

УДК 523.44

О ВОЗМОЖНОСТЯХ ОЦЕНКИ СВОЙСТВ ЧАСТИЦ В ЭКЗОСФЕРЕ АКТИВНОГО АСТЕРОИДА ПО ДЕТАЛЯМ В УФ- И ВИДИМОМ ДИАПАЗОНАХ СПЕКТРОВ ОТРАЖЕНИЯ

© 2023 г. Е. В. Петрова^{а, *}, В. В. Бусарев^б

^аИнститут космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва, Россия

^бАстрономический институт им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (ГАИШ МГУ), Москва, Россия

*e-mail: epetrova@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 28.06.2022 г.

После доработки 10.10.2022 г.

Принята к публикации 12.10.2022 г.

В спектрах отражения активных астероидов (АА), измеренных в видимом и ближнем УФ-диапазонах, наблюдаются необычные детали, которые, вероятно, обусловлены рассеянием света в экзосфере, образовавшейся во время активных процессов на астероиде. Для оценки возможностей количественной интерпретации этих деталей рассчитаны спектры отражения АА, окруженного экзосферой, состоящей из агрегатных субмикронных частиц разного состава и морфологии, а также однородных субмикронных частиц. Размеры составляющих агрегаты частиц приняты соответствующими размерам зерен в агломератах кометной и межпланетной пыли. Показано, что рассеяние на агрегатах субмикронных частиц формирует на длинах волн короче 0.6 мкм интерференционные детали, положение которых определяется как размерами этих частиц (но не самих агрегатов), так и действительной частью их показателя преломления. Структура агрегата и вариации (до $\pm 20\%$) размеров составляющих частиц слабо влияют на положение этих деталей. Форма спектра на более длинных волнах также зависит от размеров зерен в агрегатах и может служить дополнительным критерием для оценки этого параметра. Расчеты, выполненные для агрегатных частиц, поглощающих в коротковолновом диапазоне (что характерно для многих веществ, которые можно ожидать обнаружить на АА), показывают, что поглощение существенно ослабляет интерференционные детали, появляющиеся в этом диапазоне. Поэтому попытки обнаружения сильно поглощающих частиц в экзосфере и оценки их свойств по таким деталям в спектре не могут дать надежных результатов, в отличие от моделирования для частиц слабо поглощающих материалов. Присутствие в экзосфере АА однородных субмикронных частиц со слабым поглощением вызывает устойчивый рост интенсивности на длинах волн короче 0.4–0.5 мкм. Спектральные измерения на длинах волн короче 0.35 мкм могут помочь более уверенной оценке свойств слабо поглощающих, как агрегатных, так и однородных частиц в экзосферах АА.

Ключевые слова: астероиды, спектрофотометрия, рассеяние света, агрегатные частицы

DOI: 10.31857/S0320930X23020068, **EDN:** NVVFFB

ВВЕДЕНИЕ

Малые тела Солнечной системы, которые движутся по орбитам, типичным для астероидов, и при этом эпизодически показывают признаки кометной активности, составляют группу так называемых активных астероидов (АА). Хотя такие объекты немногочисленны (обнаружено порядка 30 АА на данный момент), они привлекают особое внимание исследователей, поскольку знание их природы может помочь понять процессы формирования Солнечной системы и доставки воды к планетам земной группы. На основе анализа данных наблюдений предложены такие механизмы, ответственные за появление комы (экзосфе-

ры) и даже пылевых и газовых хвостов у АА, как метеоритная бомбардировка поверхности астероидов, разрушение тела из-за нестабильного вращения, тепловые эффекты, вынос вещества за счет электростатических сил, сублимация летучих при повышении температуры поверхности у перигелия, а также комбинация различных факторов (см., например, Chandler и др., 2018; Hsieh и др., 2018; и ссылки там же).

При этом, независимо от причин кометной активности отдельных астероидов, обнаружить ее у таких тел сложно, поскольку сформировавшаяся экзосфера оптически тонкая и вызываемые ею эффекты невелики. Возможности различных ме-

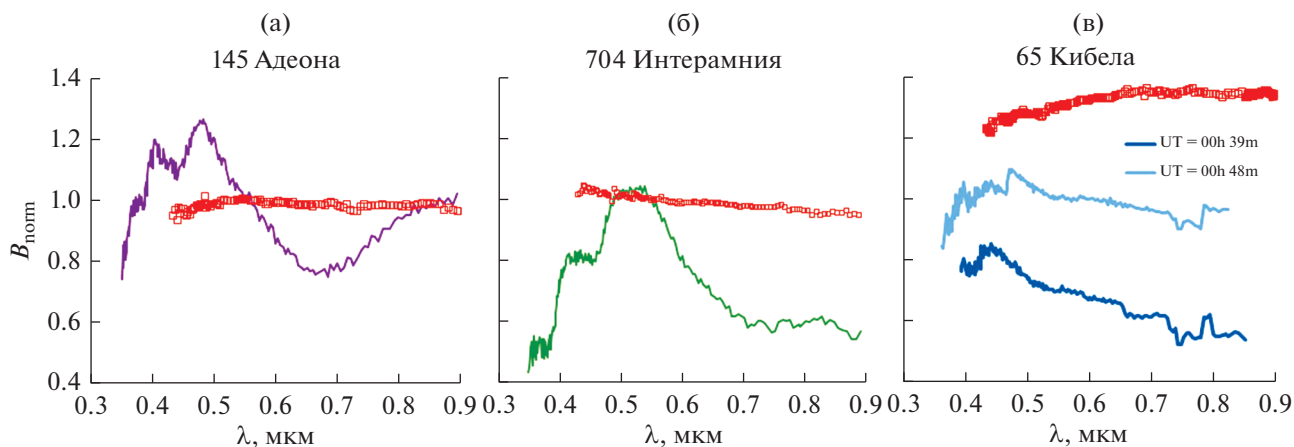


Рис. 1. Спектры отражательной способности $V_{\text{норм}}$, нормированной на длину волны $\lambda = 0.55$ мкм, измеренные у астероидов 145 Адеона и 704 Интерамния в сентябре 2012 г. и астероида 65 Кибела в сентябре 2016 г. (Бусарев и др., 2019; и ссылки там). Спектры SMASSII этих астероидов показаны красным. Спектры на панели (в) сдвинуты по вертикали на 0.3 друг относительно друга.

тодов детектирования слабых кометоподобных объектов, от непосредственной съемки высокого разрешения до фотометрического анализа, спектроскопии газовых составляющих, обнаружения негравитационных возмущений и др., подробно рассмотрены в недавнем обзоре Jewitt и Hsieh (2022). В то же время следует указать еще один метод, спектрофотометрический, который позволяет обнаруживать экзосферу у АА по необычным для астероидов деталям в УФ- и видимом спектрах отражения объекта. С его помощью удалось зарегистрировать признаки сублимационной активности у ряда астероидов Главного пояса при их приближении к перигелию орбиты (Бусарев и др., 2019; Busarev и др., 2018; 2021a и ссылки там).

Примеры необычных спектров астероидов, которые можно рассматривать как свидетельство формирования экзосферы у этих астероидов, показаны на рис. 1. Здесь мы не будем останавливаться на конкретных характеристиках этих астероидов, условиях наблюдений, возможных причинах их активности, которые детально рассмотрены в процитированных выше работах. Отметим лишь, что вид спектров существенно изменяется по сравнению с канонической для этих астероидов формой (Spectrophotometric Small Main belt Asteroid Spectroscopic Survey (SMASS) и SMASSII survey (<http://smass.mit.edu/data/smlass/>)), в них появляются дополнительные детали, значительно изменяется спектральный градиент. В нашей предыдущей статье (Busarev и др., 2021a) с помощью моделирования рассеяния света на частицах сложной структуры мы попытались качественно оценить свойства частиц в экзосфере по изменениям, которые они могут вызвать в спектре АА.

Однако подробный анализ возможностей оценки характеристик частиц в экзосфере АА по

спектральным деталям остался за рамками упомянутой статьи, поэтому здесь мы постараемся заполнить этот пробел. Мы рассмотрим процедуру моделирования спектра отражения астероида, окруженного экзосферой, и проблемы интерпретации спектров отражения АА, измеренных в УФ- и видимом диапазонах. В связи с перспективной наблюдений АА на космической УФ-обсерватории Спектр-УФ мы расширили спектральный диапазон моделирования на более короткие длины волн по сравнению с предыдущей работой. Кроме того, в расчеты включено больше вариантов состава вещества частиц экзосферы, чем раньше. Следует отметить, что, насколько нам известно, до настоящего времени анализ влияния экзосферы на спектр отражения АА проводился только в некоторых работах (Carvano, Lorenz-Martins, 2009; Rondón-Briceño и др., 2017). При этом в модельных расчетах предполагалось, что экзосфера состоит из однородных сферических частиц. Однако, как было показано в работе (Tishkovets, Petrova, 2020), и, как мы увидим далее, спектры интенсивности света, рассеянного частицами сложной структуры, типичными для кометной и межпланетной пыли, могут существенно отличаться от спектров, рассчитанных для однородных сферических частиц таких же размеров.

Особенности формирования спектров интенсивности света, рассеянного агрегатными частицами субмикронных составляющих, в зависимости от их свойств будут рассмотрены на основе расчетов соответствующих моделей рассеяния в следующем разделе. Далее мы покажем, как особенности рассеяния света такими агрегатами и субмикронными однородными частицами могут проявиться в спектрах отражения астероида, окруженного экзосферой, и обсудим, как резуль-

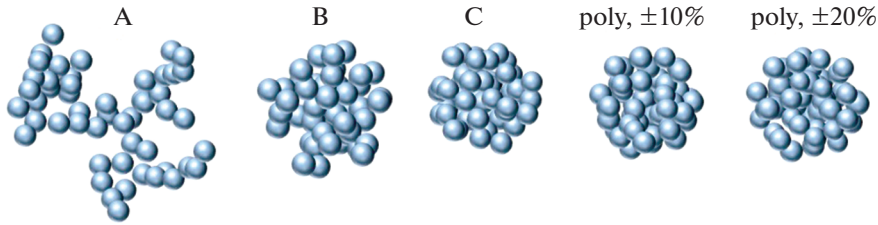


Рис. 2. Агрегатные структуры, для которых проводились расчеты характеристик рассеяния.

