

## Оценка состава вещества астероидов по спектрам отражения с использованием метеоритных аналогов

А. А. Савелова,<sup>1,\*</sup> В. В. Бусарев,<sup>1,2</sup> М. П. Щербина<sup>2,1</sup>

<sup>1</sup>Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга (ГАИШ МГУ)  
Россия, 119234, Москва, Университетский пр-т, д. 13

<sup>2</sup>Институт астрономии Российской академии наук (ИНАСАН)  
Россия, 119017, Москва, ул. Пятницкая, д. 48

(Поступила в редакцию 23.08.2022; после доработки 09.12.2022; принята к публикации 14.12.2022)

Представлена разработанная в среде MATLAB программа для оценки состава вещества астероидов на основе моделирования их спектров отражения с использованием данных об их метеоритных аналогах. Обсуждаются результаты моделирования и оценки состава вещества для 10 астероидов (1 Цереры, 4 Весты, 51 Немаузы, 65 Кибелы, 102 Мириам, 250 Беттины, 266 Алины, 379 Гуенны, 704 Интерамнии, 1474 Бейры). Для ряда астероидов (1 Церера, 4 Веста, 51 Немауза, 250 Беттина, 704 Интерамния) получено хорошее согласие между модельными спектрами отражения и наблюдаемыми.

PACS: 96.30.Ys, 95.55.Qf, 96.30.Za. УДК: 523.44

Ключевые слова: спектры отражения астероидов, метеоритные аналогии, моделирование спектров отражения, оценка состава вещества.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.78.2330801](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.78.2330801)

### ВВЕДЕНИЕ

Как известно по результатам изучения метеоритов астероидного происхождения (например, [1]), состав вещества их вероятных родительских тел со времени образования изменился значительно меньше, чем у планет, испытавших более глубокую дифференциацию. В то же время в отличие от планет с атмосферами астероиды — это геологически пассивные тела. На поверхности астероидов на вещество не действуют такие факторы, как атмосфера, вода и высокая гравитация; благодаря этому, с одной стороны, вещество сохраняет первичные космохимические характеристики, а с другой — на поверхности образуется и сохраняется в течение длительного времени слой измельченного метеоритами вещества — реголита, химический состав которого соответствует исходному веществу, из которого он образовался. Это означает, что при помощи данных о составе астероидов можно определять начальные условия формирования всех планетных тел Солнечной системы и контролировать правильность космогонических моделей. Также при изучении метеоритов и образцов вещества астероидов возможно обнаружение ранее неизвестных важных для науки минералов [2].

Кроме того, изучение астероидов уже имеет практическую значимость. Во-первых, их исследования необходимы для оценки степени угрозы при возможном падении на Землю и для разработки способов противодействия этой угрозе; во-вторых, для

поиска источников некоторых минеральных ресурсов, запасы которых на нашей планете ограничены.

Достаточно простым и не требующим значительных затрат методом определения состава поверхностного вещества астероидов является их спектrophотометрия и анализ полученных спектров отражения. При этом используются аналогичные характеристики изученных в земных лабораториях образцов-аналогов, в частности минералов и метеоритов астероидного происхождения (например, [3–6]). Метеориты являются вероятными фрагментами астероидов, сформировавшимися в других геохимических и  $PT$ -условиях по сравнению с земными минералами, а значит, их спектры отражения должны быть ближе к спектрам отражения астероидов, чем спектры смесей земных минералов.

В условиях постоянного роста количества открытых малых тел необходима автоматизация изучения их вещества. Для этой цели была разработана программа, выполняющая спектральный подбор метеоритных и минеральных аналогов, соответствующих наблюдательным спектрам конкретных астероидов.

Оценка качественного и количественного минерального состава поверхностного вещества астероидов проводится с помощью программ в среде MATLAB в три этапа (или шага). Эти программы позволяют вначале установить таксономический (спектральный) класс астероида по общей форме его спектра отражения, а затем рассчитать модельный спектр, близкий к спектру астероида, методом линейного географического (т. е. в зависимости от доли занимаемой площади на поверхности астероида) комбинирования спектров отражения соответствующих образцов-аналогов. Заверша-

\* E-mail: [aa.rezaeva@physics.msu.ru](mailto:aa.rezaeva@physics.msu.ru)

ющим этапом работы этих программ является определение долевого соотношения нескольких (оптимально не более трех) основных компонентов в составе вещества астероида. Программа, осуществляющая второй и третий шаги, и примеры её работы по поиску материалов-аналогов обсуждаются в данной статье. Оценка минерального состава поверхностного вещества астероидов осуществляется подобным образом при наличии подходящих по спектральным характеристикам образцов-аналогов земного происхождения.

## 1. ИСПОЛЬЗУЕМАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ АСТЕРОИДОВ

Наиболее часто используемыми в настоящее время являются таксономические (систематические) классификации астероидов Толена [7] и SMASSII [8].

Классификация Толена основана на восьмицветном (многополосном) обзоре Зелнера [9] (в диапазоне 0.34–1.04 мкм) 589 астероидов Главного пояса. В ней учитывались характерные особенности (наиболее сильные полосы поглощения преобладающих в составе вещества минералов) усредненных спектров отражения астероидов и значения их визуального альбеда. Для выделения спектральных классов был применен метод главных компонент. Связь классов астероидов Толена и их химико-минерального состава изучалась посредством лабораторных исследований спектров отражения минералов, горных пород и метеоритов с установленным составом вещества [10].

Для создания классификации SMASSII также был применен метод главных компонент (в этом состоит преимущество классификаций Толена и SMASSII) при изучении спектров отражения ~ 1500 астероидов обзора SMASSII (в диапазоне длин волн 0.435–0.925 мкм). Авторы при проведении этой классификации не использовали значения альбеда, но учитывали более слабые полосы поглощения в спектрах отражения астероидов по сравнению с классификацией Толена, так как анализировались непрерывные ПЗС-спектры с более высоким разрешением.

Хотя в классификации Толена используются спектры отражения с меньшим разрешением по сравнению с классификацией SMASSII, но она дает общее правильное представление о минералогии астероидов по форме их спектров отражения. На этом основании в настоящей работе используется классификация астероидов Толена.

## 2. ОЦЕНКА СОСТАВА ВЕЩЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ АСТЕРОИДА ПО ФОРМЕ ЕГО СПЕКТРА ОТРАЖЕНИЯ

Для поисков метеоритных и минеральных аналогов вещества астероидов была разработана про-

грамма ОСВАСО («Определение состава вещества астероидов по спектрам отражения») при помощи пакета MATLAB. Также для этого была создана собственная база спектров отражения минералов и метеоритов на основе общедоступных баз данных [11, 12]. Из исходных метеоритных баз данных были исключены все образцы «slab», «chip» и тому подобные и пластины, а оставлены только образцы, раздробленные до состояния порошка. При этом предполагается, что реголит на астероидах состоит в основном из достаточно мелких частиц (от микронного до миллиметрового размеров), а не из более крупных обломков, влияющих в меньшей степени на спектр диффузного отражения. Были также исключены из рассмотрения образцы, испорченные коррозией, воздействием окружающих условий, расплавленные при ударе (как не имеющие массового распространения; при этом мы учитываем, что при наблюдениях регистрируется спектр всей полусферы астероида, обращенной к наблюдателю), и фрагменты коры плавления.

Алгоритм программы ОСВАСО имеет следующий вид:

1. Нормировка используемых спектров отражения на длине волны 0.55 мкм.
2. Расчет полиномиального приближения спектра отражения астероида.
3. Выбор супергрупп минералов (высокотемпературные, низкотемпературные, смеси) или метеоритов для построения модельного приближения (этот выбор пользователь делает на основании установленного или предполагаемого класса астероида).
4. Фильтрация спектров отражения минералов или метеоритов, выбранных для построения модельного приближения. Для этой цели был выбран некоторый «стандартный» набор длин волн (набор опорных точек), большая часть которых соответствует длинам волн характерных особенностей спектров отражения часто встречающихся в метеоритах минералов. Программа отбирает из базы данных спектры отражения минералов или метеоритов, отличающиеся от полиномиального приближения спектра отражения изучаемого астероида в заданных опорных точках не больше чем на число  $a_1 \geq 0$ , заданное пользователем.
5. Расчет модельного приближения полинома комбинацией отобранных спектров отражения минералов или метеоритов.
6. Наилучшее с точки зрения программы приближение (по критерию минимального отклонения в опорных точках от спектра отражения) не всегда является лучшим с точки зрения совпадения характерных особенностей спектра, таких как, например, полосы

