

УДК 523.44+523.4-355+523.98

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

© 2019 г. В. В. Бусарев^{a, b}, М. П. Щербина^a, С. И. Барабанов^b, Т. Р. Ирсмамбетова^a,
Г. И. Кохирова^c, У. Х. Хамроев^c, И. М. Хамитов^{d, e}, И. Ф. Бикмаев^{e, f}, Р. И. Гумеров^{e, f},
Э. Н. Иртуганов^{e, f}, С. С. Мельников^{e, f}

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

^bИнститут астрономии РАН (ИНАСАН), Москва, Россия

^cИнститут астрофизики АН Республики Таджикистан, Душанбе, Республика Таджикистан

^dНациональная обсерватория ТЮБИТАК, Анталия, Турция

^eКазанский федеральный университет, Казань, Россия

^fАкадемия наук Республики Татарстан, Казань, Россия

*e-mail: busarev@sai.msu.ru

Поступила в редакцию 15.11.2018 г.

После доработки 06.02.2019 г.

Принята к публикации 18.02.2019 г.

Представлены результаты, подтверждающие сублимационную активность у перигелия примитивных астероидов Главного пояса 779 Нины, 704 Интерамнии и 145 Адеоны, обнаруженную впервые в сентябре 2012 г. (Busarev и др., 2015; Бусарев и др., 2016). Новые наблюдения Нины, Интерамнии и Адеоны (спектрофотометрия и/или *UBVRI*-фотометрия) проведены нами в 2016–2018 гг. при очередном прохождении этими астероидами перигелия. Кроме того, обнаружены вероятные спектральные признаки слабой сублимационной активности двух других примитивных астероидов Главного пояса – 51 Немаузы и 65 Цибелы. В статье обсуждаются условия возникновения периодического и/или продолжительного сублимационного процесса на астероидах Главного пояса с низкотемпературной минералогией, связанные с их формированием вблизи “снеговой линии” или за ее пределами. Рассматриваются также общие эволюционные процессы, которые могут поддерживать достаточно высокую концентрацию водяного льда вблизи поверхности рассматриваемых тел и, соответственно, – их длительную сублимационную активность, либо приводят к возобновлению угасшей активности.

Ключевые слова: астероиды примитивных типов, спектрофотометрия, химико-минеральный состав вещества, сублимация льдов, солнечная активность

DOI: 10.1134/S0320930X19040017

ВВЕДЕНИЕ

Проблема определения содержания летучих соединений в составе вещества астероидов является крайне интересной, поскольку она непосредственно связана с происхождением этих тел и космогонией Солнечной системы. Но даже для астероидов примитивных типов (с низкотемпературной минералогией) вопрос о содержании льдов пока плохо изучен из-за ряда ограничений в их исследованиях. Как показывают спектральные характеристики астероидов Главного пояса (АГП) и лабораторные исследования их вероятных образцов-аналогов, примитивный состав вещества и обилие летучих соединений свойствен-

ны периферийным АГП (например, Bell и др., 1989; Gaffey и др., 1989; Bus, Binzel, 2002). С этими наблюдательными и экспериментальными результатами согласуется предположение о формировании родительских тел этих астероидов в ранней Солнечной системе вблизи так называемой “снеговой линии” или границы конденсации водяного льда. Однако следует отметить, что термин “линия” здесь является весьма упрощенным. Более уместно говорить о достаточно протяженном интервале гелиоцентрических расстояний, возможно ~4–5 а. е., определяемом не только термодинамическим градиентом температуры в протопланетном диске, но и изменениями светимости

Солнца на ранних стадиях его эволюции (например, Lewis, 1974; Макалкин, Дорофеева, 2009). Это могло привести к большим различиям содержания летучих соединений в составе АГП. С другой стороны, в процессе роста прото-Юпитера (когда его масса превысила несколько масс Земли) должен был начаться выброс из его зоны формирования тел субпланетного размера и каменно-ледяного состава в разных направлениях, включая Главный пояс астероидов (Сафронов, Зиглина, 1991). На этом основании нами была предложена гипотеза об образовании астероидов С-типа и углистых хондритов как раздробленных фрагментов каменно-ледяных тел из зоны роста Юпитера (Busarev, 2012).

При решении проблемы определения содержания летучих в составе вещества астероидов примитивных типов имеются и некоторые благоприятные обстоятельства. В частности, эллиптичность орбиты астероида и, соответственно, различный нагрев его поверхности на разных расстояниях от Солнца создает естественный способ тестирования поверхностного вещества этого тела на присутствие летучих соединений. Мы использовали такую возможность при изучении спектральных характеристик трех АГП примитивных типов (Busarev и др., 2015; Бусарев и др., 2016), оптические характеристики которых здесь обсуждаются.

ПРЕДШЕСТВУЮЩИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И НЕКОТОРЫЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ

Начиная с сентября 2012 г., на 2-м телескопе Терскольской обсерватории ИНАСАН (далее — “Терскол”) с призмным ПЗС-спектрометром (матрица WI CCD 1240 × 1150 пикс.) в диапазоне 0.35–0.90 мкм и с низкой разрешающей способностью ($R \approx 100$) выполняется спектрофотометрия АГП и астероидов, сближающихся с Землей. Основная цель этих наблюдений — определение или уточнение таксономической (спектральной) классификации астероидов путем поиска и идентификации в их спектрах отражения слабых минералогических полос поглощения (ПП). В качестве стандартов и для расчета спектров отражения астероидов, а также для контроля спектральной прозрачности атмосферы (например, Бусарев, 1999) были использованы звезды — солнечные аналоги (Hardorp, 1980). Первичная обработка ПЗС-данных ведется с применением всех необходимых процедур и спектрального программного пакета DECH (Галазутдинов, 1992). Калибровка шкалы длин волн проводилась, как правило, по балмеровским линиям водорода в спектрах ярких звезд ранних спектральных классов (в частности, звезды α Peg, класса B9III). Суммарное время экспозиции спектров отдельных астероидов состав-

ляло от одного до нескольких часов. В целом, относительные среднеквадратические ошибки в центральной части используемого спектрального диапазона составляли ~1–2% и находились в пределах от 7 до 15% вблизи его границ. При осуществлении этих наблюдений нами были получены интересные результаты для четырех АГП примитивных типов — 145 Адеоны, 704 Интерамнии, 779 Нины и 1474 Бейры (Busarev и др., 2015; Бусарев и др., 2016). У этих астероидов, которые имели гелиоцентрические расстояния, близкие к перигелийным, нам впервые удалось обнаружить спектральные признаки сублимационной активности — максимумы рассеяния в спектрах отражения у 0.4–0.7 мкм и значительные спектральные вариации при близких относительных фазах вращения. Полученные в сентябре 2012 г. спектры отражения 145 Адеоны, 704 Интерамнии и 779 Нины представлены на рис. 1. Кратко перечислим основные параметры этих астероидов.

145 Адеона имеет средний размер 151.14 км и геометрическое альbedo 0.06 согласно данным, полученным на IC3 Wide-Field Infrared Survey Explorer (WISE) (с помощью которого был осуществлен инфракрасный обзор всего неба в полосах, центрированных на длины волн 3.4, 4.6, 12 и 22 мкм) (Masiero и др., 2014), период вращения 15.071 ч (Harris и др., 2012) и таксономический тип “C” (Tholen, 1989) или “Ch” (Bus, Binzel, 2002), что определяет ее низкотемпературную минералогию (например, Gaffey и др., 1989). Большая полуось и эксцентриситет орбиты (соответственно 2.6745 а. е. и 0.1442, <https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi#top>) показывают, что астероид движется в средней части Главного пояса по заметно вытянутой орбите. Дополнительный индекс “h” в обозначении типа Адеоны означает, что в спектре отражения присутствует ПП с центром у 0.7 мкм, которая служит признаком содержания в веществе гидросиликатов (Bus, Binzel, 2002). Она порождается интервалентным переносом заряда $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ между соседними катионами железа с разной валентностью в кристаллической структуре (например, Платонов, 1976; Бахтин, 1985; Burns, 1993).

Средняя величина диаметра и геометрическое альbedo 704 Интерамнии составляют 307.31 км и 0.08 по данным IC3 WISE (Masiero и др., 2014). Большая полуось и эксцентриситет орбиты Интерамнии — 3.059 а. е. и 0.155, соответственно (<https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi#top>). Астероид вращается с периодом 8.727 ч (Harris и др., 2012). Его установленные спектральные типы “F” (Tholen, 1989) или “B” (Bus, Binzel, 2002), для которых характерна широкая полоса поглощения на длинах волн более ~0.5 мкм в комбинации с общим отрицательным градиентом.