таты данного анализа могут быть использованы для объяснения деталей в измеренных спектрах и оценки свойств частиц экзосферы.

СПЕКТРЫ ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕТА, РАССЕЯННОГО ЧАСТИЦАМИ СЛОЖНОЙ СТРУКТУРЫ

Входные параметры модельных расчетов. Морфология

Наше моделирование основано, прежде всего, на том предположении, что частицы пыли в экзосфере имеют сложную агрегатную структуру, по аналогии с теми, что найдены в комках и хвостах комет и в межпланетном пространстве (см., например, Bradley и др., 1988; Bradley, 2003; Kolokolova и др., 2004; Güttler и др., 2019). В частности, как следует из анализа результатов поляриметрии комет, отрицательная ветвь фазовой кривой поляризации, типичная для кометной пыли, формируется именно благодаря тому, что пылевые частицы неоднородны и содержат зерна, размеры которых несколько меньше, или сравнимы с длиной волны видимого света. Параметр размера таких зерен $x \equiv 2\pi r/\lambda$ (где r – радиус составляющих зерен и λ – длина волны) находится в диапазоне 1.0–2.0 (см., например, Petrova и др., 2000; Kimura и др., 2003; Петрова и др., 2004; Lasue и др., 2009; Lumme, Penttilä, 2011; и ссылки там). При таком соотношении между размерами рассеивателей и длиной волны взаимодействие между составляющими агрегат частицами в процессе рассеяния оказывает существенное влияние на интенсивность и поляризацию рассеянного агрегатом света. В результате характеристики рассеяния частиц сложной структуры и однородных частиц таких же размеров и состава могут заметно отличаться, что делает необходимым учет агрегатной структуры рассеивающих частиц в модельных расчетах при интерпретации измерений (см., например, Tishkovets и др., 2004; Dlugach и др., 2011; 2018; Zubko и др., 2015; Liu, Mishchenko, 2018; Kolokolova и др., 2018; и ссылки там).

Необходимо подчеркнуть, что мы проводим данное моделирование спектров на основе характеристик рассеяния частиц, присутствие которых ожидается в экзосфере, но не характеристик са-

мих частиц. Хотя в реальных экзосферах частицы могут быть крупнее или мельче рассматриваемых здесь, положение основных интерференционных деталей, возникающих в спектрах рассеяния неоднородных частиц сложной структуры, как показало недавнее исследование (Tishkovets, Petrova, 2020), зависит главным образом от размеров составляющих частиц (СЧ) в этих агрегатах и показателя преломления, но не от числа СЧ и структуры агрегата (см. ниже). Это позволяет нам ограничиться расчетом характеристик рассеяния относительно небольших ансамблей ($N = 50$ и 100) всего трех фрактальных структур (А, В и С на рис. 2).

Следуя концепции статистически фрактальной структуры агломератов кометной пыли (см., например, Mannel и др., 2016), для модельных расчетов рассеяния на частицах в экзосфере мы формировали фракталоподобные агрегаты (кластеры) одинаковых сферических субмикронных СЧ (мономеров) с помощью процесса диффузно ограниченной агрегации (Mackowski, 1995). В этом случае, если число мономеров N достаточно велико, сформированный кластер может быть описан соотношением

$$N = k_f (R_g/d)^{D_f},$$

где d – диаметр мономера, R_g – радиус гирации кластера, а D_f и k_f – размерность и префактор фрактала.

Чтобы проверить насколько результаты расчетов спектров рассеяния агрегатов зависят от их строения, были выбраны три набора фрактальных параметров, которые охватывают диапазон от плотно упакованных до разреженных структур. Принятые значения – $k_f = 5.8$ и $D_f = 3.0$ (структура А на рис. 2); $k_f = 8.0$ и $D_f = 2.5$ (структура В); и $k_f = 8.0$ и $D_f = 3.0$ (структура С), которым примерно соответствуют значения пористости $p \approx 0.90, 0.68$ и 0.54 (при $N = 50$). Последняя величина определяется с помощью так называемого характерного радиуса $R_c = (5/3)^{1/2} R_g$ (Kosaza и др., 1993). Тогда $p = 1 - N(r/R_c)^3$. Хотя различные конфигурации структур с одними и теми же параметрами показывают несколько различающиеся фазовые профили интенсивности и линейной поляризации

рассеянного света даже при достаточно большом числе составляющих частиц, эти различия гораздо меньше, чем те, которые показывают кластеры с различными фрактальными параметрами (см., например, Kolokolova и др., 2018). Поскольку наши тестовые вычисления для структур с рассматриваемыми размерами СЧ подтвердили этот вывод для спектров рассеянного света, основной объем вычислений был выполнен для одной реализации каждой из структур.

Следуя ограничениям, накладываемым результатами анализа поляриметрии комет на размеры зерен, составляющих агрегаты кометных частиц, а также результатам измерений размеров частиц межпланетной и кометной пыли (см. ссылки выше), мы выбрали для данных модельных расчетов следующие четыре значения радиуса мономеров: $r = 0.08, 0.10, 0.12$ и 0.15 мкм. Несколько моделей были рассчитаны для агрегатов, состоящих из зерен сферической формы различного размера с его случайными отклонениями в интервале ± 10 и $\pm 20\%$ от среднего (см. рис. 2). Они были сконструированы заполнением квазисферического объема сферическими СЧ без пересечений случайным образом. Размер объема был задан так, чтобы по пористости полученная структура была примерно между структурами В и С.

Хотя прямые измерения с борта КА Rosetta обнаружили в коме кометы 67P/Churyumov–Gerasimenko частицы и с более мелкими составляющими (см., например, Güttler и др., 2019), они могут быть ответственны, как мы убедимся далее, за формирование интерференционных деталей в спектрах рассеянного света в дальнем УФ-диапазоне, который не охвачен спектральными измерениями астероидов. Соответственно, проводимый здесь анализ не может исключить присутствия в экзосферах астероидов частиц, состоящих из зерен более мелких размеров, чем рассматриваемые. В то же время, исходя из результатов измерений в коме кометы 67P/Churyumov–Gerasimenko (см., например, Güttler и др., 2019), естественно предположить, что в экзосфере астероидов могут находиться и одиночные однородные субмикронные частицы с размерами, близкими к размерам СЧ в агрегатах. Влияние рассеяния такими частицами на спектр отражения астероида также будет оценено. В этих расчетах мы не будем принимать во внимание их неправильную форму, поскольку характеристики рассеяния несферических и сферических полидисперсных частиц отличаются незначительно, если параметр размера $x < 3-4$ (Mishchenko и др. 1997).

Кроме того, необходимо отметить, что, хотя форма СЧ в агрегатах принята сферической для существенного облегчения расчетов характеристик рассеяния, это упрощение не должно оказывать заметного влияния на результаты в рассмат-

риваемом диапазоне параметров размеров СЧ – в большинстве случаев при $x < 4$. При таком соотношении между размерами рассеивателей и длиной волны взаимодействие внутри агрегата между рассеивателями в неоднородных ближних полях друг друга (Tishkovets и др., 2011) “замывает” детали, характерные для рассеяния отдельными зернами конкретной формы. Это подтверждается хорошим согласием результатов модельных расчетов характеристик рассеяния, выполненных с помощью метода суперпозиции Т-матриц для кластеров сферических мономеров (см., например, Kimura и др., 2003; Петрова и др., 2004; Dlugach и др., 2011; Lumme, Penttilä, 2011; Kolokolova и др., 2018; и ссылки там) и метода дискретно-дипольной аппроксимации (DDA) для кластеров частиц произвольной формы (см., например, Zubko и др., 2015; и ссылки там).

Состав вещества

Еще один параметр, определяющий характеристики рассеяния частиц, – показатель преломления вещества. Было бы логичным включить в модельные расчеты как можно больше веществ, присутствие которых можно ожидать в частицах межпланетной и кометной пыли и для которых доступны данные по спектральному ходу показателя преломления в интересующем нас диапазоне. Первоначально мы рассматривали показатели преломления восьми веществ (рис. 3): льды H_2O и CO_2 (обозначены как “Ice” и “ CO_2 ”; Warren, Brandt (2008) и Warren (1986), соответственно), железомagneзиальные силикаты (оливины; “Oli”; Dorschner и др. (1995)), так называемые астрономические силикаты (их оптические характеристики были получены Draine и Lee (1984) на основе синтеза результатов лабораторных измерений и теоретического моделирования деталей в ИК-спектре для того, чтобы обеспечить согласие с данными ряда астрономических наблюдений) (“Sil”; Li, Greenberg, 1997), аморфный углерод (“AmC”; Rouleau, Martin, 1991), тугоплавкая органика (“OrR”; Li, Greenberg, 1997) и смеси органических веществ, известные как толины Титана (“Th_T”; Ramirez и др., 2002) и Плутона (“Th_P”; Jovanović и др., 2021).

