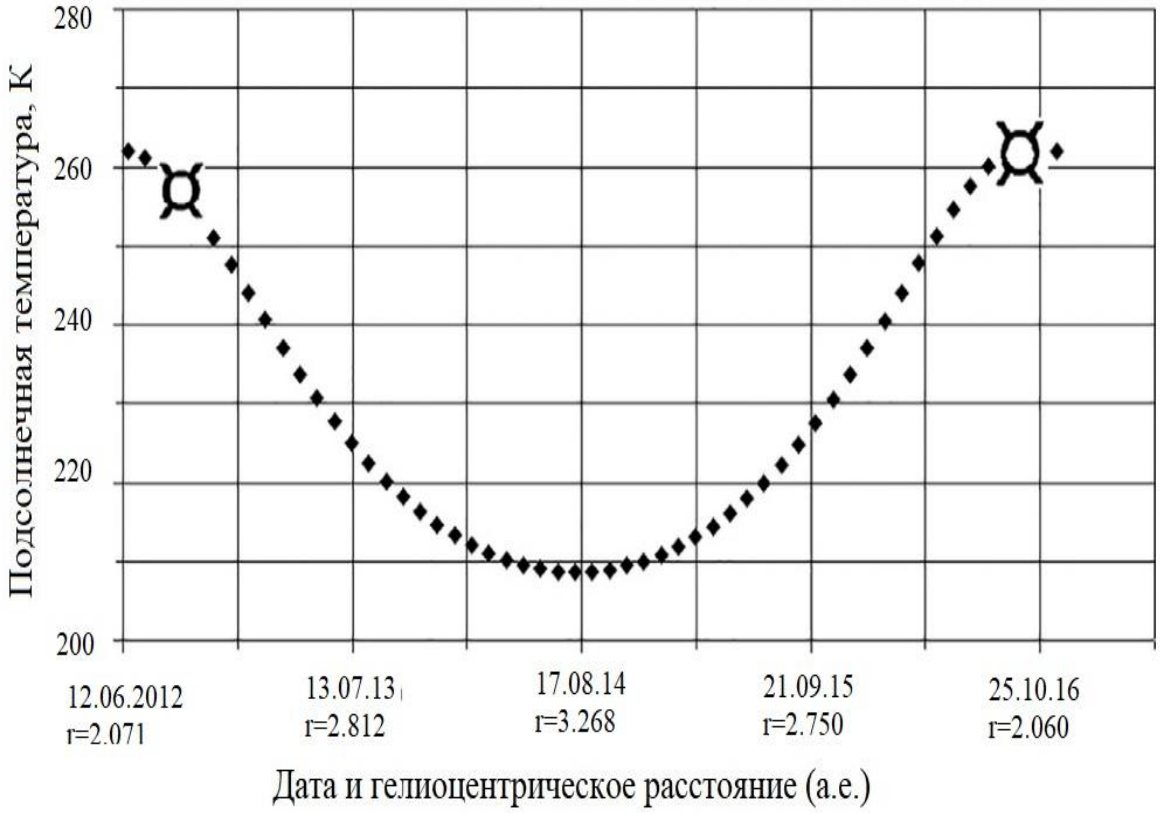

Рисунок 92 − Подсолнечные (экваториальные) колебания температуры на поверхности 779 Нины при вращении вокруг Солнца. Температура и гелиоцентрическое расстояние астероида на время наблюдений в 2012 и 2016 году отмечено звездочкой [118]

Температура на вышерассмотренных астероидах во время наблюдений находилась в диапазоне наиболее интенсивной сублимации водяного льда, а именно в пределах нескольких десятков градусов ниже 273 К. Астероиды имеют достаточно вытянутые орбиты, чтобы данная температура поддерживалась только на определенных участках, что приводит к значительной длительности в течение многих оборотов вокруг Солнца эффекта. Изменения подсолнечных температур в пределах 35-55 К, вероятно, достаточно для запуска и поддержки эффекта сублимации на/из-под поверхности данных астероидов. Следовательно, можно ожидать, что H_2O преимущественно выживает под поверхностью примитивных астероидов с момента их образования или после предыдущих падений более мелких ледяных тел на астероиды [126].

Положение длины волны, на котором наблюдается рост отражательной способности астероида, определяется преобладающим размером частиц в рассеивающей коме [118]. По результатам численного моделирования рассеяния света сферической частицей (модель рассеяния по теории Ми) [127]. с показателем преломления водяного льда n = 1,33, максимум интенсивности рассеяния наблюдается при соотношении $\rho / \lambda \approx 1$, где ρ - средний радиус рассеивающих частиц и λ – длина волны рассеиваемого света. На графиках спектров отражения исследуемых астероидов максимум интенсивности находится в диапазоне длин волн 0,48 – 0,52 мкм, тогда средний диаметр частиц льда воды в коме оказывается около 1 мкм.

2.2.4 Особенности спектров отражения 51 Немаузы и 65 Кибелы

В отличие от астероидов 145, 704 и 779 астероиды 51 Немауза и 65 Кибела не обладают достаточным эксцентриситетом, чтобы вызвать необходимый перепад температур и запустить механизм сублимации. Однако данные тела обладают относительно большим наклоном осей вращения, что может приводить к сезонным изменениям. Для подтверждения подобного предположения требуется дополнительное исследование данных тел, однако вероятность сублимации на данных астероидах крайне высока [128].

2.3 Возможные особенности строения и состава вещества астероидов с сублимационной активностью

Одновременность сублимационной активности астероидов Главного пояса примитивных типов вблизи перигелийных расстояний может иметь критическое значение. Основываясь на этом, можно судить о массовости данного эффекта, что приводит к мысли о том, что подповерхностный материал астероидов примитивных таксономических типов должен включать значительную долю льдов, накопленных в результате ранней водной дифференциации таких тел при распаде короткоживущих радионуклидов (^{26}Al, ^{60}Fe и т. Д.) [129], [130].

Реголит же, вероятно, был сформирован из-за повторяющихся ударов метеороидов, но также должен содержать ледяные включения, если во внутренних слоях существовали слои льда, в результате перемешивания. Можем предполагать о сходстве свойств лунного реголита и реголита астероидов Главного пояса, а именно – о значительной толщине слоя и его очень низкой теплопроводности [131]. Таким образом, можно представить на качественном уровне внутреннюю структуру примитивных астероидов главного пояса в виде комбинации филлосиликатных и ледяных слоев (и / или включений) с толстой оболочкой реголита (Рис. 93) [118].

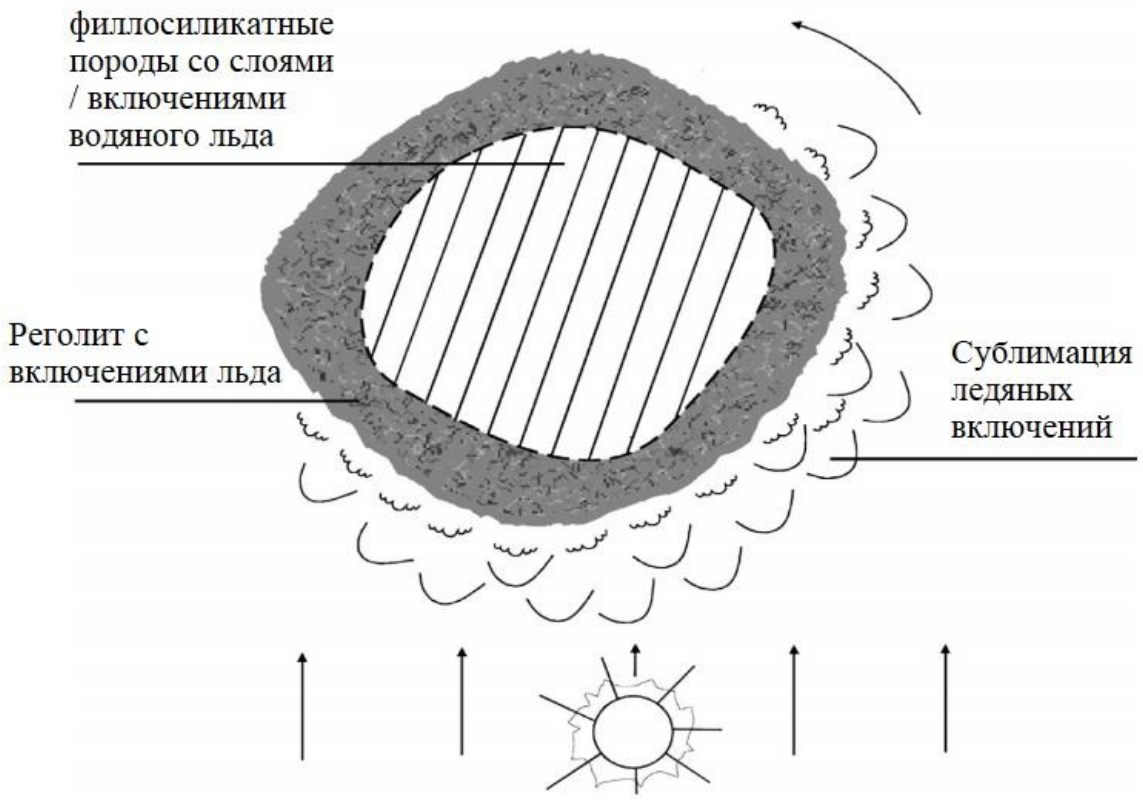

Рисунок 93 − Предполагаемая внутренняя структура астероида примитивного главного пояса и возможный механизм его сублимационной активности вблизи перигелия [118].