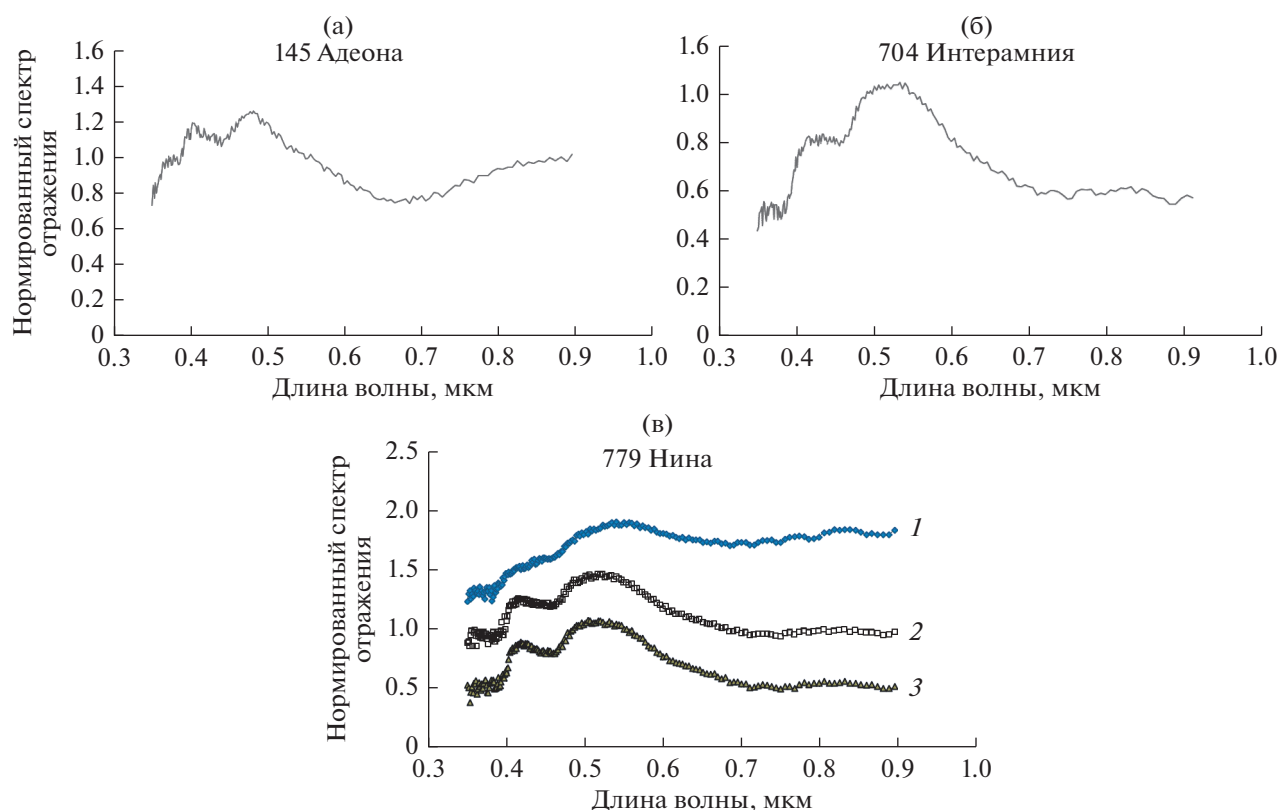


Рис. 1. (а) – Нормированный (на 0.55 мкм) спектр отражения 145 Адеоны, полученный 19 сентября 2012 г., являющийся результатом усреднения двух последовательных спектров; (б) – нормированный спектр отражения 704 Интерамнии (13 сентября 2012 г.), являющийся результатом усреднения пяти спектров; (в) – нормированные спектры отражения 779 Нины (1–3), полученные 13 сентября 2012 г. на интервале времени, соответствующем $\sim 1/2$ периода вращения астероида (спектры отражения 1 и 2 произвольно сдвинуты вдоль вертикальной оси для удобства сравнения). Представленные спектры с незначительными изменениями воспроизведены из предшествующей публикации (Бусарев и др., 2016).

Диаметр Нины составляет 80.57 км и геометрическое альbedo 0.16 по данным ИСЗ WISE (Masiero и др., 2014). Большая полуось и эксцентриситет орбиты астероида – 2.664 а. е. и 0.227 (вдвое больше по сравнению с Адеоной и Интерамнией) (<https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi#top>), период вращения – 11.186 ч (Harris и др., 2012). По спектральным характеристикам таксономический тип Нины был определен ранее как “М” (Tholen, 1989), а затем – как “Х” (Bus, Binzel, 2002). Но по радиолокационным данным астероид неоднороден по составу вещества. Полученные значения его радарного альbedo при разных фазах вращения, 0.16 и 0.50 (Shepard и др., 2010), характерны для примитивного или для железо-каменного состава, соответственно. Всего в сентябре 2012 г. нами было получено 12 спектров Нины на протяжении примерно половины ее периода вращения, по которым были получены спектры отражения 1, 2 и 3, рассчитанные путем усреднения сходных по форме спектров, представленных на рис. 1в. Мы обнаружили заметные вариации их формы и наклона во всем спектральном диапазоне (Бусарев и др., 2016).

Важно отметить, что повышенная прозрачность земной атмосферы в ближнем УФ-диапазоне благодаря значительной высоте пика Терскол (3150 м над уровнем моря), возможно, позволила нам впервые зарегистрировать в спектрах отражения Нины, Интерамнии и Адеоны не только признаки сублимационной активности, но и слабые ПП у 0.39 и 0.46 мкм. Эта часть спектрального диапазона отсутствует в аналогичных данных об этих астероидах из других источников (например, Bus, Binzel, 2003a; 2003b; 2003c). Интерпретация указанных ПП в спектрах отражения, Адеоны, Интерамнии и Нины приведена нами в предшествующих публикациях (Busarev и др., 2015; Бусарев и др., 2016), поэтому остановимся на данном вопросе только кратко. Силикатная компонента поверхностного вещества подобных примитивных астероидов, по-видимому, представляет собой смесь гидратированных и окисленных соединений, включающих окислы и гидроокислы двух- и трехвалентного железа, а также углисто-хондритового материала. В то же время их сублимационная активность указывает на наличие в веществе значительной доли ледяных соединений (в основном

H₂O), вероятно, в виде примеси (Бусарев и др., 2016). Еще одной интересной особенностью полученных данных является необычное сходство общей формы спектров отражения активных астероидов, особенно заметное по спектрам Интерамнии (рис. 1б) и Нины (рис. 1в, спектр 3) 2012 г. Попытаемся дать интерпретацию этого факта ниже и в разделе “Дискуссия”.

Возникновение максимума рассеяния света в спектральном диапазоне ~0.46–0.52 мкм согласуется с результатами численного моделирования интенсивности света, рассеянного пылевой оболочкой (комой) из сферических частиц водяного льда, согласно теории Ми (Hansen, Travis, 1974). Вероятно, близкая к сферической должна быть форма у сублимированных и замерзших водяных частиц в слабом гравитационном поле астероида. В соответствии с этим моделированием и при учете положения максимумов рассеяния в спектрах отражения Адеоны, Интерамнии и Нины в интервале 0.48–0.52 мкм средний размер частиц водяного льда регулярной комы в ближайших окрестностях каждого из этих астероидов оказывается близок к 1 мкм (Бусарев и др., 2016).

Изучение наблюдательных данных об Адеоне, Интерамнии и Нине привело нас к выводу о том, что образование у этих тел комы и ее временный характер (возможно, поэтому она не была обнаружена раньше) объясняется, в первую очередь, значительными эксцентриситетами их орбит, при которых на минимальных гелиоцентрических расстояниях их поверхностное вещество подвергается повышенной инсоляции. При этом происходит сублимация льдов и формирование комы из частиц водяного льда, возможно, с примесью еще более мелких силикатных частиц или их конгломератов (Busarev и др., 2015; Бусарев и др., 2016). Как показали расчеты, перепады подсолнечных температур на Адеоне, Интерамнии, Нине составляют соответственно ~222–257, ~206–240 и ~208–262 К (Busarev и др., 2018). Таким образом, изменение подсолнечных температур, вероятно, является основной причиной, поддерживающей периодическую сублимационную активность этих тел.

Очевидно, что необходимым условием сублимационного процесса является высокое содержание льда в поверхностном веществе рассматриваемых астероидов. Но это противоречит ранее сложившимся представлениям об астероидах примитивных типов, как о телах, содержащих воду только в связанном состоянии (например, Gaffey и др., 1989). Такие представления возникли по причине некоторых ограничений в изучении этих тел. В частности, одним из основных было отсутствие возможности прямых исследований вещества астероидов примитивных типов. Хотя их наиболее плотные и прочные фрагменты (в виде

метеоритов) и достигают поверхности Земли, но подвергаются значительному нагреванию при прохождении земной атмосферы и практически полностью теряют летучие компоненты. Но если допустить возможность наличия значительной доли льдов в составе астероидов примитивных типов, то следующим вопросом, на который нужно ответить, это — какой механизм (или механизмы) поддерживают достаточно высокую концентрацию льда в поверхностном веществе таких тел в масштабе времени, сравнимом со временем их существования? Вернемся к этому вопросу в разделе “Дискуссия”.

Следует также остановиться на некоторых методических вопросах, связанных с особенностями наблюдений АГП вообще и спектральными методами в частности, для оценки их химико-минерального состава. Напомним, что спектр отражения твердого безатмосферного планетного тела чаще всего используется как безразмерная (нормированная на 0.55 мкм) характеристика, описывающая общую форму собственного спектра этого тела (спектральное распределение энергии освещающего его солнечного света исключается) (например, Бусарев, 1999). Кроме того, при нормировке разных спектров отражения одного и того же или нескольких объектов исключаются эффекты вариаций яркости из-за неправильной формы тела и неоднородности альбедо поверхности, которые связаны с изменениями ориентации этих тел в пространстве, или при их наблюдениях сквозь земную атмосферу при разных воздушных массах. Это позволяет корректно сравнивать разные спектры отражения одного или нескольких таких тел между собой и не прибегать к гораздо более сложным (и длительным по времени) абсолютным измерениям. Таким образом, спектры отражения астероидов превращаются в удобный инструмент изучения их химико-минералогических свойств. Эти свойства описываются наклоном (градиентом) спектра отражения, а также спектральным положением и глубиной минералогических ПП. Важно отметить, что такие ПП, как правило, имеют значительную протяженность в видимом и ближних УФ- и ИК-диапазонах: от десятков до сотен ангстрем, а иногда и большую (Платонов, 1976; Бахтин, 1985) и поэтому могут быть идентифицированы при небольшой относительной глубине — примерно до 3–5%. Но как различить вклады в спектр отражения астероида примитивного типа указанных характеристик и рассеяния света, возникающего в его слабой сублимационной коме? Как говорилось выше, главным признаком этого процесса является наличие максимума в коротковолновом или видимом диапазоне. (Busarev и др., 2015). Причем, такой максимум не характерен для примитивных астероидов, за исключением астероидов В-типа (близко-

го к “С”). Но могут быть и другие признаки рассматриваемого явления.

Как известно, при наземных наблюдениях в стандартный телескоп АГП видны как точечные светящиеся объекты. Кроме того, рассматриваемые нами астероиды имеют достаточно большие размеры (от десятков до сотен километров) и сравнительно медленно вращаются (с периодом от нескольких до десятков часов). Это означает, что регистрируемый спектр такого астероида является средней характеристикой всей его видимой стороны, а форма спектра (зависящая от минерального состава и частично — от структурных особенностей вещества астероида и степени его “зрелости”) меняется со временем достаточно плавно. Особенно это характерно для астероидов примитивных типов по причине более высокой однородности их поверхности. Будем считать для простоты, что видимая сторона астероида является полусферой и в какой-то момент времени получен его первый спектр, а при относительной фазе вращения (ОФВ, принятой условно нулевой для первого спектра) 0.25 получен второй спектр. Очевидно, последний будет характеристикой обращенной к наблюдателю полусферы астероида, на половине которой появится ранее невидимая часть поверхности. Допустим также, что на этой новой части поверхности 25% площади будет покрыто другим по химико-минеральному составу веществом со средним градиентом спектра отражения, отличающимся от аналогичной характеристики ранее полученного спектра астероида на 50%. Простой расчет показывает, что в зарегистрированном втором спектре отражения астероида (ОФВ = 0.25) мы обнаружим изменение градиента только на ~6% по причине усреднения сигнала по всей наблюдаемой полусфере объекта.