Однако, как видно из рис. 3, часть из них имеет близкие по значению и спектральному поведению показатели преломления в рассматриваемом диапазоне, что дает близкие спектры интенсивности излучения, рассеянного частицами этих материалов. Кроме того, как показал анализ, проведенный ранее с привлечением всего нескольких вариантов вещества (Tishkovets, Petrova, 2020; Busagov и др., 2021a; 2021b), изменение в расчетах значений действительной части показателя преломления при сохранении общего хода его спектральной зависимости приводит просто к сдвигу

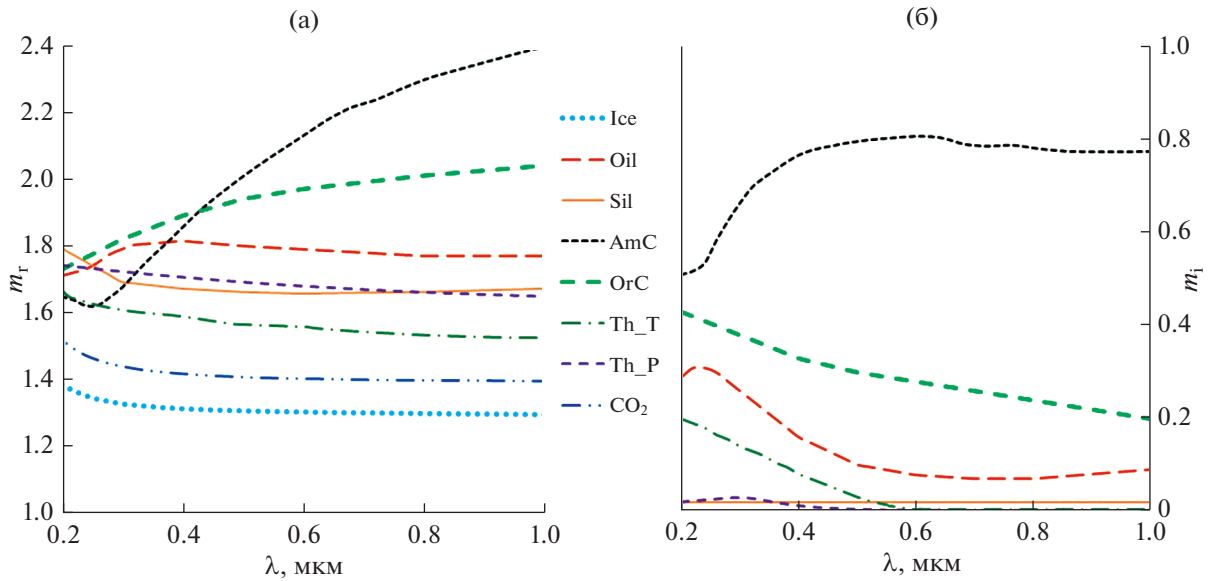


Рис. 3. Спектральные зависимости действительной m_r (а) и мнимой m_i (б) части показателя преломления веществ, рассматриваемых в данном моделировании. Ссылки приведены в тексте.

интерференционной картины в спектре рассеяния как отдельных частиц, так и их агрегатов, и этот сдвиг может быть компенсирован изменением размеров частиц (см. также результаты моделирования ниже). Эта особенность спектров рассеяния позволяет нам ограничиться в расчетах веществами, показатели преломления которых отличаются существенно как значениями, так и спектральной зависимостью. Таким образом, в последующее моделирование были включены показатели преломления льда H_2O , оливинов, астрономических силикатов, аморфного углерода и тугоплавкой органики.

Вычислительные методы

Элементы матрицы однократного рассеяния и сечения рассеяния и экстинкции сгенерированных агрегатных частиц случайной ориентации были вычислены с помощью численно точного метода суперпозиции T-матриц, реализованного в виде компьютерного кода FORTRAN-90 (Maskowski, Mishchenko, 1996; 2011). Этот метод – один из наиболее гибких и эффективных, который широко применяется при решении макроскопических уравнений Максвелла для произвольных ансамблей сферических частиц (https://www.giss.nasa.gov/staff/mmishchenko/t_matrix.html и www.eng.auburn.edu/~dmckowski/scatcodes/).

Расчет характеристик рассеяния монодисперсных и полидисперсных однородных сферических частиц был проведен на основе теории Лоренца–Ми (например, Mishchenko и др., 2002) с помощью компьютерной программы FORTRAN-77,

разработанной Мищенко (<https://www.giss.nasa.gov/staff/mmishchenko/Lorenz-Mie.html>).

Характеристики однократного рассеяния агрегатных частиц

Чтобы понять, какой вклад в спектр отражения астероида может сделать образовавшаяся вокруг него экзосфера, необходимо определить, как ведут себя в зависимости от длины волны фазовая функция (индикатриса) однократного рассеяния частиц экзосферы и их альbedo и эффективность рассеяния. Первые две характеристики непосредственно вводятся в дальнейшую процедуру расчета переноса излучения в экзосфере, а на основании спектральной зависимости эффективности рассеяния частиц можно получить спектральный ход оптической толщины экзосферы для этого расчета.

Напомним, что интенсивность излучения, рассеянного частицей, зависит как от значения фазовой функции F на данном фазовом угле α , так и от сечения рассеяния частицы $C_{sca} = Q_{sca}/(\pi R^2)$, где Q_{sca} – эффективность рассеяния, а R – радиус частицы. Спектральная зависимость Q_{sca} определяется размерным параметром частиц x , с ростом которого Q_{sca} плавно растет до максимума, положение которого зависит также от показателя преломления $m = m_r + im_i$. Далее, с ростом размерного параметра Q_{sca} убывает до значения 2. Анализ $Q_{sca}(\lambda)$ для однородных частиц подробно представлен в литературе (см., например, Hansen, Travis, 1994; Mishchenko и др., 2002). Что касается эффективности Q_{sca} и альbedo однократного рас-

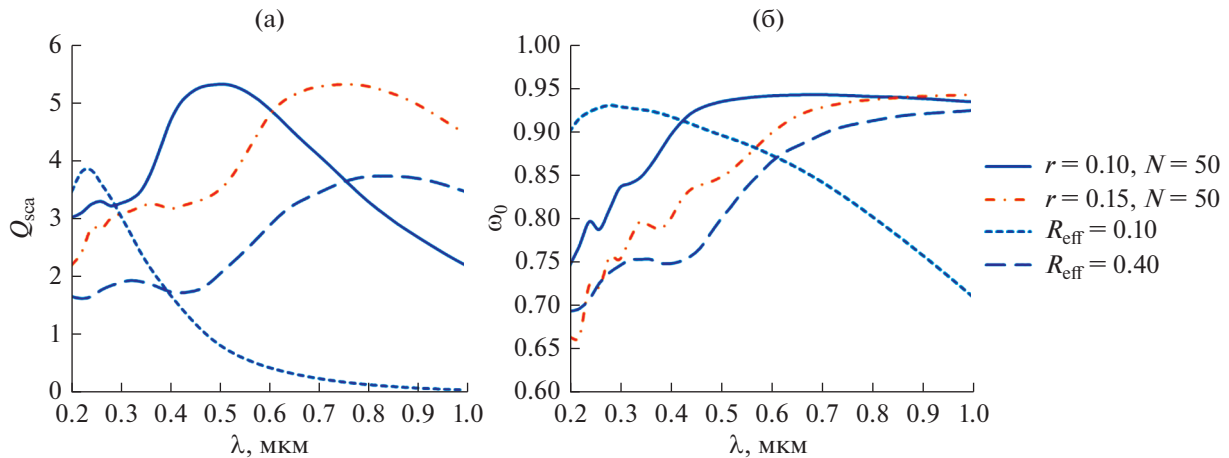


Рис. 4. Спектральные зависимости эффективности Q_{sca} (а) и альbedo однократного рассеяния ω_0 (б) агрегатных частиц (астрономические силикаты, число мономеров $N = 50$, их радиус $r = 0.10$ и 0.15 мкм) и однородных сферических частиц при эффективном радиусе $R_{eff} = 0.10$ и 0.40 мкм (эффективная вариация распределения частиц по размерам $V_{eff} = 0.02$). Значение $R_{eff} = 0.40$ мкм выбрано близким к радиусу сферы, эквивалентной по массе агрегату, состоящему из мономеров с радиусом $r = 0.10$ мкм. Здесь и далее размеры частиц на рисунках приведены в микронах.

сеяния ω_0 частиц сложной структуры, их спектральная зависимость оказалась в целом сходной со спектральной зависимостью Q_{sca} и ω_0 однородных частиц примерно той же массы (см. рис. 4, кривые для частиц эффективного радиуса $R_{eff} = 0.4$ мкм), только сдвинута в область коротких длин волн.

В то же время спектры значений $F(\alpha)$ для агрегатов и однородных частиц имеют как сходные, так отличительные детали (Tishkovets, Petrova, 2020). Поскольку для интерпретации результатов наземных наблюдений важна интенсивность излучения, рассеянного в обратную полусферу, мы покажем здесь примеры спектров только для значений F на угле фазы $\alpha = 0^\circ$. Для рассматриваемых здесь частиц они дают хорошее представление о спектрах значений $F(\alpha)$ в довольно широком диапазоне фазовых углов, так как у данных частиц фазовые кривые $F(\alpha)$ в области обратного рассеяния не имеют резких деталей.

На рис. 5а показаны спектры $F(\alpha = 0^\circ)$, рассчитанные для агрегатных частиц астрономических силикатов, состоящих из 50 мономеров радиусом $r = 0.10$ и 0.15 мкм (тип агрегатов С (см. рис. 2)), и одиночных сферических частиц того же вещества радиусом $R_1 = 0.10$ и 0.15 мкм. Очевидно, что положения максимумов и минимумов в коротковолновой части спектра одиночных частиц и агрегатов, состоящих из таких же частиц, совпадают. В то же время на более длинных волнах в спектре агрегатов появляются дополнительные детали. Tishkovets и Petrova (2020) показали, что экстремумы в коротковолновой части спектров фазовой функции агрегатов субмикронных составляющих обусловлены интерференцией электромагнитных волн, рассеянных на отдельных частицах в составе агрегата, в то время как интер-

ференция волн, рассеянных группами СЧ, ответственна за детали на более длинных волнах.

При невысоких значениях показателя преломления положение этих экстремумов в спектрах для одиночных частиц можно оценить, исходя из приближения геометрической оптики (в данном случае оно дает разумную оценку, хотя для малых по сравнению с длиной волны частиц, оно в целом не может быть корректным). Если предположить, что экстремумы являются результатом интерференции волн, одна из которых отражается от внешней поверхности частицы, а другая проходит дважды через частицу и возвращается обратно, то разность фаз этих волн $\delta = 4 \times R_1 \times m_r$. В этом случае положение интерференционных минимумов в спектре излучения, рассеянного одиночной частицей, можно определить как $\lambda_n = \delta / (n + 0.5)$, где n — целое. Как видно из рис. 5б, для ледяных частиц значения λ_n , рассчитанные для кластеров с мономерами разных радиусов, хорошо согласуются с положением деталей в спектрах $F(\alpha = 0^\circ)$. При более высоких значениях m_r согласие с формулой для λ_n становится хуже, а при значительном поглощении такой подход дает некорректные оценки (см. ниже).

