

УДК 523.64

ВЛИЯНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ НА ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛЕДЯНЫХ ЧАСТИЦ

© 2020 г. Д. В. Петров^а, *, Е. А. Жужулина^а, Н. Н. Киселев^а

^аКрымская астрофизическая обсерватория российской академии наук (КрАО РАН), Крым, Россия

*e-mail: dvp@crao.crimea.ru

Поступила в редакцию 01.02.2019 г.

После доработки 11.03.2019 г.

Принята к публикации 26.03.2019 г.

Водяной лед широко распространен в Солнечной системе. Компьютерное моделирование рассеяния света ледяными частицами, предназначенное для интерпретации данных наблюдений, должно учитывать спектральную зависимость показателя преломления водяного льда. Однако на практике часто используют одно фиксированное значение показателя преломления. В данной работе мы показываем, что неудачный выбор фиксированного показателя преломления, как правило, приводит к заметным ошибкам как для оценки интенсивности, так и для оценки степени поляризации однократно рассеянного света. Мы обнаружили, что в спектральной области от 0.4 до 0.9 мкм фиксированное значение показателя преломления ледяных частиц $m_0 = 1.3078$ приводит к минимальным отличиям рассчитанных характеристик рассеянного ледяными частицами света от тех, которые учитывают спектральный ход показателя преломления. Найдены наиболее подходящие значения фиксированного показателя преломления для широко используемых фильтров R, V и I. Также изучено влияние фиксированного значения показателя преломления льда на спектральную зависимость основных параметров фазовой зависимости степени линейной поляризации однократно рассеянного света, таких как величина и положение минимума отрицательной ветви, величина и положение максимума положительной ветви, угол инверсии и величина поляриметрического наклона. Результаты проведенных расчетов могут быть использованы для интерпретации поляризации различных объектов Солнечной системы, имеющих в своем составе ледяные частицы.

Ключевые слова: ледяные частицы, показатель преломления, спектральная зависимость, поляриметрия, фазовая зависимость поляризации, случайные гауссовские частицы, матрицы формы, компьютерное моделирование

DOI: 10.31857/S0320930X20010089

ВВЕДЕНИЕ

Частицы водяного льда являются неотъемлемой частью множества объектов Солнечной системы – например, Луны (Петров и др., 2003, Пугачева и др., 2015), спутников планет-гигантов (Friedson, Stevenson, 1983; Anderson и др., 2001; Schubert и др., 2004; Moore, 2006), астероидов (Belskaya и др., 2010; Stubbs, Wang, 2012; Scully и др., 2018), комет (Sunshine и др., 2007; Berger и др., 2011; Kossacki, 2019), а также транснептуновых объектов (Hussmann и др., 2006). Кроме того, состояние льдов на определенных участках поверхности нашей планеты является важнейшим показателем климатических изменений (Kelly, Hall, 2008).

Фотометрия и поляриметрия рассеянного излучения являются мощными инструментами дистанционного зондирования объектов Солнечной системы. За последние три десятилетия на-

бор данных наблюдений ледяных планетных поверхностей значительно расширился. Системы космической съемки позволили получить сотни тысяч мультиспектральных изображений спутников планет-гигантов, колец и даже кометных ядер (Gulkis и др., 2007). Важной целью этих фотометрических и поляриметрических исследований является оценка физических свойств и химического состава удаленных объектов с помощью сопоставления результатов наблюдений и моделирования.

К сожалению, есть не так уж много работ, посвященных изучению поляризации света, рассеянного именно ледяными частицами. Lyot (1929) и Dollfus (1957) обнаружили небольшое изменение поляризации в процессе таяния льда. Dougherty и Geake (1994) обнаружили, что частицы водяного льда, имеющие субмикронные размеры, имеют более глубокую отрицательную ветвь по-

ляризации, чем крупные частицы льда. Шкуратов и Овчаренко (Shkuratov, Ovcharenko, 2002) не обнаружили заметной отрицательной ветви поляризации в ходе лабораторных измерений на предельно малых фазовых углах для снега, состоящего из сильно вытянутых (соотношение диаметра к длине порядка 1 : 10) кристаллов льда. Различные наблюдения разнообразных видов льда позволили выявить зависимости рассеивающих свойств от размеров и формы ледяных частиц (Leroux и др., 1999; Lv, Sun, 2014; Peltoniemi и др., 2009; Sun, Zhao, 2011; Tanikawa и др., 2014). Данная работа посвящена изучению свойств ледяных частиц в зависимости от длины волны излучения; при этом основное внимание в ней уделяется такому важному параметру, как степень линейной поляризации.

Степень линейной поляризации может быть описана следующим соотношением:

$$P = \frac{I_{\perp} - I_{\parallel}}{I_{\perp} + I_{\parallel}}, \quad (1)$$

где I_{\perp} и I_{\parallel} – компоненты интенсивности рассеянного излучения, перпендикулярная и параллельная плоскости рассеяния (плоскости, содержащей источник излучения, рассеивающий объект и наблюдателя), соответственно. Если $I_{\perp} < I_{\parallel}$, тогда, формально, можно получить отрицательную степень поляризации. Физически это означает, что плоскость преимущественных колебаний вектора электрического излучения параллельна плоскости рассеяния.

Частицы могут характеризоваться комплексным показателем преломления $m_0 = n + ik$. Зависимость показателя преломления (как реальной, так и мнимой частей) ледяных частиц от длины волны показана на рис. 1. Данные взяты из работы Warren (1984). Следует также упомянуть, что существуют более новые и уточненные результаты измерений показателя преломления льда (Warren, Brandt, 2008). Однако в рассматриваемом в данной работе спектральном диапазоне 0.4–0.9 мкм разность между старыми и новыми величинами показателя преломления крайне мала, и ее влияние на результаты расчетов незначительно.

Существуют разные методы компьютерного моделирования рассеивающих свойств частиц. Но в большинстве из них для интерпретации наблюдений, особенно для мультиспектральных, требуется большое количество вычислений. Требуется многократно повторять расчеты для каждого значения показателя преломления, соответствующего каждому значению длины волны, вследствие чего время вычислений резко увеличивается. Выходом может служить использование исследователями одного фиксированного показателя преломления m_0 . Например, при интерпретации данных, измеренных при помощи фильтра в

ограниченном спектральном диапазоне, как правило, используется один показатель преломления, примерно соответствующий центру этого фильтра (Kolokolova, Kimura, 2010).

Возникает интересный вопрос: насколько сильно рассеивающие свойства ледяных частиц зависят от длины волны и соответствующего изменения показателя преломления? И какой фиксированный показатель преломления следует использовать, чтобы минимизировать расхождение между рассеивающими свойствами, вычисленными с учетом спектральной зависимости показателя преломления, и рассеивающими свойствами, вычисленными с использованием фиксированного показателя преломления? Ответам на эти вопросы и посвящена данная работа.

МОДЕЛИРОВАНИЕ

Как известно, частицы водяного льда могут находиться как в аморфном, так и в кристаллическом состоянии. Отметим, что в кометах предполагается наличие обоих типов льда (Prialnik, 1992; Cargia и др., 2002). Но лед даже в кристаллическом состоянии, вероятнее всего, представляет собой поликристаллическую структуру, в которой отдельные монокристаллы ориентированы хаотически, а их размеры малы по сравнению с размером частицы. Потому в данной работе мы исходим из предположения, что частицы водяного льда имеют сложную неправильную форму. Для моделирования таких частиц мы использовали случайные гауссовские частицы (иногда называемые в литературе “случайными гауссовыми сферами”) в качестве форм частиц льда, подробно описанных в работах Muinonen (1996a; 1996b; 1998) и широко используемых для изучения рассеивающих свойств различных объектов (Петров, Киселев, 2017; Petrov, Kiselev, 2018). Примеры таких частиц показаны на рис. 2.

Для компьютерного моделирования рассеяния электромагнитного излучения несферическими частицами часто используют метод Т-матриц в его различных модификациях (Mishchenko, Travis, 1994; Mishchenko и др., 1996; 2002). Суть этого метода, разработанного Waterman (1973), заключается в разложении электромагнитного поля, рассеянного частицей, в ряд по векторным сферическим волновым функциям, а также в дальнейшем вычислении коэффициентов разложения. В данной работе для компьютерного моделирования рассеивающих свойств используется модификация метода Т-матриц, называемая методом матриц формы, или Sh-matrix (Petrov и др., 2006a; 2007; 2008; 2009; 2010; 2012). Данный метод позволяет производить моделирование характеристик рассеяния света частицами достаточно неправильных форм (Petrov и др., 2006b).