Рассматриваемые астероиды принадлежат к низкотемпературным классам. Их метеоритными аналогами вещества астероидов являются углистые хондриты, содержащие гидратированные силикаты.

Принято считать, что астероиды C- и близких классов содержат в себе воду в связанном состоянии, которой явно не хватает для объяснения наблюдаемого эффекта сублимационной активности таких астероидов.

Также известно, что в метеоритных аналогах – углистых хондритах – летучие соединения в значительном количестве не найдены. Однако можно предполагать, что метеороидные тела такого типа, в основном не могут достигнуть земной поверхности из-за низкой механической прочности и нагревания при прохождении сквозь земную атмосферу.

2.4 Предполагаемое происхождение астероидов с сублимационной активностью

На основе перечисленных наблюдательных данных, экспериментальных и модельных результатов была выдвинута гипотеза о происхождении астероидов C-типа и близким к ним в зоне формирования Юпитера [132].

В результате процесса выброса каменно-ледяных тел про-Юпитером и последующего их ударного взаимодействия с телами, находящимися на меньших гелиоцентрических расстояниях, их вещество могло быть перенесено на эти тела в виде мелких фрагментов и пыли, включавших в себя примитивное вещество C1 типа и водяной лёд. Реликтами таких силикатно-ледяных тел могут быть астероиды-троянцы. Астероиды других примитивных типов, таких как D, P и T, могут иметь похожее происхождение, но из зон формирования более далеких планет-гигантов. Следовательно, гипотеза о происхождении астероидов C-типов может быть расширена на астероиды всех примитивных типов.

Эта гипотеза образования астероидов примитивных типов подтверждается обнаружением на многих астероидах высокотемпературных типов нетипичных для них гидросиликатов [133] и водных соединений на Луне [134], что может быть результатом рассматриваемых процессов.

2.5 Механизм поддержки эффекта сублимационной активности

Для обеспечения значительной продолжительности сублимационной активности астероидов необходим механизм для поддержки должного количества водяного льда вблизи поверхности. Логично предположить, что таковым является постоянная метеоритная бомбардировка поверхности, которая мешает образовываться герметизирующему слою, а также поддерживает постоянное «выкапывание» ледяных частиц из подповерхностных слоев. Подобное явление наблюдается и при более интенсивном ударном событии, однако имеет меньшую вероятность.

2.6 Влияние солнечной активности на величину наблюдаемого эффекта сублимации льдов

Сравнивая величину наблюдаемого пика на спектрах отражения Адеоны, Нины и Интерамнии в 2012 и 2016-2018 году, следует заметить, что при более поздних наблюдениях изменение относительно общего градиента спектра отражения не такое значительное. Как объяснение данному изменению спектрального градиента и, соответственно, интенсивности сублимации можно предположить влияние солнечной активности [122]: наблюдательные данные в 2012 году получены во время высокой солнечной активности, а в 2016-2018 гг – на спаде (Рис. 94) [135].

В июле 2012 г. космическими аппаратами STEREO, GOES, MESSENGER и SOHO был зафиксирован мощный корональный выброс вещества [136], следствием которого, согласно гипотезе, должны были стать значительный рост плотности и увеличение средней скорости частиц солнечного ветра. Это могло даже за непродолжительное время усилить сублимацию, а также увеличить протяженность комы вследствие электростатических эффектов.

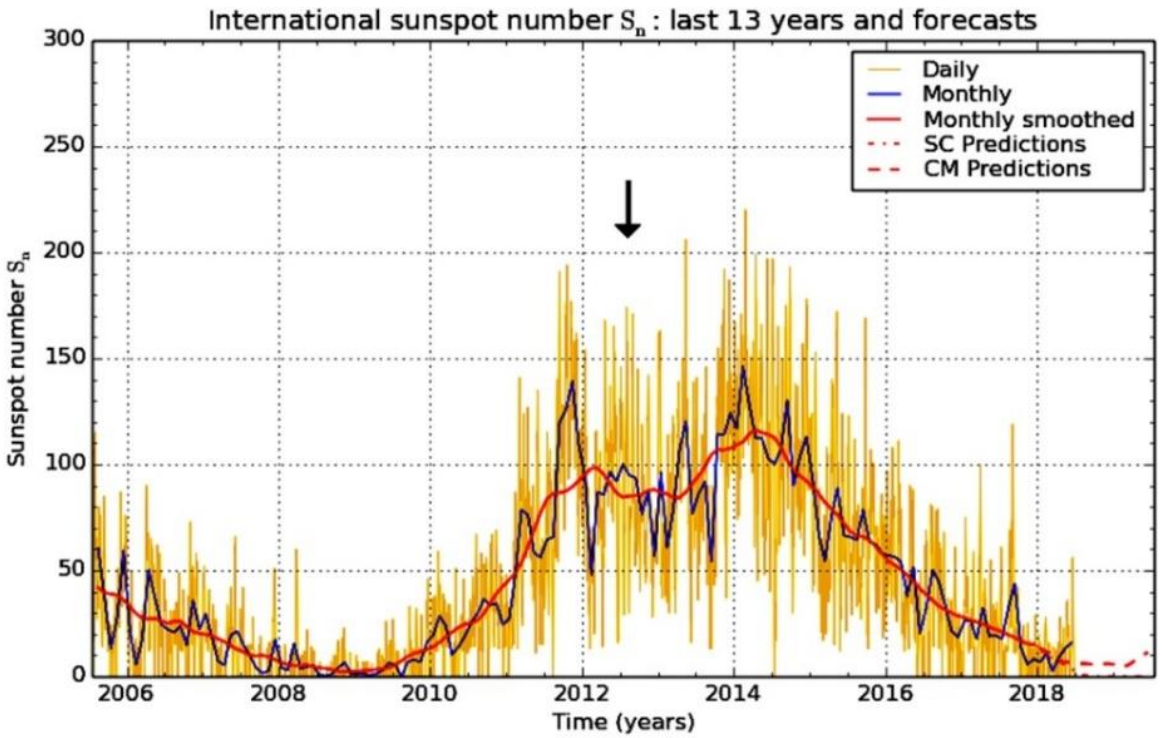

Рисунок 94 − Изменение числа солнечных пятен (S_n) с 2005 по 2018 гг., характеризующих солнечную активность [135]. Стрелка указывает на момент наблюдений астероидов 145 Адеона, 704 Интерамния и 779 Нина в сентябре 2012 г.

Появление комы и протяженного хвоста у ядер комет при сближении с Солнцем является хорошо известным фактом. Исследование с помощью космических аппаратов и с близких расстояний показало, что кометная активность связана как с ростом подсолнечной температуры, так и с потоком частиц солнечного ветра [137]. Вероятно, в случае астероидов примитивных типов повышение солнечной активности и вспышки влияют на протекание сублимационного процесса. Вследствие разрыхления и распыления льда происходит увеличение протяженности комы, а также увеличение содержания в ней ледяной компоненты.

2.7 Выводы

Вторая глава посвящена крайне интересному эффекту сублимации подповерхностных льдов у астероидов Главного пояса. В ходе проведения спектрофотометрических и *UBVRI*-фотометрических наблюдений данных тел на обсерваториях «Пик Терскол» (филиал ИНАСАН), «Крымская лаборатория ГАИШ МГУ», «Тюбитак» (КФУ/Турция), «Санглок» (Таджикистан) удалось обнаружить и подтвердить при повторных наблюдениях сублимационную активность для астероидов 145 Адеона, 704 Интерамния и 779 Нина, а также заметить её вероятные спектральные признаки у 51 Немаузы и 65 Кибелы. Спектры отражения вышеперечисленных астероидов имеют максимум на 0,4-0,6 мкм, что согласно теории Ми соответствует результату рассеивания на ледяных частицах. Максимум может незначительно смещаться из-за наличия пылевой компоненты в слабой коме астероида.

Механизмом, вызывающим сублимационную активность, вероятно, является изменение подсолнечных температур в связи с приближением к перигелию, вытянутой орбиты и/ или наклона оси вращения. Солнечная активность, а именно увеличение плотности потока солнечного ветра из-за вспышек, ведёт к возрастанию наблюдаемого эффекта, что подтверждается наблюдениями в 2012 г.

