

УДК 523.64

## МОДЕЛЬ СОПРЯЖЕННЫХ СЛУЧАЙНЫХ ГАУССОВСКИХ ЧАСТИЦ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ КОМЕТ

© 2019 г. Д. В. Петров<sup>а</sup>, \*, Н. Н. Киселев<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Крымская астрофизическая обсерватория РАН (КрАО РАН), Крым, Россия

\*e-mail: [dvp@crao.crimea.ru](mailto:dvp@crao.crimea.ru)

Поступила в редакцию 20.12.2017 г.

После доработки 09.11.2018 г.

Принята к публикации 22.01.2019 г.

Предложена модель сопряженных случайных гауссовских частиц, удобных для моделирования неправильных частиц, составляющих кометную пыль. Проведено компьютерное моделирование поляриметрических свойств таких частиц, вычислены фазовые зависимости степени линейной поляризации. На основании расчетов произведена интерпретация поляриметрических наблюдений комет, определены их возможные физико-химические характеристики и диапазон их изменений, в пределах которого модель способна описывать наблюдаемые данные. На основании модельных расчетов предложено уточнение эмпирической формулы, описывающей фазовую зависимость степени линейной поляризации континуума комет.

**Ключевые слова:** кометы, поляриметрия, фазовая зависимость поляризации, случайные гауссовские частицы, матрицы формы, компьютерное моделирование

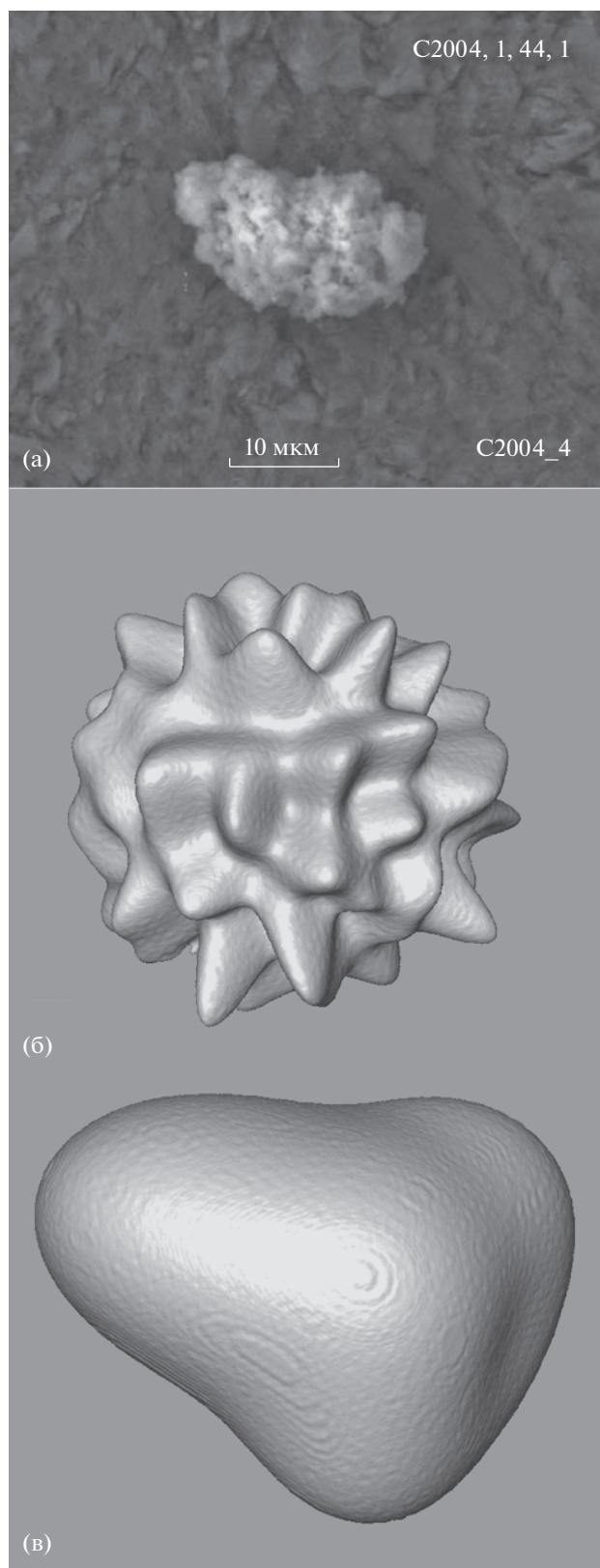
**DOI:** 10.1134/S0320930X19040078

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается значительный интерес к анализу рассеивающих свойств кометной пыли. Это связано с большим объемом наблюдательных данных по поляриметрии комет, полученных в последние годы по наземным наблюдениям (Kiselev и др., 2017), и новых данных о свойствах кометных пылинок, полученных космическими миссиями Stardust (Kearsley и др., 2008), Rosetta (Mergouane и др., 2016). Имеющиеся данные свидетельствуют, что кометная пыль состоит из частиц весьма неправильной формы. На рис. 1а приведена фотография частицы кометной пыли кометы, взятая из работы (Rietmeijer и др., 2008). Поэтому задачи моделирование рассеивающих свойств частиц сложной формы в настоящее время весьма актуальны и достаточно широко распространены (Kimura и др., 2003; Zubko и др., 2005; 2006; 2013; Dubovik и др., 2006, Bertini и др., 2007; Petrova и др., 2008; Lasue и др., 2009; Shen и др., 2009). К сожалению, достаточно точное моделирование таких частиц сталкивается со вполне очевидными трудностями, которые заключаются как в сложности математического описания неправильных частиц, так и в необходимости значительных затрат компьютерного времени для вычисления их рассеивающих свойств. Зачастую исследователи обходят эти сложности, от-

казываясь от рассмотрения неправильных частиц, представляя рассеивающие объекты в виде полидисперсного набора частиц правильной формы, таких как сфероиды (Kolokolova и др., 2005; Moreno и др., 2007; Voshchinnikov, Das, 2008; Lumme, Penttilä, 2011). При аппроксимации рассеивающих свойств аэрозолей в земной атмосфере этот подход дает великолепные результаты, очень хорошо описывая не только фотометрические, но и поляриметрические наблюдения (Mishchenko и др., 1997). Однако попытки при помощи данного подхода интерпретировать рассеивающие свойства кометной пыли, как правило, оказываются неудачны, особенно в случаях, когда проводится одновременное рассмотрение как фазовых, так и спектральных характеристик (Kolokolova и др., 2005).