Спектры $F(\alpha = 0^\circ)$ на рис. 5 подтверждают, что положение первого интерференционного минимума, обусловленного рассеянием на отдельных мономерах в агрегате, сдвигается в коротковолновой области при уменьшении размеров мономеров и/или уменьшении действительной части показателя преломления частиц. Сразу за этим первым минимумом (для ледяных агрегатов на $\lambda_1 \approx 0.35$ и 0.5 мкм при $r = 0.10$ и 0.15 мкм, соответственно) формируется так называемый “коллек-

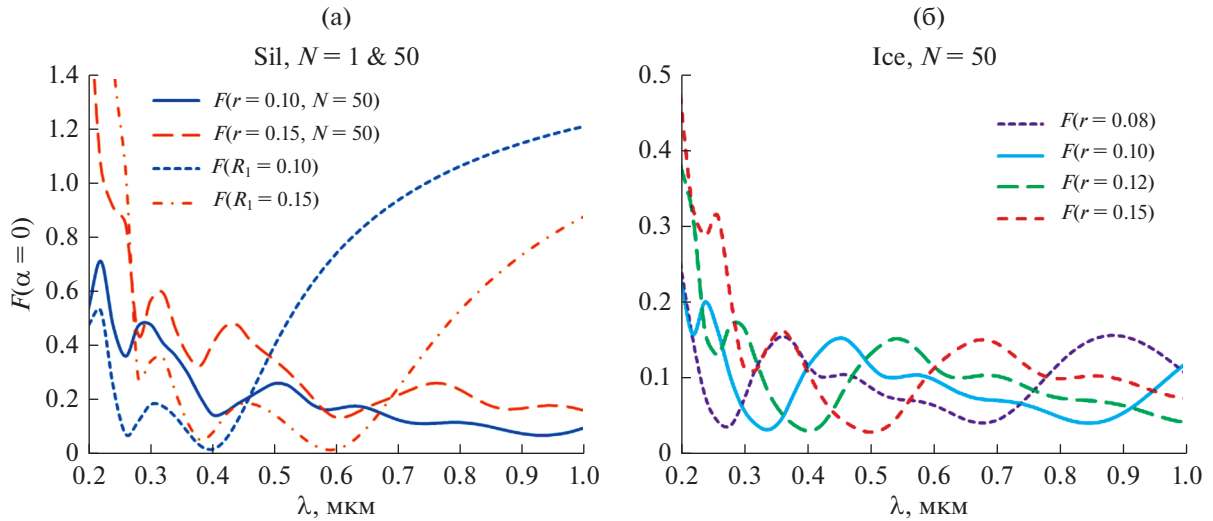


Рис. 5. Спектральные зависимости $F(\alpha = 0^\circ)$ для агрегатных (с мономерами указанных радиусов r) и одиночных частиц (указанных радиусов R_1) астрономических силикатов (а) и ледяных агрегатных частиц с мономерами разных размеров (б). Агрегаты типа С содержат 50 мономеров.

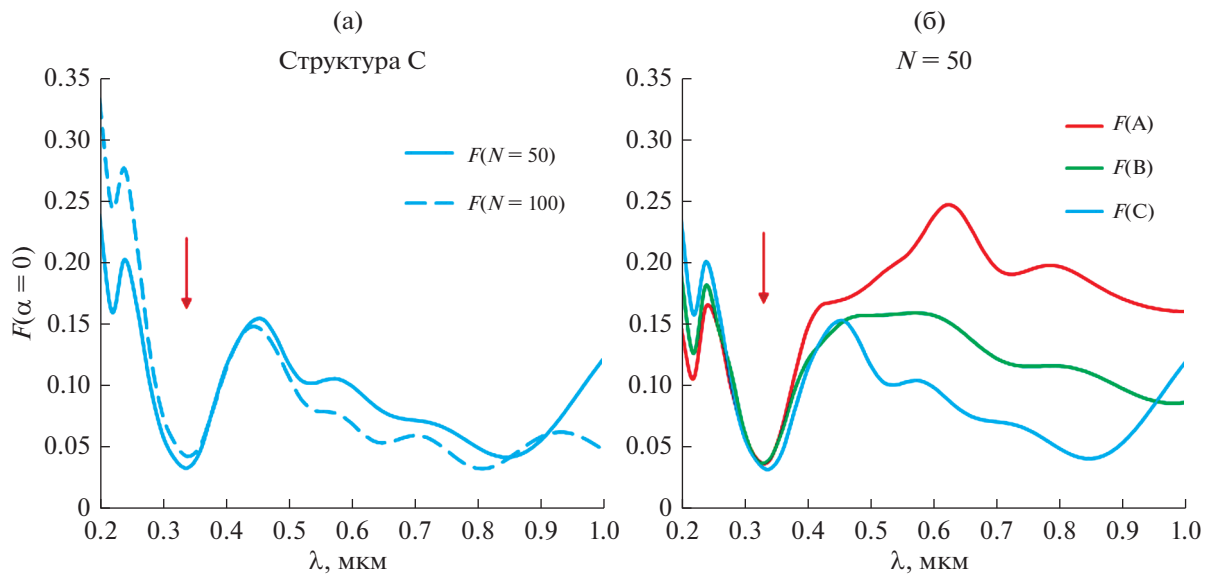


Рис. 6. Спектральные зависимости $F(\alpha = 0^\circ)$ для агрегатных ледяных частиц с мономерами радиусом 0.1 мкм. (а) – Модели для разного числа мономеров в агрегатах структуры С. (б) – Модели для агрегатов разных структур (А, В и С) при числе мономеров $N = 50$. Положения первого минимума (λ_1), сформированного интерференцией при рассеянии на отдельных СЧ, отмечены стрелками на этом и следующем рисунке.

тивный” максимум. Расчеты показывают, что при достаточно большом числе мономеров в агрегате положение этого максимума становится независимым от числа мономеров и структуры агрегата (рис. 6) и слабо смещается, если СЧ имеют разные размеры в пределах $\pm 20\%$ от среднего (рис. 7). При этом последующие коротковолновые минимумы, сформированные интерференцией на отдельных СЧ, значительно сильнее

сглаживаются их полидисперсностью, чем первый минимум.

Таким образом, очевидно, что положение в спектре первого интерференционного минимума λ_1 (отмечено стрелками на рис. 6 и 7), обусловленного рассеянием на отдельных СЧ в агрегате, может служить для оценки их размеров (но не самих агрегатов) и действительной части их показателя преломления. В то же время следует пом-

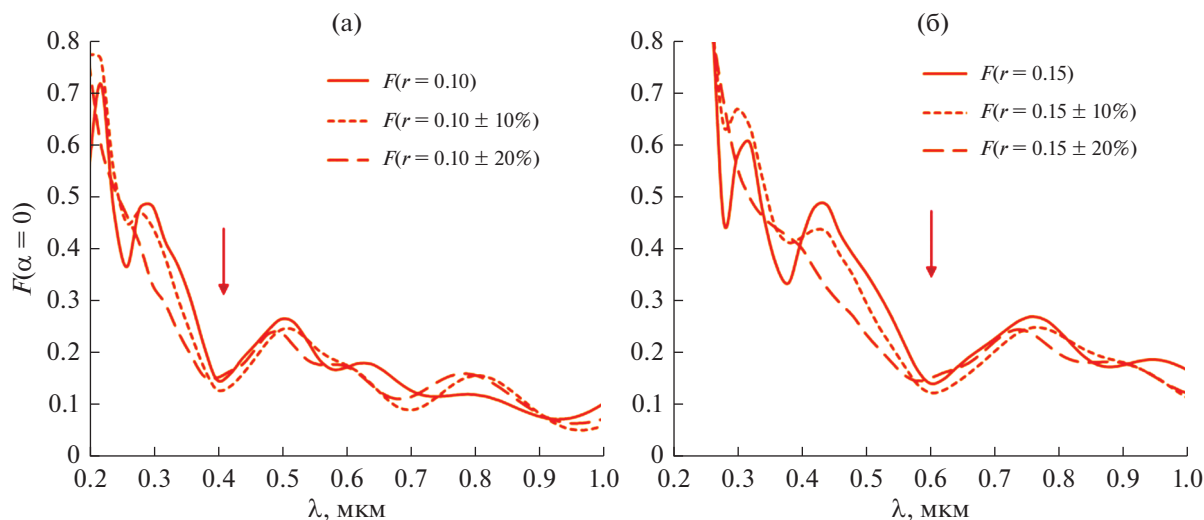


Рис. 7. Спектральные зависимости $F(\alpha = 0^\circ)$ для агрегатных частиц астрономических силикатов с СЧ радиусом 0.10 мкм (а) и 0.15 мкм (б) и вариациями размеров $\pm 10\%$ и $\pm 20\%$ от среднего.

нить, что оценки этих двух параметров, r и m_r , взаимосвязаны, и для более определенных выводов о природе рассеивающих частиц следует привлекать и другие данные. Кроме того, для объяснения интерференционной картины в спектрах агрегатов на рис. 4–7 показаны примеры для тех веществ, у которых мнимая часть показателя преломления практически равна нулю или невелика и постоянна в рассматриваемом диапазоне. Однако у отдельных веществ, которые могут входить в состав частиц экзосферы АА, рост поглощения вдоль спектра (см. рис. 3б) может “смазать” интерференционную картину и осложнить оценку размеров СЧ и их действительной части показателя преломления.

Определение пары r – m_r по положению λ_1 в спектре осложняется также тем, что при высоких значениях m_r и m_i зависимость λ_1 от m_r становится существенно нелинейной, и это вносит дополнительную неоднозначность в оценку этих параметров. Рис. 8а показывает, что при увеличении радиуса R_1 одиночных сферических частиц положение λ_1 постепенно сдвигается в длинноволновую область, но, как видно из рис. 8б, увеличение показателя преломления не всегда приводит к росту λ_1 . В результате, например, положение λ_1 на 0.4 мкм дает оценку $R_1 = 0.12$ мкм для частиц не только льда, но и тугоплавкой органики. Эта особенность формирования спектров $F(\alpha)$ сохраняется и для агрегатных частиц (см. пример на рис. 8в).

Что касается спектральных деталей на длинах волн правее коллективного интерференционного максимума, они формируются рассеянием на группах частиц, составляющих агрегат (Tishkovets, Petrova, 2020). Соответственно, в данном моделировании при относительно небольшом

числе СЧ картина этих деталей может зависеть и от структуры агрегатов, и от числа СЧ (см. рис. 6), но с ростом агрегатов она должна становиться более стабильной.