Еще одним аргументом в пользу достаточно медленных и небольших по амплитуде изменений спектральных характеристик АГП примитивных типов с вращением является высокая однородность их поверхности по альбедо и химико-минеральному составу. Как показали недавние детальные исследования самого крупного астероида примитивного типа “С” 1 Цереры с помощью КА Dawn (NASA), его поверхность достаточно однородна по альбедо, за исключением малых ярких ледяных образований (в основном на дне кратеров) (например, Ciarniello и др., 2017). Важно подчеркнуть, что этот КА двигался по низкой орбите (менее 50 км) вокруг астероида в течение 2 лет.

НОВЫЕ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ИХ РЕЗУЛЬТАТЫ

При очередном прохождении 779 Ниной перигелия в 26–28 сентября 2016 г. ее наблюдения выполнялись нами на 2-м телескопе обсерватории Терскол с помощью ПЗС-спектрофотометрии

низкого разрешения ($R \approx 100$). К сожалению, эти наблюдения были выполнены при неблагоприятно низком положении Нины над горизонтом (при воздушных массах ~ 2.5), поэтому полученные данные (Busarev и др., 2018) не могут служить надежным подтверждением ее сублимационной активности и указанные данные мы здесь не обсуждаем. В то же время заслуживает внимания информация, опубликованная о 779 Нине значительно раньше. Американский любитель астрономии с девятилетним стажем Боб Вернер, вероятно, был первым, кто обнаружил фотометрические признаки сублимационной активности астероида по странному увеличению его яркости в августе 1990 г., хотя и не указал причину этого явления. При наблюдениях в 20-см телескоп Вернер обнаружил, что звездная величина Нины была меньше на $0.5\text{--}0.9^m$, чем предсказанная (Werner, 1991). С этим вопросом он обратился к известному специалисту по астероидам Р. Бинзелу, который в сентябре того же года по результатам фотометрии подтвердил уменьшение значения звездной величины Нины на 0.5^m (т.е. повышение ее яркости) по сравнению с расчетным значением (Werner, 1991). Как мы выяснили по эфемеридам Нины в августе–сентябре 1990 г., она была весьма близко к перигелию (после его прохождения). Основываясь на этом и на наших спектрофотометрических данных о Нине, полученных в 2012 г., мы можем объяснить необычный рост ее интегральной яркости (превышающий расчетный по стандартной фотометрической модели) в августе–сентябре 1990 г. сублимационной активностью и образованием комы.

Повторные наблюдения Интерамнии в 2017 г. при ее прохождении перигелия были проведены методами спектрофотометрии на Терсколе и *UBVRI*- (*BVRI*)-фотометрии на 60-см телескопе в Крымской обсерватории ГАИШ МГУ (далее “Крым”) и на 1-м телескопе обсерватории ИААН РТ на горе Санглок, Таджикистан (далее “Санглок”).

Повторные наблюдения 145 Адеоны были проведены с января по июнь 2018 г. на 60-см телескопе в Крыму (*UBVRI*- или *BVRI*-фотометрия) и на 1.5-м российско-турецком телескопе (РТТ-150) в обсерватории ТЮБИТАК, Анталья (спектрофотометрия).

Как показали наши спектрофотометрические наблюдения Интерамнии за 4 мес. до прохождения перигелия, сублимационный процесс на ней начался достаточно рано, вероятно, по причине повышения подсолнечных температур. Эти наблюдения 704 Интерамнии (рис. 2), проведенные 23 и 27 июня 2017 г. на Терсколе, также являются подтверждением ее сублимационной активности. Они демонстрируют изменение знака градиента ее спектров отражения с интервалом в четверо су-

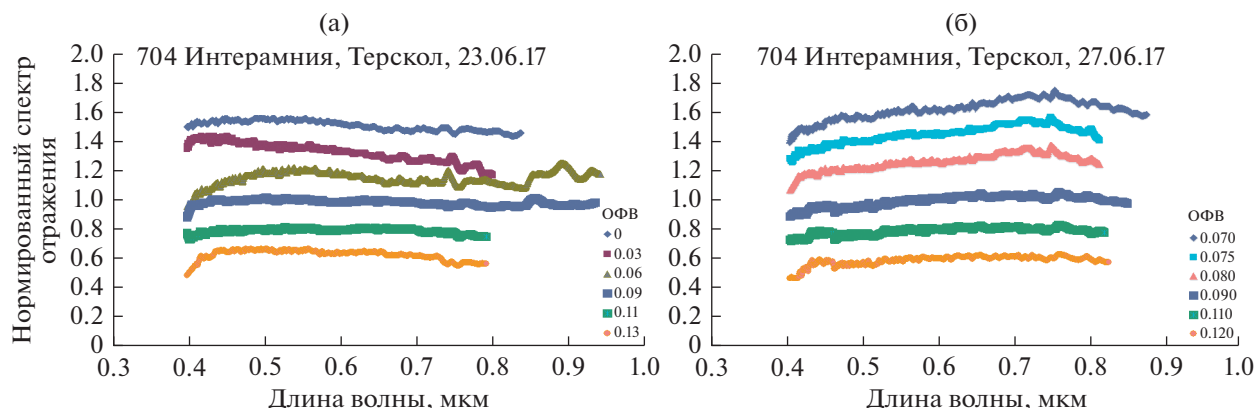


Рис. 2. (а) — Нормированные спектры отражения Интерамнии (на 0.55 мкм) при очень близких значениях относительной фазы вращения (ОФВ) 23 июня 2017 г. Общий градиент спектров отражения — отрицательный. (б) — Нормированные спектры отражения Интерамнии 27 июня 2017 г., со значениями ОФВ, практически совпадающих на предыдущем рисунке. Общий градиент спектров отражения — положительный. При этом диапазон относительных изменений в каждую дату на отдельных спектрах достигал ~20%. На каждом рисунке три верхних и два нижних спектра произвольно смещены вверх и вниз, соответственно, для удобства восприятия. Значения ОФВ указаны в том же порядке, что и спектры.

ток при практически совпадающих ОФВ и хороших наблюдательных условиях. Как видно из рисунков, все спектры отражения Интерамнии, полученные 23 июня, имеют в диапазоне 0.5–0.8 мкм отрицательный градиент, а спектры, полученные 27 июня, имеют в диапазоне 0.4–0.7 мкм положительный градиент. Причем, диапазон резких и близких по времени изменений нормированных спектров отражения достигал ~20% в каждую дату (см. рис. 2).

Чтобы проследить вариации спектров отражения 704 Интерамнии и 145 Адеоны на большом интервале времени и в разных обсерваториях, мы использовали ее *UBVRI*- или *BVRI*-наблюдательные данные (эффективные длины волн светофильтров 0.366, 0.436, 0.545, 0.641 и 0.800 мкм) и аналогичные данные о стабильной звезде солнечного типа (как солнечного аналога) для расчета отражательной способности (ОС). При этом расчет нормированной ОС астероидов в каждом из указанных светофильтров относительно полосы *V* осуществлялся путем деления интегральной интенсивности светового потока от каждого астероида на аналогичную величину для звезды солнечного типа с учетом функции спектральной прозрачности земной атмосферы и соответствующей разности воздушных масс (после пересчета интенсивностей во всех фильтрах на одно время экспозиции и на воздушную массу светофильтра *V*, соответствующего эффективной длине волны пропускания 0.55 мкм). Так рассчитывалась кривая отражения астероида (по значениям ОС в 5–4 точках в диапазоне ~0.4–0.8 мкм), нормированная на длине волны 0.55 мкм, по которой можно было в первом приближении оценить форму истинных спектров отражения астероидов. Опреде-

ление значения функции спектральной прозрачности атмосферы в каждом фильтре для каждой ночи осуществлялось путем сравнения значений интенсивности стандартной звезды до и после наблюдения каждого астероида на разных воздушных массах (*M1* и *M2*, соответственно):

$$f(\lambda) = [I_2(\lambda)/I_1(\lambda)]^{1/(M1-M2)}, \quad (1)$$

где $I_2(\lambda)$ и $I_1(\lambda)$ — измеренные значения спектральной интенсивности от стандартной звезды на разных зенитных расстояниях (Бусарев, 2011). Мы стремились к тому, чтобы наблюдать объекты при тех же или близких воздушных массах со звездой. Указанные данные были получены в Крыму и на Санглоке. Полученные *UBVRI*-(*BVRI*)-данные 704 Интерамнии и 145 Адеоны имеют примерно одинаковые ошибки единичных измерений, так как для достижения лучшей точности выбирались максимально возможные экспозиции. В фильтре *U* относительные ошибки составляют 2–4%, а в фильтрах *B*, *V*, *R* и *I* — примерно 1%. Указанные ошибки оценивались по стабильным звездам в общем ПЗС-кадре с астероидом. Рассчитанные кривые ОС Интерамнии представлены на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что *UBVRI*-(*BVRI*)-зависимости ОС Интерамнии, описывающие форму ее спектров отражения в непосредственной близости к моменту прохождения перигелия (24 октября 2017 г.), имеют наибольшую амплитуду с максимумом у ~ 0.55 мкм (рис. 3б и 3в) и, соответственно, — более регулярное состояние окружающей астероид комы, либо демонстрируют быструю изменчивость спектра и, по-нашему мнению, подтверждают ее высокую сублимационную активность. Причем важно отметить, что приведенные