Также в последнее время достигнуты успехи модели шероховатых сфероидов (Kolokolova и др., 2015), хотя использованная в данной работе модель не в состоянии количественно воспроизвести фазовую зависимость поляризации в комете Галлея. Конечно, светорассеивающие свойства комет моделируются не только сфероидами. Нельзя не упомянуть также прогресс, достигнутый в моделировании вполне реалистичными формами частиц, который представлен в следующих работах (Zubko и др., 2012; 2015; 2016; 2017).



**Рис. 1.** (а) — Фотография частицы кометной пыли кометы 81P/Wild 2, взятая из работы (Rietmeijer и др., 2008); (б) — случайная гауссовская частица с корреляционным углом  $\Gamma = 7^\circ$ ; (в) — случайная гауссовская частица с корреляционным углом  $\Gamma = 50^\circ$ .

Также должен быть отмечен подход, в рамках которого создаются частицы очень неправильной формы с использованием вспомогательного случайного гауссовского поля (Stankevich и др., 2003; Grynko и др., 2003; 2013; 2016).

Один из наиболее удачных способов математического описания частиц сугубо неправильной формы предложил Muinonen (1996), создав математическую модель гауссовских (или логнормальных) неправильных частиц. Меняя параметры модели частицы, можно менять форму частицы. Примеры таких частиц, соответствующих различным параметрам, приведены на рис. 1б и 1в. Из рисунков непосредственно видно отличие модельных частиц от реальной частицы — модельная частица на рис. 1в хорошо описывает макрорельеф поверхности, но, в отличие от реальной частицы кометной пыли, ее поверхность совершенно гладкая на малых масштабах. В то же время, модельная частица на рис. 1б хорошо описывает неровности микромасштаба, однако на макромасштабе она не является вытянутой, представляя собой по сути сферу со “взволнованной” поверхностью. Muinonen и Saariinen (2000) попытались решить и эту проблему, предложив модели частиц под названием “случайные гауссовские цилиндры”, которые можно делать сколь угодно вытянутыми. Однако такие модели не получили широкого распространения, потому что у случайных гауссовских цилиндров поперечное сечение вдоль их оси остается в достаточной степени постоянным, тогда как у реальных частиц кометной пыли оно плавно уменьшается по мере приближения к краю частицы.

В данной работе мы предлагаем базирующуюся на модели Muinonen и Saariinen новую модель случайных частиц, которая лишена вышеописанных недостатков. Кроме того, мы применим эту модель к интерпретации имеющихся поляриметрических данных комет.

### СОПРЯЖЕННЫЕ ГАУССОВСКИЕ СЛУЧАЙНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Случайные гауссовские частицы (иногда именуемые в литературе “случайные гауссовские сферы”) подробно описаны в работах Muinonen (1996; 1998). Размер и форма гауссовой сферы определяются средним радиусом и логарифмом радиуса частицы в сферической системе координат  $R(\theta, \varphi)$ . Логарифм радиуса частицы описывается как разложение в ряд по присоединенным полиномам Лежандра с неотрицательными коэффициентами. Для каждого члена разложения эти коэффициенты представляют собой спектральные веса соответствующих компонент сферических гармоник. Изменение спектра в сторону увеличения количества более высоких гармоник будет со-

ответствовать случайной гауссовской частице с большим количеством впадин и выпуклостей. Более подробно случайные статистические формы описаны в работе (Stoyan, Stoyan, 1994).

Математически случайная гауссовская частица описывается формулой:

$$R(\theta, \varphi) = R_0 \exp \left[ s(\theta, \varphi) - \frac{1}{2} \beta^2 \right], \quad (1)$$

где  $R_0$  – среднее значение радиуса частицы, а  $\beta$  – стандартное отклонение логарифма радиуса. Функция  $s(\theta, \varphi)$  представляет собой разложение в ряд по присоединенным функциям Лежандра  $P_l^m(z)$ :

$$s(\theta, \varphi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l P_l^m(\cos \theta) [a_{l,m} \cos(m\varphi) + b_{l,m} \sin(m\varphi)], \quad (2)$$

где  $a_{l,m}$  и  $b_{l,m}$  – случайные величины, распределенные по нормальному закону с дисперсией  $\sigma_{l,m}^2$ :

$$\sigma_{l,m}^2 = c_l \sigma^2 \frac{(l-m)!}{(l+m)!}, \quad (3)$$

$$\sigma^2 = \lg(1 + \beta^2), \quad (4)$$

$$c_l = (2l+1) \exp(-\kappa) \sqrt{\frac{\pi}{2\kappa}} I_{l+\frac{1}{2}}(\kappa), \quad (5)$$

где  $I_l(z)$  – модифицированная функция Бесселя первого рода (функция Инфельда) и

$$\kappa = \frac{1}{4 \sin^2 \left( \frac{\Gamma}{2} \right)}. \quad (6)$$

Величина  $\Gamma$  носит название “корреляционный угол”, и меняется в пределах от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ , являясь мерой “взволнованности” поверхности частицы. При  $\Gamma = 90^\circ$  частица превращается в сферу, по мере уменьшения  $\Gamma$  на поверхности частицы увеличивается количество “волн”. Частица на рис. 16 соответствует корреляционному углу  $\Gamma = 7^\circ$ , для частицы на рис. 1в –  $\Gamma = 50^\circ$ .

