

УДК 523.44

GAIA DATA RELEASE 3: РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ГРУПП АСТЕРОИДОВ, СБЛИЖАЮЩИХСЯ С ЗЕМЛЕЙ

© 2024 г. М. П. Щербина^{a, b, *}, Д. А. Ковалёва^a, Б. М. Шустов^a

^a Институт астрономии РАН (ИНАСАН), Москва, Россия

^b МГУ им. М.В. Ломоносова, Астрономический ин-т им. П.К. Штернберга (ГАИШ МГУ), Москва, Россия

*e-mail: mpshcherbina@inasan.ru

Поступила в редакцию 23.11.2023 г.

После доработки 19.12.2023 г.

Принята к печати 18.01.2024 г.

На основе данных третьего выпуска каталога КА Gaia, содержащих спектры отражения астероидов, были проведены исследования астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ). Спектры отражения около 100 представителей групп Атона, Аполлона и Амура были использованы для определения их спектрального класса. Для 47 астероидов такая оценка была сделана впервые. Для удобства классы были сгруппированы в более широкие спектральные группы (по Толену). Распределение по спектральным группам (в среднем 60% S-группа, 20% C-группа, 20% другие) соответствует результатам, полученным ранее с использованием других данных по большей выборке объектов. Такое распределение остается похожим на то, что известно для АСЗ разных размеров. Несмотря на численное преобладание в выборке АСЗ астероидов группы S, астероиды примитивных типов (группы C) обнаруживаются и на очень малых перигелийных расстояниях, что косвенно может подтверждать массовость явления сублимационной активности астероидов.

Ключевые слова: астероиды, спектрофотометрия, химико-минеральный состав вещества, Gaia, Gaia Data Release 3, АСЗ

DOI: 10.31857/S0320930X24030098, **EDN:** NDWYQV

ВВЕДЕНИЕ

Астероиды, сближающиеся с Землей (АСЗ) – важный класс объектов, изучение которого важно для уточнения (прояснения) картины динамической и химической эволюции малых тел Солнечной системы. Кроме того, АСЗ могут представлять потенциальную угрозу для человечества, что делает их изучение не только научно значимым, но и практически важным. С другой стороны, в некоторой отдаленной перспективе такие объекты могут рассматриваться в качестве потенциальных источников внеземных природных ресурсов, что усиливает интерес к ним (National Research Council, 2010; Hein и др., 2018).

За последние три десятилетия прямое исследование астероидов *in situ* с помощью космических аппаратов (КА), включая доставку образцов на Землю (см., например, McMahon и др., 2018; Fujiwara и др., 2006), позволило получить детальные данные о некоторых из них. Конечно, исходный отбор этих объектов для космических миссий основывался на данных, полученных при помощи дистанционных методов, что подчеркивает весомый вклад таких исследований в успешность

космических программ. Благодаря накопленному большому объему данных наблюдений астероидов, полученному дистанционными методами, с одной стороны, мы имеем возможность оценки основных параметров конкретных астероидов в короткие сроки и с минимальными затратами, а с другой – можем применять статистические методы. Учитывая многочисленность открытых и/или вновь наблюдаемых астероидов с помощью КА (таких, как WISE, Gaia), можно отметить, что космические миссии дают существенный вклад, позволяющий применять статистические методы исследований. Естественно – сравнить результаты таких исследований, проведенных наземными и космическими средствами. Данные, полученные на КА WISE, позволили существенно уточнить распределения физических характеристик астероидов (см. Masiero и др., 2014; Mainzer и др., 2012), в том числе АСЗ (Grav и др., 2013).

Определенные надежды вызвал и проект Gaia, в котором астероидам уделено существенное внимание. Особый интерес представляют наблюдательные данные, опубликованные в недавнем релизе Gaia Data Release 3 о спектрах наблюдаемых астероидов, в том числе АСЗ.

Более десяти лет ИНАСАН совместно с ГАИШ МГУ ведут работу по спектрофотометрическим исследованиям астероидов, в том числе и сближающихся с Землей, с целью оценки спектрального класса, а значит, определения основного типа минералогии поверхностного вещества. Наблюдения проводятся в обсерватории Пик Терскол с помощью 2-метрового телескопа Zeiss на спектрометре низкого разрешения (с разрешающей силой $R \approx 100$) и в обсерватории КГО ГАИШ МГУ фотометрическими методами с помощью 2.5-метрового телескопа. Для части объектов, вошедших в данную наблюдательную программу, спектральный класс был определен впервые (см., например, Щербина и др., 2017; 2019). Имея опыт работы со спектрофотометрическими данными, полученными наземными средствами, мы решили определить спектральные классы астероидов, спектры отражения которых представлены в базе Gaia Data Release 3, а конкретно для AC3.