Массовость обнаруженного эффекта сублимационной активности как в данной работе, так и в работах других авторов, наводит на логичную мысль об образовании астероидов примитивного типа за «снежной линией», что в результате привело к значительным запасам водяного льда. Постоянная бомбардировка метеоритами и микрометеоритами приводит к экскавации находящихся на глубине летучих, что поддерживает или приводит к возобновлению рассматриваемого эффекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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). Среди личного вклада автора в работу следует отметить 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 спектрофотомет-рическими, 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.

Таблица 14 − 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

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.

Благодарности

Автор выражает огромную благодарность своему научному руководителю, Бусареву Владимиру Васильевичу, как проводнику в увлекательный мир исследования малых тел Солнечной системы. За его безграничное терпение и помощь в подготовке диссертации.

Отдельную благодарность автор выражает сотрудникам обсерватории «Пик Терскол» за помощь во время наблюдений.

Также автор благодарит соавторов за обсуждение полученных результатов.

Отдельное спасибо автор говорит своей семье и друзьям за поддержку.

Список литературы

1. *Бусарев В.В*. Спектрофотометрия астероидов и ее приложения – LAP LAMBERT Acad. Pablish. 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: 10.12.2018 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 MMining 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.
15. *Бусарев В.В.* Спектрофотометрия безатмосферных тел Солнечной системы //Астрон. вестн. – 1999. – Т. 33, №. 2. – С. 140-150.
16. *Харитонов А. В., Терещенко В. М*. Спектрофотометрический каталог звезд: справочник. – Изд-во" Наука" Казахской ССР, 1988. – 477 с.
17. *Hardorp J.* The sun among the stars. III-Energy distributions of 16 northern G-type stars and the solar flux calibration //Astronomy and Astrophysics. – 1980. – Vol. 91. – P. 221-232.
18. *Томозов В. М.* О некоторых закономерностях распределения химического состава в атмосферах звезд // Солнечно-земная физика. – 2013. – №. 23. – С. 23-32.
19. *Шкуратов Ю. Г. и др.* Рассеяние света поверхностями сложной структуры. – ХНУ им. ВН Каразина, 2008. – С.18.
20. *Capaccioni F. et al.* Phase curves of meteorites and terrestrial rocks: Laboratory measurements and applications to asteroids //Icarus. – 1990. – Vol. 83, №. 2. – P. 325-348.
21. *Макарова Е. А.* Поток солнечного излучения. – Наука, 1991. – 396 с.

22. *Kurucz R. L.* Atlas12, synthe, atlas9, width9, et cetera //Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplementi. – 2005. – Vol. 8. – P. 14.
23. *Смирнов О.* Применение однородных структур для обнаружения космических частиц на астрономических изображениях //Интеллектуальные системы. – 2004. – Т. 8, №. 1-4.
24. *Chapman C. R., Morrison D., Zellner B.* Surface properties of asteroids: A synthesis of polarimetry, radiometry, and spectrophotometry //Icarus. – 1975. – Vol. 25, №. 1. – P. 104-130.
25. *Zellner B. et al.* The asteroid albedo scale. I-Laboratory polarimetry of meteorites //Lunar and Planetary Science Conference Proceedings. – 1977. – Vol. 8. – P. 1091-1110.
26. *Zellner B., Tholen D. J., Tedesco E. F.* The eight-color asteroid survey: Results for 589 minor planets //Icarus. – 1985. – Vol. 61. – №. 3. – P. 355-416.
27. *Tholen D. J., Barucci M. A.* Asteroid taxonomy //Asteroids II. – 1989. – P. 298-315.
28. SMASS: Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey – Режим доступа: http://smass.mit.edu/smass.html (дата обращения: 10.09.2019)
29. *Bell J. F. et al.* Asteroids-The big picture //Asteroids II. – 1989. – P. 921-945.
30. *Pieters C. M., Hiroi T.* RELAB (Reflectance Experiment Laboratory): A NASA multiuser spectroscopy facility //Lunar and Planetary Science Conference. – 2004. – Vol. 35.
31. PSF PLANETARY SPECTROPHOTOMETER FACILITY – Режим доступа: http://psf.uwinnipeg.ca/index.html (дата обращения: 10.12.2018)
32. *Платонов А. Н.* Природа окраски минералов. – Наукова думка, 1976. – 264 с.
33. *Cloutis E. A. et al.* Spectral reflectance properties of ureilites //Meteoritics & Planetary Science. – 2010. – Vol. 45, №. 10-11. – P. 1668-1694.

34. *Busarev V.V. et al.* Possible spectral signs of serpentines and chlorites in reflectance spectra of celestial solid bodies //Proc. 40th Vernadsky Inst.– Brown Univ. Microsimp. on Comparative Planetology, 2004, abstracts, p.12-13.
35. *Fernandes C.* Spectral studies of extra-terrestrial materials : дис. – The Open University, 2012. – P.204.
36. *Gaffey M. J.* Mineralogy of asteroids //AIP Conference Proceedings. – American Institute of Physics, 2011. – Vol. 1386, №. 1. – P. 129-169.
37. *Busarev V. V.* Spectral features of M-asteroids: 75 Eurydike and 201 Penelope //Icarus. – 1998. – Vol. 131, №. 1. – P. 32-40.
38. *Бусарев В. В.* Гидратированные силикаты на астероидах M-, S-и E-типов как возможные следы столкновений с телами из зоны роста Юпитера //Астрон. вестн. – 2002. – Т. 36. – №. 1. – С. 39-47.
39. *Сафронов В. С.* Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. – Наука, 1969. – 244 с.
40. *Binzel R. P. et al.* Compositional distributions and evolutionary processes for the near-Earth object population: Results from the MIT-Hawaii Near-Earth Object Spectroscopic Survey (MITHNEOS) //Icarus. – 2019. – Vol . 324. – P . 41-76.
41. *Krot A. N. et al.* Classification of meteorites and their genetic relationships //mcp. – 2014. – Vol. 1. – P. 1-63.
42. *Иванов А. В., Ярошевский А. А., Иванова М. А.* Минералы метеоритов-новый каталог //Геохимия. – 2019. – Т. 64. – №. 8. – С. 869-932.
43. *Fornasier S. et al*. Spectroscopic comparison of aqueous altered asteroids with CM2 carbonaceous chondrite meteorites //Astronomy and Astrophysics Supplement Series. – 1999. – Vol. 135, №. 1. – P. 65-73.
44. *Wiik H. B.* The chemical composition of some stony meteorites //Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1956. – Т. 9. – №. 5-6. – С. 279-289.

45. *Wasson J. T.* Classification of Meteorites //Meteorites. – Springer, Berlin, Heidelberg, 1974. – P. 11-38.
46. *Додд Р.Т.* Метеориты – петрология и геохимия. – М.: Мир, 1986. – 382 с.
47. *Ярошевский А.А.* Проблемы современной геохимии: конспект лекций, прочитанных в ГЕОХИ РАН в зимнем семестре 2003 – 2004 гг. / А.А. Ярошевский. – Новосибирск, 2004. –194 с.
48. *Nakamura T. et al.* Itokawa dust particles: a direct link between S-type asteroids and ordinary chondrites //Science. – 2011. – Vol. 333. – №. 6046. – P. 1113-1116.
49. *Gupta G., Sahijpal S.* Differentiation of Vesta and the parent bodies of other achondrites //Journal of Geophysical Research: Planets. – 2010. – Vol. 115. – №. E8.
50. *Mittlefehldt, D. W.* Asteroid (4) Vesta: I. The howardite-eucrite-diogenite (HED) clan of meteorites / D. W. Mittlefehldt // Chemie der Erde. – 2015. – Vol. 75. – P. 155–183.
51. *Krot A. et al.* Meteorites, Comets and Planets //Treatise on Geochemistry. – 2005. – P. 84-129.
52. *Scott E. R. D., Wasson J. T.* Classification and properties of iron meteorites //Reviews of Geophysics. – 1975. – Vol. 13. – №. 4. – P. 527-546.
53. *Goldstein J. I., Scott E. R. D., Chabot N. L.* Iron meteorites: Crystallization, thermal history, parent bodies, and origin //Geochemistry. – 2009. – Vol. 69, №. 4. – P. 293-325.
54. *Wasson J. T.* Relationship between iron-meteorite composition and size: Compositional distribution of irons from North Africa //Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2011. – Vol. 75, №. 7. – P. 1757-1772.
55. *Железнов Н. Б.* Астероидно-кометная опасность: современное состояние проблемы //Физика космоса: Тр. , 2004. – С.56-72.
56. JPL Small-Body Database – Режим доступа: http://ssd.jpl.nasa.gov/ssdb.cgi (дата обращения: 10.09.2019)