поглощения. Так как программа не учитывает подобные особенности спектра, то проверку схожести спектра астероида и его приближения по полосам поглощения пользователь проводит самостоятельно. Если пользователь не удовлетворяет приближение, полученное на шаге 5, он имеет возможность запустить повторную фильтрацию массива спектров, выбранных для моделирования спектра астероида, или запустить программу заново, выбрав другое значение  $a_1$  на шаге 4. Вторая фильтрация заключается в более жестком отборе выбранных на шаге 4 спектров отражения. В результате остаются только те спектры отражения минералов или метеоритов, которые отклоняются от полинома астероида во всем диапазоне не более чем на заданное пользователем число  $a_2 \geq 0$  (может быть отличное от  $a_1$ ).

7. Расчет модельного приближения полинома спектра отражения астероида отобранными на шаге 6 спектрами отражения минералов или метеоритов.

Спектры отражения астероидов моделируются линейной суммой спектров отражения минералов или метеоритов, взятых с некоторыми коэффициентами, соответствующими географическому (площадному) распределению материалов на поверхности астероида. В программе нами условно принято, что все минералы (метеориты) имеют одинаковый удельный вес, поэтому в итоге оцениваются объемные количества минералов (метеоритов), соответствующие их площадному распределению на поверхности астероида.

Коэффициенты подбираются с помощью генерации случайных наборов чисел, удовлетворяющих заданным условиям, и выбором наилучшего из них.

По найденному метеоритному приближению состава вещества поверхности астероида можно сделать оценку его минерального состава. К настоящему моменту накоплено много данных о составе метеоритов разных типов. Однако хотелось бы установить точнее, какие именно минералы могут в комбинации дать наблюдаемый спектр отражения астероида. В программе это реализуется таким образом: в случае построения «удачной» метеоритной модели в расчете модельного спектра используются те типы земных минералов, которые соответствуют найденному метеоритному приближению (например, высокотемпературные или низкотемпературные минералы). При этом необходимо помнить, что даже при самом лучшем алгоритме метеоритная модель может быть «неудачной» по причине ограниченности баз данных метеоритов (из-за селективности земной атмосферы при падении метеоритного вещества разных типов и ряда других причин). В случае «неудачной» метеоритной модели всё равно, на наш взгляд, имеет смысл попытаться построить минеральную модель, варьи-

руя разные типы минералов, чтобы иметь основание говорить о том, что какой-то земной минерал на астероидах, возможно, присутствует, хотя пока в метеоритах его и не нашли.

Очевидно, пополнение метеоритных баз данных и улучшение обсуждаемого алгоритма будут способствовать уточнению модельных спектров и последующей оценке состава вещества астероидов.

### 3. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОГРАММЫ ОСВАСО НА СПЕКТРАХ ОТРАЖЕНИЯ АСТЕРОИДОВ ИЗ БАЗЫ SMASSII

Для описания работы программы и демонстрации её возможностей был проведен подбор метеоритных аналогов по их спектрам отражения для ряда астероидов, так или иначе рассматривавшихся в наших недавних работах (например, [13, 14]). Спектры отражения 9 астероидов были взяты из базы данных SMASSII [8], а ещё два спектра (102 Мириам и 266 Алина) рассчитаны по нашим наблюдательным данным, полученным с помощью спектрофотометрии низкого разрешения ( $R \sim 100$ ) на пике Терскол [15].

В табл. 1 приведены все полученные результаты. Ниже рассмотрим каждый из астероидов отдельно.

Астероид 1 Церера, согласно классификации Толена [16], принадлежит к классу G. Наше моделирование показывает, что спектр отражения хорошо совпадает со спектром отражения метеорита Allende, углистым хондритом типа CV3 (рис. 1, а), что не противоречит низкотемпературной минералогии указанного типа. Водяной лед, присутствующий в больших количествах на поверхности Цереры по данным миссии Dawn ([17]), практически никак не проявляется в видимом диапазоне, у него почти плоский спектр, лишенный каких-либо полос поглощения.