В данной работе в разделе “Спектральные данные по наблюдениям AC3” проведено краткое описание набора спектральных данных об астероидах (AC3), приведенных в Gaia Data Release 3, дополненных нашими результатами, полученными в предыдущих работах. В разделе “Результаты” представлены результаты краткого статистического анализа этого набора.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ AC3

Проект ESA KA Gaia, на основе наблюдений с помощью КА, запущенного в 2013 г., находится сейчас на этапе третьего релиза данных — Gaia Data Release 3 (Gaia DR3) (Gaia Collaboration, 2023).

Каталог GDR3 включает фотометрические наблюдения объектов Солнечной системы (SSO), собранные во время работы Gaia с 5 августа 2014 г. по 28 мая 2017 г. В каталоге представлены спектры отражения для 60518 объектов — пронумерованных астероидов: большинство которых находятся в Главном поясе, а также околоземных астероидов, троянцев и астероидных семейств Венгрии, Хильды (https://gea.esac.esa.int/archive/documentation/GDR3/Data_analysis/chap_cu4sso/sec_cu4sso_processingsteps/ssc_cu4sso_spectrophotometryprocessing.html). На рис. 1 представлено распределение по орбитам астероидов, спектры отражения которых были получены в ходе работы KA Gaia.

Расчет спектров отражения в GDR3. Солнечные аналоги

Используя описанные в (Bus, Binzel, 2002) методики, спектральные коэффициенты отражения астероидов мы определяли путем деления значений интенсивности отраженного излучения от астероида на каждой длине волны на среднее значение интенсивности спектров группы звезд, аналогичных Солнцу. Такие звезды-аналоги обладают физическими свойствами, схожими с солнечными (масса, металличность, температура, возраст), и их спектры напоминают солнечные. Чтобы избежать неопределенностей, связанных с неточным знанием величины покраснения, звезды с покрасневшими спектрами не используются как аналоги Солнца. Соответствующая нормировка дает значения отражательной способности астероида на данной длине волны. При наземных наблюдениях обычно выбирается одна звезда-аналог Солнца, находящаяся в непосредственной

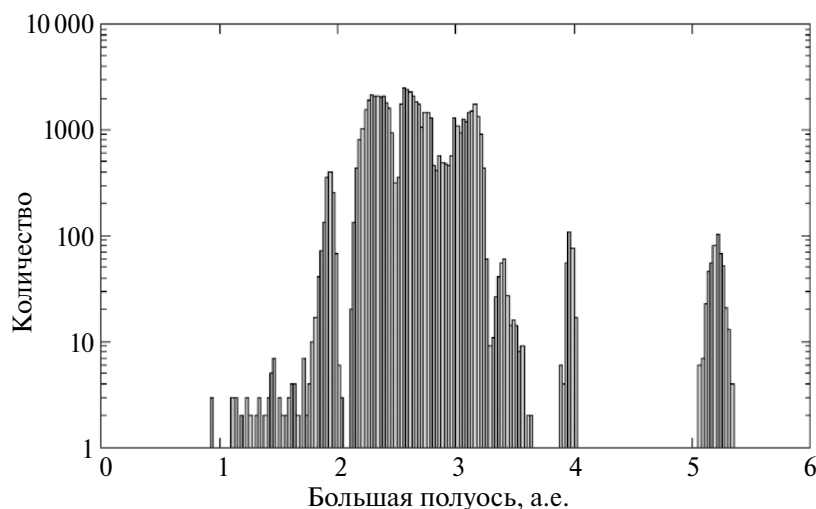


Рис. 1. Орбитальное распределение астероидов, для которых получены спектрофотометрические спектры отражения из Gaia DR3 (рисунок взят с сайта gea.esac.esa.int, полный доступ указан в тексте выше).

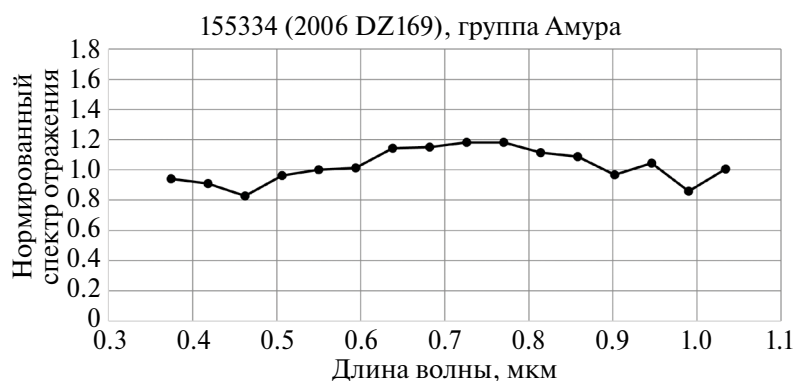


Рис. 2. Спектр отражения астероида 155334 (2006 DZ169) группы Амуре из каталога GDR3.