МОДЕЛЬНЫЕ СПЕКТРЫ ОТРАЖЕНИЯ АСТЕРОИДОВ, ОКРУЖЕННЫХ ЭКЗОСФЕРОЙ

Входные параметры

Кроме характеристик частиц в экзосфере (см. выше), для вычисления спектра интенсивности света, рассеянного экзосферой с подстилающей поверхностью, необходимо задать ее оптическую толщину τ и альбедо поверхности A_s на каждой из длин волн. Поскольку оценок оптической толщины экзосфер АА пока не существует, в выборе значений мы опирались на данные о числе частиц на луче зрения в кометных комах и соответствующие оценки оптической толщины. Например, для джетов кометы 103P/Hartley 2 (Protora и др. (2014) приводят значения τ около 0.1 при допущении, что размеры пылевых и ледяных частиц в джетах того же порядка, что и рассматриваемые здесь. Однако частицы в реальных джетах могут быть и крупнее, что должно увеличить оценку оптической толщины. В данном моделировании мы принимали значения $\tau = 0.5$ или 0.1 на длине волн 0.55 мкм. Значения оптической толщины вдоль спектра вычислялись, исходя из изменения сечения рассеяния модельных частиц с длиной волны.

Что касается вклада газовой составляющей в оптическую толщину кометной комы то, согласно оценкам Bockelée–Morvan и др. (2016) для кометы 67P/Churyumov–Gerasimenko у перигелия,

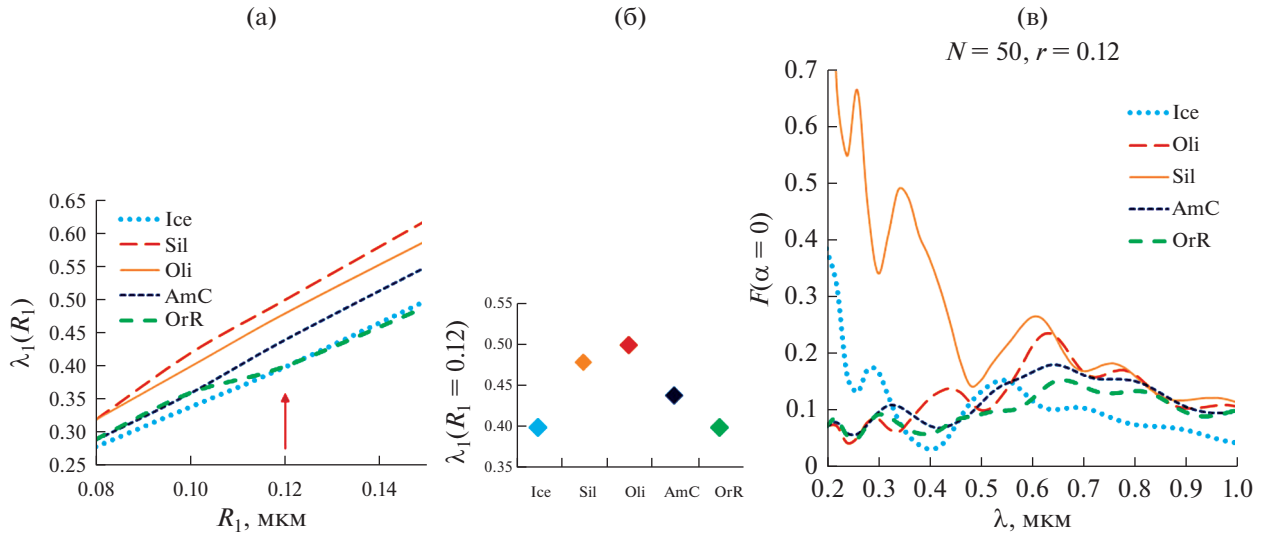


Рис. 8. (а) – Положение первого интерференционного минимума λ_1 в спектре для одиночных сферических частиц разного состава в зависимости от радиуса этих частиц R_1 . (б) – Положение λ_1 в спектре в зависимости от состава частиц при их радиусе $R_1 = 0.12$ мкм (отмечено стрелкой на панели (а)). (в) – Спектральные зависимости $F(\alpha = 0^\circ)$ для агрегатных частиц разного состава при радиусе мономеров $r = 0.12$ мкм (структура С).

он очень мал. Наши предыдущие модельные расчеты также показали, что влияние газа на спектры отражения астероидов с экзосферой невелико и может проявлять себя небольшим плавным увеличением яркости в коротковолновом диапазоне (Busarev и др., 2021a).

В выборе значений альбедо поверхности мы опирались на данные для низкоальбедных астероидов Главного пояса, у некоторых из которых ранее была обнаружена активность (см., например, Бусарев и др., 2019; Busarev и др., 2018; 2021a и ссылки там). Так, для данного моделирования мы приняли $A_s = 0.072$ на $\lambda = 0.55$ мкм, что является средним значением геометрических альбедо относительно крупных астероидов (24) Фемиды и (704) Интарамния (0.067 и 0.078, соответственно (<http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi#top>)). Спектральная зависимость A_s , принятая для $\lambda > 0.35$ мкм, следует канонической зависимости для астероида С-типа (145) Адеона из базы данных SMASSII (<http://smass.mit.edu/data/smass/smass2/a000145.2.txt>; данные получены примерно за шесть месяцев до прохождения астероидом перигелийного расстояния, когда он был, вероятно, в “неактивном” состоянии), в то время как предполагаемый для низкоальбедных астероидов спад A_s в коротковолновом диапазоне, где данные SMASSII отсутствуют, был задан на основе результатов исследований Hendrix и Vilas (2019). Спектр поверхности, принятый в данном моделировании, показан дополнительной кривой (S_model) на рис. 9а.

Для расчетов интенсивности света, рассеянно-го оптически тонкой средой с подстилающей поверхностью, надо задать закон отражения этой

поверхности. В нашем случае, при анализе интегральных наблюдений, проводимых вне оппозиции на фазовых углах, существенно больших нуля, можно не учитывать оппозиционный эффект (значительное увеличение яркости при уменьшении фазового угла) и принять, что поверхность астероида рассеивает свет изотропно, что делает процедуру вычислений гораздо проще и быстрее.

Метод вычислений

Описанные выше характеристики однократного рассеяния частиц в экзосфере, а также ее оптическая толщина и характеристики отражения поверхностью служат входными параметрами для процедуры расчета переноса излучения в системе экзосфера плюс поверхность. Наши расчеты основаны на методе инвариантного погружения, применение которого подробно описано Mishchenko и Travis (1997), а необходимые компьютерные коды можно найти на сайте <https://www.giss.nasa.gov/staff/mmishchenko/brf/>. Поскольку этот метод работает для системы плоскопараллельных рассеивающих слоев, мы вычисляли интенсивность рассеянного света для небольших областей (порядка $3^\circ \times 3^\circ$ по долготы и широты) окруженного экзосферой астероида, форма которого принята шарообразной. В данных областях рассеивающая среда предполагалась состоящей из плоскопараллельных слоев, а полученные значения интенсивности были затем проинтегрированы по сфере с учетом фазового угла наблюдений.

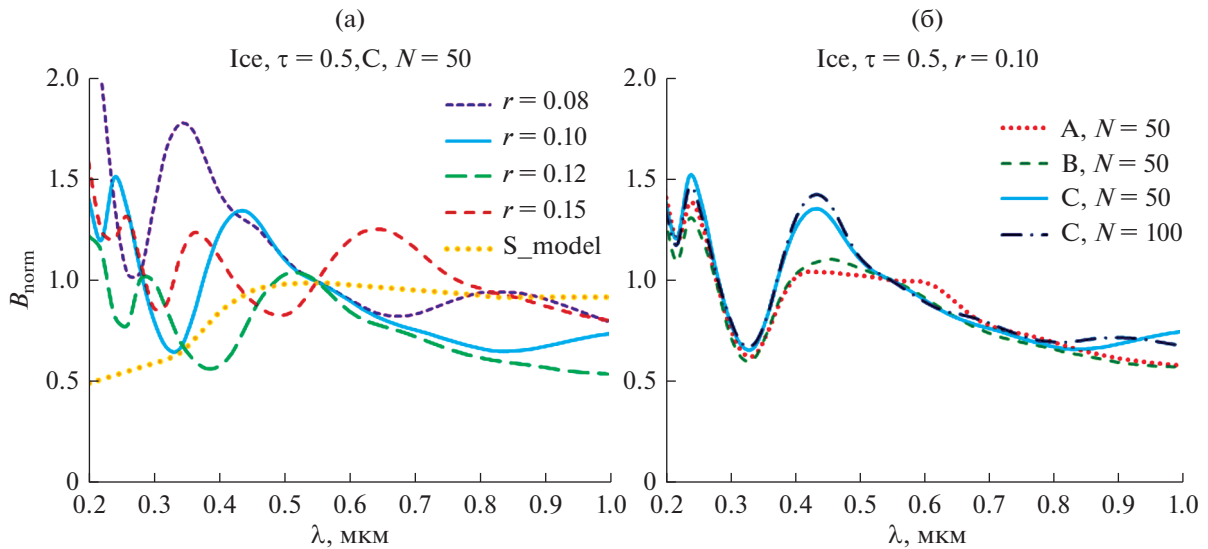


Рис. 9. Спектры B_{norm} для экзосферы оптической толщины $\tau = 0.5$ над поверхностью с альбедо $A_s(\lambda = 0.55 \text{ мкм}) = 0.072$ и его нормированной спектральной зависимостью, показанной кривой S_{model} . Экзосфера состоит из ледяных агрегатов структуры С, содержащих 50 мономеров указанных радиусов r (а), и разных структур при $r = 0.10 \text{ мкм}$ и $N = 50$ и 100 (б).