4 Веста принадлежит к классу V. Метеоритными аналогами астероидов класса V считаются метеориты группы HED. Программа подобрала сумму спектров двух эвкритов, хорошо согласующуюся со спектром отражения астероида (рис. 1, б).

Поверхность Весты минералогически неоднородная. Мы использовали спектр отражения Весты с экспозицией 3,5 с, что, с учетом периода ее вращения  $5.3^h$  [16], очень мало. То есть использованный спектр характеризует свойства только одной стороны астероида.

Для астероида 51 Немауза класса CU программа подобрала (рис. 2, а) в качестве метеоритного аналога метеорит Mighei, возглавляющий группу CM2. Это согласуется с предполагаемым низкотемпературным составом данного класса астероидов и типом их метеоритов-аналогов.

65 Кибела (рис. 2, б) и 102 Мириам (рис. 2, в) принадлежат к низкотемпературному классу P. Согласно последним данным [8], по классификации SMASSII 65 Кибелла и 102 Мириам принадлежат

Таблица 1. Результаты моделирования спектров отражения астероидов, взятых из базы SMASSII, и оценки состава их вещества с использованием спектров отражения метеоритов

Астероид	Спектральный класс по Толену [16]	Метеоритные аналоги и их модельные долевые соотношения <sup>a</sup>
1 Церера	G	100% Allende (CV3)
4 Веста	V	66% Yamato 75011 (Эвкрит) + 34% Millbillillie (Эвкрит)
51 Немауза	CU	100% Mighei (CM2)
65 Кибела	P	55% Murchison (CM2) + 25% Allende (CV3) + 20% Ivuna 300 (CI1)
102 Мириам	P	36% Queen Alexandra Range 93005 (CM2) + 36% Dhofar 735 (CM) + 27% Allende (CV3)
250 Беттина	M	61% Mokoia (CV3) + 36% Abee (E4) + 2% Queen Alexandra Range 93372 (EH5)
379 Гуенна	B	100% Dhofar 225 (CM anomalous)
704 Интрамния	F	55% Murchison (CM2) + 43% Ivuna 700 (CI1) + 2% Yamato 82162 (C1/2)
1474 Бейра	FX	55% Murchison (CM2) + 45% Ivuna 700 (CI1)

<sup>a</sup>Знак «+» здесь и далее означает, что модельный спектр представляет собой линейную комбинацию спектров отражения метеоритов, взятых с коэффициентами, равными их указанной доле.

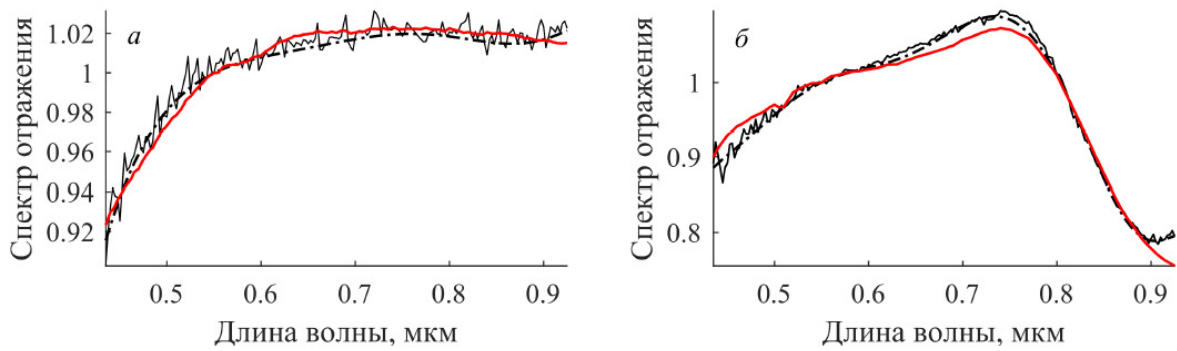


Рис. 1. Нормированные спектры отражения астероидов и их метеоритные модели: *a* — 1 Церера, *б* — 4 Веста. Используются следующие обозначения: сплошная черная линия — нормированный спектр отражения астероида, штрихпунктирная линия — нормированное полиномиальное приближение спектра отражения астероида, красная сплошная линия — нормированный модельный спектр по метеоритным данным

к низкотемпературным спектральным классам Xc и C соответственно. В качестве метеоритной модели для обоих астероидов были подобраны смеси из трех углистых хондритов (CM2, CV3, CI1 и CM2, CM<sup>1</sup>, CV3 соответственно), что не противоречит классу P.