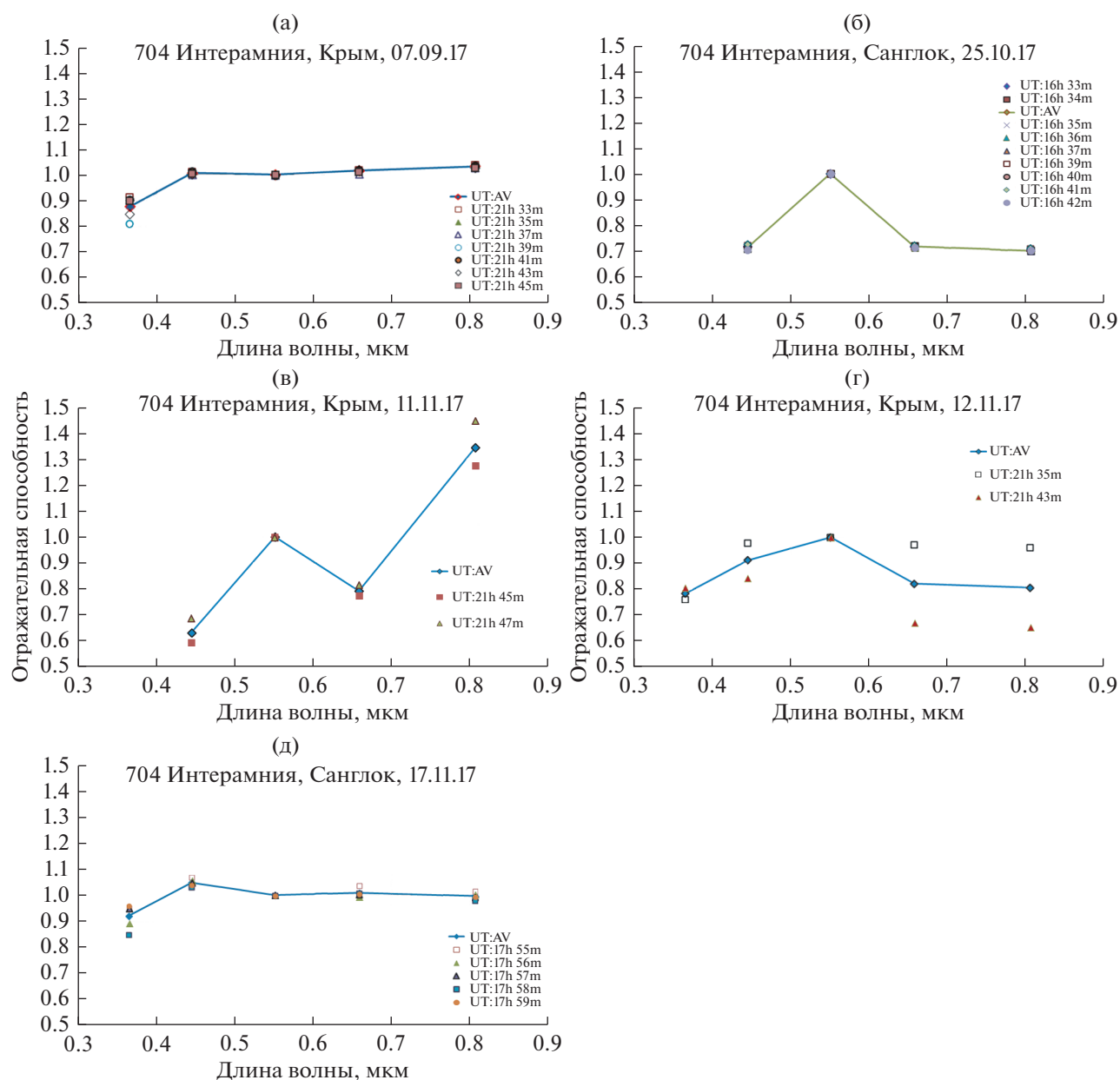


Рис. 3. Усредненная и нормированная (на 0.55 мкм) отражательная способность (ОС) 704 Интерамнии в 2017 г. по *UBVRI*- (*BVRI*)-данным на указанные даты наблюдений в Крыму и на Санглоке. Близкие по времени (в пределах десятков секунд) величины ОС изображены разными символами и характеризуют разброс измерений в пределах 5–15%. Непрерывной линией соединены только точки, соответствующие средней (расчетной) *UBVRI*- (*BVRI*)-кривой ОС астероида. AV обозначает среднее всемирное время, указанное в табл. 1, на соответствующие даты *UBVRI*- (*BVRI*)-наблюдений астероида.

согласующиеся данные получены на обсерваториях с разными климатическими условиями (Санглок и Крым) и, соответственно, — с разной величиной содержания водяного пара в атмосфере. Это исключает вероятное влияние на полученные результаты земной атмосферы.

Аналогичным образом, в 2018 г. были проведены фотометрические *UBVRI*-наблюдения (в феврале и апреле в Крыму) и спектрофотометрия (в

апреле и июне, ТЮБИТАК) (табл. 2) 145 Адеоны для подтверждения ее активности при очередном прохождении перигелия. Рассчитанные кривые ОС Адеоны и нормированная интенсивность стабильных звезд представлены на рис. 4.

Поскольку наблюдения Адеоны проводились в более нестабильный по атмосферным условиям зимне-весенний период, нами был проведен дополнительный контроль устойчивости спек-

Таблица 1. Наблюдательные параметры 704 Интерамнии (перигелийное расстояние $q = 2.586$ а. е.) в июне–ноябре 2017 г. при выполнении ее спектrophотометрии и $UBVRI$ - ($BVRI$)-фотометрии

Дата	UT (h m s) среднее	Δ , а. е.	r , а. е.	Фаз. угол, град	Видимая звездная величина	Время экспоз., с	Воздуш. масса астероида	Относ. фаза вращения (ОФВ)	Обсерватория, телескоп, вид наблюдений	Стандарт. звезда солнечного типа	Возд. масса звезды
2017 06 23	22 42 00	2.496	2.639	22.6	11.4	900	1.931	0	Терскол, 2-м, спектrophот-рия	HD 10307	1.981
2017 06 23	23 00 00	2.496	2.639	22.6	11.4	700	1.767	0.03	Терскол, 2-м, спектrophот-рия		
2017 06 23	23 15 00	2.496	2.639	22.6	11.4	600	1.659	0.06	Терскол, 2-м, спектrophот-рия		
2017 06 23	23 27 00	2.495	2.639	22.6	11.4	600	1.580	0.09	Терскол, 2-м, спектrophот-рия		
2017 06 23	23 39 00	2.495	2.639	22.6	11.4	600	1.516	0.11	Терскол, 2-м, спектrophот-рия		
2017 06 23	23 50 00	2.495	2.639	22.6	11.4	600	1.462	0.13	Терскол, 2-м, спектrophот-рия		
2017 06 27	23 19 00	2.447	2.636	22.7	11.3	60	1.538	0.07	Терскол, 2-м, спектrophот-рия	HD 10307	1.631
2017 06 27	23 21 00	2.447	2.636	22.7	11.3	180	1.522	0.075	Терскол, 2-м, спектrophот-рия		
2017 06 27	23 24 00	2.447	2.636	22.7	11.3	200	1.507	0.08	Терскол, 2-м, спектrophот-рия		
2017 06 27	23 30 00	2.447	2.636	22.7	11.3	300	1.479	0.09	Терскол, 2-м, спектrophот-рия		
2017 06 27	23 38 00	2.447	2.636	22.7	11.34	250	1.443	0.11	Терскол, 2-м, спектrophот-рия		
2017 06 27	23 44 00	2.446	2.636	22.7	11.3	250	1.415	0.12	Терскол, 2-м, спектrophот-рия		
2017 09 07	21 39 00	1.722	2.595	22.7	10.2	5	1.060	0.73	Крым, 60-см, $UBVRI$ -фот-рия	HD 804	1.095
2017 10 25	16 37 00	1.729	2.586	13.7	10.2	5	1.025	0.07	Санглок, 1-м, $BVRI$ -фот-рия	HIP 2894	1.104
2017 11 11	21 46 00	1.853	2.587	17.5	10.5	10	1.527	0.37	Крым, 60-см, $UBVRI$ -фот-рия	HD 804	1.281
2017 11 12	21 39 00	1.862	2.587	17.6	10.5	15	1.651	0.12	Крым, 60-см, $UBVRI$ -фот-рия	HD 804	1.114
2017 11 17	17 57 00	1.906	2.587	18.6	10.6	5	1.297	0.43	Санглок, 1-м, $UBVRI$ -фот-рия	HIP 109931	1.509

Примечания: 1) наблюдательные параметры 704 Интерамнии и других астероидов рассчитаны с помощью сервиса Центра Малых Планет (ЦМП) по всемирному времени (<https://www.minorplanetcenter.net/jau/mpeh/mpeh.html>); 2) ОФВ — относительная фаза вращения астероида, рассчитанная для всех полученных спектров отражения (в этой таблице и последующих); за нулевую условно принимается ОФВ для первого полученного спектра каждой отдельной наблюдательной серии; 3) здесь и в последующих таблицах Δ и r обозначают соответственно гео- и гелиоцентрическое расстояние астероида; приведенные значения всемирного времени (UT) спектrophотометрии астероида соответствуют середине экспозиции, а при его $UBVRI$ - ($BVRI$)-фотометрии — среднему значению времени всех наблюдательных серий, полученных в указанную дату; а. е. — астрономические единицы (1 а. е. = 150 млн км).