близости к астероиду на небесной сфере. В связи с временной стабильностью оборудования КА Gaia и тем фактом, что наблюдения проводятся за пределами земной атмосферы, было принято решение использовать метод, основанный на делении спектра каждого астероида на усредненный спектр группы достоверных солнечных аналогов. Это в принципе должно уменьшать шум, вызванный мелкими различиями между отдельными звездами-аналогами Солнца.

Полученные спектры отражения были нормированы по отражательной способности на длине волны 0.55 мкм. Затем они были разложены на 16 отдельных спектральных каналов в диапазоне от 374 до 1034 нм ($\lambda=374, 418, 462, 506, 550, 594, 638, 682, 726, 770, 814, 858, 902, 946, 990$ и 1034 нм).

Пример спектра отражения астероида показан на рис. 2 (спектр отражения астероида 155334).

Рассматриваемый набор АСЗ

В настоящем исследовании в основном рассматриваются астероиды, сближающиеся с Землей (АСЗ). Эти объекты имеют перигелийные дистанции, равные или меньшие 1.3 а. е. Напомним, что АСЗ разделяют на группы. Группировка АСЗ проводится по наименованиям типичных представителей: (1221) Амур, (1862) Аполлон, (2062) Атона, орбиты схематично представлены на рис. 3.

- Тип Амуре. Не заходят внутрь орбиты Земли, так как перигелийные расстояния представителей данного типа больше, чем афелийное расстояние Земли.

- Тип Аполлона. Могут проникать внутрь орбиты Земли. Большие полуоси орбит больше, чем у Земли, а перигелийные расстояния меньше, чем афелийное расстояние Земли.

- Тип Атоне. Находятся в основном внутри орбиты Земли, лишь в окрестности афелиев выходят за ее пределы. Афелийные расстояния таких астероидов больше перигелийного расстояния Земли, а большие полуоси меньше, чем у Земли.

АСЗ, траектории которых позволяют им сближаться с орбитой Земли до 0.05 а. е. или менее в настоящий момент и имеющие абсолютную звездную величину не более 22.0, классифицируются как потенциально опасные астероиды (ПОА). Такое ограничение по величине соответствует размерам объектов в 140 м и более, поскольку предполагалось, что более мелкие тела не несут серьезной угрозы для Земли. Однако в последние годы, после Челябинского события (падение астероида 15 февраля в 2023 г.), опасными считаются астероиды деkamетрового и более размеров (см. Шустов, 2019).

В каталоге Gaia Data Release 3 представлены спектры отражения АСЗ для следующих групп: 4 объекта относятся к группе Атоне, 49 — к группе

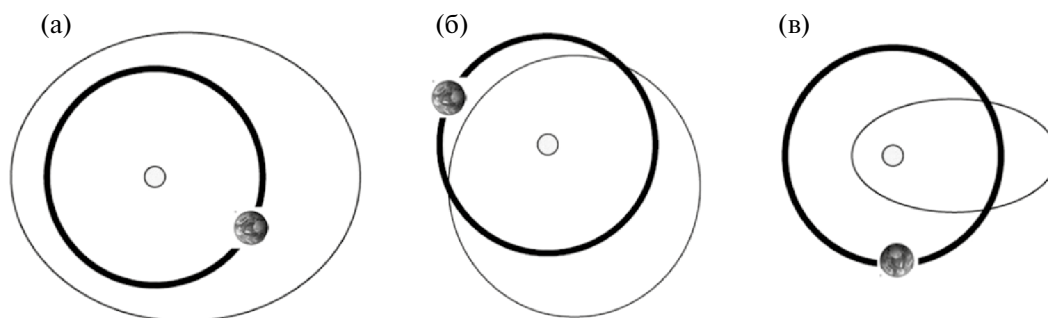


Рис. 3. Приблизительные орбиты астероидов: (а) — (1221) Амуре; (б) — (1862) Аполлона; (в) — (2062) Атоне. Орбита Земли обозначена жирной линией.