57. Asteroid Database and Mining Rankings - Asterank – Режим доступа: http://www.asterank.com/ (дата обращения: 10.09.2019)
58. Цейсс-2000 – Режим доступа: http://w0.sao.ru/Doc-k8/Telescopes/small/Z2000/ (дата обращения: 10.09.2019)
59. Структура ГАИШ: Представительство — Крымская лаборатория – Режим доступа: http://www.sai.msu.ru/dept/crimea/index.html (дата обращения: 10.09.2019)
60. Описание обсерватории – Режим доступа: http://lfvn.astronomer.ru/optic/gissar/index.htm (дата обращения: 10.09.2019)
61. *Галазутдинов Г.А.* Система обработки звездных эшелле-спектров. I. Обработка изображений. II. Обработка спектров. Препринт № 92. - Нижний Архыз: САО РАН, 1992. - 52 с.
62. www.originlab.com — официальный сайт – Режим доступа: https://www.originlab.com/ (дата обращения: 10.09.2019)
63. Winfield, John. "MaximDL Utilities" – Режим доступа:http://winfij.com/maximdl.html (дата обращения: 10.09.2019)
64. *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.
65. *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.
66. *Belskaya I. N. et al.* Refining the asteroid taxonomy by polarimetric observations //Icarus. – 2017. – Vol. 284. – P. 30-42.
67. The Meteoritical Bulletin Database [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.lpi.usra.edu/meteor/ (дата обращения: 01.09.2020)

68. *Michałowski T. et al.* CCD photometry, spin and shape models of five asteroids: 225, 360, 416, 516, and 1223 //Astronomy and Astrophysics Supplement Series. – 2000. – Vol. 146, №. 3. – P. 471-479.
69. *Vilas F., Smith B. A.* Reflectance spectrophotometry (~ 0.5–1.0 μm) of outer-belt asteroids: Implications for primitive, organic solar system material //Icarus. – 1985. – Vol. 64, №. 3. – P. 503-516.
70. *De Prá M. N. et al*. PRIMASS visits Hilda and Cybele groups //Icarus. – 2018. – Vol. 311. – P. 35-51.
71. *Vilas F., Jarvis K. S., Gaffey M. J.* Iron alteration minerals in the visible and near-infrared spectra of low-albedo asteroids //Icarus. – 1994. – Vol. 109, №. 2. – P. 274-283.
72. *Norton O. R.* The Cambridge encyclopedia of meteorites. – 2002. – P. 374.
73. *Lazzaro D. et al.* S3OS2: The visible spectroscopic survey of 820 asteroids //Icarus. – 2004. – Vol. 172, №. 1. – P. 179-220.
74. *Tomeoka K., Buseck P. R.* Matrix mineralogy of the Orgueil CI carbonaceous chondrite //Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1988. – Vol. 52, №. 6. – P. 1627-1640.
75. *Xu S. et al*. Small main-belt asteroid spectroscopic survey: Initial results //Icarus. – 1995. – Vol. 115, №. 1. – P. 1-35.
76. *López-Sisterna C., García-Migani E., Gil-Hutton R.* Polarimetric survey of main-belt asteroids-VII. New results for 82 main-belt objects //Astronomy & Astrophysics. – 2019. – Vol. 626. – P. A42.
77. *Fuchs L. H., Olsen E., Jensen K. J.* Mineralogy, mineral-chemistry, and composition of the Murchison (C2) meteorite //Smithsonian contributions to the Earth Sciences, 1973. – P.1-39.
78. *Airieau S. A. et al.* Planetesimal sulfate and aqueous alteration in CM and CI carbonaceous chondrites //Geochimica et cosmochimica acta. – 2005. – Vol. 69. – №. 16. – P. 4167-4172.
79. *Harris A. W., Young J. W.* Asteroid lightcurve observations from 1979–1981 //Icarus. – 1989. – Vol. 81, №. 2. – P. 314-364.

80. *Blancoa C., Di Martinob M., Ricciolia D.* New rotational periods of 18 asteroids // Planetary and Space Science. — 2000. — Vol. 48, № 4. — P. 271–284.
81. *Takir D., Emery J. P., McSween Jr H. Y.* Toward an understanding of phyllosilicate mineralogy in the outer main asteroid belt //Icarus. – 2015. – Vol. 257. – P. 185-193.
82. *Vdovykin G. P.* The Mighei meteorite //Space Science Reviews. – 1973. – Vol. 14. – №. 6. – P. 832-879.
83. *Lee M. R. et al.* The diversity of CM carbonaceous chondrite parent bodies explored using Lewis Cliff 85311 //Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2019. – Vol. 264. – P. 224-244.
84. *Jogo K. et al*. Origin of the metamorphosed clasts in the CV 3 carbonaceous chondrite breccias of Graves Nunataks 06101, Vigarano, Roberts Massif 04143, and Yamato-86009 //Meteoritics & Planetary Science. – 2019. – Vol. 54. – №. 5. – P. 1133-1152.
85. *Oey J.* Lightcurve Analysis of Asteroids from Blue Mountains Observatory in 2014 //Minor Planet Bulletin. – 2016. – Vol. 43. – P. 45-51.
86. *Popescu M. et al.* Taxonomic classification of asteroids based on MOVIS near-infrared colors //Astronomy & Astrophysics. – 2018. – Vol. 617. – P. A12.
87. *Herrin J. S. et al*. Carbonaceous chondrite-rich howardites; the potential for hydrous lithologies on the HED parent. – Lunar Planet. Sci. XVII, 2806., 2011, Abstract #1608.
88. *Goodrich C. A. et al.* Northwest Africa 1500: Plagioclase-bearing monomict ureilite or ungrouped achondrite? //Meteoritics & Planetary Science. – 2006. – Vol. 41. – №. 6. – P. 925-952.
89. *Goodrich C. A. et al.* The Northwest Africa 1500 meteorite: Not a ureilite, maybe a brachinite //Meteoritics & Planetary Science. – 2010. – Vol. 45. – №. 12. – P. 1906-1928.

90. *Martins Z. et al*. Extraterrestrial nucleobases in the Murchison meteorite //Earth and planetary science Letters. – 2008. – Vol. 270. – №. 1-2. – P. 130-136.

91. Contact Binary Asteroids and Comets – Режим доступа: http://www.johnstonsarchive.net/astro/contactbinast.html (дата обращения: 10.12.2018)

92. *Kaneda K., Warren P. H., Miyamoto M.* Petrology and thermal history of Mg-rich pyroxene bearing cumulate eucrite, Talampaya //Lunar Planet. Sci. 31. Abstract. – 2000. – Abstract #2069.

93. *Ieva S. et al*. Low delta-V near-Earth asteroids: A survey of suitable targets for space missions //Astronomy & Astrophysics. – 2014. – Vol. 569. – P. A59.

94. *Thomas C. A. et al*. Physical characterization of Warm Spitzer-observed near-Earth objects //Icarus. – 2014. – Vol. 228. – P. 217-246.

95. *Ye Q.* BVRI photometry of 53 unusual asteroids //The Astronomical Journal. – 2010. – Vol. 141, №. 2. – P. 32.

96. *Warner B. D., Harris A. W., Pravec P.* The asteroid lightcurve database //Icarus. – 2009. – Vol. 202, №. 1. – P. 134-146.

97. *Binzel R. P. et al*. Dynamical and compositional assessment of near-Earth object mission targets //Meteoritics & Planetary Science. – 2004. – Vol. 39, №. 3. – P. 351-366.

98. *Jewitt D.* The active asteroids //The Astronomical Journal. – 2012. – Vol. 143, №. 3. – P. 66.

99. *Öpik E. J.* The stray bodies in the solar system. Part I. Survival of cometary nuclei and the asteroids //Adv. Astron. Astrophys. – 1963. – Vol. 2. – P. 219-262.

100. *Ishiguro M. et al.* Observational evidence for an impact on the main-belt asteroid (596) Scheila //The Astrophysical Journal Letters. – 2011. – Vol. 740, №. 1. – P. L11.

101. *Kokhirova G. I. et al.* Results of Complex Observations of Asteroid (596) Scheila at the Sanglokh International Astronomical Observatory //Solar System Research. – 2018. – Vol. 52, №. 6. – P. 495-504.

102. *Jewitt D. et al.* Anatomy of an asteroid breakup: the case of P/2013 R3 //The Astronomical Journal. – 2017. – Vol. 153, №. 5. – P. 223.

103. *Hsieh H. H., Jewitt D. C., Fernández Y. R.* The strange case of 133P/Elst-Pizarro: A comet among the asteroids //The Astronomical Journal. – 2004. – Vol. 127, №. 5. – P. 2997.

104. *Licandro J. et al.* The nature of comet-asteroid transition object (3200) Phaethon //Astronomy & Astrophysics. – 2007. – Vol. 461, №. 2. – P. 751-757.

105. *Chandler C. O. et al.* SAFARI: Searching Asteroids for Activity Revealing Indicators //Publications of the Astronomical Society of the Pacific. – 2018. – Vol. 130. – №. 993. – P. 114502.