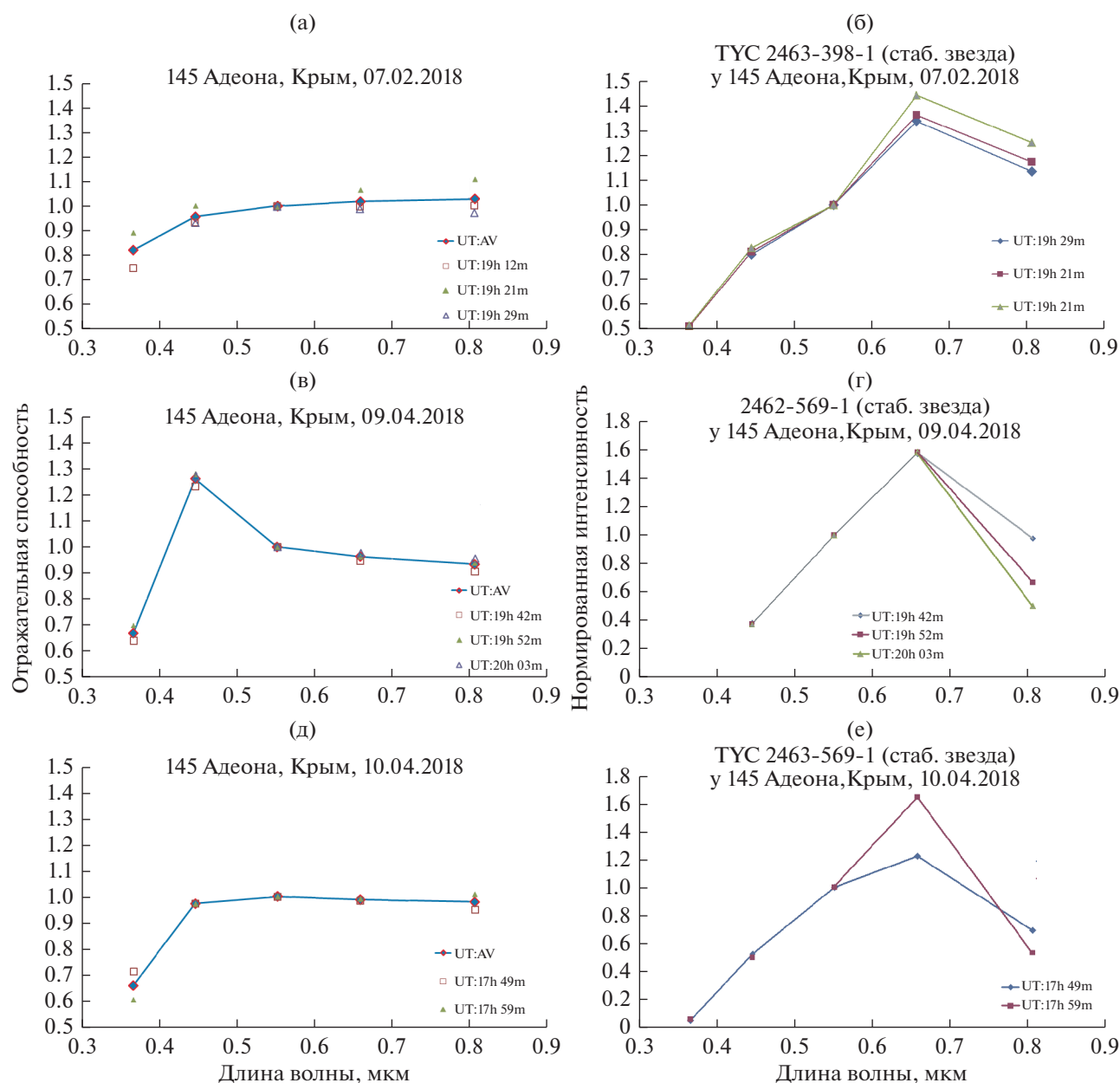


Рис. 4. Усредненная и нормированная (на 0.55 мкм) отражательная способность (ОС) 145 Адеоны по *UBVRI*- (*BVRI*)-данным на указанные даты наблюдений в Крыму (февраль–апрель 2018 г.) 4 “а”, “в” и “д”. На рис. 4б, 4г и 4е для контроля наблюдательных условий представлены усредненные и нормированные (на 0.55 мкм) величины интенсивности для стабильных звезд, которые наблюдались вместе с Адеоной на одном ПЗС-кадре. Непрерывной линией соединены точки, соответствующие только средней (расчетной) кривой в полосах *UBVRI*- (*BVRI*) ОС астероида. AV обозначает среднее всемирное время, указанное в табл. 2, на соответствующие даты *UBVRI*- (*BVRI*)-наблюдений астероида.

тральной прозрачности земной атмосферы. С этой целью при измерениях интенсивности светового потока от Адеоны на одном ПЗС-кадре с ней выбиралась ближайшая по положению и яркости неперенная звезда, которая использовалась в качестве фотометрического стандарта. На рис. 4б, 4г и 4е представлены нормированные (на 0.55 мкм) зависимости интенсивности света таких звезд, измеренные на тех же кадрах, что и ин-

тенсивности Адеоны, изображенные соответственно на рис. 4а, 4в и 4д. По звездным *UBVRI*- (*BVRI*)-зависимостям интенсивности (и точкам, показывающим величины отдельных измерений) видно, что во время наблюдений практически отсутствовали колебания спектральной прозрачности земной атмосферы в коротковолновой области, — на тех длинах волн, где у астероида были зарегистрированы значительные изменения ОС.

Таблица 2. Наблюдательные параметры 145 Адеоны (перигелийное расстояние $q = 2.2889472$ а. е.) в феврале–июне 2018 г. при выполнении ее спектрофотометрии и $UBVRI$ - ($BVRI$)-фотометрии

Дата	UT (h m s) среднее	Δ , а. е.	r , а. е.	Фаз. угол, град	Видимая звездная величина	Время экспоз., с	Воздуш. масса	Относ. фаза вращения (ОФВ)	Обсерватория, телескоп, вид наблюдений	Стандарт. звезда солнечного типа	Воздуш. масса звезды
2018 02 07	19 21 00	1.410	2.288	14.4	11.48	30	1.016	0	Крым, 60-см, $UBVRI$ -фот-рия	НІР 22528	1.110
2018 04 09	19 52 00	2.032	2.301	25.8	12.66	40	1.344	0.61	Крым, 60-см, $UBVRI$ -фот-рия	НІР 22528	1.709
2018 04 10	17 54 00	2.042	2.301	25.8	12.67	40	1.077	0.07	Крым, 60-см, $UBVRI$ -фот-рия	НІР 22528	1.312
2018 04 12	19 14 50	2.067	2.302	25.8	12.7	1200 (4 × 300)	1.221	0.75	ТЮБИТАК, РТТ-150, спектрофот-рия	НІР44324	1.076
2018 06 13	19 10 10	2.776	2.346	20.8	13.2	600 (2 × 300)	2.366	0.51	ТЮБИТАК, РТТ-150, спектрофот-рия	НІР44324	1.959

На рис. 4а, на котором представлены ближайшие к перигелию (дата прохождения 11.02.2018) зависимости ОС Адеоны в течение 10 мин зарегистрированы наибольшие изменения (до 15%) континуума в коротковолновой области, причем такие изменения отсутствуют у стабильной звезды на том же ПЗС-кадре (рис. 4б). А после его прохождения перигелия, когда “тепловая волна”, вызванная максимальной инсоляцией поверхности Адеоны, вероятно, достигла ее больших глубин и привела к росту интенсивности сублимации льдов, на кривой ОС астероида наблюдался характерный максимум рассеяния света более регулярной комой (рис. 4в). Хотя на следующую ночь у астероида такой максимум отсутствовал, но оставались значительные колебания в коротковолновой области (до 10%) в течение ~10 мин, при отсутствии таких колебаний у звезды на том же кадре (рис. 4д и 4е). Поэтому перечисленные результаты можно рассматривать как указание на сублимационную активность Адеоны сразу после прохождения перигелия, в период времени, когда температура в ее подповерхностных слоях оставалась наиболее высокой.

И наконец в апреле и июне 2018 г. были проведены спектрофотометрические наблюдения Адеоны в ТЮБИТАК на российско-турецком 1.5-м телескопе RGT150 с прибором TFOSC в варианте низкого разрешения ($R \approx 500$) с шириной щели 1.8" (100 мкм) в диапазоне 0.37–0.84 мкм и с использованием в качестве приемника ПЗС-матрицы Andor DW436 с размером пикселей 13.5×13.5 мкм (Гумеров и др., 2013). На рис. 5 представлены спектры отражения, полученные 12 апреля (спектр 1) и 13 июня 2018 г. (спектр 2), после прохождения Адеоной перигелия при отличии ОФВ 27%. Спектры отражения астероида были рассчитаны с использованием его измеренного спектра и спектра стабильной звезды солнечного типа HIP 44324. Следует подчеркнуть, что эти спектры были получены при хороших наблюдательных условиях и при меньшей величине содержания водяного пара в земной атмосфере, чем при наблюдениях в Крыму в феврале и апреле 2018 г. Но зарегистрированные изменения в коротковолновой части спектра 2 (рис. 5) достигают 40%, а в длинноволновой — 15%. Такой общий наклон континуума спектра отражения характерен для астероида таксономического типа “D” или “T”, но отнюдь не “C”, как у Адеоны, согласно известным классификациям (Tholen, 1989; Bus, Binzel, 2002). Таким образом, значительное изменение градиента спектра Адеоны при указанных ОФВ (табл. 2), не свойственно медленно вращающемуся астероиду примитивного типа и, по нашему мнению, может быть объяснено присутствием в его ближайших окрестностях пылевой комы из частиц водяного льда микронных размеров. Закономерно задать вопрос: почему в спек-

тре отражения Адеоны 10 апреля (спектр 1, рис. 5) отсутствует характерный максимум рассеяния света у ~ 0.5 мкм, как в спектре 2012 г. (рис. 1а)? Мы предполагаем, что это связано с удалением астероида от перигелия (и соответственно, — от Солнца), со снижением поверхностных температур и нарастающей нерегулярностью сублимационной комы, которая становится менее протяженной и как бы “прижатой” к поверхности астероида. В то же время, как отмечалось, максимум рассеяния света у ~ 0.5 мкм на спектре отражения Адеоны был за трое суток до этого (табл. 2, рис. 4в).

Следует подчеркнуть еще одно обстоятельство. 10 апреля кривая средней ОС Адеоны по крымским *UBVRI*-данным (табл. 2, рис. 4г) полностью совпадает по форме с ее спектром отражения 12 апреля по турецким данным (спектр 1, рис. 5). Это, с одной стороны, показывает хорошее согласие наших спектрофотометрических и *UBVRI*-данных для Адеоны и, с другой, — свидетельствует о достаточно высокой спектральной однородности поверхности этого астероида при разнице ОФВ ~ 0.32 (см. табл. 2). Более конкретный ответ на вопрос, почему второй спектр отражения Адеоны на (рис. 5, спектр 2), полученный 13 июня, значительно отличается от первого и имеет больший положительный градиент, должно дать последующее моделирование рассеяния света ледяными частицами с разными распределениями размеров.

РЕЗУЛЬТАТЫ СПЕКТРОФОТОМЕТРИИ 51 НЕМАУЗЫ И 65 ЦИБЕЛЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Астероид 51 Немауза движется по орбите с большой полуосью $a = 2.36527$ а. е. в ГПА, с малым эксцентриситетом $e = 0.06697$ и периодом обращения 3.64 г. (<https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi#top>). Период вращения составляет $T_{\text{rot}} = 7.783$ ч (Kristensen, 1993; Warner и др., 2009). Размер Немаузы оценивается около 138.16 км, если использовать измеренную величину ее геометрического альбедо 0.105 (Masiero и др., 2014). Согласно классификациям Толена (Tholen, 1989) и Бас–Бинзела (Bus, Binzel, 2002) Немауза относится к примитивному спектральному типу “C”. Нами были проведены спектрофотометрические наблюдения этого астероида на Терсколе на 2-м телескопе и выполнен расчет спектров отражения (табл. 3, рис. 6).

Значительные изменения формы спектра отражения 51 Немаузы в диапазоне 0.38–0.65 мкм при близких фазах вращения могут быть объяснены присутствием слабой пылевой комы из замерших частиц водяного льда, возникшей вследствие сублимационной активности. Действительно, в коротковолновой области верхнего спектра (рис. 6) есть слабые признаки характерного максимума рассеяния, упоминавшегося выше. Но можно до-

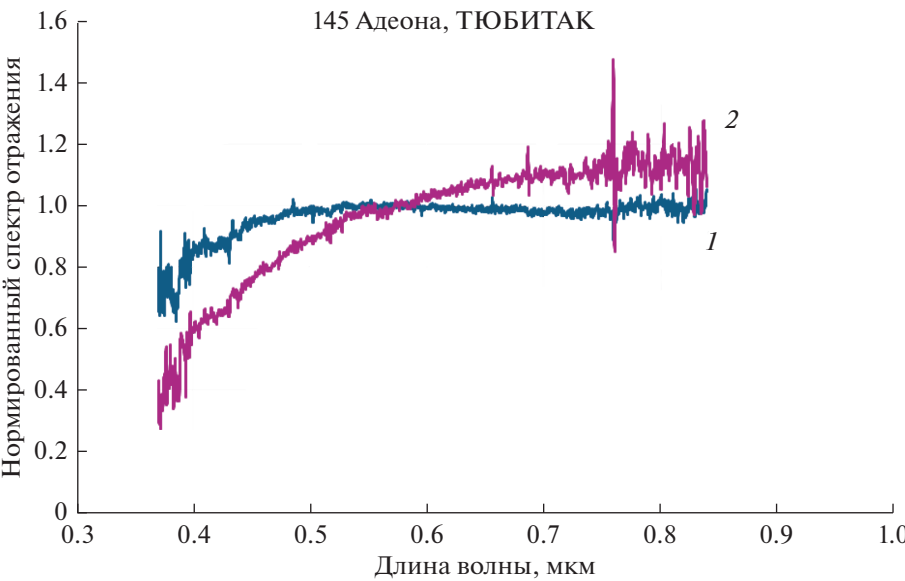


Рис. 5. Нормированные (на 0.55 мкм) спектры отражения 145 Адеона, полученные в обсерватории ТЮБИТАК (Турция) 12 апреля (1) и 13 июня (2) 2018 г. после прохождения астероидом перигелия при ОФВ, отличающихся на 27%.