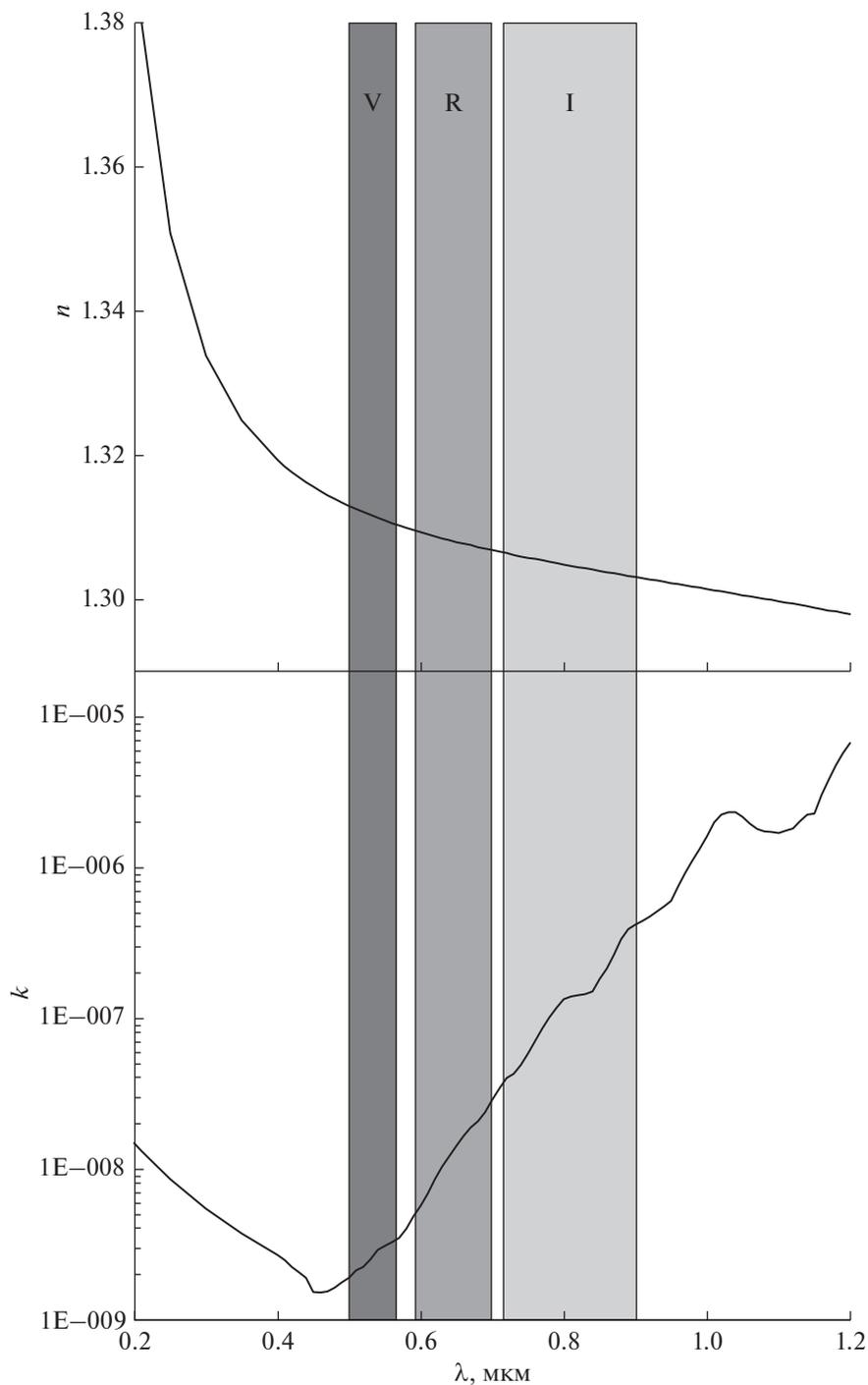


Рис. 1. Спектральные зависимости реальной и мнимой части показателя преломления льда, взятые из работы (Warren, 1984). Выделенные области соответствуют спектральным диапазонам фильтров V, R, I (см. табл. 1).

При этом необходимо упомянуть, что данный анализ проведен для характеристик лишь однократного рассеяния, в то время как проявления многократного рассеяния, значительные для плотно упакованных сред, таких как реголиты поверхностей небесных тел, способно существен-

но изменить форму фазовых зависимостей интенсивности и поляризации рассеянного света (Shkuratov и др., 2007). Поскольку многократное рассеяние в данной работе не учитывается, результаты данной работы применять к интерпретации наблюдений безатмосферных небесных

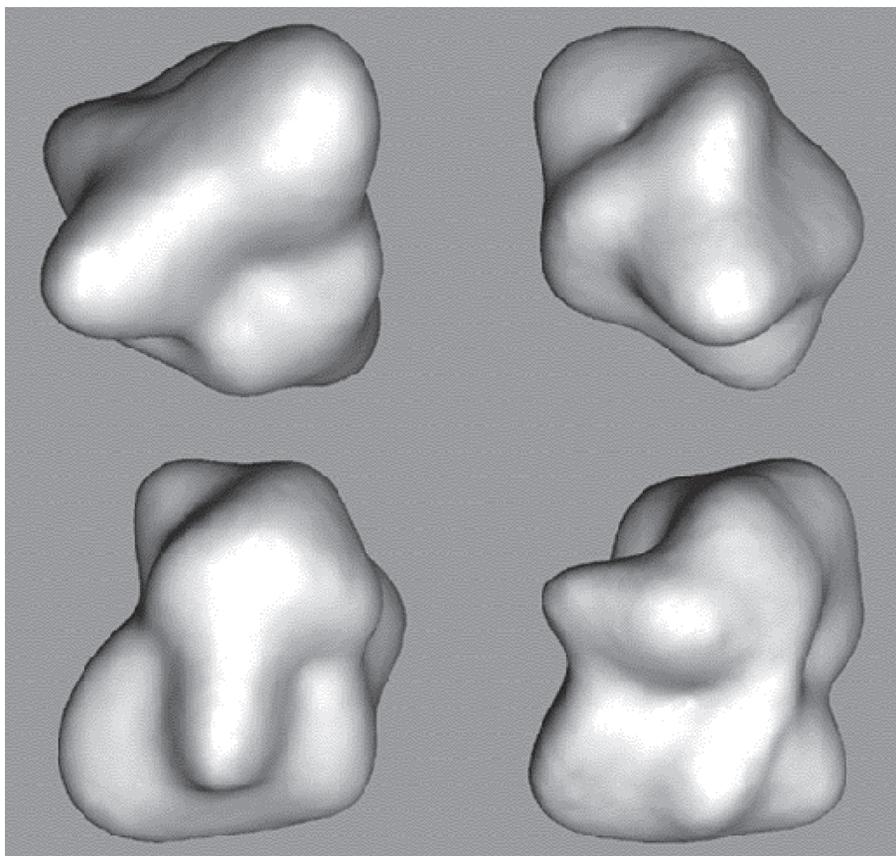


Рис. 2. Примеры случайных гауссовских частиц, используемых для моделирования.

тел, особенно на малых углах фазы, нужно с осторожностью, помня об эффектах многократного рассеяния.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Мы рассчитали характеристики рассеяния, такие как интенсивность и степень линейной поляризации света, рассеянного ледяными частицами, как с учетом зависимости показателя преломления от длины волны (обозначая их I и P), так и для фиксированного показателя преломления (обозначив интенсивность и степень линейной поляризации I_0 и P_0 , соответственно). Мы рассматриваем рассеивающий объект как совокупность случайных гауссовских частиц различных размеров и ориентаций в пространстве, не взаимодействующих между собой (многократное рассеяние между частицами не учитывается). Частицы разных размеров обладают одной и той же случайной неправильной формой. Мы принимаем во внимание усреднение характеристик рассеянного света. Усреднение производится как по ориентациям рассеивающих частиц, так и по размерам рассеивающих частиц в соответствии со сте-

пенным законом распределения с показателем степени -2.89 , который соответствует закону распределения частиц кометной пыли (Price и др., 2010).

Согласно определениям, приведенным в работе (Hansen, Travis, 1974), для используемых в данной работе параметров распределения частиц по размерам эффективный размер частицы равен $R_{\text{eff}} = 0.68$ мкм, а эффективная вариация распределения по размерам $v_{\text{eff}} = 0.6$.

На рис. 3 показаны спектральные зависимости степени линейной поляризации ледяных случайных гауссовских частиц, вычисленные с учетом спектральной зависимости показателя преломления льда, на фиксированных фазовых углах от 10° до 60° . Видно, что спектральная зависимость квазилинейна, и степень линейной поляризации возрастает с увеличением фазового угла. Однако следует принимать во внимание тот факт, что спектральная зависимость степени линейной поляризации отражает не только спектральную зависимость показателя преломления, но также зависит от размерного параметра $X = 2\pi r/\lambda$, где r — характерный размер частицы, определяемый как максимальное значение функции $R(\theta, \varphi)$, описы-

вающей форму случайной гауссовской частицы (Muinonen, 1996b; Petrov, Kiselev, 2018), λ – длина волны падающего света.