Для астероида 250 Беттина класса M программа подобрала смесь, состоящую из двух энстатитовых хондритов групп E4 и EH5 и углистого хондрита группы CV3 (рис. 3, *a*). Форма спектра отражения металлов (в основном Fe и Ni) в видимом

диапазоне плоская, а сам спектр — красноватый (с ростом отражательной способности в длинноволновой части спектра) [10]. Подобный вид спектров не дает возможности выявить металлы с помощью нашей программы. Однако спектр отражения астероида Беттина имеет относительно много мелких особенностей, что в совокупности с найденным достаточно хорошим приближением может означать, что вещество поверхности астероида смешано с материалом столкнувшихся с ним других тел, возможно, более низкотемпературных по происхождению, чем этот астероид.

Астероид 379 Гуенна принадлежит к классу B. Программа подобрала для него метеорит-аналог типа CM (рис. 3, *б*), согласующийся с предполагаемой низкотемпературной минералогией астероидов класса B.

<sup>1</sup> Несмотря на то, что метеорит Dhofar 735 в базе данных The Meteoritical Bulletin Database [18] относится к типу CM2, в работе [19] его тип был пересмотрен и принят за метаморфизованный CM.

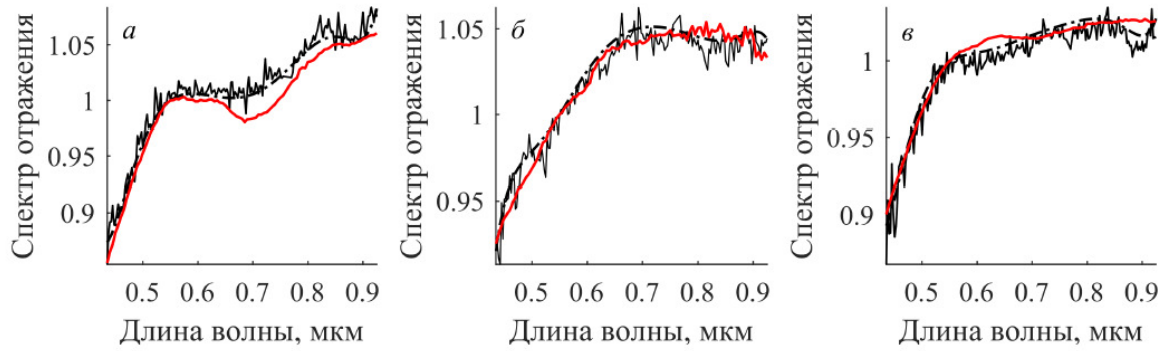


Рис. 2. Нормированные спектры отражения астероидов и их метеоритные модели: *a* — 51 Немауза, *б* — 65 Кибела, *в* — 102 Мириам. Используются следующие обозначения: сплошная черная линия — нормированный спектр отражения астероида, штрихпунктирная линия — нормированное полиномиальное приближение спектра отражения астероида, красная сплошная линия — нормированный модельный спектр по метеоритным данным