Результаты моделирования

На рис. 9–12 приведены примеры модельных спектров отражения $B_{\text{norm}}(\lambda)$ условного низкоальбедного астероида С-типа, окруженного пылевой экзосферой. Они рассчитаны для различных параметров агрегатных и однородных субмикронных частиц в экзосфере над поверхностью и нормированы на значение на $\lambda = 0.55 \text{ мкм}$. В отличие от спектров значений фазовой функции $F(\alpha)$ (рис. 5–8), в спектрах $B_{\text{norm}}(\lambda)$ учтены как рассеяние света в экзосфере, так и отражение света от поверхности астероида. Принятые величины оптической толщины экзосферы τ , размеров мономеров в агрегатах r и отдельных частиц R (в микронах), обозначения веществ и структур, а также число СЧ в агрегатах N указаны на графиках. Расчеты выполнены для фазового угла $\alpha = 20^\circ$. Следует отметить, что изменение фазового угла в пределах $\pm 15^\circ$ слабо влияет на форму модельного спектра, так как фазовые функции рассматриваемых агрегатов и субмикронных однородных сферических частиц в области обратного рассеяния не имеют резких деталей, а отражение поверхностью принято изотропным.

Сравнение спектров отражения B_{norm} на этих рисунках со спектрами $F(\alpha = 0^\circ)$ на рис. 5–8 показывает, что в целом поведение $B_{\text{norm}}(\lambda)$ следует спектральным кривым для значений фазовой функции однонаправленного рассеяния. Исключение составляет коротковолновая часть спектра, где существенное уменьшение альбедо поверхности ослабляет сильные интерференционные детали, сформированные рассеянием на частицах экзо-

сферы. Например, положения интерференционных максимумов и минимумов в спектре B_{norm} для экзосферы из агрегатов ледяных зерен (рис. 9а) и в спектре $F(\alpha = 0^\circ)$ для этих же частиц (рис. 5б) совпадают, и вся интерференционная картина сдвигается в длинноволновую область при увеличении размеров СЧ в агрегатах. На рис. 9б видно, что положение λ_1 у кривой $B_{\text{norm}}(\lambda)$ для экзосферы, содержащей ледяные агрегаты при $r = 0.10 \text{ мкм}$ (на $\lambda_1 \approx 0.33 \text{ мкм}$), практически не зависит от структуры агрегатов и числа их СЧ (по крайней мере при $N > 50$), так же, как и в спектре $F(\alpha = 0^\circ)$ для этих же частиц (рис. 6).

Спектры B_{norm} для агрегатных частиц разного состава показаны на рис. 10 и 11 (при оптической толщине экзосферы $\tau = 0.5$ и 0.1 соответственно). В этих примерах принятые значения радиусов мономеров составляют $r = 0.10$ и 0.15 мкм (на панелях (а) и (б), соответственно). Как и следовало ожидать, спектральные детали, обусловленные рассеянием в экзосфере, гораздо сильнее выражены при $\tau = 0.5$, чем при $\tau = 0.1$. На этих спектрах хорошо видно, что у астрономических силикатов, у которых m_r выше, чем у льда, первый интерференционный минимум сдвинут относительно этого минимума у ледяных частиц в длинноволновую область: $\lambda_1 \approx 0.4 \text{ мкм}$ против $\sim 0.33 \text{ мкм}$ при $r = 0.10 \text{ мкм}$ и $\lambda_1 \approx 0.6 \text{ мкм}$ против $\sim 0.5 \text{ мкм}$ при $r = 0.15 \text{ мкм}$.

В то же время для тех веществ, у которых в коротковолновой части диапазона растет поглощение, интерференционная картина нечеткая на длинах волн короче $\sim 0.5 \text{ мкм}$ даже при $\tau = 0.5$. Это

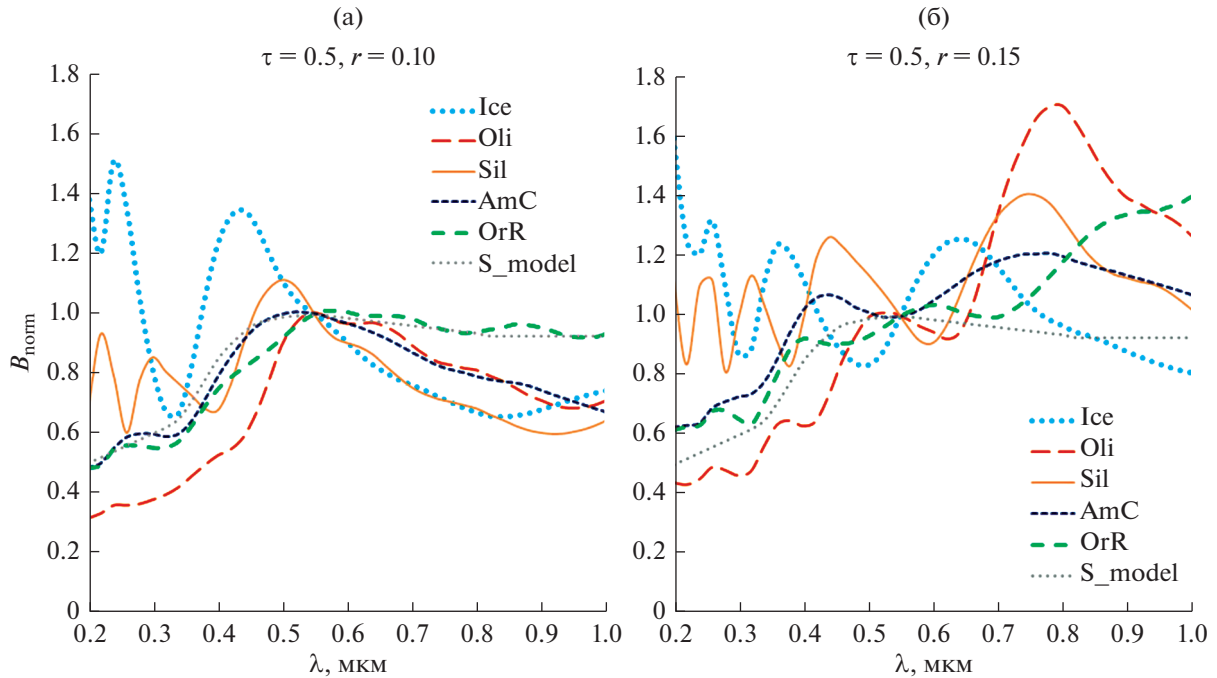


Рис. 10. Спектры B_{norm} для экзосферы оптической толщины $\tau = 0.5$, состоящей из агрегатных частиц разного состава. Структуры типа С содержат 50 мономеров радиусом 0.10 мкм (а) и 0.15 мкм (б).

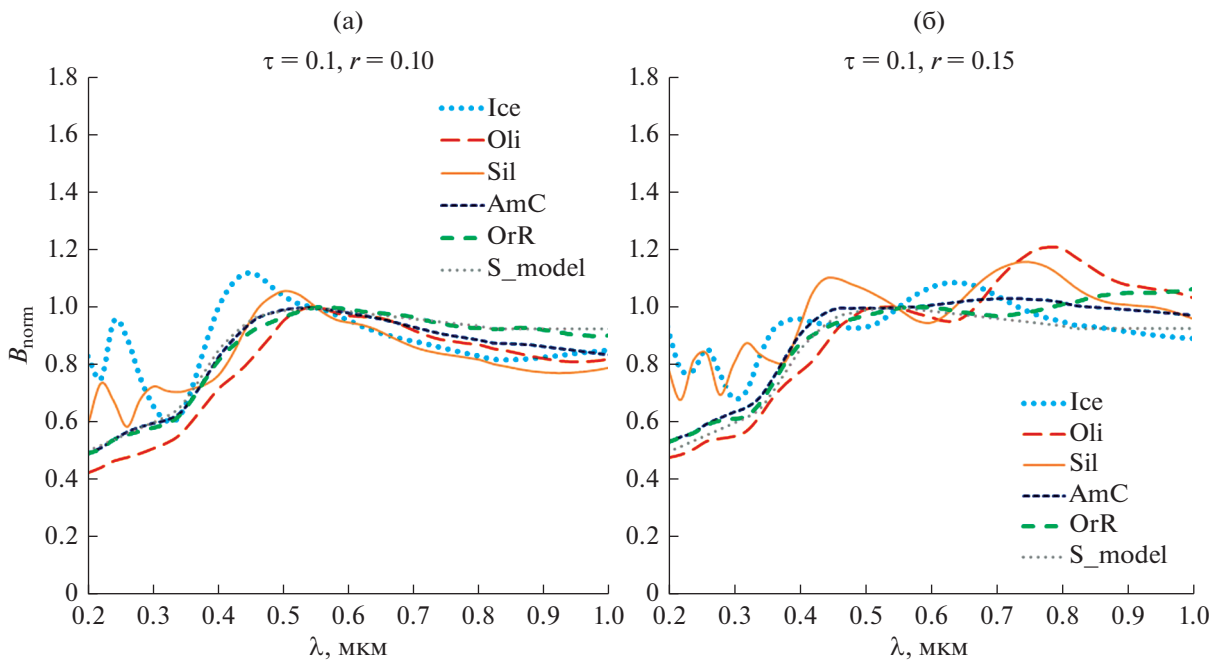


Рис. 11. То же, что на рис. 10, но для $\tau = 0.1$.

оливин, тугоплавкая органика и аморфный углерод; у последнего m_i хотя и уменьшается, но остается в целом высоким. У непоглощающего излучение льда и слабо поглощающих астрономиче-

ских силикатов интерференционные детали хорошо заметны в УФ-диапазоне даже при $\tau = 0.1$.