Введем обозначение для функции, описывающей радиус частицы с корреляционным углом  $\Gamma$ , в виде  $R_\Gamma(\theta, \varphi)$ . В этом случае мы можем получить новую функцию, описывающую новый тип частиц, путем простого сложения функций с различными значениями  $\Gamma$ :

$$R(\theta, \varphi) = p R_{\Gamma_1}(\theta, \varphi) + (1-p) R_{\Gamma_2}(\theta, \varphi). \quad (7)$$

Здесь  $p$  – величина, которая меняется от 0 до 1 и описывает долю вклада частицы с корреляционным углом  $\Gamma_1$  в результирующую частицу. Такие частицы можно назвать “сопряженными

гауссовыми случайными частицами” (СГСЧ), и для краткости описывать в виде  $G_{\Gamma_1}^{\Gamma_2}(p)$ . На рис. 2 изображены примеры частиц  $G_{50}^7(p)$ , при изменении параметра  $p$  от 0.1 до 0.9. Особое внимание уделим частице  $G_{50}^7(0.5)$ , которая соответствует своеобразному “усреднению” частиц, показанных на рис. 1б и 1в. На рис. 2 хорошо видно, что частица  $G_{50}^7(0.5)$  сочетает в себе достоинства обоих типов частиц – она достаточно вытянута, но при этом обладает не гладкой, “взволнованной” поверхностью.

### РАССЕЯНИЕ СВЕТА СОПРЯЖЕННЫМИ СЛУЧАЙНЫМИ ГАУССОВСКИМИ ЧАСТИЦАМИ

Для компьютерного моделирования рассеяния электромагнитного излучения несферическими частицами часто используется метод Т-матриц в его различных модификациях (Mishchenko и др., 1994; 1996; 2002). Суть этого метода, разработанного Waterman (1973), состоит в разложении рассеянного частицей электромагнитного излучения в ряд по векторным сферическим волновым функциям, и дальнейшем вычислении коэффициентов разложения. В данной работе для моделирования рассеивающих свойств использована модификация метода Т-матриц, именуемая методом матриц формы, или же *Sh*-матриц (Petrov и др., 2006; 2011; 2012).

Частицы можно охарактеризовать комплексным показателем преломления  $m_0 = m_r + im_i$  и размерным параметром  $X = 2\pi r/\lambda$ , где  $r$  – характерный размер частицы,  $\lambda$  – длина волны падающего света. Возникает интересный вопрос – чем же отличается рассеяние излучения частицами различных типов, как зависят поляризационные характеристики частиц от их формы? В ограниченной форме на него уже даны ответы в работах (Muirpopen и др., 2007; Zubko и др., 2007). Для исследования данного вопроса нами были проведены расчеты рассеивающих свойств для показателя преломления водяного льда  $m_2 = 1.313 + i0$ . На рис. 3 приведены карты распределения степени поляризации для трех типов частиц. По оси абсцисс отложен фазовый угол, а по оси ординат – размерный параметр частицы. Шкалы степени поляризации приведены с правой стороны каждого рисунка. Темные участки соответствуют отрицательным значениям степени поляризации, светлые – положительным значениям. Отметим здесь, что фазовый угол лежит в плоскости рассеяния (плоскость, проходящая через Солнце, объект исследования и наблюдателя) и является углом между направлениями Солнце–объект (частица), объект (частица)–наблюдатель. Математически

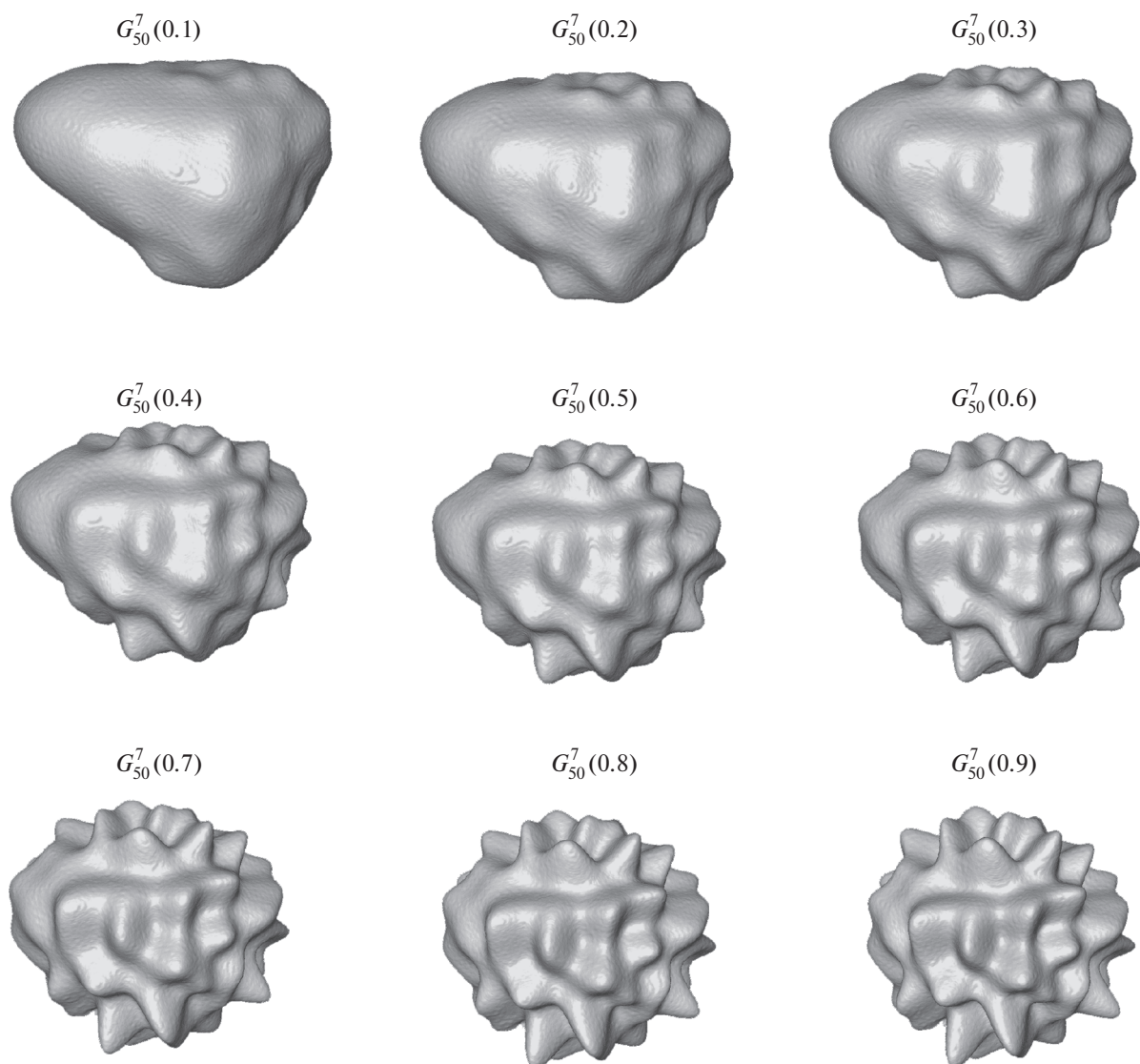


Рис. 2. Примеры сопряженных случайных гауссовских частиц от  $G_{50}^7(0.1)$  до  $G_{50}^7(0.9)$ .