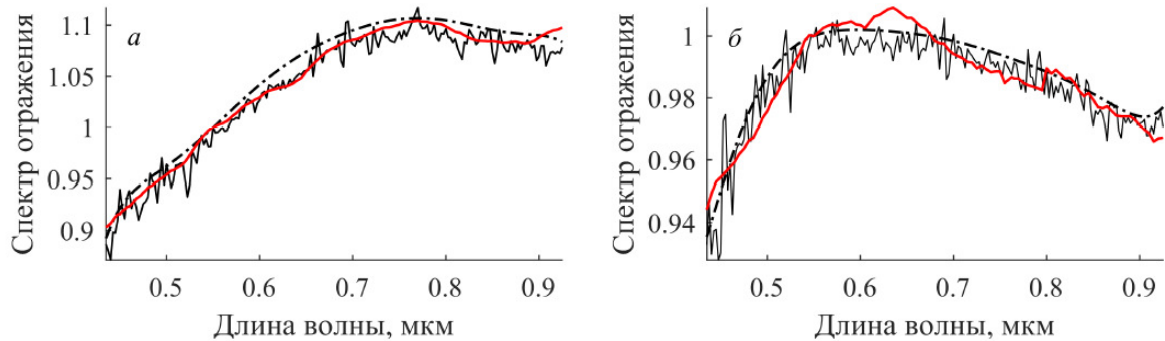


Рис. 3. Нормированные спектры отражения астероидов и их метеоритные модели: *a* — 250 Беттина, *б* — 379 Гуенна. Используются следующие обозначения: сплошная черная линия — нормированный спектр отражения астероида, штрихпунктирная линия — нормированное полиномиальное приближение спектра отражения астероида, красная сплошная линия — нормированный модельный спектр по метеоритным данным

704 Интерамния принадлежит к классу F. Для состава вещества этого астероида была программно подобрана смесь трех углистых хондритов типов CM2, CI1 и C1/2 (рис. 4, *a*), соответствующая возможным метеоритным аналогам астероидов класса F [10].

Для состава вещества 1474 Бейры класса FX была подобрана смесь из двух углистых хондритов типов CM2 и CI1 (рис. 4, *б*), также согласующаяся с возможными метеоритными аналогами астероидов класса F.

#### 4. ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОГРАММЫ ОСВАСО ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТАВА ВЕЩЕСТВА НАБЛЮДАВШИХСЯ НАМИ АСТЕРОИДОВ

Кроме проверки работоспособности программы ОСВАСО на «эталонных» спектрах отражения астероидов из базы SMASSII, эта программа также использовалась для изучения минералогии двух астероидов (102 Мириам и 266 Алина) по их спектрам отражения [15]. Следует отметить, что эти

спектры были специально выбраны по причине отсутствия в них ярко выраженных спектральных деталей, связанных с сублимационно-пылевой активностью [15], которые могли бы помешать корректной оценке минералогического состава поверхностного вещества. Как и в предыдущем разделе, результаты для удобства объединены в табл. 2.

Для астероида 102 Мириам класса P (рис. 5, *a*) программой был подобран модельный спектр отражения в виде нормированной суммы спектров смеси двух углистых хондритов типов CR2 и CV3, а для астероида 266 Алина класса C (рис. 5, *б*) был найден метеорит-аналог типа CM2. Обе спектральные модели не противоречат низкотемпературной минералогии классов P и C.

Необходимо отметить, что модели для астероида 102 Мириам по спектру отражения из базы SMASSII и нашему спектру несколько отличаются: в первой модели присутствуют метеориты типа CM, замещенные во второй CR-метеоритом. Согласно работе [20] спектры метеоритов типов CM и CR одинаковы по форме и наклону и единственной особенностью, позволяющей их различить, является

Таблица 2. Результаты расчета модельных спектров отражения астероидов, полученных по нашим данным, и оценка состава их вещества с использованием спектров отражения метеоритов

Астероид	Спектральный класс по Толену [16]	Метеоритные аналоги и их модельные долевые соотношения
102 Мириам	P	76% Buckley Island 10933 (CR2) + 24% Grosnaja (CV3)
266 Алина	C	100% Nogoya (CM2)