Также обращает на себя внимание существенное понижение спектра B_{norm} на $\lambda > 0.6$ мкм у

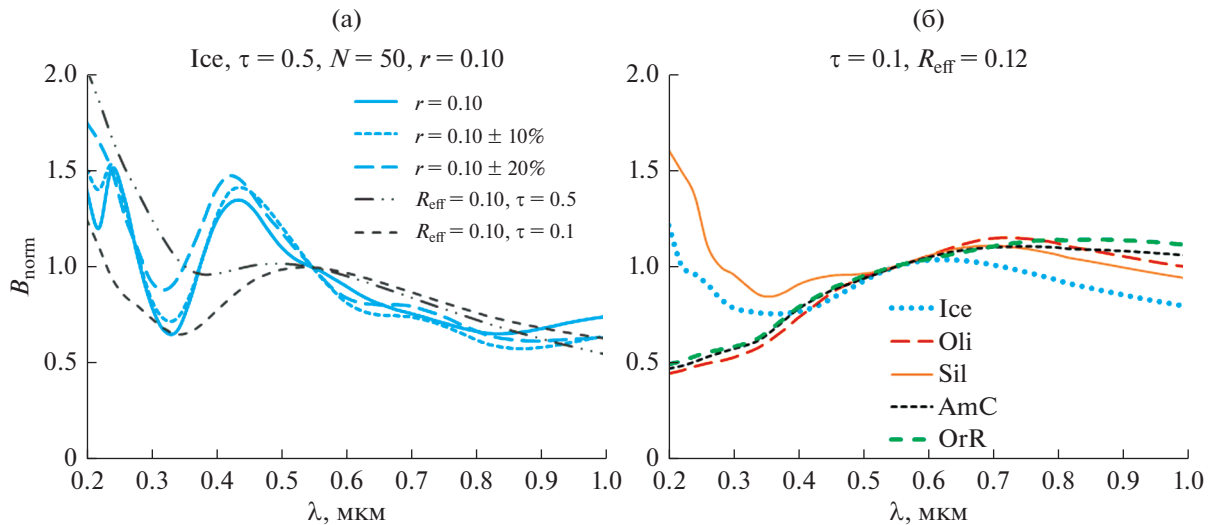


Рис. 12. (а) – Спектры B_{norm} для экзосферы, состоящей из ледяных агрегатов, радиус СЧ которых $r = 0.10$ мкм или варьирует в указанных пределах (при $\tau = 0.5$), или из однородных частиц при указанных размерах R_{eff} и τ . (б) – Экзосфера с оптической толщиной $\tau = 0.1$ состоит из однородных частиц разного состава ($R_{\text{eff}} = 0.12$ мкм).

большинства моделей для агрегатов с более мелкими СЧ (рис. 10а), тогда как модельные спектры для более крупных СЧ в целом показывают в этом диапазоне значения на высоком уровне (рис. 10б). Сравнение модельных профилей на рис. 10 со спектрами, измеренными у АА Адеона и Интерамния в 2012 г. (рис. 1а и 1б), дает возможность предположить, что частицы в экзосферах, образовавшихся у этих АА, были, скорее всего, слабо поглощающими и состояли из зерен радиусом порядка 0.1 мкм или менее. Об этом говорят не только упомянутый минимум в спектре, но и два последовательных (примерно на 0.4 и 0.5 мкм) максимума в спектре АА Адеона или “ступеньки” в спектре АА Интерамния. Поскольку расстояние между этими деталями в измеренных спектрах существенно меньше, чем расстояние между интерференционными максимумами в модельных спектрах агрегатов для какого-либо отдельного вещества, можно предположить, что эти детали в измеренных спектрах были сформированы рассеянием на частицах разного состава, например льда и силикатов. Подобная модель была предложена нами ранее для объяснения деталей такого рода в спектрах АА (Busarev и др., 2021а), и последнее моделирование подтверждает такую возможность.

Влияние полидисперсности СЧ агрегатов на формирование интерференционных деталей в спектре B_{norm} экзосферы аналогично тому, что можно было наблюдать в спектрах $F(\alpha = 0^\circ)$ (см. рис. 7). На рис. 12а видно, что разброс в значениях размеров составляющих агрегат частиц до $\pm 10\%$ от среднего слабо влияет на форму спектра B_{norm} . При увеличении вариаций размеров СЧ до $\pm 20\%$

первый интерференционный минимум и коллективный максимум (на ~ 0.33 и ~ 0.43 мкм, соответственно, при радиусе ледяных СЧ $r = 0.10$ мкм) немного смещаются в коротковолновую область.

На той же диаграмме показан спектр B_{norm} экзосферы, состоящей из отдельных ледяных частиц, близких по размерам к составляющим в агрегатах: их эффективный радиус $R_{\text{eff}} = 0.10$ мкм при эффективной вариации $v_{\text{eff}} = 0.02$ степенного распределения по размерам. Рассеяние на таких частицах в экзосфере ожидаемо дает рост яркости АА с уменьшением длины волны; и этот рост тем больше, чем больше оптическая толщина слоя. На рис. 12б показаны аналогичные модели спектров для разного состава вещества полидисперсных однородных субмикронных частиц ($R_{\text{eff}} = 0.12$ мкм и $v_{\text{eff}} = 0.02$) в экзосфере оптической толщины $\tau = 0.1$. Очевидно, что присутствие частиц непоглощающего льда или слабо поглощающих астрономических силикатов существенно поднимает коротковолновую часть спектра B_{norm} , тогда как присутствие поглощающих излучение субмикронных частиц практически никак себя не обнаруживает в данном диапазоне спектра.

Сравнение моделей на рис. 10–12 со спектрами, измеренными у АА Кибела в 2016 г. (рис. 1в), показывает, что положительный градиент спектра АА может измениться на отрицательный благодаря рассеянию излучения на субмикронных частицах экзосферы. Более того, можно предположить, что максимум в спектре АА Кибела на $\lambda \approx 0.45$ мкм образован, скорее всего, рассеянием на ледяных агрегатах, состоящих из частиц радиусом порядка 0.10 мкм. Хотя близкий максимум можно найти и в спектре для агрегатов астроно-

мических силикатов при $r = 0.15$ мкм, модели для таких частиц не показывают понижения на $\lambda > 0.6$ мкм, который можно видеть на измеренных спектрах АА Кибела.

Поскольку спектральные детали, формирующиеся в результате рассеяния на агрегатных частицах в экзосфере, усиливаются с ростом оптической толщины рассеивающего слоя, по выраженности деталей в измеренных спектрах можно попытаться оценить количество (массу) вещества частиц, образующих экзосферу. Однако при этом следует принимать во внимание и вклад субмикронных однородных частиц в увеличение яркости на коротких длинах волн. Решение этой задачи по результатам наблюдений конкретных астероидов будет предметом нашей дальнейшей работы.

ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Результаты расчетов спектров интенсивности света, рассеянного как однородными, так и агрегатными субмикронными частицами экзосферы АА, дают возможность проследить следующие тенденции в изменениях этих спектров при изменении состава и размеров составляющих агрегаты частиц, которые могут помочь в интерпретации измеренных спектров отражения АА.

Рассеяние на агрегатах субмикронных частиц формирует на длинах волн $\lambda < 0.6$ мкм (в рассматриваемом диапазоне параметров СЧ) интерференционные детали, положение которых определяется размерами этих частиц (но не самих агрегатов) и действительной частью их показателя преломления. Однако, поскольку оценки этих параметров по положению интерференционных деталей взаимосвязаны, для окончательных выводов следует принимать во внимание и форму измеренного спектра на $\lambda > 0.6$ мкм, которая также зависит от свойств СЧ.

Спектры, рассчитанные для экзосферы, содержащей агрегаты частиц, поглощающих излучение в коротковолновом диапазоне (что характерно для многих веществ, которые можно ожидать обнаружить на АА), показывают, что поглощение существенно ослабляет интерференционные детали, появляющиеся в этом диапазоне. Поэтому попытки обнаружения сильно поглощающих частиц в экзосфере и, тем более, оценки их свойств по таким деталям в спектре не могут дать надежные результаты. В то же время для частиц слабо поглощающих материалов эта задача может быть решена по крайней мере на качественном уровне. Спектральные измерения на длинах волн короче 0.35 мкм могут помочь более уверенной оценке свойств таких частиц в экзосфере АА.

Что касается влияния на спектр экзосферы АА однородных частиц, существенно меньших дли-

ны волны, рассеяние излучения на таких частицах, как и следовало ожидать, проявляет себя устойчивым ростом интенсивности на длинах волн $\lambda < 0.4-0.5$ мкм при условии низких поглощательных свойств их вещества. Соответственно, присутствие таких частиц в экзосферах АА можно будет обнаружить более-менее надежно только при измерениях в УФ-диапазоне.

Следует также отметить, что для более надежной интерпретации спектра конкретного АА в расчетах предпочтительнее опираться на спектр его поверхности, измеренный вне периода активности, а не на некий усредненный спектр, поскольку при оптически тонкой экзосфере спектральные свойства поверхности оказывают значительное влияние на результирующий спектр АА.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 22-12-00115. Вычисления характеристик рассеяния агрегатных частиц выполнены при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ 075-15-2020-780 (N13.1902.21.0039).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бусарев В.В., Щербина М.П., Барabanов С.И., Ирсамбетова Т.Р., Кохинова Г.И., Хамроев У.Х., Хамитов И.М., Бикмаев И.Ф., Гумеров Р.И., Иртуганов Э.Н., Мельников С.С. 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 // *Астрон. вестн.* 2019. Т. 53. С. 273–290. <https://doi.org/10.1134/S0038094619040014>. (Busarev V.V., Shcherbina M.P., Barabanov S.I., Irsambetova T.R., Kokhirova G.I., Khamroev U.Kh., Khamitov I.M., Bikmaev I.F., Gumerov R.I., Irtuganov E.N., Mel'nikov S.S. Confirmation of the sublimation activity of the primitive Main-Belt asteroids 779 Nina, 704 Interamnia, and 145 Adeona, as well as its probable spectral signs on 51 Nemausa and 65 Cybele // *Sol. Syst. Res.* 2019. V. 53. P. 261–277. <https://doi.org/10.1134/S0038094619040014>.)
- Петрова Е.В., Тишковец В.П., Йокерс К. Поляризация света, рассеянного телами Солнечной системы, и агрегатная модель пылевых частиц // *Астрон. вестн.* 2004. Т. 38. С. 354–371. https://www.elibrary.ru/title_about_new.asp?id=7665. (Petrova E.V., Tishkovets V.P., Jockers K. Polarization of light scattered by Solar System bodies and the aggregate model of dust particles // *Sol. Syst. Res.* 2004. V. 38. P. 309–324.) <https://doi.org/10.1023/B:SOLS.0000037466.32514.fe>
- Bockelée-Morvan D., Crovisier J., Erard S., Capaccioni F., Leyrat C., Filacchione G., Drossart P., Encrenaz T., Biver N., de Sanctis M.-C., Schmitt B., Kürt E., Capria M.-T., Combes M., Combi M., Fougere N., Arnold G., Fink U., Ip W., Migliorini A., Piccioni G., Tozzi G. Evolution of CO₂, CH₄, and OCS abundances relative to H₂O in the coma of comet 67P around perihelion from Rosetta/VIRTIS-H observations // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2016. V. 462 (Suppl. 1). P. S170–S183. <https://doi.org/10.1093/mnras/stw2428>