106. *Hsieh H. H., Haghighipour N.* Potential Jupiter-Family comet contamination of the main asteroid belt //Icarus. – 2016. – Vol. 277. – P. 19-38.

107. *Busarev V. V., Barabanov S. I., Puzin V. B.* Spectral signs of cometary activity on primitive asteroids (145) Adeona,(704) Interamnia,(779) Nina, and (1474) Beira //The Six Moscow Solar System Symposium, 2015. – Abstract #6MS3-SB-06

108. Бусарев В. В., Барабанов С. И., Пузин В. Б. Оценка состава вещества и обнаружение сублимационной активности астероидов 145 Адеоны, 704 Интерамнии, 779 Нины и 1474 Бейры //Астрономический вестник. – 2016. – Т. 50. – №. 4. – С. 300-312.

109. Гумеров Р. И., Хамитов И. М., Пинигин Г. И. Телескоп РТТ150 в международных проектах по исследованию малых тел Солнечной системы //Ученые записки Казанского университета. Серия Физико-математические науки. – 2013. – Т. 155. – №. 1. –С.164-177.

110. *Masiero J. R. et al*. Main-belt asteroids with WISE/NEOWISE: Near-infrared albedos //The Astrophysical Journal. – 2014. – Vol. 791, №. 2. – P. 121.

111. *Warner B.D.* Minor Planet Bull. - 2018 – Vol.45- P.256-259.

112. *Nesvorný D. et al.* Identification and dynamical properties of asteroid families //Asteroids IV. – 2015. – P. 297-321.

113. *Busarev V. V. et al.* Spectrophotometry of (32) Pomona, (145) Adeona, (704) Interamnia,(779) Nina, (330825) 2008 XE3, and 2012 QG42 and laboratory study of possible analog samples //Icarus. – 2015. – Vol. 262. – P. 44-57.

114. *Usui F. et al.* AKARI/IRC near-infrared asteroid spectroscopic survey: AcuA-spec //Publications of the Astronomical Society of Japan. – 2018. – Vol. 71, №. 1. – P. 1.

115. *Belskaya I. N. et al.* The F-type asteroids with small inversion angles of polarization //Icarus. – 2005. – Vol. 178, №. 1. – P. 213-221.

116. *Takir D., Emery J. P.* Outer main belt asteroids: Identification and distribution of four 3-μm spectral groups //Icarus. – 2012. – Vol. 219, №. 2. – P. 641-654.

117. *Rivkin A. S. et al.* Hydrated minerals on asteroids: The astronomical record //Asteroids III. – 2002. – Vol. 1. – P. 235-253.

118. *Busarev V. V. et al.* 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.

119. *Elkins-Tanton L. T.* Asteroids, meteorites, and comets. – Infobase Publishing, 2010. – P. 269.

120. *Müller T. G., Blommaert J.* 65 Cybele in the thermal infrared: Multiple observations and thermophysical analysis //Astronomy & Astrophysics. – 2004. – Vol. 418, №. 1. – P. 347-356.

121. *Licandro J. et al.* (65) Cybele: detection of small silicate grains, water-ice, and organics //Astronomy & Astrophysics. – 2011. – Vol. 525. – P. A34.

122. *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 – 2019 – Т.53, №4, – С. 273- 290.

123. *Бусарев В. В., Щербина М. П., Кохирова Г. И. и др.* Подтверждение сублимационной активности астероида 704 Интерамния // ДАН Республики Таджикистан. — 2018. — Т. 61, № 1. — С. 27–37.

124. *Werner B.* A Modest Success Story: 779 Nina Brighter than Predicted //Minor Planet Bulletin. – 1991. – Vol. 18. – P. 16.

125. *Harris A. W., Lagerros J. S. V.* Asteroids in the thermal infrared //Asteroids III. – 2002. – Vol. 205. – P. 205-218.

126. *Fanale F. P., Salvail J. R.* The water regime of asteroid (1) Ceres //Icarus. – 1989. – Vol. 82, №. 1. – P. 97-110.

127. *Hansen J. E., Travis L. D.* Light scattering in planetary atmospheres //Space science reviews. – 1974. – Vol. 16, №. 4. – P. 527-610.

128. *Franco L., Pilcher F.* Lightcurve Inversion for 65 Cybele //Minor Planet Bulletin. – 2015. – Vol. 42. – P. 204-206.

129. *Wadhwa M., Srinivasan G., Carlson R. W.* Timescales of planetesimal differentiation in the early solar system //Meteorites and the early solar system II. – 2006. – P. 715-731.

130. *Busarev V. V. et al.* Possibility of separating silicates and organics in large Kuiper belt objects //Lunar & Planetary Science Conf. 36th, Houston. – 2005– Abstract #1074.

131. *Кузьмин Р. О., Забалуева Е. В.* Характер температурного режима поверхностного слоя реголита Фобоса в районе потенциального места

посадки космической станции Фобос-Грунт //Астрономический вестник. – 2003. – Т. 37, №. 6. – С. 526-535.

132. *Busarev V. V.* A hypothesis on the origin of C-type asteroids and carbonaceous chondrites //arXiv preprint arXiv:1211.3042. – 2012.

133. *Бусарев В. В.* Спектральные исследования астероидов 21 Лютеция и 4 Веста как объектов космических миссий //Астрономический вестник. – 2010. – Т. 44, №. 6. – С. 539-551.

134. *Pieters C. M. et al.* Character and spatial distribution of OH/H2O on the surface of the Moon seen by M3 on Chandrayaan-1 //Science. – 2009. – Vol. 326, № 5952. – P. 568-572.

135. Daily and monthly sunspot number (last 13 years) – Режим доступа: http://sidc.oma.be/silso/dayssnplot (дата обращения 10.12.2018)

136. *Gopalswamy N. et al.* The 2012 July 23 backside eruption: An extreme energetic particle event? //The Astrophysical Journal. – 2016. – Vol. 833, №. 2. – P. 216.

137. *Skorov Y. V. et al*. A model of short-lived outbursts on the 67P from fractured terrains //Astronomy & Astrophysics. – 2016. – Vol. 593. – P. A76.

Приложение А. Эфемериды и наблюдаемые параметры астероидов Главного Пояса [2], [53]

11 Парфенопа

Дата (год месяц число)	Время UTC	R.A. (h m)	Decl. (˚ ‘)	Delta (AU)	R (AU)	Elong (˚)	Фазовый угол(º)	$V^{(m)}$	Высота.(º)	Время экспозиции (s)	Воздушная масса	Относительная фаза вращения
2016 09 19	231600	00 43 40.03	-02 55 11.2	1.2718	2.2603	166.397	6.002	9.26	33.8	45	1.533	0
2016 09 19	231700	00 43 40.00	-02 55 11.5	1.2718	2.2603	166.397	6.002	9.26	33.7	45	1.536	0
2016 09 19	232000	00 43 39.89	-02 55 12.4	1.2718	2.2603	166.400	6.001	9.26	33.2	45	1.544	0.01
2016 09 19	232200	00 43 39.82	-02 55 13.0	1.2718	2.2603	166.401	6.001	9.26	33.0	45	1.549	0.01
2016 09 19 HD 9986 Воздушная масса 1.173												

225 Генриетта

Дата (год месяц число)	Время UTC	R.A. (h m)	Decl. (˚ ‘)	Delta (AU)	R (AU)	Elong (˚)	Фазовый угол(º)	$V^{(m)}$	Высота.(º)	Время экспозиции (s)	Воздушная масса	Относительная фаза вращения
2019 05 17	235100	15 46 48.01	+00 54 37	1.859	2.829	159.571	7.168	12.85	34.6	1200	1.724	-
2019 05 17 HD 115382 Воздушная масса 1.318												

307 Ника

Дата (год месяц число)	Время UTC	R.A. (h m)	Decl. (˚ ‘)	Delta (AU)	R (AU)	Elong (˚)	Фазовый угол(º)	$V^{(m)}$	Высота.(º)	Время экспозиции (s)	Воздушная масса	Относительная фаза вращения
2018 11 03	220300	01 53 10	+01 45 57	1.577	2.542	163.087	6.513	13.63	41.2	1200	1.499	0
2018 11 03	222800	01 53 09	+01 45 54	1.577	2.542	163.070	6.520	13.63	38.1	1200	1.597	0.04
2018 11 03	225300	01 53 08	+01 45 52	1.577	2.542	163.053	6.526	13.63	34.7	900	1.730	0.07