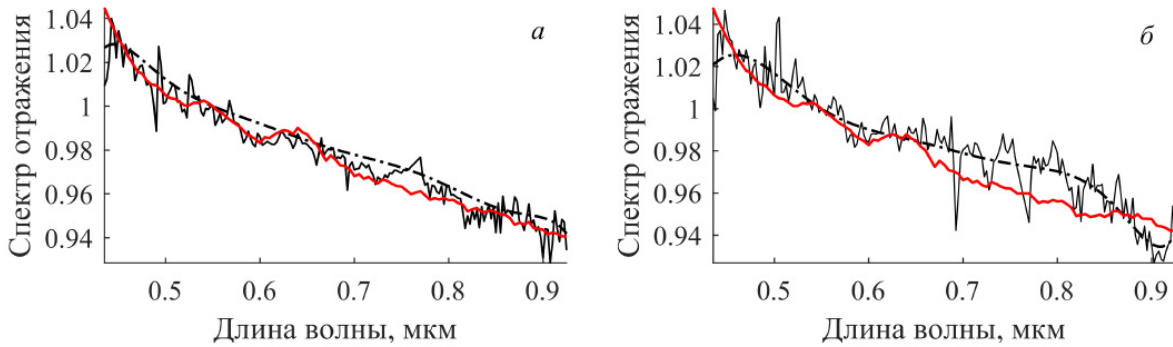


Рис. 4. Нормированные спектры отражения астероидов и их метеоритные модели: *a* — 704 Интерамния, *б* — 1474 Бейра. Используются следующие обозначения: сплошная черная линия — нормированный спектр отражения астероида, штрихпунктирная линия — нормированное полиномиальное приближение спектра отражения астероида, красная сплошная линия — нормированный модельный спектр по метеоритным данным

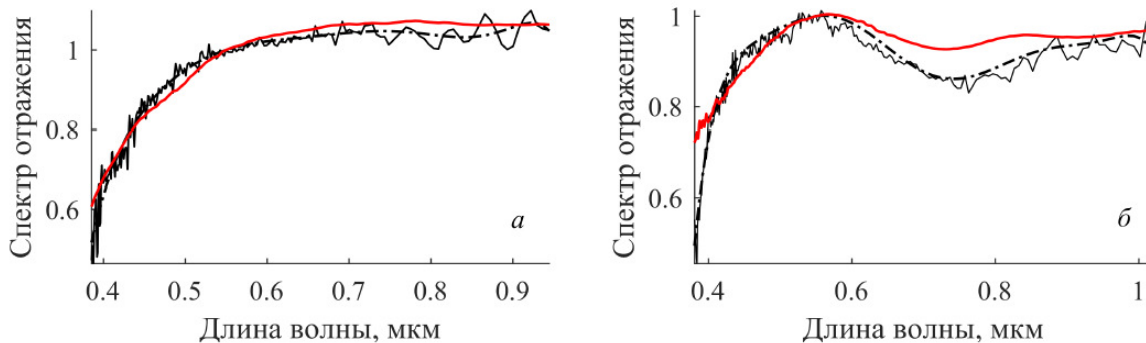


Рис. 5. Нормированные спектры отражения астероидов и их метеоритные модели: *a* — 102 Мириам, *б* — 266 Алина. Используются следующие обозначения: сплошная черная линия — нормированный спектр отражения астероида, штрихпунктирная линия — нормированное полиномиальное приближение спектра отражения астероида, красная сплошная линия — нормированный модельный спектр по метеоритным данным

наличие или отсутствие небольшой полосы поглощения около 0.7 мкм. В программе ОСВАСО используется только общая форма спектров отражения и не учитываются полосы поглощения, поэтому метеориты типов CM и CR для нее неотличимы. Также, несмотря на то, что для построения моделей были отобраны такие спектры, в которых возможные проявления сублимационно-пылевой активности практически отсутствуют, у взятого нами спектра отражения 102 Мириам, вероятно, всё же было небольшое изменение формы, по сравнению со спектром из SMASSII вызванное, по-видимому, появлением очень слабой пылевой экзосферы, связанной

с солнечными эруптивными событиями [15], что, соответственно, должно было повлиять на результирующий модельный спектр.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, программа ОСВАСО позволяет ускорить процесс поиска и подбора наиболее близких метеоритных аналогов, соответствующих астероиду по спектру отражения. В том случае, если оптимальный модельный спектр отражения астероида (наиболее близкий к его наблюдаемому спектру) является комбинацией спектров несколь-

ких образцов-аналогов, то их весовые коэффициенты характеризуют долевые соотношения вещества образцов-аналогов и, соответственно, позволяют количественно оценить состав поверхностного вещества астероида. В настоящей работе было показано, что программа работоспособна и может быть использована для оценки состава вещества

астероида при получении его спектра отражения при достаточно высоком отношении сигнал/шум (не менее  $\sim 20 - 30$ ).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №22-12-00115).