степень линейной поляризации описывается отношением:

$$P = \frac{I_{\perp} - I_{\parallel}}{I_{\perp} + I_{\parallel}}, \quad (8)$$

где  $I_{\parallel}$  — интенсивность света в плоскости рассеяния, а  $I_{\perp}$  — интенсивность света в плоскости, перпендикулярной плоскости рассеяния.

В соответствии с выражением (8) степень поляризации формально может быть отрицательной, если преимущественное направление колебаний электрического вектора лежит в плоскости рассеяния ( $I_{\parallel} > I_{\perp}$ ) и положительной, если ( $I_{\parallel} < I_{\perp}$ ).

Рисунок 3а соответствует частице  $G_{50}^7(1.0)$ , изображенной на рис. 1в. Это достаточно вытяну-

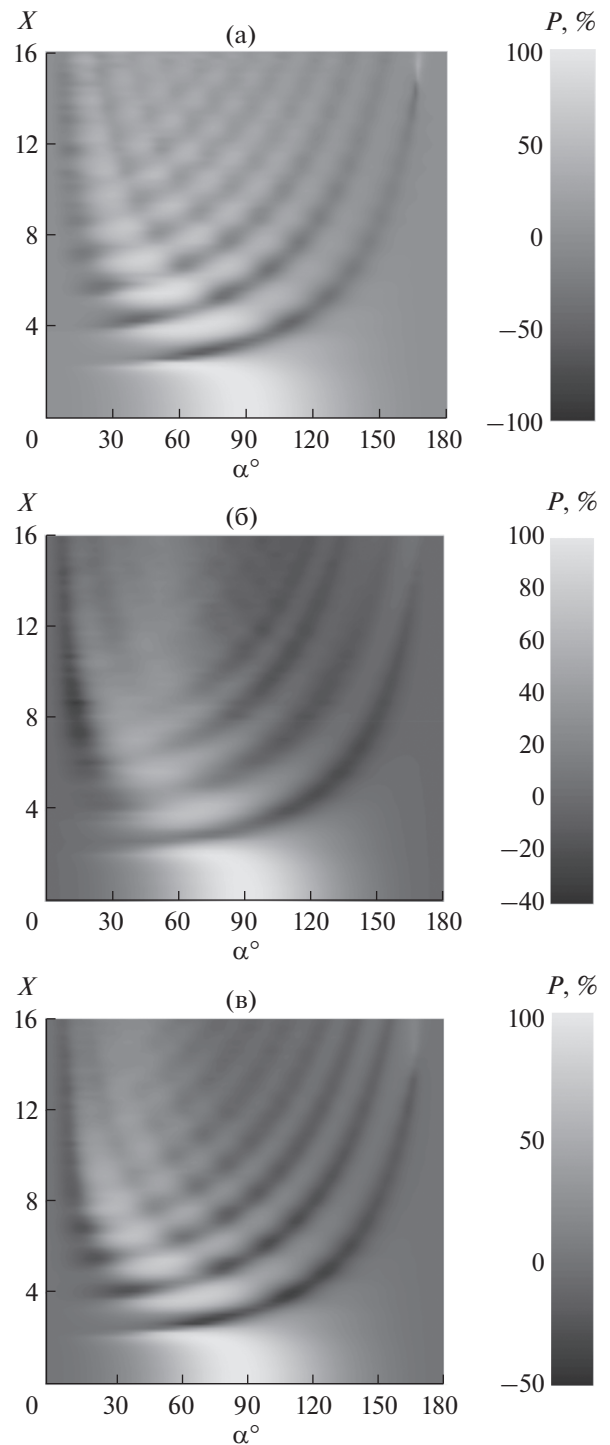
тая частица, весьма неправильной формы, но с гладкой поверхностью. И в рассеянии эта гладкость проявляется в виде большого количества колебаний значений степени линейной поляризации, причем в достаточно широком диапазоне — практически от  $-100$  до  $+100\%$ . Кроме того, отрицательная поляризация на малых фазовых углах для частиц этого типа почти не видна, она существует лишь для некоторых отдельных значений размерного параметра. Поскольку для реальных небесных тел такой картины не наблюдается, можно сделать вывод, что реальные частицы имеют намного более неправильную форму.

Рисунок 3б соответствует частице  $G_{50}^7(0.0)$ , изображенной на рис. 1б. Это частица с очень большим количеством неровностей на поверхности. В свойствах рассеянного излучения это про-

является в виде уменьшения колебаний степени поляризации и сильном проявлении отрицательной степени поляризации в большом диапазоне размерных параметров. Степень поляризации достигает  $-40\%$ , что значительно больше, чем реально наблюдается в кометах. Тем не менее такая форма частиц намного ближе к реальности по сравнению с часто используемыми в интерпретациях наблюдений правильными частицами, такими как сферы и сфероиды.