пустить, что особая форма этого спектра (в отличие от двух нижних спектров, полученных близко по времени, примерно через сутки после верхнего), вызвана, например, при наличии заметной прецессии, изменением ориентации оси вращения астероида в пространстве (и соответственно, — доступностью для наблюдений новой части поверхности с другими спектральными характеристиками). Но все же мы склоняемся к предыдущей интерпретации зарегистрированных спектральных изменений на Немаузе. А на двух нижних спектрах, полученных с интервалом времени около 30 мин, имеются резкие изменения спектрального градиента в коротковолновой области (рис. 6). Наклон нижнего спектра оказался заметно положительным, характерным для астероида таксономического типа “D”, а среднего — нейтральным, соответствующим типу “C”, согласно общепринятым классификациям (Tholen, 1989; Bus, Binzel, 2002). Как уже отмечалось, такие резкие изменения спектрального градиента (при ΔОФВ = 0.06) (см. табл. 3), не характерны для сравни-

тельно медленно вращающегося астероида примитивного типа. Фотометрические условия наблюдений Немаузы были устойчивыми. В то же время необходимо отметить, что Немауза имеет малый эксцентриситет орбиты. Это исключает возникновение на ней перепада подсолнечных температур, рассматриваемого нами в качестве главного условия периодической сублимационной активности примитивных астероидов. Но с учетом большого наклона оси вращения Немаузы (Kristensen, 1993), на ней должны происходить сезонные изменения, которые, вероятно, приводят к поочередному накоплению и сублимации летучих соединений (включая H₂O) вблизи полярных областей.

Необычные характеристики 51 Немаузы (сложная форма кривой блеска, а также большие изменения цветовых показателей и линейной поляризации с вращением) вызывали и продолжают вызывать к ней значительный интерес (Gammellaard, 1992; Kristensen, 1993; Broglia, Manara, 1994). Вариации оптических характеристик Не-

Таблица 3. Наблюдательные параметры 51 Немаузы (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, град	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		

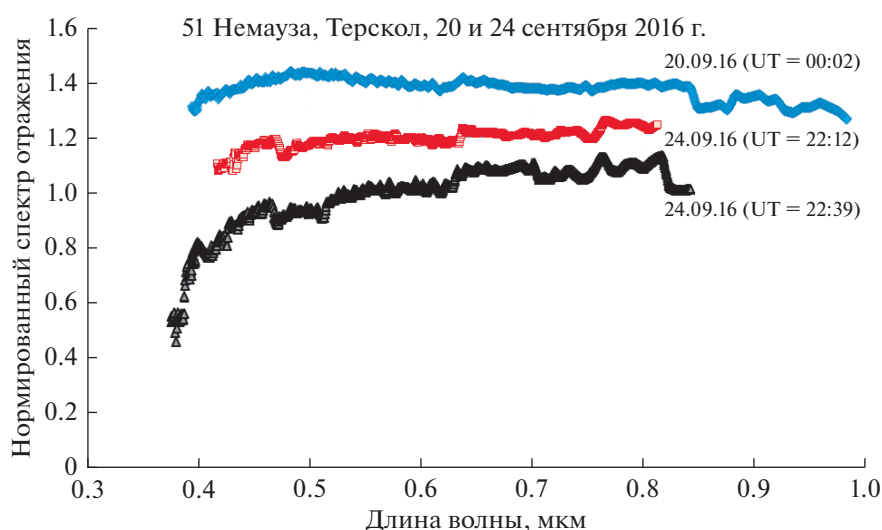


Рис. 6. Нормированные (на 0.55 мкм) спектры отражения 51 Немаузы, полученные в 2016 г. на Терсколе в течение двух ночей при близких фазах вращения (табл. 4). Два верхних спектра произвольно смещены вдоль вертикальной оси для удобства сравнения.

маузы с вращением были объяснены наличием на ее поверхности смеси разнородных материалов (Broglia, Manara, 1994). А интерпретация ее спектра отражения, полученного в диапазоне $\sim 0.4\text{--}2.5$ мкм, показала, что ее метеоритными аналогами являются CI_1 и CM_2 (Reynolds и др., 2009). Обнаруженные нами признаки сублимационной активности Немаузы вполне согласуются с перечисленными результатами исследований и свидетельствуют, вероятно, о наличии в ее полярных областях льдов, в основном H_2O и некоторой доли CO_2 .

65 Цибела — это астероид Главного пояса с большой полуосью орбиты $a = 3.42762$ а. е., эксцентриситетом $e = 0.11161$ и периодом обращения 6.35 г. (<https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi#top>). Период вращения Цибелы составляет $T_{\text{rot}} = 6.081$ ч (Warner и др., 2009), а диаметр и геометрическое альbedo соответственно — 237.26 км и 0.071 (Tedesco и др., 2004). Согласно классификациям Толена (Tholen, 1989) и Бас–Бинзела (Bus, Binzel, 2002) астероид имеет примитивные спектральные типы соответственно Р и Хс.

Нами было получено всего два спектра Цибелы (табл. 4, рис. 7) на достаточно коротком интер-

вале времени (около 10 мин) и, возможно, удалось зарегистрировать переменность ее спектральных характеристик, связанную с наличием слабой сублимационной комы. На представленных спектрах отражения имеется максимум в достаточно широком диапазоне — $0.4\text{--}0.7$ мкм, меняющийся по интенсивности в интервале $0.4\text{--}0.5$ мкм, характерном для рассеяния света в коме из ледяных частиц H_2O примерно микронного размера. Общий спектральный градиент обоих спектров отрицательный, а по установленным таксономическим типам он должен быть положительным (Tholen, 1989; Bus, Binzel, 2002).

В соответствии с вышеперечисленными параметрами 65 Цибела является типичным представителем периферийных АГП. Licandro и его соавторы (2011) с помощью спектральных наблюдений в ближней ИК-области (до 3 мкм) обнаружили в спектрах отражения Цибелы диагностические полосы поглощения водяного льда и органики. Это, по нашему мнению, является прямым указанием на возможность сублимационной активности Цибелы. В то же время при сравнении эмиссионной способности в среднем ИК-диапазоне угли-

Таблица 4. Наблюдательные параметры 65 Цибелы (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, град	Видимая звездная величина	Вр. экспоз., с	Возд. масса астероида	Стандарт. звезда солнечно- го 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	

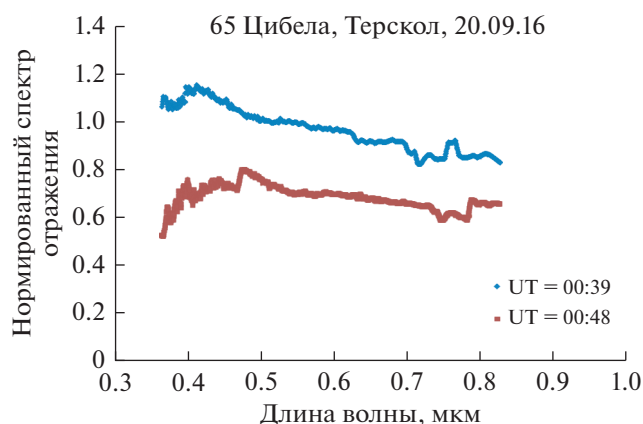


Рис. 7. Нормированные (на 0.55 мкм) спектры отражения 65 Цибелы, полученные в 2016 г. на Терсколе при хороших фотометрических условиях с интервалом времени около 10 мин. Резкое изменение формы спектра отражения в коротковолновой области может быть объяснено рассеянием отраженного от астероида света в слабой и нерегулярной пылевой коме, состоящей предположительно из частиц водяного льда микронного размера.

стых хондритов и Цибелы не удалось найти близких совпадений (Müller, Blommaert, 2004). Такой результат показывает, что поверхность Цибелы, возможно, состоит из материалов, отсутствующих в земных метеоритных коллекциях. Хотя в период наших наблюдений этот астероид находился достаточно далеко от перигелия (эксцентриситет орбиты Цибелы примерно вдвое больше, чем у Немаузы), но его ось вращения имеет небольшой наклон, который оценивается в $\sim 7^\circ$ – 14° (Franco, Pilcher, 2015). Поэтому на Цибеле, как на Немаузе, в северном и южном полушариях возможны сезонные температурные изменения. Хотя для более уверенных выводов, очевидно, необходимо получение большего количества наблюдательных данных, вероятность сублимационного процесса на этом астероиде является достаточно высокой.

ДИСКУССИЯ

Признаки сублимационной активности были нами зарегистрированы одновременно на 145 Адеоне, 704 Интерамнии, 779 Нине и 1474 Бейре — астероидах примитивных типов, находившихся вблизи перигелийного расстояния (Busarev и др., 2015; Бусарев и др., 2016). Исходя из этого, можно сделать два предположения: первое — о возможной массовости этого явления на примитивных астероидах Главного пояса и, второе — о сходных условиях происхождения таких тел, приведших к значительному обогащению их вещества льдами (преимущественно H_2O). Если такие предположения подтвердятся на большем наблюдательном материале, то это будет означать, что большин-

ство астероидов примитивных типов (или их родительские тела) сформировалось не в Главном поясе, а гораздо дальше — за границей конденсации водяного льда. Один из таких вариантов нами уже обсуждался: была предложена гипотеза об образовании астероидов С-типа и углистых хондритов при выбросе в Главный пояс каменно-ледяных тел из зоны формирования Юпитера в период его роста (Busarev, 2012).