2018 11 03	231200	01 53 08	+01 45 50	1.577	2.542	163.039	6.531	13.63	32.0	900	1.861	0.10
2018 11 04	202400	01 52 26	+01 43 52	1.579	2.542	162.160	6.861	13.65	47.8	900	1.336	0.89
2018 11 04	204200	01 52 25	+01 43 50	1.579	2.542	162.147	6.866	13.65	47.3	1200	1.348	0.91
2018 11 04	210400	01 52 25	+01 43 48	1.579	2.542	162.131	6.872	13.65	46.1	1200	1.373	0.94
2018 11 09	222000	01 48 37	+01 34 55	1.597	2.538	156.856	8.820	13.76	33.5	600	1.707	0.14
2018 11 09	223200	01 48 37	+01 34 55	1.597	2.538	156.847	8.823	13.76	33.4	900	1.782	0.16
2018 11 03 HD 9986 Воздушная масса 1.709 2018 11 04 HD 9986 Воздушная масса 1.222 2018 11 09 HD 10307 Воздушная масса 1.292												

345 Терцидина

Дата (год месяц число)	Время UTC	R.A. (h m)	Decl. (˚ ‘)	Delta (AU)	R (AU)	Elong (˚)	Фазовый угол(º)	$V^{(m)}$	Высота.(º)	Время экспозиции (s)	Воздушная масса	Относительная фаза вращения
2016 09 26	233800	02 07 06.18	+16 09 51.1	1.333	2.251	148.780	13.351	12.11	59.7	480	1.139	0
2016 09 26	234800	02 07 05.96	+16 09 48.2	1.333	2.251	148.788	13.348	12.11	58.9	480	1.147	0.01
2016 09 26	235900	02 07 05.71	+16 09 45.0	1.332	2.251	148.797	13.345	12.11	57.8	500	1.159	0.03
2016 09 27	000900	02 07 05.49	+16 09 42.0	1.332	2.251	148.805	13.342	12.11	56.6	500	1.172	0.04
2016 09 27	002000	02 07 05.24	+16 09 38.8	1.332	2.251	148.813	13.338	12.11	55.4	500	1.188	0.06
2016 09 27 HD 9986 Воздушная масса 1.379												

381 Мирра

Дата (год месяц число)	Время UTC	R.A. (h m)	Decl. (˚ ‘)	Delta (AU)	R (AU)	Elong (˚)	Фазовый угол(º)	$V^{(m)}$	Высота.(º)	Время экспозиции (s)	Воздушная масса	Относительная фаза вращения
2016 05 28	233200	16 16 33.85	-04 29 27.8	1.971	2.954	162.786	5.825	12.69	30.5	1800	1.927	-
2016 05 29 HD146233 Воздушная масса 2.158												

482 Петрина

Дата (год месяц число)	Время UTC	R.A. (h m)	Decl. (˚ ‘)	Delta (AU)	R (AU)	Elong (˚)	Фазовый угол(º)	$V^{(m)}$	Высота.(º)	Время экспозиции (s)	Воздушная масса	Относительная фаза вращения
2017 06 24	192400	16 11 39.42	+00 01 12.7	1.837	2.713	142.180	13.279	13.16	46.6	1800	1.375	0
2017 06 24	195700	16 11 38.7	+00 01 10.5	1.837	2.713	142.160	13.285	13.16	45.4	1800	1.403	0.04
2017 06 24	202900	16 11 38.01	+00 01 08.4	1.838	2.713	142.141	13.291	13.16	43.1	1800	1.462	0.09
2017 06 24	210000	16 11 37.34	+00 01 06.3	1.838	2.713	142.122	13.297	13.16	40.0	1800	1.554	0.13
2017 06 24 HD 143436 Воздушная масса 1.632729												

488 Креуса

Дата (год месяц число)	Время UTC	R.A. (h m)	Decl. (˚ ‘)	Delta (AU)	R (AU)	Elong (˚)	Фазовый угол(º)	$V^{(m)}$	Высота.(º)	Время экспозиции (s)	Воздушная масса	Относительная фаза вращения
2019 05 22	193200	10 53 29.17	+21 01 21	2.406	2.695	95.269	21.962	12.93	40.1	1200	1.505	0
2019 05 22	195500	10 53 29.84	+21 01 13	2.407	2.695	95.257	21.962	12.93	36.9	1200	1.643	0.06
2019 05 22	201700	10 53 30.48	+21 01 05	2.407	2.695	95.246	21.963	12.93	32.8	1200	1.811	0.13
2019 05 22 HD 107633 Воздушная масса 1.176												

712 Боливиана

Дата (год месяц число)	Время UTC	R.A. (h m)	Decl. (˚ ‘)	Delta (AU)	R (AU)	Elong (˚)	Фазовый угол(º)	$V^{(m)}$	Высота.(º)	Время экспозиции (s)	Воздушная масса	Относительная фаза вращения
2017 06 27	211500	23 17 10.74	+11 55 47	2.021	2.426	100.8	24.3	13.09	21.5	1800	2.7126	0
2017 06 27	212500	23 17 51.52	+12 05 24	2.007	2.424	101.5	24.3	13.08	24.0	1800	2.447	0.06
2017 06 27	223000	23 17 53.10	+12 05 47	2.007	2.424	101.5	24.3	13.08	35.5	1800	1.719	0.15
2017 06 27 HD 109931 Воздушная масса 1.373												

787 Москва

Дата (год месяц число)	Время UTC	R.A. (h m)	Decl. (˚ ‘)	Delta (AU)	R (AU)	Elong (˚)	Фазовый угол(º)	$V^{(m)}$	Высота.(º)	Время экспозиции (s)	Воздушная масса	Относительная фаза вращения
2016 09 19	212200	22 54 39.56	-00 06 21.6	1.281	2.270	166.273	6.023	12.49	36.9	600	1.445	0
2016 09 26	211900	22 50 51.28	-01 38 11.7	1.313	2.276	158.831	9.146	12.69	39.0	1500	1.562	0.68
2016 09 26	214600	22 50 50.71	-01 38 26.0	1.313	2.276	158.810	9.155	12.69	36.0	1500	1.670	0.76
2016 09 26	221400	22 50 50.12	-01 38 40.8	1.313	2.276	158.788	9.164	12.69	32.3	1500	1.828	0.84

2016 09 19 HIP 109931 Воздушная масса 1.261

2016 09 26 HIP 100963 Воздушная масса 1.608

788 Гогенштейна

Дата (год месяц число)	Время UTC	R.A. (h m)	Decl. (˚ ‘)	Delta (AU)	R (AU)	Elong (˚)	Фазовый угол(º)	$V^{(m)}$	Высота.(º)	Время экспозиции (s)	Воздушная масса	Относительная фаза вращения
2019 05 23	203300	14 00 32	+03 00 20	1.836	2.709	142.345	13.196	12.95	44.5	1800	1.404	0
2019 05 23	210500	14 00 32	+03 00 23	1.836	2.709	142.323	13.203	12.95	41.1	1800	1.496	0.02
2019 05 23	213700	14 00 31	+03 00 27	1.836	2.709	142.301	13.210	12.95	36.8	1800	1.633	0.03

2019 05 23 HD 134902 Воздушная масса 1.152

863 Бенкоэла

Дата (год месяц число)	Время UTC	R.A. (h m)	Decl. (˚ ‘)	Delta (AU)	R (AU)	Elong (˚)	Фазовый угол(º)	$V^{(m)}$	Высота.(º)	Время экспозиции (s)	Воздушная масса	Относительная фаза вращения
2016 06 02	230300	17 41 11.63	-00 36 52.0	2.188	3.133	154.296	8.075	13.85	43.5	1800	1.432	0
2016 06 02	233400	17 41 10.59	-00 36 55.9	2.187	3.133	154.309	8.071	13.85	41.0	1800	1.499	0.07

2016 06 02 HD133600 Воздушная масса 1.0501

1264 Летаба												
Дата (год месяц число)	Время UTC	R.A. (h m)	Decl. (˚ ‘)	Delta (AU)	R (AU)	Elong (˚)	Фазовый угол(º)	$V^{(m)}$	Высота.(º)	Время экспозиции (s)	Воздушная масса	Относительная фаза вращения
2016 05 25	220500	20 29 27.22	+08 27 23.8	1.910	2.452	110.196	22.823	14.14	33.9	1800	1.764	0
2016 05 25	230700	20 29 27.76	+08 28 04.2	1.910	2.452	110.225	22.819	14.14	43.5	1800	1.435	0.03
2016 05 25 HD173071 Воздушная масса 1.472												

Приложение В. Эфемериды и наблюдаемые параметры астероидов, сближающихся с Землёй, и марс-кроссеров [2], [53]

4450 Пан (1987 SY)