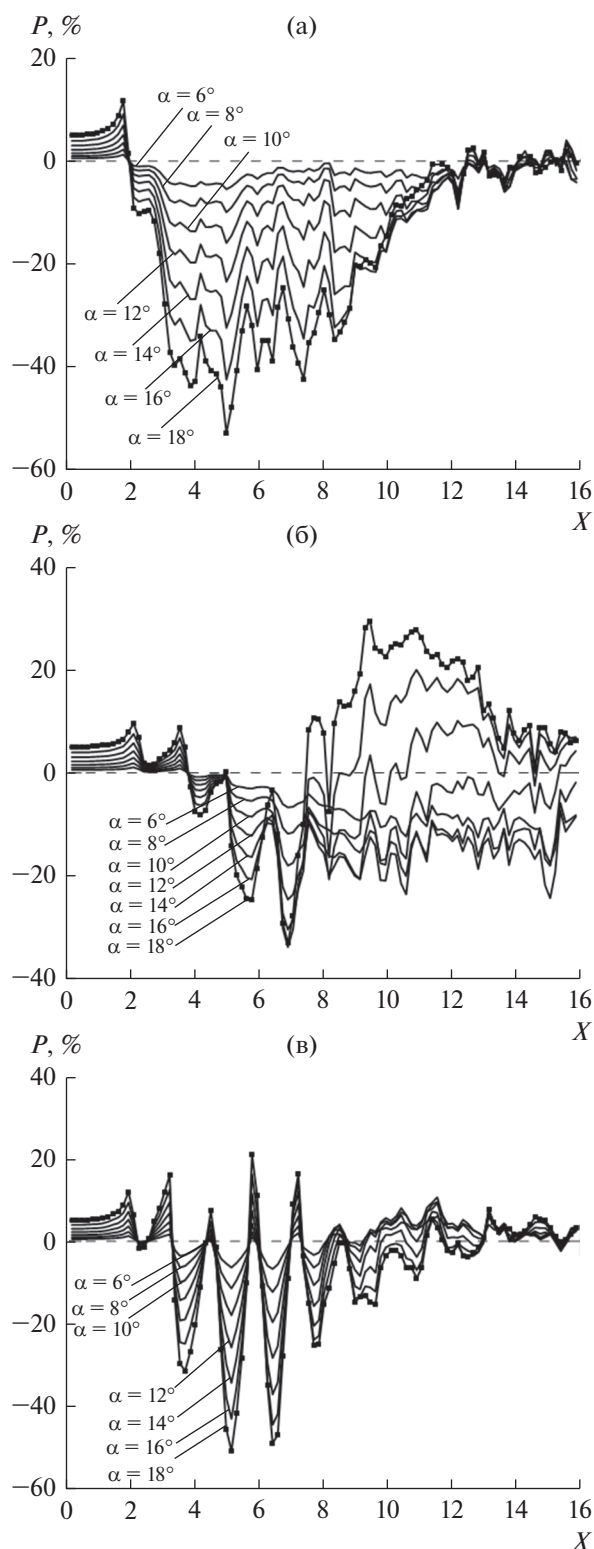
И, наконец, рис. 3в соответствует сопряженной случайной гауссовской частице  $G_{50}^7(0.5)$ , изображенной на рис. 2. Картина распределения степени поляризации для этих частиц выглядит промежуточной между предыдущими двумя случаями – отрицательная поляризация существует, но ее глубина намного меньше, около  $-10\%$ . Колебания степени поляризации присутствуют и на больших фазовых углах, что говорит о необходимости дополнительного усреднения рассеивающих характеристик частиц, например по размерам. Далее мы изучим рассеивающие свойства сопряженных случайных гауссовских частиц более подробно. Рассмотрим три типа сопряженных случайных гауссовских частиц, соответствующих трем значениям показателя преломления. Первый из них – силикатный минерал форстерит, который, обнаружен в кометах. Показатель преломления форстерита на длине волны  $\lambda = 650$  нм равен  $m_1 = 1.677 + i0.0044$  (Dorschner и др., 1995). Второй – водяной лед с показателем преломления  $m_2 = 1.313 + i0$  (Warren, 1984). Третий показатель преломления соответствует органическому материалу и равен  $m_3 = 1.5 + i0.1$  (Jenniskens, 1993).

На рис. 4 показаны зависимости степени линейной поляризации рассеянного света от размерного параметра рассеивающих частиц для набора фазовых углов. Рисунок 4а соответствует показателю преломления форстерита  $m_1$ , рис. 4б – показателю преломления водяного льда  $m_2$ , рис. 4в – показателю преломления органики. Как видно из рисунка, при малых размерных параметрах  $X < 2$  доминирует рэлеевское рассеяние, при котором поляризация положительна и практически одинакова для всех трех типов вещества. Однако с увеличением размера наблюдаются принципиальные различия в степени поляризации. Для форстерита степень поляризации отрицательна в достаточно широком диапазоне размерных параметров  $2 < X < 12$ , а при больших размерах практически (в пределах нескольких процентов) не отличается от нуля. Таким образом, модельные частицы достаточно больших размеров, состоящие из форстерита, не могут воспроизвести высокую степень поляризации на больших фазовых углах, наблюдаемую у комет и других тел Солнечной системы (см. следующий раздел). Органика же показывает довольно сильные осцилляции степени линейной поляризации, что также не соответствует реальной картине наблюдательных данных. В свою



**Рис. 3.** Карты поляризации водяного льда для трех типов частиц: (а) – частица  $G_{50}^7(1.0)$ , (б) – частица  $G_{50}^7(0.0)$ , (в) – частица  $G_{50}^7(0.5)$ .

очередь, для водяного льда при больших размерах частиц положительная поляризация рассеянного света доминирует при фазовых углах  $\alpha > 14^\circ$ . Таким образом, ветвь отрицательной поляризации



**Рис. 4.** Зависимости степени линейной поляризации рассеянного света от размерного параметра частиц для набора фазовых углов: (а) — для показателя преломления форстерита  $m_1 = 1.677 + i0.0044$ , (б) — для показателя преломления водяного льда  $m_2 = 1.313 + i0$ , (в) — для показателя преломления органики  $m_3 = 1.5 + i0.1$ .