При рассмотрении сублимационного процесса на астероидах примитивных типов нас также интересует возможность поддержания в течение длительного времени высокого содержания водяного льда в их поверхностном веществе. Для обеспечения продолжительной сублимационной активности таких тел должен существовать механизм, препятствующий исчерпанию или изоляции водяного льда вблизи их поверхности. Очевидно, искомым механизмом на астероидах Главного является постоянная метеоритная и микрометеоритная переработка их поверхностного вещества. Наблюдения с помощью ИСЗ *IRAS* (InfraRed Astronomical Satellite — орбитальный 0.57-м телескоп с детекторами инфракрасного излучения на длинах волн 12, 25, 60 и 100 мкм) показали, что с Главным поясом астероидов связаны несколько пылевых полос и он является основным источником метеоритного и пылевого вещества во внутренней части Солнечной системы по причине высокой частоты взаимных столкновений астероидов (например, Dermott и др., 1984). Хотя наиболее мелкие частицы, обладающие достаточной энергией для заметного метеоритного удара по астероидной поверхности (примерно от одного до нескольких сотен микрон) сравнительно быстро удаляются из Главного пояса благодаря эффектам радиационного давления и Пойтинга—Робертсона (например, Liou и др., 1995; Nesvorný и др., 2006), достаточно высокое содержание там более крупного метеоритного материала поддерживается за счет новых каскадных столкновений (Durda, Dermott, 1997). Таким образом, метеоритный и микрометеоритный потоки в Главном поясе, по-видимому, не только препятствуют образованию на поверхности астероида примитивного типа герметизирующих слоев органики, но и обеспечивают постоянную экскавацию новых ледяных включений с большей глубины и, таким образом, поддерживают его сублимационную активность. К похожим последствиям должны приводить падения на астероиды крупных тел, что, возможно, произошло на астероиде 596 Шейла (например, Jewitt, 2012; Кохирова и др., 2018), но такие события имеют меньшую вероятность.

Следует отметить, что при очередном прохождении Адеоной, Ниной и Интерамнией перигелия в 2016–2018 гг. изменения их спектров отражения оказались не такими значительными, как в 2012 г., что нуждается в объяснении. Мы замети-

ли, что наши наблюдательные данные в 2012 г. (Busarev и др., 2015) были получены в период высокой солнечной активности (характеризуемой таким интегральным параметром, как число солнечных пятен S_n), а в 2016–2018 гг. — на ее спаде (см. рис. 10) (<http://sidc.oma.be/silso/dayssnplot>). Давно известно явление возникновения комы и протяженного хвоста у ядер комет с приближением к Солнцу. А изучение нескольких ядер комет с ближайших расстояний с помощью космических аппаратов позволило установить, что такая активность связана с интенсивным выделением из кометного ядра наиболее летучих соединений (CH , CN , CO , CO_2 и др.) и пыли под влиянием роста подсолнечной температуры и потока частиц солнечного ветра (например, Huebner и др., 1988; Grün и др., 2016; Skofov и др., 2016). Кометное вещество сформировалось на далекой периферии Солнечной системы при крайне низких температурах (порядка нескольких десятков кельвинов) из льдов разного состава, включающих органику и пыль (например, Guilbert-Lepoutre и др., 2015; Davidsson и др., 2016). Но одновременная активность у перигелийного расстояния нескольких примитивных астероидов Главного пояса, находящихся значительно ближе к Солнцу (Busarev и др., 2015), представляется странной. По температурным условиям на астероидах Главного пояса и термо-физическим параметрам летучих соединений наиболее обильными здесь являются льды H_2O и CO_2 , с абсолютным преобладанием водяного (Longhi, 2005; Busarev и др., 2015). Можно предполагать, что повышение общей солнечной активности и локальные вспышечные явления в солнечной фотосфере оказывают заметное влияние на протекание сублимационного процесса на примитивных астероидах. Оказалось, что именно такое событие произошло за два месяца до наблюдений рассматриваемых астероидов в сентябре 2012 г.: в июле 2012 г. на обратной стороне Солнца имел место массивный корональный выброс вещества, зарегистрированный одновременно с четырех космических аппаратов (*STEREO*, *SOHO*, *GOES*, и *MESSENGER*) (Gopalswamy и др., 2016). На фоне высокой общей солнечной активности в тот период указанное событие должно было привести к дополнительному росту средней скорости частиц и плотности потока солнечного ветра. Протоны (как наиболее энергоемкая компонента солнечного ветра) даже за короткое время могли оказать разрушительное воздействие на водяной лед (и/или на покрывающие его органические пленки), находящийся в свободном состоянии на поверхности примитивных астероидов, что должно было усилить его сублимацию. Вследствие разрушения и распыления льда, вероятно, произошло увеличение общей площади сублимирующей поверхности и образование большего объема ледяного материала в

пылевой коме активных астероидов. Еще одним механизмом увеличения протяженности комы активного астероида при высокой солнечной активности могут быть более сильные электростатические эффекты, заставляющие частицы комы достигать большей высоты над астероидом. Но в слабом гравитационном поле астероида такие частицы должны быстро терять с ним связь.

В то же время, детальное изучение особенностей взаимодействия солнечного ветра и коротковолнового излучения с поверхностью астероида примитивного типа выходит за рамки данной статьи и нуждается в специальном рассмотрении.

ВЫВОДЫ

Таким образом, отмеченное выше необычное общее сходство спектров отражения трех активных астероидов примитивных типов у перигелия в 2012 г. (наличие необычного максимума с центром у $\sim 0.5\text{--}0.6$ мкм), подтвердившееся по некоторым *UBVRI*- (*BVRI*)-данным 2017–2018 гг., вероятно, объясняется следующими причинами: (1) наличием водяного льда в их поверхностном веществе и его интенсивной сублимацией, приведшей к образованию рассеивающей свет регулярной комы; (2) солнечной активностью и связанными с ней электро-магнитными и радиационными факторами, влияющими на размер, плотность и регулярность комы всех рассматриваемых тел, находящихся в сфере влияния этих факторов. У тех же астероидов в 2017–2018 гг. нами обнаружены и более слабые признаки рассматриваемого явления, но они нуждаются в подтверждении и дополнительном изучении. В то же время более слабые спектральные изменения на астероидах (вариации наклона континуума спектра отражения) могут быть связаны с неоднородностью состава вещества при вращении этих тел. Но следует подчеркнуть, что последние, как правило, являются более медленными и имеют меньшую амплитуду.

Очевидно, что одним из основных условий сублимационной активности примитивных астероидов Главного пояса является перепад подсолнечной температуры. Диапазон ее изменений на поверхности астероида зависит либо от величины эксцентриситета орбиты, либо (при отсутствии последнего) от наклона оси вращения к плоскости орбиты, что приводит к чередованию сезонных изменений в зависимости от положения данного тела относительно Солнца. Но другим необходимым условием сублимационной активности примитивного астероида является достаточно высокое содержание льда в его веществе. При наличии на астероиде некоторого замерзшего CO_2 , его запасы должны истощаться намного быстрее, чем водяного льда (Busarev и др., 2015).

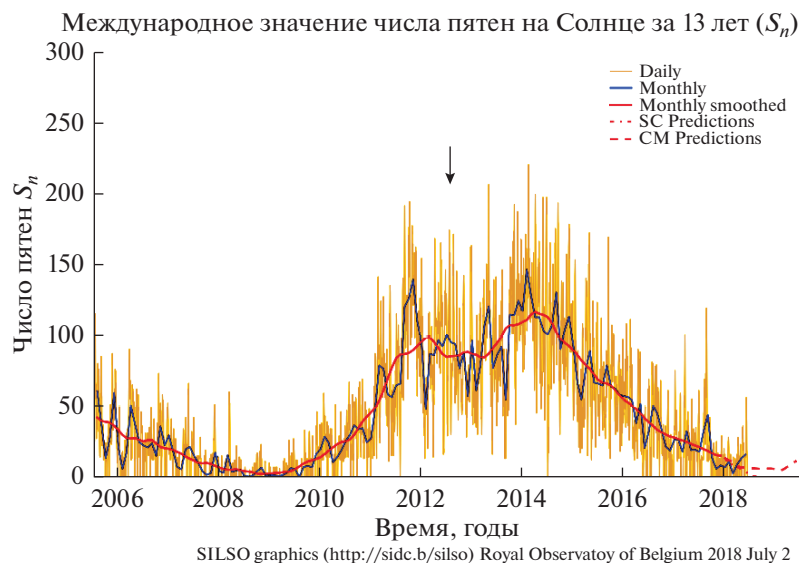


Рис. 8. Изменение числа солнечных пятен (S_n) с 2005 по 2018 гг., характеризующих солнечную активность согласно Мировому центру данных (<http://sidc.oma.be/silso/dayssnplot>). Вертикальная стрелка указывает момент выполнения наших наблюдений в сентябре 2012 г. астероидов 145 Адеоны, 704 Интерамнии, 779 Нины и 1474 Бейры.

Одновременность активности 779 Нины, 704 Интерамнии и 145 Адеоны в 2012 г. и установленная периодичность этого процесса являются прямыми указаниями на массовость формирования временной разреженной газо-пылевой атмосферы на примитивных астероидах Главного пояса со значительным эксцентриситетом орбиты с приближением к Солнцу. Аналогами таких астероидов считались имеющиеся в земных коллекциях углистые хондриты и земные гидратированные силикаты (серпентины, хлориты и др.) (Gaffey и др., 1989), которые содержат воду в связанном состоянии. Но в этом случае наше предположение о значительном содержании льда в веществе астероидов примитивных типов противоречит ранее сложившимся представлениям. Известно, что в углистых хондритах, упавших на земную поверхность, летучие соединения в свободном состоянии практически отсутствуют (например, Dodd, 1981). Но весьма вероятно, что подобные материалы с высоким содержанием летучих вообще не достигают земной поверхности из-за их низкой механической прочности (высокой пористости) и нагревания в земной атмосфере.

Необходимы дальнейшие наблюдения с целью обнаружения сублимационной активности других астероидов примитивных типов. Причем желательно использовать для этого не только спектральный, но и фотометрический и поляриметрический методы. Возможно, новыми подтверждениями наших предположений, являются спектральные признаки сублимационной активности 51 Немаузы и 65 Цибелы.

Авторы благодарят анонимных рецензентов за ряд полезных замечаний, учет которых позволил значительно улучшить описание и интерпретацию полученных результатов.