- Bradley J.P., Sandford S.A., Walker R.M.* Interplanetary dust particles // Meteorites and the early Solar system / Eds Kerridge J.F., Matthews M.S. Tucson: Univ. Arizona Press, 1988. P. 861–895.
- Bradley J.* The astromineralogy of interplanetary dust particles // *Astromineralogy* / Ed. Henning T. Berlin Heidelberg: Springer, 2003. P. 217–235.
- 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.
- Busarev V.V., Petrova E.V., Irsamambetova T.R., Shcherbina M.P., Barabanov S.I.* Simultaneous sublimation activity of primitive asteroids including (24) Themis and (449) Hamburga: Spectral signs of an exosphere and the solar activity impact // *Icarus*. 2021a. V. 369. 114634. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2021.114634>
- Busarev V.V., Petrova E.V., Shcherbina M.P., Burlak M.A., Belinski A.A.* Interstellar comet 2I/Borisov: Dust composition from multiband photometry and modelling // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2021b. V. 502(1). P. 1882–1894. <https://doi.org/10.1093/mnras/staa4022>
- Carvano J.M., Lorenz-Martins S.* Modeling the effects of a faint dust coma on asteroid spectra // *Proc. IAU Symp.* № 263. Icy Bodies of the Solar System. 2009. P. 223–226. <https://doi.org/10.1017/S1743921310001791>.
- Chandler C.O., Curtis A.M., Mommert M., Sheppard S.S., Trujillo C.A.* SAFARI: Searching asteroids for activity revealing indicators // *Publ. Astron. Soc. Pacif.* 2018. V. 130. id. 114502. <https://doi.org/10.1088/1538-3873/aad03d>
- Dlugach J.M., Mishchenko M.I., Mackowski D.W.* Numerical simulations of single and multiple scattering by fractal ice clusters // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2011. V. 112. P. 1864–1870. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2011.01.038>
- Dlugach J.M., Ivanova O.V., Mishchenko M.I., Afanasiev V.L.* Retrieval of microphysical characteristics of particles in atmospheres of distant comets from ground-based polarimetry // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2018. V. 205. P. 80–90. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2017.10.002>
- Dorschner J., Begemann B., Henning T., Jaeger C., Mutschke H.* Steps toward interstellar silicate mineralogy. II. Study of Mg-Fe-silicate glasses of variable composition // *Astron. and Astrophys.* 1995. V. 300. P. 503–520.
- Draine B.T., Lee H.M.* Optical properties of interstellar graphite and silicate grains // *Astrophys. J.* 1984. V. 285. P. 89–108.
- Güttler C., Mannel T., Rotundi A., Merouane S., Fulle M., Bockelée-Morvan D., Lasue J., Levasseur-Regourd A.C., Blum J., Naletto G., Sierks H., Hilchenbach M., Tubiana C., Capaccioni F., Paquette J.A., Flandes A., Moreno F., Agarwal J., Bodewits D., Bertini I., Tozzi G.P., Hornung K., Langevin Y., Krüger H., Longobardo A., Della Corte V., Tóth I., Filacchione G., Ivanovski S. L., Mottola S., Rinaldi G.* Synthesis of the morphological description of cometary dust at comet 67P/Churyumov-Gerasimenko // *Astron. and Astrophys.* 2019. V. 630. id. A24. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834751>
- Hansen J.E., Travis L.D.* Light scattering in planetary atmospheres // *Space Sci. Rev.* 1974. V. 16. P. 527–610.
- Hendrix A.R., Vilas F.* C-complex asteroids: UV-visible spectral characteristics and implications for space weathering effects // *Geophys. Res. Lett.* 2019. V. 46. P. 14307–14317. <https://doi.org/10.1029/2019GL085883>
- Hsieh H.H., Novaković B., Kim Y., Brassier R.* Asteroid family associations of active asteroids // *Astron. J.* 2018. V. 155. id. 96. <https://doi.org/10.3847/1538-3881/aaa5a2>
- Jewitt D., Hsieh H.H.* The Asteroid-Comet Continuum. Chapter in press for the book *Comets III.* / Eds Meech K., Combi M. Univ. Arizona Press. arXiv:2203.01397v1 [astro-ph.EP] 2 Mar 2022. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.01397>.
- Jovanović L., Gautier T., Protopapa S.* Optical constants of Pluto aerosol analogues from UV to near-IR // *Icarus*. 2021. V. 362. id. 114398. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2021.114398>
- Kimura H., Kolokolova L., Mann I.* Optical properties of cometary dust: Constrains from numerical studies on light scattering by aggregate particles // *Astron. and Astrophys.* 2003. V. 407. P. L5–L8. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20030967>
- Kolokolova L., Hanner M.S., Levasseur-Regourd A.-Ch., Gustafson B.Å.S.* Physical properties of cometary dust from light scattering and thermal emission // *Comets II* / Eds Festou M.C., Keller H.U., and Weaver H.A. Tucson: Univ. Arizona Press, 2004. P. 577–604.
- Kolokolova L., Nagdimunov L., Mackowski D.* Light scattering by hierarchical aggregates // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2018. V. 204. P. 138–143. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2017.09.019>
- Kosaza T., Blum J., Okamoto H., Mukai T.* Optical properties of dust aggregates. 2. Angular dependence of scattered light // *Astron. and Astrophys.* 1993. V. 276. P. 278–288.
- Lasue J., Levasseur-Regourd A.C., Hadamcik E., Alcouffé G.* Cometary dust properties retrieved from polarization observations: Application to C/1995 O1 Hale–Bopp and 1P/Halley // *Icarus*. 2009. V. 199. V. 129–144. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2008.09.008>
- Li A., Greenberg J.M.* A unified model of interstellar dust // *Astron. and Astrophys.* 1997. V. 232. P. 566–584.
- Liu L., Mishchenko M.I.* Scattering and radiative properties of morphologically complex carbonaceous aerosols: A systematic modeling study // *Remote Sens.* 2018. V. 10. id. 1634. <https://doi.org/10.3390/rs10101634>
- Lumme K., Penttilä A.* Model of light scattering by dust particles in the Solar System: Applications to cometary comae and planetary regoliths // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2011. V. 112. P. 1658–1670. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2011.01.016>
- Mackowski D.W.* Electrostatics analysis of sphere clusters in the Rayleigh limit: Application to soot particles // *Appl. Opt.* 1995. V. 34. P. 3535–3545. <https://doi.org/10.1364/AO.34.003535>
- Mackowski D.W., Mishchenko M.I.* Calculation of the T matrix and the scattering matrix for ensembles of spheres // *J.*

- Opt. Soc. Am. A. 1996. V. 13. P. 2266–2278.
<https://doi.org/10.1364/JOSAA.13.002266>
- Mackowski D.W., Mishchenko M.I.* A multiple sphere T-matrix Fortran code for use on parallel computer clusters // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2011. V. 112. P. 2182–2192.
<https://doi.org/10.1016/j.jqsrt>
- Mannel T., Bentley M.S., Schmied R., Jeszenszky H., Levasseur-Regourd A.C., Romstedt J., Torkar K.* Fractal cometary dust – a window into the early Solar system // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2016. V. 462. P. S304–S311.
<https://doi.org/10.1093/mnras/stw2898>
- Mishchenko M.I., Travis L.D.* Satellite retrieval of aerosol properties over ocean using polarization as well as intensity of reflected sunlight // J. Geophys. Res. 1997. V. 102 (D14). P. 16989–17013.
<https://doi.org/10.1029/96JD02425>
- Mishchenko M.I., Travis L.D., Kahn R.A., West R.A.* Modeling phase functions for dustlike tropospheric aerosols using a shape mixture of randomly oriented polydisperse spheroids // J. Geophys. Res. 1997. V. 102 (D14). P. 16831–16847.
<https://doi.org/10.1029/96JD02110>
- Mishchenko M.I., Travis L.D., Lacis A.A.* Scattering, Absorption, and Emission of Light by Small Particles. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2002. 462 p.
- Petrova E.V., Jockers K., Kiselev N.N.* Light scattering by aggregates with sizes comparable to the wavelength: an application to cometary dust // Icarus. 2000. V. 148. P. 526–536.
<https://doi.org/10.1006/icar.2000.6504>
- Protopapa S., Sunshine J.M., Feaga L.M., Kelley M.S.P., A'Hearn M.F., Farnham T.L., Groussin O., Besse S., Merlin F., Li J.-Y.* Water ice and dust in the innermost coma of comet 103P/Hartley 2 // Icarus. 2014. V. 238. P. 191–204.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.04.008>
- Ramirez S.I., Coll P., da Silva A., Navarro-González R., Lafait J., Raulin F.* Complex refractive index of Titan's aerosol analogues in the 200–900 nm domain // Icarus. 2002. V. 156 P. 515–529.
<https://doi.org/10.1006/icar.2001.6783>
- Rondón-Briceño E., Carvano J.M., Lorenz-Martins S.* A study of the effects of faint dust comae on the spectra of asteroids // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2017. V. 468. P. 1556–1566.
<https://doi.org/10.1093/mnras/stx536>
- Rouleau F., Martin P.G.* Shape and clustering effects on the optical properties of amorphous carbon // Astrophys. J. 1991. V. 377. P. 526–540.
- Tishkovets V.P., Petrova E.V., Jockers K.* Optical properties of aggregate particles comparable in size to the wavelength // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2004. V. 86. P. 241–265.
<https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2003.08.003>
- Tishkovets V.P., Petrova E.V., Mishchenko M.I.* Scattering of electromagnetic waves by ensembles of particles and discrete random media // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2011. V. 112. P. 2095–20127.
<https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2011.04.010>
- Tishkovets V.P., Petrova E.V.* Spectra of light reflected by aggregate structures of submicron particles // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2020. V. 252. id. 107116.
<https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2020.107116>
- Warren S.G.* Optical constants of carbon dioxide ice // Applied Optics. 1986. V. 25. № 16.
- Warren S.G., Brandt R.E.* Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave: A revised compilation // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. D14220.
<https://doi.org/10.1029/2007JD009744>
- Zubko E., Shkuratov Yu., Videen G.* Effect of morphology on light scattering by agglomerates // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2015. V. 150. P. 42–54.
<https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2014.06.023>