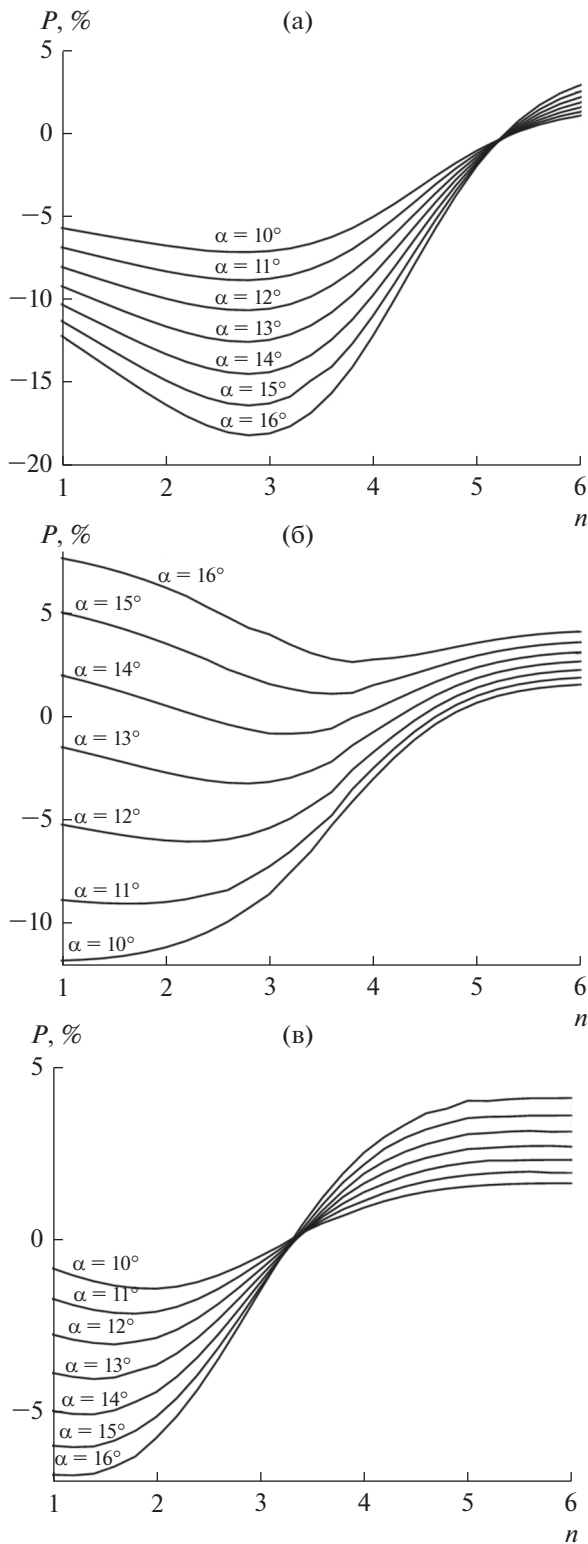
для водяного льда существуют в меньшем диапазоне фазовых углов, чем у большинства реально наблюдаемых объектов.

Поскольку наблюдаемые космические объекты, как правило, состоят из частиц различных размеров, то для интерпретации наблюдательных данных необходимо провести усреднение по размерам. Наиболее распространено степенное усреднение, когда вклад в рассеяние от частиц различных размеров учитывается с весовым множителем  $X^{-n}$ , где  $n$  — показатель степени, показывающий, насколько быстро убывает количество частиц при увеличении их размера. На рис. 5 представлены зависимости степени линейной поляризации для набора фазовых углов, при усреднении характеристик рассеяния по размерам в диапазоне размерных параметров от 0.2 до 16, от показателя степени  $n$ . Рисунок 5а соответствует форстериту, рис. 5б — водяному льду, рис. 5в — органике. Из рисунков видно, что для форстерита только узкий диапазон относительно высоких значений  $n$  способен дать положительные значения линейной поляризации. Очевидно, при столь высоких значениях  $n$  основную роль играют маленькие, рэлеевские частицы. В случае же водяного льда картина обратная — начиная с фазового угла  $\alpha > 14^\circ$ , значения степени линейной поляризации не опускаются ниже нуля. Зато частицы, составленные из органики, для разных  $n$  способны демонстрировать как положительные, так и отрицательные значения поляризации на данном фазовом угле.

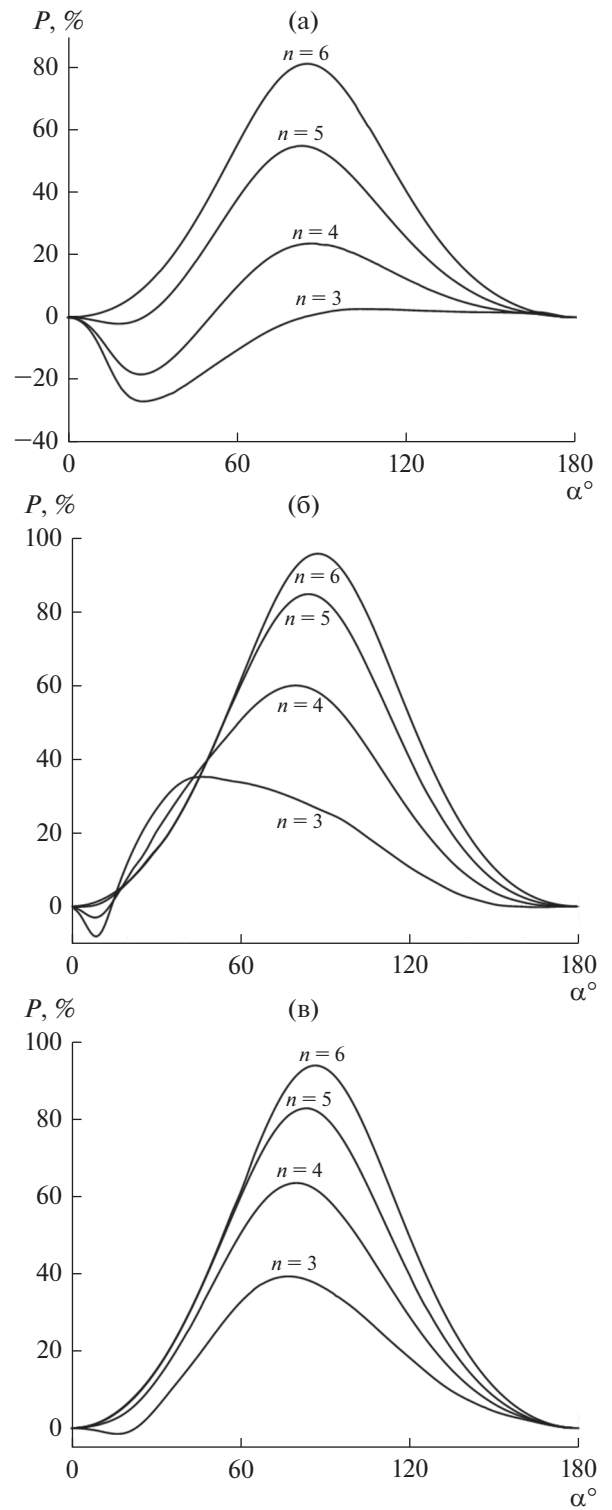
Рассмотрим фазовые зависимости степени линейной поляризации, соответствующие диапазону размерных параметров от 0.2 до 16, показателям преломления трех типов вещества и разным  $n$  (рис. 6). Рисунок 6а, соответствующий форстериту, демонстрирует присущие данному минералу особенности — такие как очень широкая ветвь отрицательной поляризации и преобладание отрицательной поляризации при малых значениях  $n$ . В то же самое время ледяные частицы (рис. 6б) демонстрируют весьма узкий и неглубокий пик отрицательной поляризации, однако значения максимума положительной поляризации для этих частиц оказываются слишком большими. Что же касается органики (рис. 6в), она проявляет более широкую ветвь отрицательной поляризации, чем водяной лед, однако эта ветвь несколько меньше, чем в случае силикатов.