Эта работа поддержана РФФИ (Проект № 18-02-00105 А). ИХ, ИБ, РГ, ЭИ и СМ благодарят ТЮБИТАК, КФУ, АН РТ и ИКИ за частичную поддержку при использовании РТТ150 (российско-турецкого 1.5-м телескопа в Анталии). Эта работа также частично финансировалась за счет субсидии 3.6714.2017/8.9 выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бахтин А.И. Пороодообразующие силикаты: оптические спектры, кристаллохимия, закономерности окраски, типоморфизм. Казань: Издат. Казанского ун-та, 1985. 192 с.
- Бусарев В.В. Спектрофотометрия безатмосферных тел Солнечной системы // Астрон. вестн. 1999. Т. 33. С. 140–150 (Busarev V.V. Spectrophotometry of atmosphereless celestial bodies of the solar system // Sol. Syst. Res. 1999. V. 33. P. 120–129).
- Бусарев В.В. Спектрофотометрия астероидов и ее приложения / LAP LAMBERT Acad. Publish. GmbH & Co. KG, Саарбрюккен, 2011. 250 с.
- Галазутдинов Г.А. Система обработки звездных эшелле-спектров. II. Обработка спектров // Препр. Спец. астрофиз. обсерв. 1992. № 92. С. 27–52.
- Гумеров Р.И., Хамитов И.М., Пинигин Г.И. РТТ150 телескоп в международных проектах по изучению малых тел Солнечной системы // Уч. зап. Казан-

- ского ун-та. Сер. физ.-мат. науки. Изд-во Казанского ун-та, 2013. Т. 155. Кн. 1. С. 164–177.
- 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 // *Астрон. вестн.* 2016. Т. 50. С. 300–312 (Busarev V.V., Barabanov S.I., Puzin V.B. Material composition assessment and discovering sublimation activity on asteroids 145 Adeona, 704 Interamnia, 779 Nina, and 1474 Beira // *Sol. Syst. Res.* 2016. V. 50. P. 281–293).
- Кохирова Г.И., Иванова О.В., Рахматуллаева Ф.Дж., Хамроев У.Х., Буриев А.М., Абдуллоев С.Х. Результаты комплексных наблюдений астероида (596) Шейла в Международной астрономической обсерватории Санглох // *Астрон. вестн.* 2018. Т. 52. № 6. С. 511–520 (Kokhirova G.I., Ivanova O.V., Rakhmatullayeva F.Dzh., Khamroev U.Kh., Buriev A.M., Abdulloev S.Kh. Results of Complex Observations of Asteroid (596) Scheila at the Sanglokh International Astronomical Observatory // *Sol. Syst. Res.* 2018. V. 52. P. 495–504).
- Макалкин А.Б., Дорофеева В.А. Распределение температуры в околосолнечном протопланетном диске на последовательных стадиях его эволюции // *Астрон. вестн.* 2009. Т. 43. С. 528–554 (Makalkin A.B., Dorofeeva V.A. Temperature distribution in the solar nebula at successive stages of its evolution // *Sol. Syst. Res.* 2009. V. 43. № 6. P. 508–532).
- Платонов А.Н. Природа окраски минералов. Киев: Наукова думка, 1976. 264 с.
- Сафронов В.С., Зиглина И.Н. Происхождение пояса астероидов // *Астрон. вестн.* 1991. Т. 25. № 2. С. 190–199. (Safronov V.S., Ziglina I.N. Origin of the asteroid belt // *Sol. Syst. Res.* 1991. V. 25 № 2. P. 139–146.)
- Bell J.F., Davis D.R., Hartmann W.K., Gaffey M.J. Asteroids: The big picture // *Asteroids II* / Eds Binzel R.P., Gehrels T., Matthews M.S. Tucson: Univ. Arizona Press, 1989. P. 98–127.
- Broglia P., Manara A. Polarimetric observations of 51 Nemausa during its 1991 apparition // *Astron. and Astrophys.* 1994. V. 281. P. 576–578.
- Burns R.G. Mineralogical applications of crystal field theory. New-York: Cambridge Univ. Press, 1993. 224 p.
- Bus S.J., Binzel R.P. Phase II of the small Main-belt asteroid spectroscopic survey. A feature-based taxonomy // *Icarus.* 2002. V. 158. P. 146–177.
- Bus S., Binzel R.P. 779 Nina CCD Spectrum // EAR-A-10028-4-SBN0001/SMASII-V1.0: 779_01_TAB. NASA Planetary Data System, 2003a.
- Bus S., Binzel R.P. 704 Interamnia CCD Spectrum // EAR-A-10028-4-SBN0001/SMASII-V1.0: 704_01_TAB. NASA Planetary Data System, 2003b.
- Bus S., Binzel R.P. 145 Adeona CCD Spectrum // EAR-A-10028-4-SBN0001/SMASII-V1.0: 145_01_TAB. NASA Planetary Data System, 2003c.
- Busarev V.V. A hypothesis on the origin of C-type asteroids and carbonaceous chondrites // *Asteroids, Comets, Meteors (ACM) 2012. Abstract #6017, Niigata, Japan* (<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1211/1211.3042.pdf>).
- Busarev V.V., Barabanov S.I., Rusakov V.S., Puzin V.B., Kravtsov V.V. 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. V. 262. P. 44–57.
- 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. V. 304. P. 83–94.
- Ciarniello M., De Sanctis M.C., Ammannito E. and 14 co-authors. Spectrophotometric properties of dwarf planet Ceres from the VIR spectrometer on board the Dawn mission // *Astron. and Astroph.* 2017. V. 598. A130. 14 p.
- Davidsson B.J.R., Sierks H., Güttler C. and 45 co-authors. The primordial nucleus of comet 67P/Churyumov–Gerasimenko // *Astron. and Astroph.* 2016. V. 592. A63. 30 p.
- Dermott S.F., Nicholson P.D., Burns J.A., Houck J.R. Origin of the Solar System dust bands discovered by IRAS // *Nature.* 1984. V. 312. P. 505–509.
- Dodd R.T. Meteorites: A petrologic-chemical synthesis. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1981. 368 p.
- Durda D.D., Dermott S.F. The collisional evolution of the Asteroid belt and its contribution to the zodiacal cloud // *Icarus.* 1997. V. 130. P. 140–164.
- Franco L., Pilcher F. Lightcurve inversion for 65 Cybele // *Minor Planet Bull.* 2015. № 42. P. 204–206.
- Gaffey M.J., Bell J.F., Cruikshank D.P. Reflectance spectroscopy and asteroid surface mineralogy // *Asteroids II* / Eds Binzel R. P., Gehrels T., Matthews M. S. Tucson: Univ. Arizona Press, 1989. P. 98–127.
- Gammelgaard P. Significant color variation of (51) Nemausa // *Proc. Liege Int. Astrophys. Colloq.* 30. 1992. P. 311–313.
- Gopalswamy N., Yashiro S., Thakur N., Mäkelä P., Xie H., Akiyama S. The 2012 July 23 backside eruption: An extreme energetic particle event? // *Astrophys. J.* 2016. V. 833. P. 216–235.
- Grün E., Agarwal J., Altbelli N. and 93 co-authors. The 19 Feb. 2016 outburst of Comet 67P/CG: An ESA Rosetta multi-instrument study // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2016. V. 462. Iss. Suppl. 1. P. S220–S234.
- Guilbert-Lepoutre A., Besse S., Mousis O., Ali-Dib M., Höfner S., Koschny D., Hager P. On the evolution of comets // *Space Sci. Rev.* 2015. V. 197. P. 271–296.
- Hansen J.E., Travis L.D. Light scattering in planetary atmosphere // *Space Sci. Rev.* 1974. V. 16. P. 527–610.
- Hardorp J. The Sun among the stars // *Astron. and Astrophys.* 1980. V. 91. P. 221–232.
- Harris A.W., Warner B.D., Pravec P. Asteroid lightcurve derived data V13.0. NASA Planetary Data System, EAR-A-5-DDR-DERIVED-6-V13.0, 2012.
- Huebner W.F., Boice D.C., Reitsema H.J., Delamere W.A., Whipple F.L. A model for intensity profiles of dust jets near the nucleus of Comet Halley // *Icarus.* 1988. V. 76. P. 78–88.
- Jewitt D. The active asteroids // *Astron. J.* 2012. V. 143. P. 66–80.
- Kristensen L.K. The pole of (51) Nemausa // *Astron. Nachr.* 1993. V. 314. P. 381–390.
- Lewis J.S. The temperature gradient in the solar nebula // *Science.* 1974. V. 186. P. 440–442.

- Licandro J., Campins H., Kelley M., Hargrove K., Pinilla-Alonso N., Cruikshank D., Rivkin A.S., Emery J.* (65) Cybele: detection of small silicate grains, water-ice, and organics // *Astron. and Astrophys.* 2011. V. 525. A34. 7 p.
- Liou J.-Ch., Zook H.A., Jackson A.A.* Radiation pressure, Poynting–Robertson drag, and solar wind drag in the restricted three-body problem // *Icarus.* 1995. V. 116. P. 186–201.
- Longhi J.* Phase equilibria in the system $\text{CO}_2\text{--H}_2\text{O}$. I. New equilibrium relations at low temperatures. *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 2005. V. 69. P. 529–539.
- 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. Article id. 121. 11 p.
- Müller T.G., Blommaert J.A.D.L.* 65 Cybele in the thermal infrared: Multiple observations and thermophysical analysis // *Astron. and Astrophys.* 2004. V. 418. P. 347–356.
- Nesvorný D., Vokrouhlický D., Bottke W.F., Sykes M.* Physical properties of asteroid dust bands and their sources // *Icarus.* 2006. V. 181. P. 107–144.
- Reynolds C.M., Reddy V., Gaffey M.J.* Compositional study of 51 Nemausa: A possible carbonaceous chondrite-like asteroid // 40th Lunar and Planet. Sci. Conf. 2009. Abstract #1285.
- Shepard M.K. and 12 co-authors.* A radar survey of M- and X-class asteroids. II. Summary and synthesis. *Icarus.* 2010. V. 208. P. 221–237.
- Skorov Yu.V., Rezac L., Hartogh P., Bazilevsky A.T., Keller H.U.* A model of short-lived outbursts on the 67P from fractured terrains // *Astron. and Astrophys.* 2016. V. 593. A76. 10 p.
- Tedesco E.F., Noah P.V., Noah M., Price S.D.* IRAS Minor Planet Survey, IRAS-A-FPA-3-RDR-IMPS-V6.0. NASA Planetary Data System, 2004.
- Tholen D.J.* Asteroid taxonomic classifications // *Asteroids II* / Eds Binzel R.P., Gehrels T., Matthews M.S. Tucson: Univ. Arizona Press, 1989. P. 1139–1150.
- Warner B.D., Harris A.W., Pravec P.* The asteroid lightcurve database // *Icarus.* 2009. V. 202. P. 134–146.
- Werner B.* A modest success story: 779 Nina brighter than predicted // *Minor Planet Bull.* 1991. V. 18. P. 16.