Дата (год месяц число)	Время UTC	R.A. (h m)	Decl. (˚ ‘)	Delta (AU)	R (AU)	Elong (˚)	Фазовый угол(º)	$V^{(m)}$	Высота.(º)	Время экспозиции (s)	Воздушная масса	Относительная фаза вращения
2013 09 09	230900	01 49 39.19	+27 05 43.6	0.348	1.260	130.356	37.514	16.82	64.9	1800	1.049	0
2013 09 09	234000	01 49 32.93	+27 05 22.2	0.348	1.260	130.398	37.479	16.82	69.4	1800	1.041	0.01
2013 09 10	001100	01 49 26.66	+27 05 00.6	0.348	1.261	130.441	37.444	16.82	72.7	1800	1.046	0.02
2013 09 11	220100	01 40 33.33	+26 31 35.0	0.354	1.279	134.118	34.418	16.80	56.2	1800	1.095	0.4
2013 09 11	223300	01 40 27.01	+26 31 10.9	0.354	1.279	134.161	34.382	16.80	61.5	1800	1.063	0.4
2013 09 13	005600	01 35 24.04	+26 10 32.3	0.358	1.289	136.261	32.668	16.80	71.4	1800	1.115	0.3
2013 09 13	012700	01 35 18.01	+26 10 07.0	0.358	1.289	136.303	32.634	16.80	68.0	1800	1.170	0.31
2013 09 10 HIP109931 Воздушная масса 1.053 2013 09 11 HIP109931 Воздушная масса 1.263 2013 09 13 HIP109931 Воздушная масса 1.987												

20826 (2000 UV13)

Дата (год месяц число)	Время UTC	R.A. (h m)	Decl. (˚ ‘)	Delta (AU)	R (AU)	Elong (˚)	Фазовый угол(º)	$V^{(m)}$	Высота.(º)	Время экспозиции (s)	Воздушная масса	Относительная фаза вращения
2016 02 09	175500	01 35 29.28	+67 04 30.4	0.662	1.217	93.071	54.045	15.41	48.2	1800	1.340	0
2016 02 09	192800	01 35 43.87	+67 02 55.8	0.661	1.217	93.036	54.085	15.40	39.2	1800	1.575	0.13
2016 02 09	195900	01 35 48.80	+67 02 24.2	0.661	1.216	93.025	54.098	15.40	36.4	1800	1.676	0.17
2016 02 09 HIP115604 Воздушная масса 1.629												

24445 (2000 PM8)

Дата (год месяц число)	Время UTC	R.A. (h m)	Decl. (˚ ‘)	Delta (AU)	R (AU)	Elong (˚)	Фазовый угол(º)	V(m)	Высота.(º)	Время экспозиции (s)	Воздушная масса	Относительная фаза вращения
2013 09 07	234800	03 19 44.11	+40 55 30.9	0.453	1.211	105.657	53.243	15.35	61.8	900	1.134	0
2013 09 08	000400	03 19 48.42	+40 55 20.6	0.453	1.211	105.656	53.248	15.35	64.7	900	1.106	0.01
2013 09 08	001800	03 19 52.19	+40 55 11.5	0.453	1.211	105.654	53.252	15.35	67.1	900	1.085	0.02
2013 09 08	003600	03 19 57.04	+40 54 59.7	0.452	1.211	105.653	53.258	15.35	70.5	900	1.061	0.4
2013 09 08	005200	03 20 01.35	+40 54 49.2	0.452	1.211	105.651	53.263	15.35	73.5	900	1.043	0.4
2013 09 10	020500	03 33 48.06	+40 16 54.4	0.435	1.198	105.296	54.201	15.26	84.9	900	1.004	0.3
2013 09 10	022100	03 33 52.54	+40 16 40.2	0.435	1.198	105.296	54.203	15.26	86.9	900	1.001	0.31

2013 09 08 HIP115604 Воздушная масса 1.121

2013 09 10 HIP115604 Воздушная масса 1.338

68216 (2001 CV26)

Дата (год месяц число)	Время UTC	R.A. (h m)	Decl. (˚ ‘)	Delta (AU)	R (AU)	Elong (˚)	Фазовый угол(º)	V(m)	Высота.(º)	Время экспозиции (s)	Воздушная масса	Относительная фаза вращения
2016 02 10	230300	16 15 09.70	+71 40 35.1	0.288	1.077	100.524	64.258	16.23	45.2	1800	1.407	0
2016 02 10	233400	16 14 52.01	+71 41 04.1	0.288	1.077	100.549	64.237	16.23	47.8	1800	1.351	0.212

2016 02 11 HD 129357 Воздушная масса 1.121

93768 (2000 WN22)

Дата (год месяц число)	Время UTC	R.A. (h m)	Decl. (˚ ‘)	Delta (AU)	R (AU)	Elong (˚)	Фазовый угол(º)	V(m)	Высота.(º)	Время экспозиции (s)	Воздушная масса	Относительная фаза вращения
2016 02 10	204400	13 11 34.05	+49 02 00.9	0.905	1.671	124.004	29.318	16.38	46.4	1800	1.377	0

2016 02 10	211500	13 11 34.97	+49 02 18.2	0.905	1.671	124.008	29.318	16.38	51.3	1800	1.279	0.193
2016 02 10	214600	13 11 35.88	+49 02 35.5	0.905	1.671	124.012	29.317	16.38	56.4	1800	1.200	0.385
2016 02 10 HD 101364 Воздушная масса 1.303												

112493 (2002 PR6)

Дата (год месяц число)	Время UTC	R.A. (h m)	Decl. (˚ ‘)	Delta (AU)	R (AU)	Elong (˚)	Фазовый угол(º)	$V^{(m)}$	Высота.(º)	Время экспозиции (s)	Воздушная масса	Относительная фаза вращения
2016 02 04	225500	09 43 59.33	+10 40 22.0	0.530	1.511	170.270	6.3322	15.61	54.3	1800	1.220	-
2016 02 04	232600	09 43 58.59	+10 40 57.3	0.530	1.511	170.300	6.3130	15.61	51.5	1800	1.268	-
2016 02 05	011400	09 43 56.07	+10 43 00.1	0.531	1.512	170.401	6.2463	15.60	35.9	1800	1.685	-
2016 02 05	014500	09 43 55.37	+10 43 35.3	0.531	1.512	170.430	6.2272	15.60	30.6	1800	1.938	-
2016 02 05	212000	09 43 31.88	+11 05 58.8	0.532	1.514	171.518	5.5149	15.58	56.3	1800	1.192	-
2016 02 04 HD 78660 Воздушная масса 1.583 2016 02 05 HD 78660 Воздушная масса 1.193												

337866 (2001 WL15)

Дата (год месяц число)	Время UTC	R.A. (h m)	Decl. (˚ ‘)	Delta (AU)	R (AU)	Elong (˚)	Фазовый угол(º)	$V^{(m)}$	Высота.(º)	Время экспозиции (s)	Воздушная масса	Относительная фаза вращения
2016 02 09	214000	13 37 39.89	+24 12 39.4	0.134	1.063	121.515	52.333	16.39	39.3	1800	1.571	-
2016 02 09	221100	13 37 43.73	+24 12 41.3	0.134	1.063	121.518	52.328	16.39	44.7	1800	1.411	-
2016 02 09	224200	13 37 47.51	+24 12 42.9	0.134	1.063	121.521	52.322	16.39	50.2	1800	1.293	-
2016 02 09	231300	13 37 51.25	+24 12 44.3	0.134	1.063	121.524	52.317	16.39	55.3	1800	1.206	-
2016 02 10	002600	13 37 59.89	+24 12 46.2	0.134	1.063	121.532	52.303	16.39	66.2	1800	1.088	-
2016 02 10	005700	13 38 03.51	+24 12 46.5	0.134	1.063	121.536	52.297	16.39	69.0	1800	1.066	-
2016 02 10	012800	13 38 07.12	+24 12 46.4	0.134	1.063	121.540	52.291	16.39	69.9	1800	1.058	-
2016 02 10	015900	13 38 10.72	+24 12 45.9	0.134	1.063	121.543	52.285	16.40	69.3	1800	1.064	-

2016 02 10 HD 107633 Воздушная масса 1.167

468738 (2010 TN54)

Дата (год месяц число)	Время UTC	R.A. (h m)	Decl. (˚ ‘)	Delta (AU)	R (AU)	Elong (˚)	Фазовый угол(º)	V(m)	Высота.(º)	Время экспозиции (s)	Воздушная масса	Относительная фаза вращения
2013 09 12	233900	22 45 12.06	+17 07 52.1	0.237	1.228	156.912	18.746	17.48	51.9	3600	1.270	-

2013 09 13 HIP109931 Воздушная масса 1.199

518810 (2010 CF19)

Дата (год месяц число)	Время UTC	R.A. (h m)	Decl. (˚ ‘)	Delta (AU)	R (AU)	Elong (˚)	Фазовый угол(º)	V(m)	Высота.(º)	Время экспозиции (s)	Воздушная масса	Относительная фаза вращения
2013 08 29	213400	00 16 46.77	-05 29 33.5	0.063	1.066	154.017	24.508	16.96	32.6	2700	1.85190	-