Потому представляется достаточно важным изучить спектральную зависимость основных параметров фазовой зависимости степени линейной поляризации, таких как величина и положение минимума отрицательной ветви, величина и положение максимума положительной ветви, угол инверсии и величина поляриметрического наклона (Петров и др., 2018). Эти параметры часто используются для идентификации космических объектов, в частности, для отнесения комет к классам с высокой и низкой максимальной степенью поляризации (Жужулина и др., 2018). Рис. 4 демонстрирует все эти параметры наглядно на фазовой зависимости степени линейной поляризации совокупности невзаимодействующих между собой случайных гауссовских частиц, чьи характеристики рассеяния усреднены при указанном выше распределении по размерам, для длины волны $\lambda = 0.9$ мкм (для которой показатель преломления равен $m_0 = 1.3032 + i 4.200E-7$). Из рисунка видно, что величина максимума поляризации достигает достаточно больших значений (~50%), что заметно выше наблюдаемых значений максимума поляризации для объектов Солнечной системы (Петров, Киселев, 2017). Это расхождение может быть объяснено вкладом многократного рассеяния между частицами, не учитываемым в данной работе. Потому следует иметь в виду, что величины максимума поляризации и поляриметрического наклона у изучаемых в данной работе совокупностей невзаимодействующих частиц оказываются выше, чем у реально наблюдаемых объектов. Необходимо также отметить, что многократное рассеяние, особенно когерентное обратное рассеяние, также сильно изменяет форму отрицательной ветви и, в частности, положение фазового угла минимума поляризации. Вследствие этого в случае плотно упакованных сред с высоким альбедо, где многократное рассеяние достаточно сильно развито, модельные параметры отрицательной ветви степени линейной поляризации также могут заметно отличаться от наблюдаемых.

На рис. 5 показана спектральная зависимость положения минимума отрицательной ветви поляризации α_{\min} для двух случаев фиксированного показателя преломления: $m_0 = 1.30$ и $m_0 = 1.33$ (сплошные линии). Кружочками отмечена спектральная зависимость α_{\min} с учетом спектральной зависимости показателя преломления. Из рисунка ясно видно, что изменение α_{\min} с длиной волны с учетом $m(\lambda)$ не является простой линейной комбинацией спектральных зависимостей для двух значений фиксированного показателя преломления: m_0 – в области коротких волн она

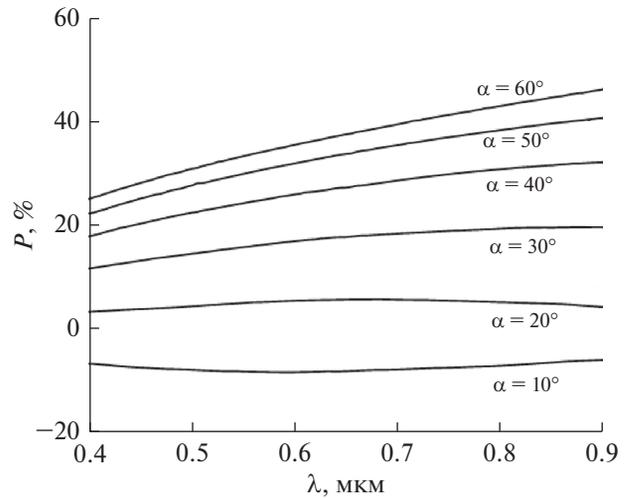


Рис. 3. Спектральная зависимость степени линейной поляризации для набора фазовых углов от 10° до 60°.

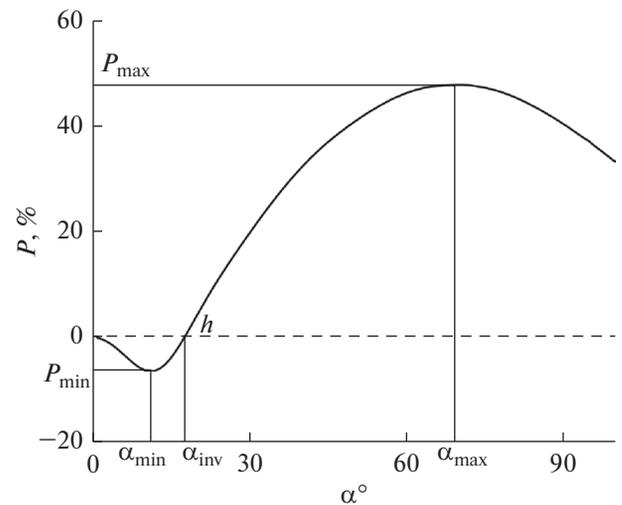


Рис. 4. Фазовая зависимость степени линейной поляризации совокупности невзаимодействующих между собой случайных гауссовских частиц, чьи характеристики рассеяния усреднены при указанных выше параметрах, для длины волны $\lambda = 0.9$ мкм (показатель преломления $m_0 = 1.3032 + i 4.200E-7$).

близка к $m_0 = 1.33$, в области длинных волн – ближе к $m_0 = 1.30$. Однако тот факт, что спектральная зависимость α_{\min} с учетом $m(\lambda)$ лежит в промежутке между зависимостями для двух фиксированных показателей преломления вселяет надежду на успешный подбор фиксированного показателя преломления с минимальным отличием от кривых с учетом $m(\lambda)$. Отметим также тот факт, что в видимой области спектра минимум поляризации лежит в пределах $8^\circ \lesssim \alpha_{\min} \lesssim 10^\circ$.

На рис. 6 показана спектральная зависимость величины минимума ветви отрицательной поля-

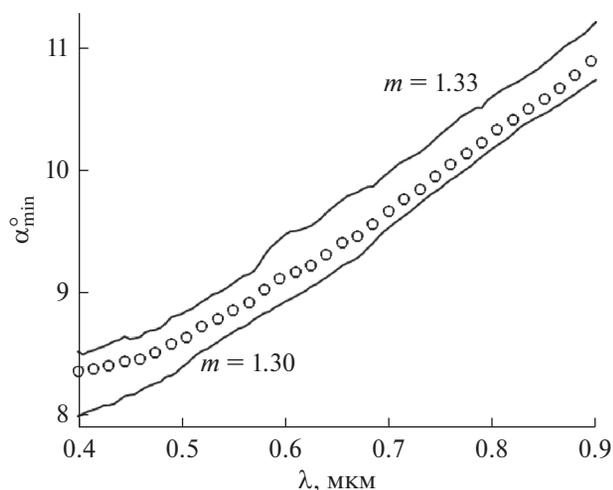


Рис. 5. Спектральная зависимость положения минимума отрицательной ветви поляризации α_{\min} для двух случаев фиксированного показателя преломления: $m_0 = 1.30$ и $m_0 = 1.33$ (сплошные линии), а также спектральная зависимость α_{\min} с учетом спектральной зависимости показателя преломления (кружочки).

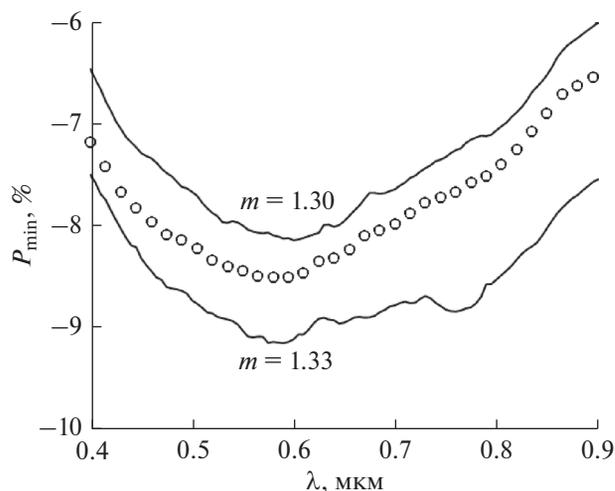


Рис. 6. Спектральная зависимость минимума отрицательной ветви поляризации P_{\min} для двух случаев фиксированного показателя преломления: $m_0 = 1.30$ и $m_0 = 1.33$ (сплошные линии), а также спектральная зависимость P_{\min} с учетом спектральной зависимости показателя преломления (кружочки).

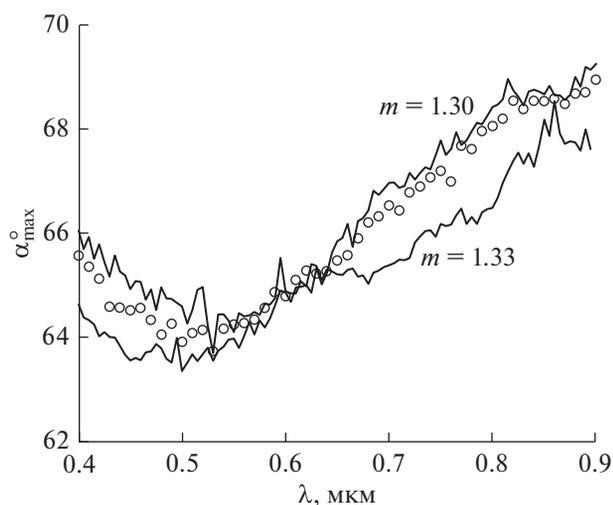


Рис. 7. Спектральная зависимость максимального угла положительной ветви поляризации α_{\max} для двух случаев фиксированного показателя преломления: $m_0 = 1.30$ и $m_0 = 1.33$ (сплошные линии), а также спектральная зависимость α_{\max} с учетом спектральной зависимости показателя преломления (кружочки).