Аполлона, 37 — к группе Амура, в сумме 90 астероидов. Нами для обеспечения статистической значимости выборки были включены данные о спектральных классах АСЗ, полученные в результате спектрофотометрии, проведенной в обсерватории Пик Терскол с 2013 г. Таким образом, к анализу были добавлены дополнительные объекты: 3 из группы Атона, 8 из группы Аполлона и 6 из группы Амура, всего 107 астероидов.

В рассматриваемом массиве данных, дополненном информацией, полученной в обсерватории Пик Терскол, удалось подтвердить, уточнить или впервые определить принадлежность к спектральным классам для 24 ПОА, включая 4 астероида из группы Атона, 19 из группы Аполлона и одного из группы Амура.

Определение спектрального класса астероидов

В рамках данного исследования был проведен сбор дополнительных параметров для каждого астероида, включающих геометрическое альbedo, период обращения и диаметр, которые имеют вспомогательное значение при определении спектрального класса. Спектральная классификация проводилась в соответствии с таксономиями Толена или Баса–Бинзеля (SMASSII), применяемыми к данным из базы NASA (<https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons/>), если таковые были доступны. Проведено сопоставление результатов с предыдущими исследованиями, выполненными методом спектрофотометрии низкого разрешения ИНАСАН в сотрудничестве с ГАИШ МГУ в обсерватории Пик Терскол с 2013 г., большинство оценок класса подтвердилось.

Опишем процедуру определения (присвоения) спектрального класса для каждого данного астероида. Эта процедура, предложенная в работе (Савелова и др., 2022), получила название “построение спектрофотометрического коридора”. Вкратце она заключается в следующем. Ис-

Таблица 1. Количество использованных для построения “спектрофотометрических коридоров” спектров отражения из базы SMASS II, принадлежность к спектральному классу взята из статьи (Bus, Binzel, 2002)

Класс	Количество спектров	Класс	Количество спектров	Класс	Количество спектров
A	16	K	23	Sr	4
B	30	L	19	T	6
C	80	R	2	V	8
Cb	13	S	176	X	79
Cg	6	Sa	10	Xc	35
Cgh	8	Sk	8	Xe	19
Ch	95	Sl	22	Xk	29
D	2	Sq	17		

пользуя работу (Bus, Binzel, 2002), из базы данных SMASS II были извлечены спектры отражения астероидов с номерами до примерно 2000 для распределения по спектральным классам. Определялись максимальные и минимальные значения отражательной способности для каждой длины волны, создавая таким образом “диапазон” возможных значений для каждого класса. Количество астероидных спектров, использованных для конструирования этого “диапазона”, представлено в табл. 1.

Оценка принадлежности к спектральным классам проводилась на основе альbedo, спектрального градиента, наличия выраженных полос поглощения и соответствия спектра астероида созданным шаблонам отражательных спектров. Например, как показано на рис. 4, астероид 155334 идеально соответствует “диапазону” отражательной способности астероидов класса S, а его геометрическое альbedo также соответствует классу S. Отметим, что сходные классы и подклассы

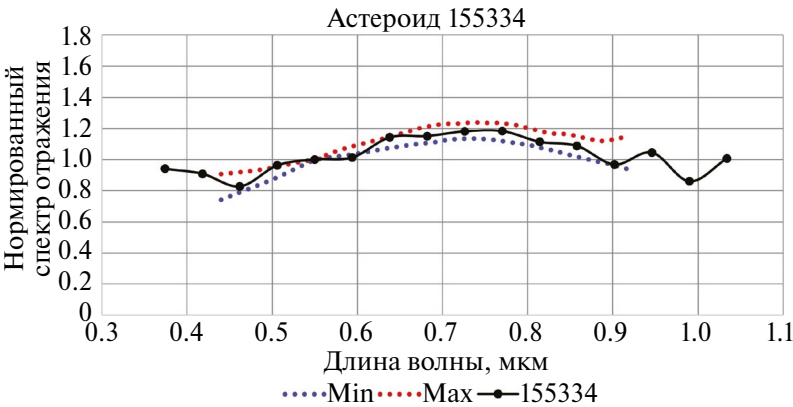


Рис. 4. Спектр отражения астероида 155334 (2006 DZ169) группы Амура из каталога GDR3.

(или промежуточные классы, обозначены двумя буквами, например, Cb является промежуточным вариантом между классом C и B) имеют схожие границы “спектрофотометрического коридора”, порой пересекаясь, схожие значения альbedo, различаясь порой только полосами поглощения. Поэтому в случае неоднозначности оценки принадлежности к тому или иному классу, астероиду присуждалось значение нескольких классов (например, C, Cb, B), в особенности в тех случаях, когда характерные для классов полосы поглощения не определялись однозначно.