2013 08 29 HD10307 Воздушная масса 1.050

Приложение С. Эфемериды и наблюдаемые параметры астероидов 145 Адеона, 704 Интерамния, 779 Нина, 65 Кибела и 51 Немауза [2], [53]

Таблица С1 − Наблюдательные параметры 145 Адеона (перигелийное расстояние q=2.2889472 а.е.) в сентябре 2012 г. и в январе-июне 2018 г. при выполнении ее спектрофотометрии и UBVRI / BVRI - фотометрии на разных обсерваториях

Дата	UT (hms) среднее	Δ (а. е.)	r (а. е.)	Фаз. угол (˚)	Видимая звездная величина	Время экспоз. (с)	Воздуш. масса	Обсерватория, телескоп, вид наблюдений	Стандарт. звезда солнечного типа	Воздуш. масса звезды
2012 09 19	232200	2.080	2.616	21.0	10.9	1200	1.286	Терскол, 2-м, спектрофот-рия	HD 10307	1.090
2018 02 07	191200	1.410	2.288	14.4	11.48	30	1.019	Крым, 60-см, UBVRI-фот-рия	HIP 22528	1.1104
2018 02 07	192100	1.410	2.288	14.4	11.48	30	1.016	Крым, 60-см, UBVRI-фот-рия		
2018 02 07	192900	1.410	2.288	14.4	11.48	30	1.013	Крым, 60-см, UBVRI-фот-рия		
2018 02 15	190400	1.467	2.288	17.3	11.67	25	1.011	Крым, 60-см, UBVRI-фот-рия	HIP 22528	1.1388
2018 02 15	191400	1.467	2.288	17.3	11.67	25	1.010	Крым, 60-см, UBVRI-фот-рия		
2018 04 09	194200	2.032	2.301	25.8	12.66	40	1.304	Крым, 60-см, UBVRI-фот-рия	HIP 22528	1.7094
2018 04 09	195200	2.032	2.301	25.8	12.66	40	1.343	Крым, 60-см, UBVRI-фот-рия		

2018 04 09	200300	2.032	2.301	25.8	12.66	40	1.386	Крым, 60-см, UBVRI-фот-рия		
2018 04 10	174900	2.042	2.301	25.8	12.67	40	1.070	Крым, 60-см, UBVRI-фот-рия	HIP 22528	1.3115
2018 04 10	175900	2.042	2.301	25.8	12.67	40	1.083	Крым, 60-см, UBVRI-фот-рия		

Таблица С2 − Наблюдательные параметры 704 Интерамния (перигелийное расстояние q=2.586 а.е.) в сентябре 2012 г. и в июне-ноябре 2017 г. при выполнении ее спектрофотометрии и UBVRI (BVRI) - фотометрии на разных обсерваториях.

Дата	UT (h m s) среднее	Δ (а. е.)	r (а. е.)	Фаз. угол (˚)	Видимая звездная величина	Время экспоз. (с)	Воздуш. масса	Относ. фаза вращения (ОФВ)	Обсерватория, телескоп, вид наблюдений	Стандарт. звезда солнечного типа	Возд. масса звезды
2012 09 13	222800	2.080	2.616	21.0	10.9	600	1.286	-	Терскол, 2-м, спектрофот-рия	HD 10307	1.188
2017 06 23	224200	2.496	2.639	22.6	11.38	900	1.931	0	Терскол, 2-м, спектрофот-рия	HD 10307	1.981
2017 06 23	230000	2.496	2.639	22.6	11.4	700	1.767	0.03	Терскол, 2-м, спектрофот-рия,		
2017 06 23	231500	2.496	2.639	22.6	11.38	600	1.659	0.06	Терскол, 2-м, спектрофот-рия,		
2017 06 23	232700	2.495	2.639	22.6	11.38	600	1.580	0.09	Терскол, 2-м, спектрофот-рия,		
2017 06 23	233900	2.495	2.639	22.6	11.38	600	1.516	0.11	Терскол, 2-м, спектрофот-рия,		
2017 06 23	235000	2.495	2.639	22.6	11.38	600	1.462	0.13	Терскол, 2-м, спектрофот-рия,		

2017 06 27	231900	2.447	2.636	22.7	11.34	60	1.538	0.07	Терскол, 2-м, спектрофот-рия,	HD 10307	1.631
2017 06 27	232100	2.447	2.636	22.7	11.34	180	1.522	0.075	Терскол, 2-м, спектрофот-рия,		
2017 06 27	232400	2.447	2.636	22.7	11.34	200	1.507	0.08	Терскол, 2-м, спектрофот-рия,		
2017 06 27	233000	2.447	2.636	22.7	11.34	300	1.479	0.09	Терскол, 2-м, спектрофот-рия,		
2017 06 27	233800	2.447	2.636	22.7	11.34	250	1.443	0.11	Терскол, 2-м, спектрофот-рия,		
2017 06 27	234400	2.446	2.636	22.7	11.34	250	1.415	0.12	Терскол, 2-м, спектрофот-рия,		
2017 09 07	213930	1.722	2.595	22.7	10.2	5	1.060	-	Крым, 60-см, UBVRI-фот-рия	HD 804	1.095
2017 10 25	163654	1.729	2.586	13.7	10.2	5	1.025	-	Санглок, 1-м, BVRI-фот-рия	HIP 2894	1.104
2017 11 11	212717	1.853	2.587	17.4	10.5	10	1.527	-	Крым, 60-см, UBVRI-фот-рия	HD 804	1.281
2017 11 12	214308	1.862	2.587	17.6	10.5	15	1.651	-	Крым, 60-см, UBVRI-фот-рия	HD 804	1.114
2017 11 17	175652	1.906	2.587	18.6	10.6	5	1.297	-	Санглок, 1-м, UBVRI-фот-рия	HIP 109931	1.509

Таблица С3 − Наблюдательные параметры 779 Нина при ее наблюдениях в моменты последовательных прохождений перигелия в сентябре 2012 г. и в сентябре 2016 г. (перигелийное расстояние q=2.058 а.е.)

Дата, № спектра	UT (hms) среднее	Δ (а.е.) среднее	r (а.е.) среднее	Фаз. угол (˚) средний	Видимая звезд. вел. средняя	Возд. масса астероида	Время экспоз. (с)	Обсерватория, телескоп, вид наблюдений	Стандарт. звезда солнечного типа	Воздушная масса звезды	ОФВ
2012 09 13 (1)	190500	1.289	2.149	18.1	11.05	1.329	300	Терскол, 2-м, сп-фотометрия	HD10307	2.088	0
2012 09 13 (2)	212300	1.289	2.149	18.0	11.05	1.045	300	Терскол, 2-м, сп-фотометрия	HD10307	1.349	0.21
2012 09 13 (3)	234600	1.288	2.149	18.0	11.05	1.052	300	Терскол, 2-м, сп-фотометрия	HD10307	1.026	0.43
2016 09 26	201000	1.411	2.060	25.9	11.40	2.513	1500	Терскол, 2-м, сп-фотометрия	HD 9986	1.428	0
2016 09 28	200000	1.422 1.430	2.060	25.9 26.2	11.4	2.458	400	Терскол, 2-м, сп-фотометрия	HD 173071,	2.629	0.30
2016 09 26	201650	1.422	2.060	25.1	11.3	-	10	Терскол, 60-см, поляриметрия	-	-	0
2016 09 28	194050	1.422	2.060	25.9	11.4	-	10	Терскол, 60-см, поляриметрия	-	-	0.30

Таблица С4 − Наблюдательные параметры 65 Cybele (перигелийное расстояние q = 3.04505 а. е.) при наблюдениях 20 сентября 2016 г. на Терсколе

Дата	UT среднее (h m s)	Δ (а. е.)	r (а. е.)	Фаз. угол (˚)	Видимая звездная величина	Вр. экспоз. (s)	Возд. масса астероида	Стандарт. звезда солнечного типа	Возд. масса звезды
2016 09 20	003900	2.746	3.616	9.1	12.3	480	1.279	HD 9986	1.618
2016 09 20	004800	2.746	3.616	9.1	12.3	480	1.297	HD 9986	

Таблица С5 − Наблюдательные параметры 51 Немауза (перигелийное расстояние q = 2.20688 а. е.) при наблюдениях 20 и 24 сентября 2016 г. на Терсколе

Дата	UT среднее (h m s)	Δ (а. е.)	r (а. е.)	Фаз. угол (˚)	Видимая звезд. величина	Вр. эксп. (с)	Возд. масса астероида	ОФВ	Станд. звезда солнеч. типа	Возд. масса звезды
2016 09 20	00 02 00	1.5920	2.5163	11.3	11.12	240	1.313	0	HD 9986	1.2153
2016 09 24	22 12 00	1.5645	2.5153	9.2	11.00	1500	1.285	0.19	HD 9986	1.1796
2016 09 24	22 39 00	1.5644	2.5152	9.2	11.00	1200	1.279	0.25		