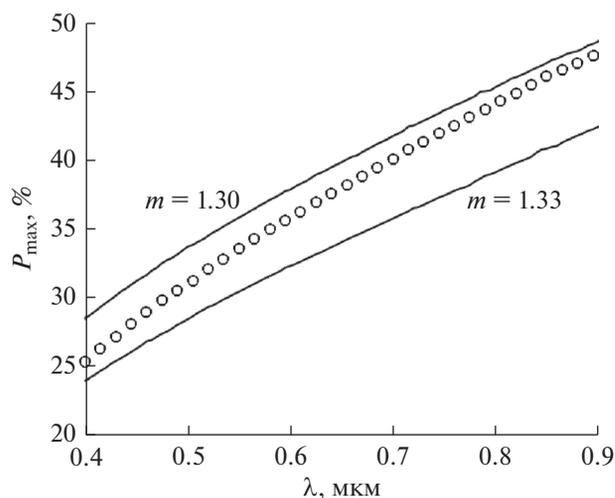


Рис. 8. Спектральная зависимость максимума положительной ветви поляризации P_{\max} для двух случаев фиксированного показателя преломления: $m_0 = 1.30$ и $m_0 = 1.33$ (сплошные линии), а также спектральная зависимость P_{\max} с учетом спектральной зависимости показателя преломления (кружочки).

ризации P_{\min} для двух случаев фиксированного показателя преломления (сплошные линии). Кружочками отмечена спектральная зависимость α_{\min} с учетом $m(\lambda)$. Данный рисунок демонстрирует немонотонную зависимость величины минимума поляризации от длины волны, причем минимальные значения параметра P_{\min} также отличаются во всех трех случаях, равно как и значения длин волн, соответствующих данному минимуму.

Рис. 7–10 демонстрируют спектральные зависимости остальных четырех вышеописанных параметров фазовой зависимости степени линейной поляризации:

- положения максимального угла α_{\max} положительной ветви поляризации (рис. 7);
- величины максимальной степени P_{\max} положительной ветви поляризации (рис. 8);

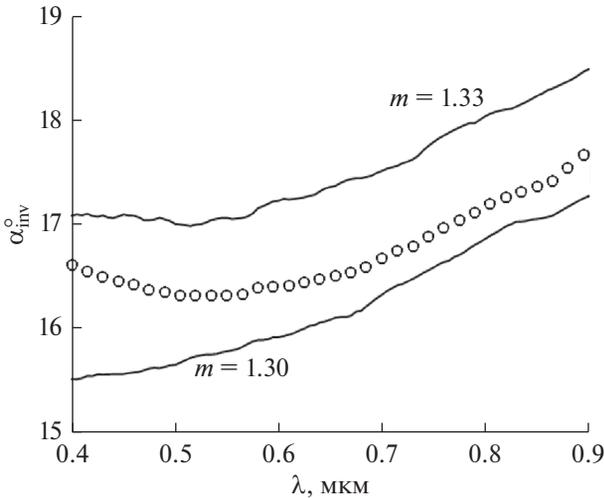


Рис. 9. Спектральная зависимость угла инверсии степени поляризации α_{inv} для двух случаев фиксированного показателя преломления: $m_0 = 1.30$ и $m_0 = 1.33$ (сплошные линии), а также спектральная зависимость α_{inv} с учетом спектральной зависимости показателя преломления (кружочки).

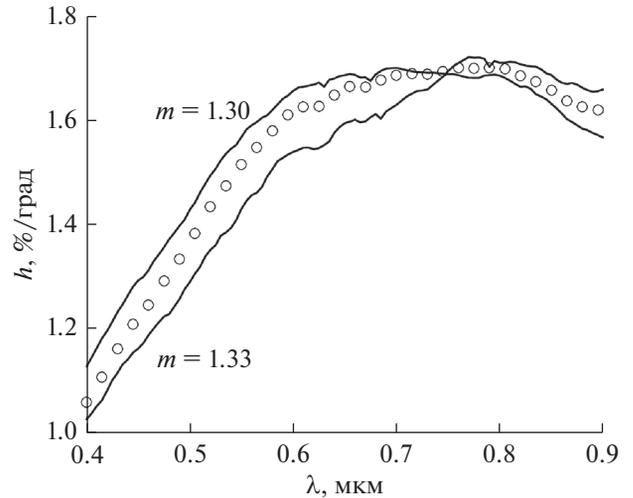


Рис. 10. Спектральная зависимость поляриметрического наклона h в точке инверсии для двух случаев фиксированного показателя преломления: $m_0 = 1.30$ и $m_0 = 1.33$ (сплошные линии), а также спектральная зависимость h с учетом спектральной зависимости показателя преломления (кружочки).

- угла инверсии степени поляризации (угла, при котором поляризация меняет знак, см. рис. 4) α_{inv} (рис. 9);
- величины поляриметрического наклона $h = \Delta P / \Delta \alpha$ в точке инверсии (рис. 10).

Представляется достаточно интересным сравнить наши результаты, приведенные на рис. 5–10, с результатами лабораторных измерений для “взвешенных” в потоке воздуха частиц (Volten и др., 2001). В данные лабораторных измерений измерялись характеристики рассеяния света частицами, которые представляют собой достаточно разреженную среду, с отсутствующим в ней многократным рассеянием. В ходе данных лабораторных измерений использовались две длины волн: $\lambda_1 = 0.4416$ мкм и $\lambda_2 = 0.6328$ мкм. Следует сразу же уточнить, что исследовались достаточно сильно преломляющие частицы (показатели преломления от 1.5 до 2.1 (см. табл. 1 в работе Volten и др., 2001), и потому количественное сравнение характеристик рассеяния произвести невозможно. Однако качественное сравнение может проявить общие закономерности с моделями, рассматриваемыми в данной работе. Рассмотрим для примера характеристики рассеяния частицами полевого шпата, приведенные в работе (Volten и др., 2001) на рис. 5.

Из этого рисунка видно, что для измеренных характеристик рассеяния частиц такие величины, как α_{min} , P_{min} , α_{max} и α_{inv} на двух длинах волн отличаются достаточно слабо. Рис. 5–7 и 9 демонстрируют аналогичное поведение данных величин.

В то же самое время, величина максимальной степени P_{max} положительной ветви поляризации достаточно сильно увеличивается с увеличением длины волны ($P_{max}(\lambda_1) < P_{max}(\lambda_2)$). Рис. 8 демонстрирует ту же самую тенденцию ($\Delta P_{max} \approx 9\%$). Далее, величина поляриметрического наклона h в точке инверсии достаточно сильно увеличивается с увеличением длины волны ($h(\lambda_1) < h(\lambda_2)$). Рис. 10 демонстрирует ту же самую тенденцию ($\Delta h \approx 0.43\%$ на град).

Таким образом, мы видим, что поведение характеристик рассеяния света частицами, не подверженными влиянию многократного рассеяния, проявляет общие закономерности с моделями, рассматриваемыми в данной работе.

Рис. 5–10 показывают, что практически во всех случаях спектральная зависимость степени поляризации с учетом $m(\lambda)$ лежит между кривыми, соответствующими фиксированным значениям показателя преломления, что позволяет сделать вывод о возможности удачного подбора фиксированного показателя преломления. Сле-

Фиксированный показатель преломления для спектральных фильтров I, R и V

Фильтр	λ_0 , мкм	$\Delta\lambda$, мкм	Фиксированный показатель преломления m_0
I	0.80	0.19	1.3075
R	0.64	0.1058	1.3077
V	0.53	0.0662	1.3081

дует также отметить интересную особенность немонотонной, но достаточно слабой зависимости положения максимума положительной поляризации от длины волны. В работах (Петров, Киселев, 2017; Petrov, Kiselev, 2018) было показано, что положение максимума может быть объяснено заметным изменением абсолютной величины мнимой части показателя преломления, которая в рассматриваемой спектральной области крайне мала (см. нижнюю панель рис. 1). Но на величину максимума ветви положительной поляризации размерный параметр частиц и показатель преломления, зависящие от длины волны, оказывают существенное влияние. Таким образом, вариации показателя преломления во всем рассматриваемом спектральном диапазоне способны изменить величину P_{\max} очень сильно — намного сильнее, чем ошибки измерения поляризации в ходе поляриметрических наблюдений (Киселев, Петров, 2018).

Из-за замены зависящего от длины волны показателя преломления $m(\lambda)$ фиксированным значением характеристики рассеяния изменяются. Ввиду этого интересно определить разность характеристик рассеяния (интенсивности и степени линейной поляризации рассеянного света) во всем диапазоне фазовых углов и для всего диапазона длин волн. Для этого мы построили трехмерные карты распределения ΔP и ΔI (соотношения (2) и (3), соответственно). Ось X соответствует фазовому углу, ось Y — длине волны, а яркость — разности. Белый цвет соответствует минимальной разности, черный — максимальной.