- [1] Weisberg M.K., McCoy T.J., Krot A.N. In: Meteorites and the Early Solar System II. P. 19. (2006).
- [2] Lewis J.S. Mining the Sky: Untold Riches From The Asteroids, Comets, And Planets. Helix Books, 1996.
- [3] Gaffey M.J., McCord T.B. // Space Sci Rev. **21**. 555. (1978).
- [4] Vilas F., Gaffey M.J. // Science. **246**, N 4931. 790. (1989).
- [5] Burbine T.H., Binzel R.P., Bus S.J., Clark B.E. // Meteoritics & Planetary Science. **36**, N 2. 245. (2001).
- [6] Mothé-Diniz T., Carvano J.M. // Astronomy & Astrophysics. **442**, N 2. 727. (2005).
- [7] Tholen D.J. In: Asteroids II. P. 1139. (1989).
- [8] Bus S.J., Binzel R.P. // Icarus. **158**, N 1. 146. (2002).
- [9] Zellner B., Tholen D.J., Tedesco E.F. // Icarus. **61**, N 3. 355. (1985).
- [10] Gaffey M.J., Bell J.F., Cruikshank D.P. In: Asteroids II. P. 98. (1989).
- [11] RELAB Spectral Database. <http://apps.geology.brown.edu/index.php> (Дата обращения: 23.07.2022 г.).
- [12] Centre For Terrestrial and Planetary Exploration. (С-TAPE). <https://www.uwinnipeg.ca/c-tape/> (Дата обращения: 23.07.2022 г.).
- [13] Бусарев В.В., Щербина М.П., Барбанов С.И. и др. // Астрон. вестник. 2019. **53**, №.4. P. 273 (Busarev V.V., Shcherbina M.P., Barabanov S.I. et al. // Solar System Research. **53**, N 4. 261. (2019).)404
- [14] Busarev V.V., Makalkin A.B., Vilas F. et al. // Icarus. 2018. **304**. P. 83.
- [15] Бусарев В.В., Савелова А.А., Щербина М.П., Барбанов С.И. // Астрон. вестн. 2022. **56**, №.2. P. 92.
- [16] Small-Body Database Lookup. (Дата обращения: 29.07.2022 г.).
- [17] Prettyman T.H., Yamashita N., Toplis M.J. et al. // Science. 2016. **355**, N 6320. P. 55.
- [18] The Meteoritical Bulletin Database. (Дата обращения: 09.12.2022 г.).
- [19] Ivanova M.A., Lorenz C.A., Nazarov M.A. et al. // Meteoritics and Planetary Science. 2010. **45**, N 7. P. 1108.
- [20] Cloutis E.A., Hudon P., Hiroi T., Gaffey M.J. // Icarus. 2012. **217**, N 1. P. 389.

## Evaluation of the Asteroid Material Composition by Reflectance Spectra Using Meteorite Analogues

A. A. Savelova<sup>1,a</sup>, V. V. Busarev<sup>1,2</sup>, M. P. Shcherbina<sup>2,1</sup>

<sup>1</sup>Sternberg Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119234, Russia

<sup>2</sup>Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Moscow 119017, Russia

E-mail: <sup>a</sup>[aa.rezaeva@physics.msu.ru](mailto:aa.rezaeva@physics.msu.ru)

The MATLAB program was developed to estimate composition of the asteroid material. The program models reflectance spectra of asteroids using reflectance spectra of meteorite analogues. Modeling results and estimation of the material composition for 10 asteroids (1 Ceres, 4 Vesta, 51 Nemausa, 65 Cybele, 102 Miriam, 250 Bettina, 266 Aline, 379 Huenna, 704 Interamnia, 1474 Beira) are discussed. A good agreement between the model spectra and the asteroids reflectance spectra is achieved for a number of asteroids (1 Ceres, 4 Vesta, 51 Nemausa, 250 Bettina, 704 Interamnia).

PACS:96.30.Ys, 95.55.Qf, 96.30.Za.

**Keywords:** asteroid reflectance spectra, meteoritic analogues, reflectance spectra modeling, estimation of the material composition.

Received 23 August 2022.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2023. **78**, No. 3. Pp. 381–387.

### Сведения об авторах

1. Савелова Арина Александровна — аспирант; e-mail [aa.rezaeva@physics.msu.ru](mailto:aa.rezaeva@physics.msu.ru).
2. Бусарев Владимир Васильевич — доктор физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: [busarev@sai.msu.ru](mailto:busarev@sai.msu.ru).
3. Щербина Марина Петровна — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; e-mail: [morskayaa906@yandex.ru](mailto:morskayaa906@yandex.ru).