Использование подобной методики создания “спектрофотометрического коридора” подробно описано в работе (Савелова и др., 2022).

Ввиду некоторой условности определения подклассов и возможности ситуации соответствия астероида сразу нескольким классам с близким минеральным составом (что вполне объяснимо, учитывая особенности данных, на довольно разреженном наборе значений в 16 точках), спектральные классы традиционно делятся на крупные группы по их характеристикам:

- С-группа охватывает классы B, C, Cb, Cg, Ch, Cgh, что также коррелирует с классами B и F в таксономии Толена и отражает спектры, схожие со спектрами углистых хондритов CI и CM.

- S-группа включает классы S, A, Q, R, K, L и промежуточные Sa, Sq, Sr, Sk, Sl, представляющие спектры, близкие к железокосмическим метеоритам, обыкновенным хондритам и ахондритам.

- X-группа состоит из классов X, M, E, P, по классификации Толена, и промежуточных Xe, Xc, Xk.

В малые группы входят редкие классы Ld, T, D, V, O.

Отдельные астероиды могут демонстрировать признаки, характерные как для высокотемпературных, так и для низкотемпературных классов (S и C соответственно), что может свидетель-

ствовать о сложном ударном прошлом этих астероидов.

Деление на более крупные группы позволяет говорить в общих чертах о преобладающей минералогии поверхностного вещества астероида, не вдаваясь в подробности (низкотемпературная минералогия представителей С-группы; высокотемпературная минералогия S-группы; преобладание металлов X-группы; достаточно эксклюзивный состав вещества, но представленный малым числом астероидов в принципе — так называемые малые группы; а также особые астероиды смешанной минералогии). Такое деление на более крупные группы традиционно при спектрофотометрических исследованиях астероидов, особенно при использовании спектров отражения низкого разрешения, и часто используется для общей оценки распределения химико-минералогических свойств астероидов, при этом позволяя обойти некоторые неточности или сомнения в определении близких классов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Отметим, что для почти половины объектов оценка спектрального класса была дана нами впервые. Была определена принадлежность к определенному спектральному классу для 22 астероидов группы Аполлона, 23 астероидов группы Амура и 5 группы Атона, итого 47 астероидов.

Результаты представлены в виде табл. 2 и диаграмм на рис. 5.

Приведенная статистика, к сожалению, построена на небольшом наборе данных. Мы все же попытались построить некоторые статистические зависимости от параметров AC3. Сведения о диаметре, значении большой полуоси и перигелийном расстоянии брались из базы данных NASA (<https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons/>).

Таблица 2. Распределение спектральных групп астероидов, сближающихся с Землей, по данным базы GDR3 + дополнение результатами спектрофотометрических наблюдений, полученными в обсерватории Пик Терскол

Группа астероидов AC3	Общее количество	С-группа	S-группа	X-группа	Малые группы	Смешанная минералогия
	Из них ПОА	Из них ПОА	Из них ПОА	Из них ПОА	Из них ПОА	Из них ПОА
Атона	7	3	1	1	1	1
	4	2	0	0	1	1
Аполлона	57	12	36	1	3	5
	19	4	12	0	0	3
Амура	43	8	28	0	6	1
	1	0	1	0	0	0
Общее количество	107	23	65	2	10	7
	24	6	13	0	1	4