Следует иметь в виду, что в случае поляризации мы вычисляем абсолютную величину разности между поляризациями следующим образом:

$$\Delta P = |P - P_0|, \quad (2)$$

тогда как в случае интенсивности мы вычисляем относительную разность при помощи следующей формулы:

$$\Delta I = \frac{|I - I_0|}{I_0} \times 100\%. \quad (3)$$

Напомним, что здесь I и P — интенсивность и степень линейной поляризации рассеянного света, вычисленные с учетом спектральной зависимости показателя преломления, а I_0 и P_0 — интенсивность и степень линейной поляризации рассеянного света, вычисленные при фиксированном значении показателя преломления.

Причина столь разных подходов кроется в особенностях фазовой зависимости интенсивности и поляризации. Степень линейной поляризации на определенном фазовом угле обращается в ноль, и в области этого угла относительная погрешность может принимать очень высокие значения, затмевая собой всю остальную картину. В случае же интенсивности есть иная особенность — очень

большая разность (порядка — несколько порядков) между интенсивностью света, рассеянного в направлении “вперед” (фазовый угол около 180°) и остальными участками фазовой кривой. По этой причине нам представляется оправданным использовать относительную разность для интенсивности и абсолютную для поляризации.

На рис. 11 показана разность в поляризации (уравнение (2)) для двух значений фиксированного показателя преломления: $m_0 = 1.33 + 0i$ (верхняя панель) и $m_0 = 1.30 + 0i$ (нижняя панель). Как видно, основные различия в поляризации находятся в области фазовых углов от 30° до 90° .

Рис. 12 показывает разность в интенсивности (уравнение (3)) для тех же условий. Как видно из рисунка, основные различия в интенсивности расположены в области фазовых углов от 0° до 30° .

Также можно заметить, что различия достаточно велики, особенно по интенсивности, поэтому неправильный выбор фиксированного показателя преломления приведет к большим ошибкам — абсолютная разность 3–5% в случае поляризации и относительная разность 18–30% в случае интенсивности.

Мы провели ряд расчетов при различных значениях фиксированного показателя преломления и выбрали из них такое значение фиксированного показателя преломления, которое приводит к минимизации среднего квадратичного отклонения поляризации во всем диапазоне фазовых углов и диапазоне длин волн от 0.4 до 0.9 мкм. Следует уточнить, что в расчетах, учитывающих спектральную зависимость показателя преломления, принималась во внимание как действительная, так и мнимая часть показателя преломления (см. рис. 1). А у фиксированного показателя преломления мнимая часть всегда равна нулю. В результате мы получили наиболее подходящее значение показателя преломления $m_0 = 1.3078$ для спектрального диапазона от 0.4 до 0.9 мкм, которое можно использовать для достаточно точного моделирования рассеяния света ледяными частицами. Отметим важный факт — что это значение вовсе не равно среднему значению показателя преломления в спектральном диапазоне от 0.4 до 0.9 мкм, определяемому по формуле:

$$\bar{m} = \frac{m|_{\lambda=0.4} + m|_{\lambda=0.9}}{2} = 1.3113. \quad (4)$$

Также приведены наиболее подходящие значения фиксированного показателя преломления для часто используемых фильтров R, V и I. Параметры фильтров и соответствующие фиксированные показатели преломления приведены в таблице.

На рис. 13 показана карта разности для поляризации (верхняя панель) и интенсивности (нижняя панель) при значении $m_0 = 1.3078$. Хорошо видно, что и модули абсолютной разности степени

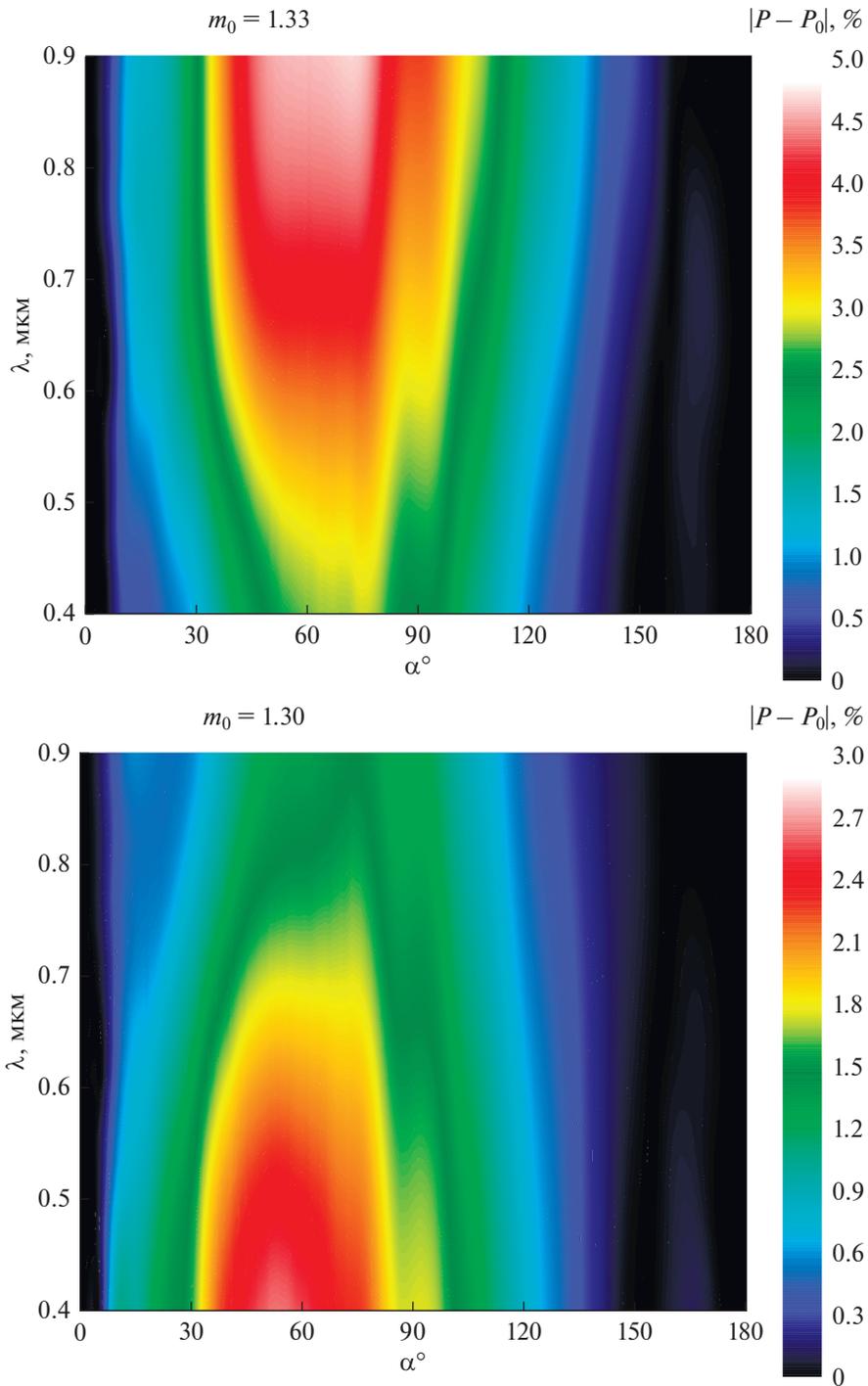


Рис. 11. Карта распределения модуля абсолютной разности степени линейной поляризации с учетом и без учета спектральной зависимости показателя преломления. Шкала приведена справа. Темные участки соответствуют высокой разности, светлые – низкой.

линейной поляризации, и относительной разности интенсивности стали заметно меньше по сравнению с данными, приведенными на рис. 11 и 12.