Следует отметить, что вывод о невозможности воспроизведения фазовой зависимости степени линейной поляризации у комет с помощью одного типа вещества был сделан ранее в работе (Zubko и др., 2014). Также в этой работе обосновывается необходимость использования как минимум двухкомпонентной смеси.

Подводя итоги, мы можем подтвердить выше процитированный вывод о том, что для интерпретации наблюдательных данных затруднительно



**Рис. 5.** Зависимости степени линейной поляризации при степенном усреднении частиц с размерными параметрами от 0.2 до 16, для набора фазовых углов от показателя степени  $n$ : (а) – форстерит, (б) – водяной лед, (в) – органика.



**Рис. 6.** Фазовые зависимости степени линейной поляризации при степенном усреднении частиц с размерными параметрами от 0.2 до 16, соответствующие данным трем типам вещества: (а) – форстерит; (б) – водяной лед; (в) – органика, при разных показателях степени степенного усреднения  $n$ .

но использовать модели частиц, состоящих из вещества различного типа, по отдельности. Однако вполне возможно допустить наличие их смеси, что вполне подтверждается данными других исследователей (Bertaux, Lallement, 2017).

### ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ФАЗОВОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ ПЫЛИ КОМЕТ

Как известно, для комет характерны сложные спектры, состоящие из множества эмиссий нейтральных молекул, ионов, отдельных атомов и континуума (Добровольский, 1986; Шульман, 1972). Условно кометы можно разделить на “газовые” и “пылевые”. У первых наблюдаются сильные эмиссионные полосы и слабые континуумы, у вторых – эмиссии наблюдаются на фоне сильного непрерывного спектра. Как было показано еще Öman (1941) поляризация континуума комет возникает в результате рассеяния солнечного излучения на пылевых частицах комет. В то время как за поляризацию молекулярных эмиссий ответственен механизм резонансной флуоресценции. Фазовые зависимости поляризации континуума комет и газовых эмиссий принципиально различны. Поляризация излучения молекул CN и C<sub>2</sub> в кометах положительна на всем диапазоне фазовых углов. Излучение, рассеянное на френелевской поверхности и рэлеевских частицах, также всегда поляризовано положительно. Излучение, рассеянное на пылевых частицах комет, отрицательно поляризовано на малых фазовых углах ( $\alpha \leq 22^\circ$ ) (Kiselev и др., 2015 и ссылки там же). Отметим также, что максимальная степень поляризации наиболее ярких кометных эмиссий CN и C<sub>2</sub>, находящихся в видимой области спектра, составляет 7.7% и лежит на фазовом угле  $90^\circ$  (Le Borgne и др., 1987). Максимальная степень поляризации континуума комет заключена в пределах от  $\approx 10$ –25% (для газовых комет) до  $\approx 30\%$  (для пылевых комет). Существует несколько точек зрения на объяснение значительного различия степени поляризации комет на больших фазовых углах (Kiselev и др., 2015 и ссылки там же).

Для интерпретации фазовой зависимости поляризации пыли комет мы использовали выборку результатов наблюдений из Поляриметрической базы данных комет (Kiselev и др., 2017). На основании множества наблюдений комет, у которых наблюдался сильный непрерывный спектр, была получена синтетическая фазовая зависимость поляризации для “красной” области спектра  $\lambda \approx (6840 \pm 100 \text{ \AA})$ , где деполяризующее влияние молекулярных эмиссий незначительное или отсутствует полностью (рис. 7). Рассеяние точек на рисунке вызывается рядом причин: ошибками измерений, различием размеров наблюдаемой области комы, оцененных с фильтрами, используемыми для выделения континуума комет, сво-

бодного от влияния газовых эмиссий и, возможно, с разными свойствами пыли разных комет.

Для аппроксимации фазовых зависимостей поляризации достаточно часто используется тригонометрическое выражение:

$$P(\alpha) = b(\sin\alpha)^{c1}[\cos(\alpha/2)]^{c2}\sin(\alpha - \alpha_{inv}), \quad (9)$$

где  $b$ ,  $c1$ ,  $c2$  и  $\alpha_{inv}$  являются свободными параметрами (Lumme, Muinonen, 1993). Это эмпирическое соотношение достаточно точно описывает реальный ход наблюдательных данных, однако оно обладает недостатком, состоящим в том, что, за исключением параметра  $\alpha_{inv}$ , характеризующего угол инверсии, параметры  $b$ ,  $c1$ ,  $c2$  и  $\alpha_{inv}$  не имеют четко определяемого физического смысла, и потому их определение не дает информации о возможных физико-химических характеристиках частиц кометной пыли, в то время как попытки интерпретации наблюдательных данных путем компьютерного моделирования рассеяния света частицами различного химического состава такую информацию способны предоставить.