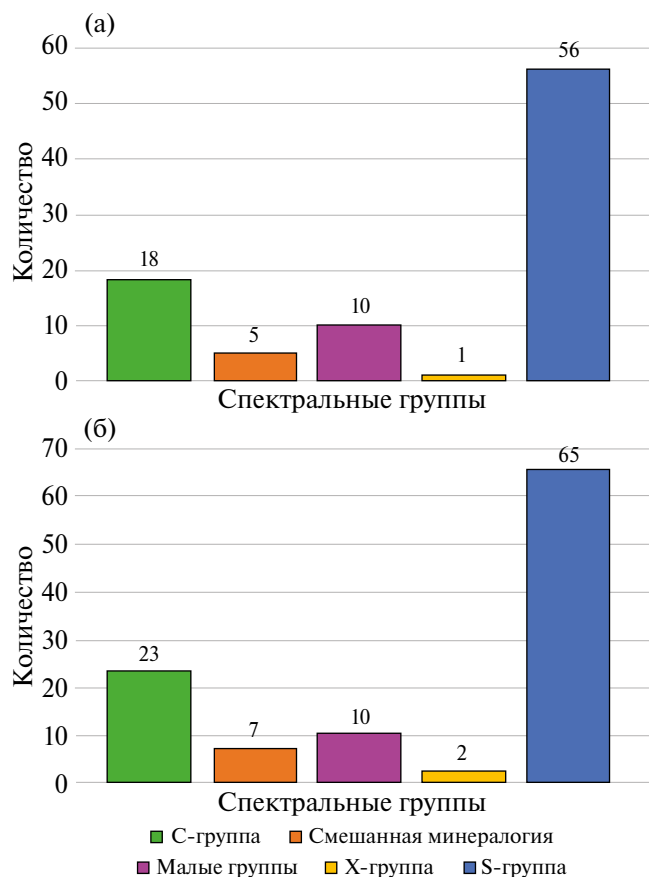


Рис. 5. Распределение спектральных групп астероидов, сближающихся с Землей: (а) – GDR3 (90 AC3); (б) – GDR3 + дополнение результатами спектрофотометрических наблюдений, полученными в обсерватории Пик Терскол (107 AC3).

На рис. 6 показано, что относительная доля S-типов остается во всем интервале размеров (50–60% от числа выборки).

Результаты хорошо согласуются с работой (Binzel и др., 2019), в которой представлена выборка из более 1000 AC3, включая марс-кроссеры. Как отмечают авторы работы, долевые распределения основных таксономических классов (60% S, 20% C, 20% другие) кажутся удивительно постоянными в интервале размеров порядка величины (от 10 км до 100 м), что составляет восемь порядков величины по массе.

На рис. 7 представлено распределение астероидов разных спектральных групп по большой полуоси и перигелийному расстоянию орбит. Интервалы значений большой полуоси рассматриваемых спектральных групп AC3 перекрываются, причем распределение астероидов C-типа охватывает почти весь интервал значений большой полуоси. Максимум же числа астероидов S-типов смещен к внутреннему краю Главного пояса, что логично, так как данный тип предполагает высокотемпературную минералогия

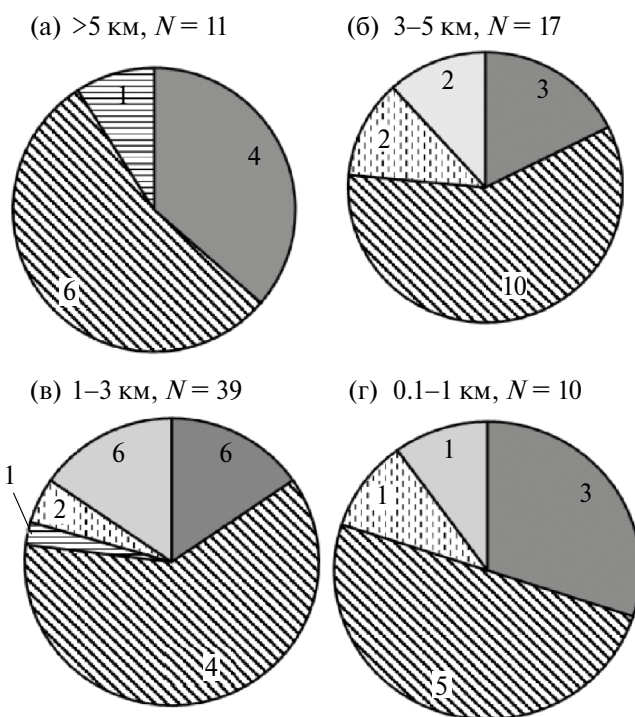


Рис. 6. Распределение AC3 из базы GDR3 + дополнения по спектральным классам астероидов различных размеров (значения диаметров взяты из базы NASA). Легенда диаграмм: косая штриховка соответствует S-группе, горизонтальная штриховка – X-группе, вертикальная прерывистая штриховка – смешанной минералогии; темная заливка – C-группа, светлая заливка – малые группы. Внутри каждого сектора указано число астероидов, вошедших в распределение: (а) – распределение по спектральным группам AC3, чей диаметр более 5 км; (б) – распределение по спектральным группам AC3, чей диаметр от 3 до 5 км; (в) – распределение по спектральным группам AC3, чей диаметр от 3 до 1 км; (г) – распределение по спектральным группам AC3, чей диаметр менее 1 км.