Рис. 14 показывает спектральные зависимости шести характерных параметров фазовой зависи-

мости степени линейной поляризации: α_{\min} , α_{\max} , α_{inv} , P_{\min} , P_{\max} , h с учетом спектральной зависимости показателя преломления (кружочки) и для фиксированного показателя преломления $m_0 = 1.3078$ (сплошные линии). Из рисунка видно,

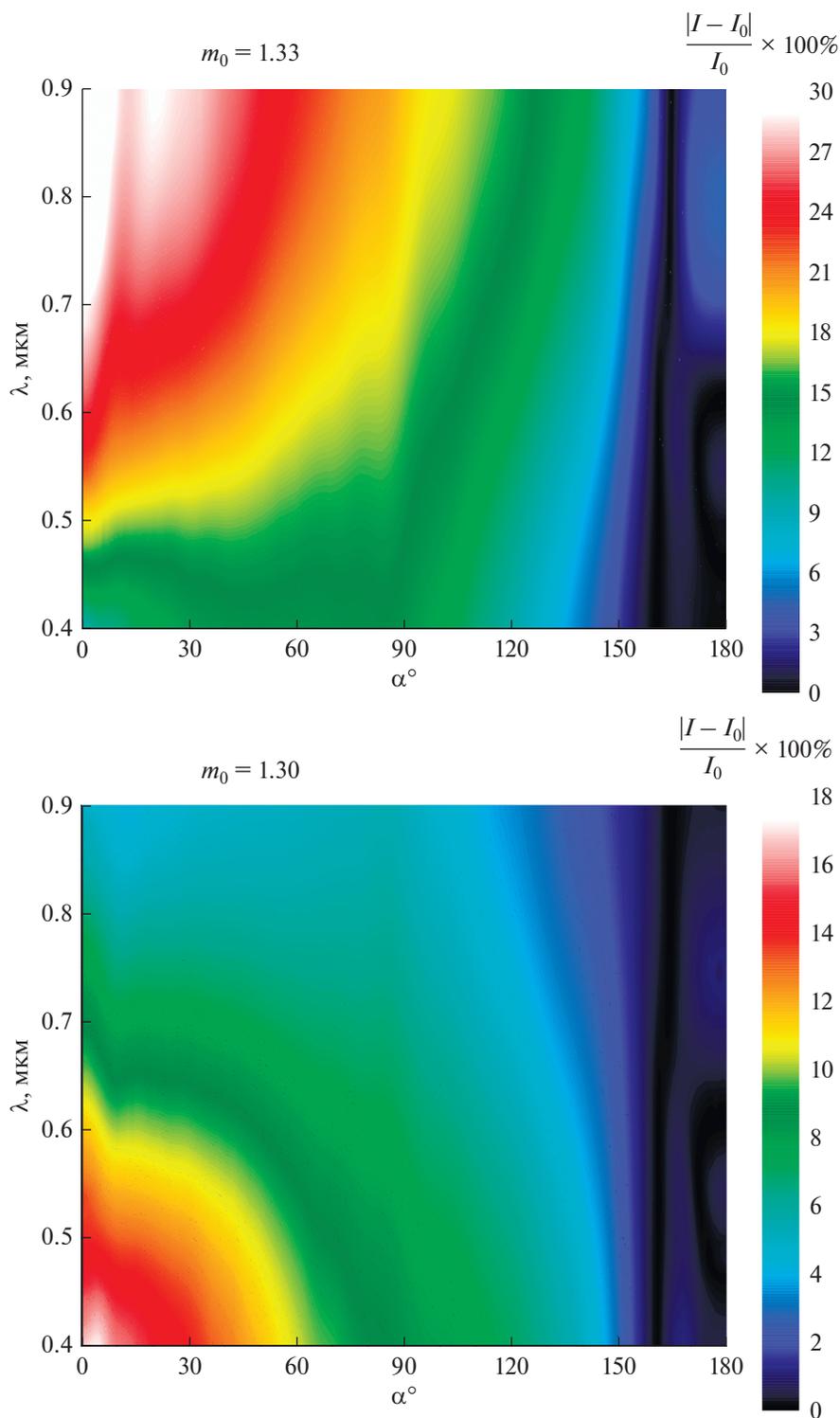


Рис. 12. Карта распределения модуля относительной разности интенсивности с учетом и без учета спектральной зависимости показателя преломления. Шкала приведена справа. Темные участки соответствуют высокой разности, светлые – низкой.

что, несмотря на очень хорошее совпадение для большинства длин волн из рассматриваемого спектрального диапазона, в коротковолновом

диапазоне имеются заметные различия, особенно для угла инверсии поляризации. Это говорит о том, что фиксированный показатель преломле-

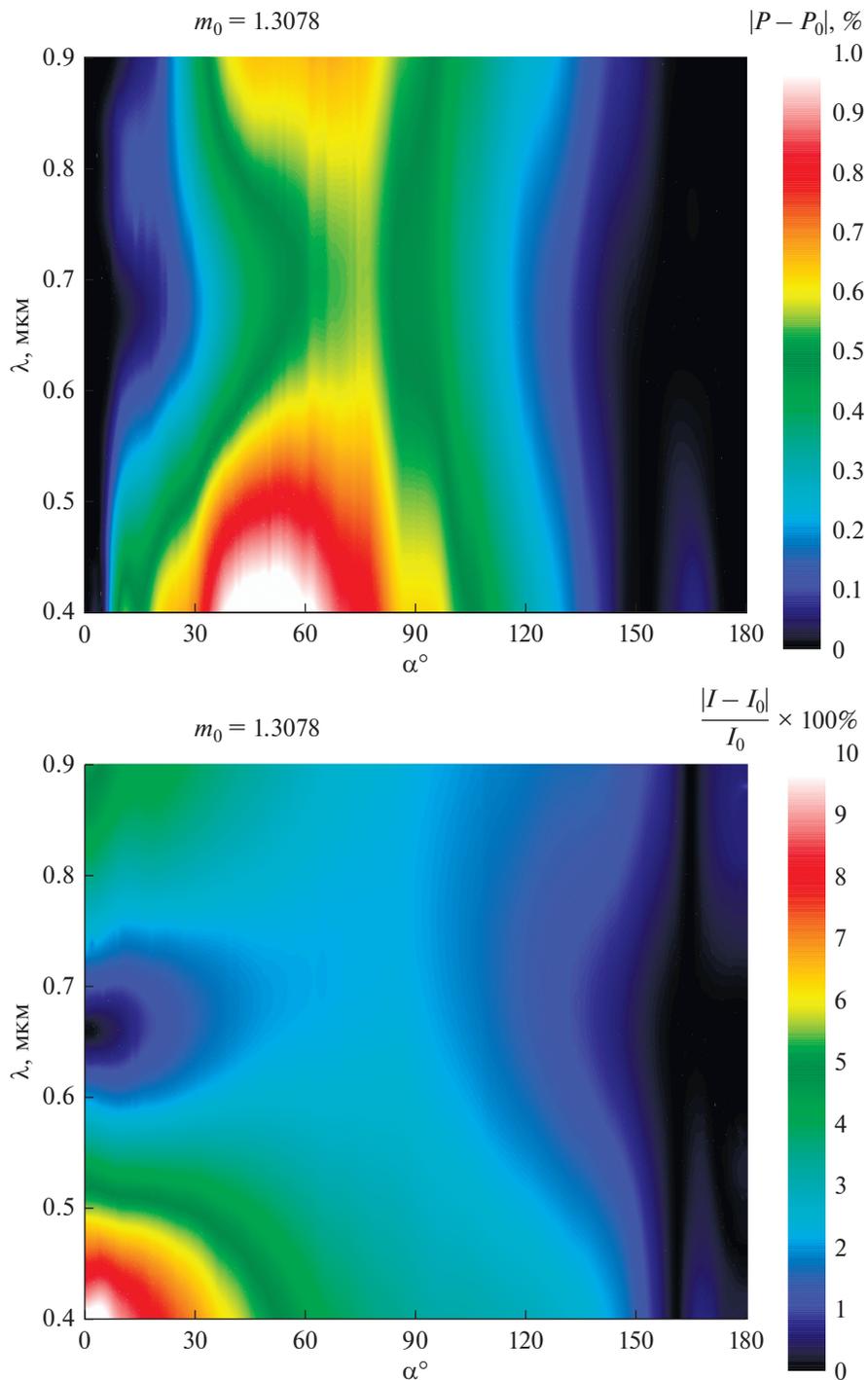


Рис. 13. Карта распределения модуля абсолютной разности степени линейной поляризации (верхняя панель) и относительной разности интенсивности (нижняя панель) с учетом спектральной зависимости показателя преломления и при фиксированном показателе преломления $m_0 = 1.3078$. Шкала приведена справа. Темные участки соответствуют высокой разности, светлые – низкой.

ния всего лишь уменьшает ошибку, но не устраняет ее полностью. Следовательно, для получения более точных результатов следует учитывать изменение показателя преломления с изменением длины волны. Следует также отметить, что за-

метные отличия на коротких волнах вполне ожидаемы, потому что характеристики света, рассеянного на крупных (относительно длины волны) частицах, более чувствительны к показателю преломления, и поэтому правильный учет показате-

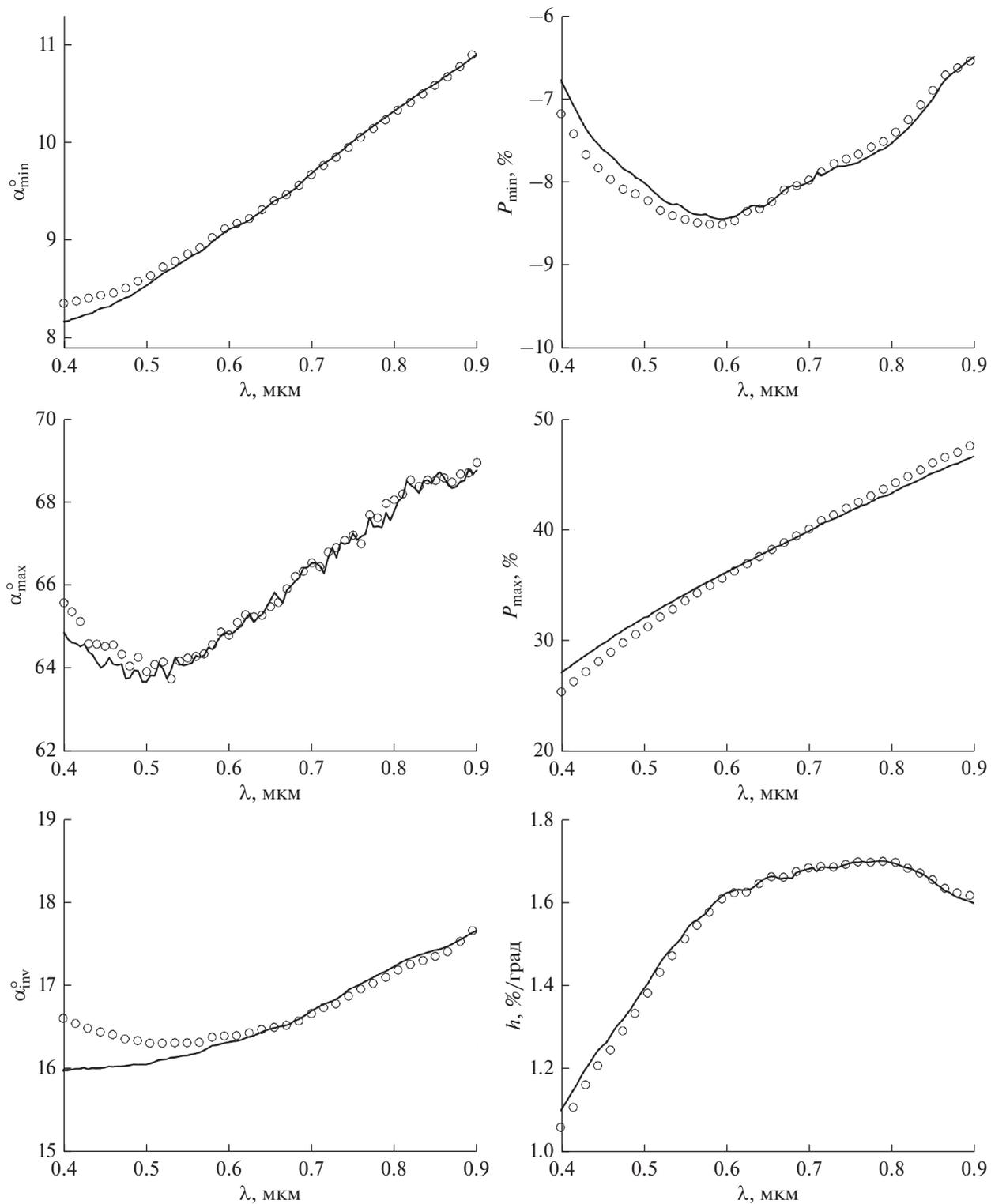


Рис. 14. Спектральные зависимости шести параметров фазовой зависимости степени линейной поляризации: α_{\min} , α_{\max} , α_{inv} , P_{\min} , P_{\max} , h с учетом спектральной зависимости показателя преломления (кружочки) и для фиксированного показателя преломления $m_0 = 1.3078$ (сплошные линии).

ля преломления более существенен в коротковолновом диапазоне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы исследовали спектральные зависимости рассеивающих свойств ледяных частиц в спектральном диапазоне от 0.4 до 0.9 мкм, где из-за крайне малых значений мнимой части показателя преломления доминирующее при неизменных размерах частиц влияние на рассеивающие свойства оказывает зависимость действительной части показателя преломления от длины волны. Подтверждено, что спектральные вариации показателя преломления приводят к существенным изменениям некоторых параметров фазовой зависимости степени линейной поляризации, особенно величины максимума положительной ветви. Показано, что неудачный выбор фиксированного показателя преломления в спектральном диапазоне от 0.4 до 0.9 мкм обязательно приводит к заметной разнице между кривыми, учитываемыми и не учитываемыми спектральную зависимость показателя преломления, как в случае интенсивности, так и в случае поляризации. Мы обнаружили, что в спектральной области от 0.4 до 0.9 мкм фиксированное значение показателя преломления $m_0 = 1.3078$ дает минимальную разность вышеописанных характеристик рассеяния света ледяными частицами. Также приведены наиболее подходящие значения фиксированного показателя преломления для известных фильтров R, V и I.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Республики Крым в рамках научного проекта № 18-42-910019\18.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Жужулина Е.А., Киселев Н.Н., Шаховской Д.Н.* Апертурная поляриметрия избранных комет в КрАО // Изв. Крым. астрофиз. obs. 2018. Т. 114. № 2. С. 37–39.
- Киселев Н.Н., Петров Д.В.* О погрешностях построения фазовых зависимостей поляризации излучения тел Солнечной системы // Астрон. вестн. 2018. Т. 52. № 3. С. 285–288. (*Kiselev N.N., Petrov D.V.* On Errors in Constructing the Polarization Phase Dependences for Solar System Bodies // *Sol. Syst. Res.* 2018. V. 52. № 3. P. 282–285.)
<https://doi.org/10.1134/S0038094618030073>
- Петров Д.В., Шкуратов Ю.Г., Станкевич Д.Г., Шевченко В.В., Козлова Е.А.* Площадь холодных ловушек на поверхности Луны // Астрон. вестн. 2003. Т. 37. № 4. С. 285–291. (*Petrov D.V., Shkuratov Y.G., Stankevich D.G., Shevchenko V.V., Kozlova E.A.* The Area of Cold Traps on the Lunar Surface // *Sol. Syst. Res.* 2003. V. 37. № 4. P. 260–265.)
<https://doi.org/10.1023/A:1025022130047>
- Петров Д.В., Киселев Н.Н.* Положительная ветвь поляризации астероидов: наблюдательные данные и компьютерное моделирование // Астрон. вестн. 2017. Т. 51. № 4. С. 297–302. (*Petrov D.V., Kiselev N.N.* Positive branch of asteroid polarization: Observational data and computer modeling // *Sol. Syst. Res.* 2017. V. 51. № 4. P. 271–276.)
<https://doi.org/10.1134/S0038094617040049>
- Петров Д.В., Киселев Н.Н., Жужулина Е.А.* Применение метода матриц формы для моделирования рассеивающих свойств пылевых частиц кометных атмосфер // Изв. Крым. астрофиз. obs. 2018. Т. 14. № 1. С. 64–69.
- Пугачева С.Г., Феоктистова Е.А., Шевченко В.В.* Отложения водяного льда на поверхности луны // Перспективы науки. 2015. № 10(73). С. 183–188.
- Anderson J.D., Jacobson R.A., McElrath T.P., Moore W.B., Schubert G., Thomas P.C.* Shape, mean radius, gravity field, and interior structure of Callisto // *Icarus.* 2001. V. 153. P. 157.
- Belskaya I.N., Bagnulo S., Barucci M.A., Muinonen K., Tozzi G.P., Fornasier S., Kolokolova L.* Polarimetry of Centaurs (2060) Chiron, (5145) Pholus and (10199) Chariklo // *Icarus.* 2010. V. 210. № 1. P. 472–479.
- Berger E.L., Zega T.J., Keller L.P., Lauretta D.S.* Evidence for aqueous activity on comet 81P/Wild 2 from sulfide mineral assemblages in Stardust samples and CI chondrites // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 2011. V. 75. № 12. P. 3501–3513.
- Capria M.T., Coradini A., De Sanctis M.C.* C/1995 O1 Hale–Bopp: Short and long distance activity from a theoretical model // *Earth, Moon, and Planets.* 2002. V. 90. P. 217–225.
- Dollfus A.* Étude des planètes par la polarisation de leur lumière // *Supplements Aux Annales d’Astrophysique.* 1957. V. 4. P. 3–114.
- Dougherty L.M., Geake J.E.* Polarization by frost formed at very low temperatures, as relevant to icy planetary surfaces // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 1994. V. 271. № 2. P. 343–354.
<https://doi.org/10.1093/mnras/271.2.343>
- Friedson A.J., Stevenson D.J.* Viscosity of ice-rock mixtures and applications to the evolution of icy satellites // *Icarus.* 1983. V. 56. P. 1–14.
- Gulkis S., Allen M., Backus C., Beaudin G., Biver N., Bockelee-Morvan D., Crovisier J., Despois D., Encrenaz P., Frerking M., Hofstadter M., Hartogh P., Ip W., Janssen M., Kamp L., Koch T., Lellouch E., Mann I., Muhleman D., Rauer H., Schloerb P., Spilker T.* Remote sensing of a comet at millimeter and submillimeter wavelengths from an orbiting spacecraft // *Planet. and Space Sci.* 2007. V. 55. № 9. P. 1050–1057.
- Hansen J.E., Travis L.D.* Light scattering in planetary atmospheres // *Space Sci. Rev.* 1974. V. 16. P. 527–610.
<https://doi.org/10.1007/BF00168069>
- Hussmann H., Sohl F., Spohn T.* Subsurface oceans and deep interiors of medium-sized outer planet satellites and large trans-neptunian objects // *Icarus.* 2006. V. 185. № 1. P. 258–273.
- Kelly R., Hall D.K.* Remote sensing of terrestrial snow and ice for global change studies // *Earth Observation of Global Change.* Dordrecht: Springer, 2008. P. 189–219.
https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6358-9_9
- Kossacki K.J.* Sublimation of cometary ices in the presence of organic volatiles II // *Icarus.* 2019. V. 319. P. 470–475.