поверхностного вещества (см. рис. 7а). Обратим внимание на то, что, несмотря на численное преобладание в выборке AC3 астероидов группы S, астероиды примитивных типов (C-группа) имеются и на очень малых перигелийных расстояниях (см. рис. 7б). Возможно, что наличие таких астероидов в этой зоне является фактором, позволяющим объяснить явление сублимационной активности астероидов примитивных типов, что подтверждается сериями работ (см., например, Busarev и др., 2022; 2023), в которых отмечена корреляция активности астероидов с прохождением перигелийной зоны.

ВЫВОДЫ

1. В результате анализа спектров отражения астероидов, полученных с КА Gaia, были определены их спектральные классы, причем около половины – 47 объектов – получили оценку

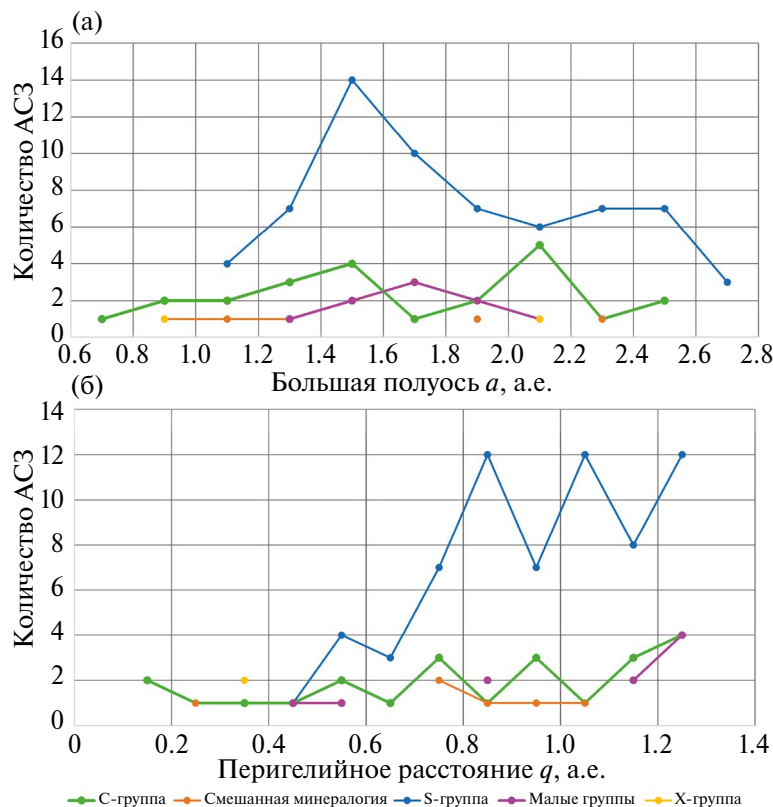


Рис. 7. Распределение количества AC3 данного спектрального класса: (а) — по большой полуоси; (б) — в зависимости от перигелийного расстояния.

спектрального класса впервые. Для астероидов, спектральные классы которых были определены ранее другими авторами (и занесены в базу JPL NASA), получено подтверждение или уточнение принадлежности к тому или иному классу.

2. Оценка принадлежности к спектральному классу делалась комбинированным методом: с помощью “спектрофотометрического коридора”, построенного по минимальным и максимальным значениям нормированной отражательной способности на каждой длине волны, по значению альбедо, спектральному градиенту, наличию выраженных полос поглощения. Использование в качестве одного из фильтров отбора “спектрофотометрического коридора” значительно ускоряет процесс оценивания спектрального класса. В случае неопределенного результата (если подходят несколько близких по своему химико-минералогическому составу классов) присуждались несколько классов.

3. Для последующего анализа все классы были разделены на несколько традиционных групп (С-группа, S-группа, X-группа, малые группы и группа смешанной минералогии). Такое деление позволяет делать общий анализ распределения преобладающего типа минералогии в данном случае астероидов, сближающихся с Землёй, не заостряя внимание на более тонких

различиях внутри каждой группы, а также избегая спорных моментов принадлежности к схожим классам.

4. Статистика распределения спектральных групп данной выборки астероидов совпадает с результатами наземных наблюдений с большим количеством объектов (Binzel и др., 2019), а именно 60% — представители S-группы, 20% — С-группы, 20% — других групп.

5. Подобная статистика примерно сохраняется и при рассмотрении в определенных интервалах диаметров. Подобную закономерность также отмечали авторы работы (Binzel и др., 2019).

6. При анализе распределения спектральных групп по значениям большой полуоси и перигелийному расстоянию орбит астероидов отмечаем, что представители С-группы охватывают большой диапазон значений большой полуоси, а также присутствуют на достаточно малых перигелийных расстояниях. Косвенно это может служить подтверждением гипотезы, объясняющей сублимационно-пылевую активность астероидов примитивных типов (С-группы) кометоподобным механизмом.