- Kokolova L., Kimura H.* Comet dust as a mixture of aggregates and solid particles: Model consistent with ground-based and space-mission results // *Earth, Planets and Space*. 2010. V. 62. № 1. P. 17–21.
- Leroux C., Lenoble J., Brogniez G., Hovenier J.W., De Haan J.F.* A model for the bidirectional polarized reflectance of snow // *J. Quant. Spectroscopy and Radiative Transfer*. 1999. V. 61. № 3. P. 273–285.
- Ly Y., Sun Z.* The reflectance and negative polarization of light scattered from snow surfaces with different grain size in backward direction // *J. Quant. Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2014. V. 133. P. 472–481. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2013.09.010>
- Lyot B.* Recherches sur la polarisation de la lumière des planètes et de quelques substances terrestres. Paris. 1929.
- Mishchenko M.I., Travis L.D.* Light scattering by polydispersions of randomly oriented spheroids with sizes comparable to wavelengths of observation // *Appl. Opt.* 1994. V. 33. № 30. P. 7206–7225.
- Mishchenko M.I., Travis L.D., Mackowski D.W.* T-matrix computations of light scattering by nonspherical particles: A review // *J. Quant. Spectroscopy and Radiative Transfer*. 1996. V. 55. № 5. P. 535–575.
- Mishchenko M.I., Travis L.D., Lacis A.A.* Scattering, absorption, and emission of light by small particles. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2002. 690 p.
- Moore W.B.* Thermal equilibrium in Europa's ice shell // *Icarus*. 2006. V. 180. P. 141–146.
- Muononen K.* Light scattering by Gaussian random particles // *Earth, Moon, and Planets*. 1996a. V. 72. P. 339–342.
- Muononen K.* Light scattering by Gaussian random particles: Rayleigh and Rayleigh-Gans approximations // *J. Quant. Spectroscopy and Radiative Transfer*. 1996b. V. 55. № 5. P. 603–613. [https://doi.org/10.1016/0022-4073\(96\)00004-0](https://doi.org/10.1016/0022-4073(96)00004-0)
- Muononen K.* Introducing the Gaussian shape hypothesis for asteroids and comets // *Astron. and Astrophys.* 1998. V. 332. P. 1087–1098.
- Peltoniemi J., Hakala T., Suomalainen J., Puttonen E.* Polarized bidirectional reflectance factor measurements from soil, stones, and snow // *J. Quant. Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2009. V. 110. № 17. P. 1940–1953. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2009.04.008>
- Petrov D., Synelnyk E., Shkuratov Y., Videen G.* The T-matrix technique for calculations of scattering properties of ensembles of randomly oriented particles with different size // *J. Quant. Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2006a. V. 102. № 1. P. 85–110.
- Petrov D., Synelnyk E., Shkuratov Y.G., Videen G., Scotto C., Hart M., Eversole J.* Photopolarimetric properties of analytic models of some biological particles with irregular shape // *J. Quant. Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2006b. V. 102. № 1. P. 111–120.
- Petrov D., Shkuratov Yu.G., Videen G.* Sh-matrices method as applied to scattering by particles with layered structure // *J. Quant. Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2007. V. 106. № 1–3. P. 437–454.
- Petrov D., Shkuratov Yu.G., Videen G.* Influence of corrugation on light-scattering properties of capsule and finite-cylinder particles: Analytic solution using Sh-matrices // *J. Quant. Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2008. V. 109. № 4. P. 650–669.
- Petrov D., Shkuratov Yu.G., Videen G.* Light scattering by a finite cylinder containing a spherical cavity using Sh-matrices // *Optics Communications*. 2009. V. 282. № 2. P. 156–166.
- Petrov D., Shkuratov Yu.G., Videen G.* An analytical solution to the light scattering from cube-like particles using Sh-matrices // *J. Quant. Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2010. V. 111. № 3. P. 474–482.
- Petrov D., Shkuratov Y., Videen G.* Electromagnetic wave scattering from cuboid-like particles using Sh-matrices // *J. Quant. Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2011. V. 112. № 2. P. 155–162.
- Petrov D., Shkuratov Y., Videen G.* Light scattering by arbitrary shaped particles with rough surfaces: Sh-matrices approach // *J. Quant. Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2012. V. 113. № 18. P. 2406–2418.
- Petrov D., Kiselev N.* Computer simulation of position and maximum of linear polarization of asteroids // *J. Quant. Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2018. V. 204. № 18. P. 88–93.
- Prialnik D.* Crystallization, sublimation, and gas release in the interior of a porous comet nucleus // *Astrophys. J.* 1992. V. 388. P. 196–202.
- Price M.C., Kearsley A.T., Burchell M.J., Hörz F., Borg J., Bridges J.C., Cole M.J., Floss C., Graham G., Green S.F., Hoppe P., Leroux H., Marhas K.K., Park N., Stroud R., Stadermann F.J., Telisch N., Wozniakiewicz P.J.* Comet 81P/Wild 2: The size distribution of finer (sub-10 μ m) dust collected by the Stardust spacecraft // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2010. V. 45. P. 1409–1428.
- Schubert G., Anderson J.D., Spohn T., McKinnon W.B.* Interior composition, structure and dynamics of the Galilean satellites // *Jupiter: The planet, satellites and magnetosphere* / Eds Bagenal F., Dowling T., McKinnon W.B. Cambridge Univ. Press, 2004. P. 281–306.
- Scully J.E.C., Buczkowski D.L., Neesemann A., Williams D.A., Mest S.C., Raymond C.A., Nass A., Hughson K.H.G., Kneissl T., Pasckert J.H., Ruesch O., Frigeri A., Marchi S., Combe J-P., Schmedemann N., Schmidt B.E., Chilton H.T., Russell C.T., Jaumann R., Preusker F., Roatsch T., Hoffmann M., Nathues A., Schaefer M., Ermakov A.I.* Ceres' Ezinu quadrangle: A heavily cratered region with evidence for localized subsurface water ice and the context of Occator crater // *Icarus*. 2018. V. 316. P. 46–62.
- Shkuratov Yu.G., Ovcharenko A.A.* Polarization of light scattered by surfaces with complex microstructure at phase angles 0.1°–3.5° // *Sol. Syst. Res.* 2002. V. 36. № 1. P. 62–67.
- Shkuratov Yu., Bondarenko S., Kaydash V., Videen G., Muñoz O., Volten H.* Photometry and polarimetry of particulate surfaces and aerosol particles over a wide range of phase angles // *J. Quant. Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2007. V. 106. № 1–3. P. 487–508. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2007.01.031>

- Stubbs T.J., Wang Y.* Illumination conditions at the Asteroid 4 Vesta: Implications for the presence of water ice // *Icarus*. 2012. V. 217. № 1. P. 272–276.
- Sun Z., Zhao Y.* The effects of grain size on bidirectional polarized reflectance factor measurements of snow // *J. Quant. Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2011. V. 112. № 14. P. 2372–2383.
<https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2011.05.011>
- Sunshine J.M., Groussin O., Schultz P.H., A'Hearn M.F., Feaga L.M., Farnham T.L., Klaasen K.P.* The distribution of water ice in the interior of Comet Tempel 1 // *Icarus*. 2007. V. 190. № 2. P. 284–294.
- Tanikawa T., Hori M., Aoki T., Hachikubo A., Kuchiki K., Niwano M., Matoba S., Yamaguchi S., Stamnes K.* In situ measurements of polarization properties of snow surface under the Brewster geometry in Hokkaido, Japan, and northwest Greenland ice sheet // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2014. V. 119. P. 13946–13964.
- Volten H., Muñoz O., Rol E., deHaan J.F., Vassen W., Hovenier J.W., Muinonen K., Nousiainen T.* Scattering matrices of mineral aerosol particles at 441.6 nm and 632.8 nm // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106(D15). P. 17375–17401.
<https://doi.org/10.1029/2001JD900068>
- Warren S.G.* Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave // *Applied Optics*. 1984. V. 23. № 8. P. 1206–1225.
- 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. P. D14220.
<https://doi.org/10.1029/2007JD009744>
- Waterman P.C.* Numerical solution of electromagnetic scattering problems // *Computer Techniques for Electromagnetics*. Pergamon Press, 1973. P. 97–157.