Авторы (Щербина М.П., Шустов Б.М.) выражают благодарность Российскому научному фонду (грант № 22–12–00115) за поддержку этой работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Савелова А.А., Бусарев В.В., Щербина М.П., Барабанов С.И. Использование шаблонов спектральных типов астероидов для уточнения минералогии этих тел и обнаружения признаков сублимационно-пылевой и солнечной активности // Научн. труды Института астрономии РАН. 2022. Т. 7. С. 143–148.
- Шустов Б.М. О роли науки в изучении и парировании космических угроз // Вестн. Российск. акад. наук. 2019. Т. 89. № 8. С. 777–799.
- Щербина М.П., Бусарев В.В., Барабанов С.И. Спектрофотометрия астероидов в 2016 г. и интерпретация их спектров отражения // Экологич. вестн. научн. центров Черноморского экономического сотрудничества (ЧЭС). 2017. Т. 2. № 4. С. 148–156.
- Щербина М.П., Бусарев В.В., Барабанов С.И. Спектрофотометрические исследования астероидов, сближающихся с Землей, и Главного пояса // Вестн. Московск. университета. Сер. 3: Физика, астрономия. 2019. № 6. С. 93–96.
- Binzel R.P., DeMeo F., Turtelboom E.V., Bus S.J., Tokunaga A., Burbine T.H., Lantz C., Polishook D., Carry B., Morbideli A., and 13 co-authors. Compositional distributions and evolutionary processes for the near-Earth object population: Results from the MIT-Hawaii Near Earth Object Spectroscopic Survey (MITHNEOS) // Icarus. 2019. V. 324. P. 41–76.
- Bus S.J., Binzel R.P. Phase II of the small Main-Belt asteroid spectroscopic survey: A feature-based taxonomy // Icarus. 2002. V. 158. № 1. P. 146–177.
- Busarev V.V., Savelova A.A., Shcherbina M.P., Barabanov S.I. Spectral signs of simultaneous sublimation activity and the appearance of a dust exosphere on eight asteroids of the Main Belt near perihelion // Sol. Syst. Res. 2022. V. 56. № 2. P. 84–99.
- Busarev V.V., Petrova E.V., Shcherbina M.P., Kuznetsov S.Y., Burlak M.A., Ikonnikova N.P., Savelova A.A., Belinski A.A. Search for signs of sublimation-driven dust activity of primitive-type asteroids near perihelion // Sol. Syst. Res. 2023. V. 57. № 5. P. 449–466.
- Fujiwara A., Kawaguchi J., Yeomans D.K., Abe M., Mukai T., Okada T., Saito J., Yano H., Yoshikawa M., Scheeres D.J., and 12 co-authors. The rubble-pile asteroid Itokawa as observed by Hayabusa // Science. 2006. V. 312. № 5778. P. 1330–1334.
- Gaia Collaboration. Gaia Data Release 3-Summary of the content and survey properties // Astron. and Astrophys. 2023. V. 674. id. A1 (22 p.).
- Grav T., Mainzer A.K., Bauer J.M., Masiero J.R., Stevenson R., Carolyn N., and NEOWISE Team. The WISE survey of the near-Earth asteroids (NEOWISE) // Am. Astron. Soc. Meeting Abstracts. 2013. V. 222, id.402.01.
- Hein A.M., Saidani M., Tollu H. Exploring potential environmental benefits of asteroid mining // arXiv preprint arXiv:1810.04749. 2018.
- Mainzer A., Grav T., Masiero J., Bauer J., Cutri R.M., McMillan R.S., Wright E.L. Physical parameters of asteroids estimated from the WISE3-band data and NEOWISE post-cryogenic survey // Astrophys. J. Lett. 2012. V. 760. № 1. L. 12.
- Masiero J.R., Grav T., Mainzer A.K., Nugent C.R., Bauer J.M., Stevenson R., Sonnett S. Main-belt asteroids with WISE/NEOWISE: Near-infrared albedos // Astrophys. J. 2014. V. 791. № 2. P. 121.
- McMahon J.W., Scheeres D.J., Hesar S.G., Farnocchia D., Chesley S., Lauretta D. The OSIRIS-REx radio science experiment at Bennu // Space Sci. Rev. 2018. V. 214. P. 1–41.
- National Research Council (NRC) Defending Planet Earth: Near-Earth-Object Surveys and Hazard Mitigation Strategies // Washington, DC: The National Academies Press. 2010. — 134 p.