Построенная нами синтетическая фазовая зависимость поляризации выбранных комет аппроксимируется следующим выражением:

$$P(\alpha) = 33.007(\sin \alpha)^{0.859}[\cos(\alpha/2)]^{0.372}\sin(\alpha - 22^\circ). \quad (10)$$

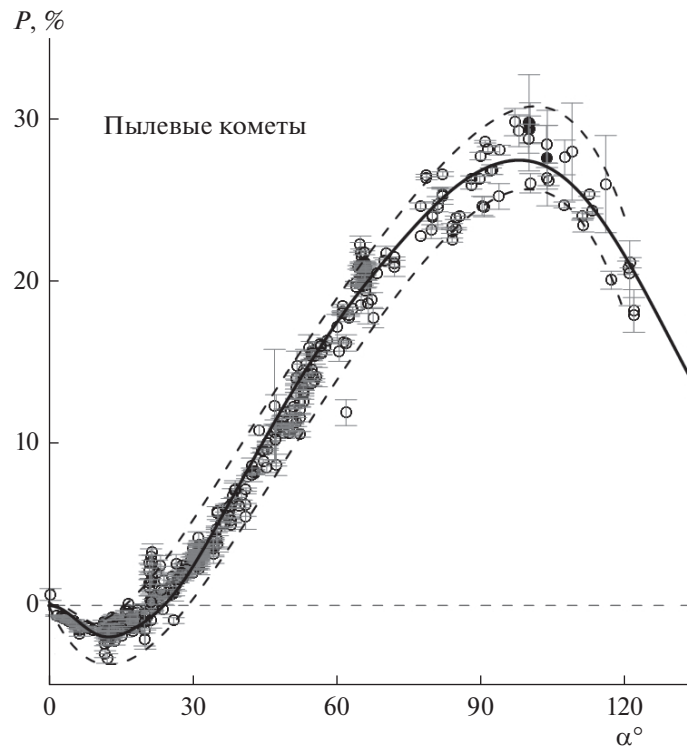
На рис. 7 линиями представлены результаты моделирования синтетической фазовой зависимости поляризации избранных комет. Сплошная линия соответствует наилучшему приближению, достигнутому путем подбора параметров модельных частиц кометной пыли – таких как минимальный и максимальный размерный параметр  $X_{min}$  и  $X_{max}$ , показатель степени степенного усреднения  $n$ , и  $\xi$  – относительное содержание частиц одного из трех типов (водяной лед, силикат и органика) в составе кометной пыли. Используемые для моделирования параметры приведены в табл. 1.

Заметим, что силикатов и органики в кометах примерно поровну, а вот водяного льда примерно вдвое меньше, чем каждого из этих компонентов.

Следует отметить, что понятие “лед” можно толковать расширенно – как некое вещество с относительно низкими значениями действительной части показателя преломления и околонулевыми значениями его мнимой части. Таковыми могут быть, например, частицы с пористой структурой, присутствующие в кометах (Li, Greenberg, 1998; Kolokolova и др., 2007).

Следует также отметить, что показатели степени  $n$ , при которых достигается соответствие наблюдениям, не вполне согласуются с данными космических исследований комет. Так, согласно данным ВеГа-1, -2 по комете 1P/Галлея, показатель степени субмикронных и микронных частиц находится в диапазоне  $1.5 < n < 3$  (Mazets и др.,





**Рис. 7.** Синтетическая фазовая зависимость поляризации различных комет (кружочки) для красной области спектра. Сплошная линия соответствует наилучшему приближению, достигнутому путем подбора параметров модельных частиц кометной пыли (табл. 1). Пунктирные кривые описывают верхний и нижний предел изменений степени поляризации и представляют собой аппроксимацию полиномом 5-го порядка соответственно нижних и верхних значений поляризации в каждом интервале фазовых углов с шагом 5°.

1986). По данным КА Stardust в комете 81P/Вильд  $n = 2.89$  (Price и др., 2010).

Кроме того, при высоких показателях степени,  $n > 4.5$ , кометная пыль, вероятнее всего, имеет “синий” цвет (см. обсуждения в Zubko и др., 2015). Так что мы опасаемся, что данная модель подразумевает синий цвет пыли комет с высоким  $P_{max}$ .

Эти несоответствия могут быть объяснены недоучетом вклада больших частиц, не включенных в наши расчеты, и является предметом дальнейших исследований.

Однако было бы опрометчиво полагать, что химический состав всех наблюдаемых комет одинаков. Потому мы задались вопросом, в каких пределах способно меняться относительное содержание каждого из компонентов в различных кометах. Для этого мы задались нижней и верхней границами значений степени линейной поляризации для каждого фазового угла, получив две кривые, обозначенные пунктиром на рис. 7, и представляющие собой аппроксимацию полиномом 5-го порядка соответственно нижних и верхних значений поляризации в каждом интервале фазовых углов с шагом 5°. Далее мы меняли содержание каждого из компонентов таким образом, чтобы кривая поляризации находилась в пределах между верхней и нижней границами, а в сумме их содержание составляло 100% (при неиз-

менности остальных параметров, указанных в табл. 1).

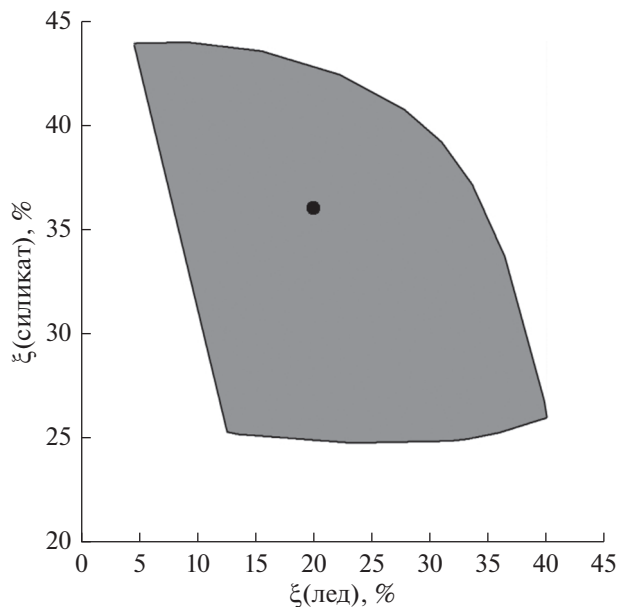
В результате расчетов получилась область, выделенная серым цветом на рис. 8 (черная точка соответствует содержаниям компонентов из табл. 1). Каждая точка внутри этой области соответствует возможным значениям содержания трех компонентов. Поскольку в сумме их содержание составляет 100%, то для определения относительной доли органики достаточно использовать формулу:

$$\xi(\text{органика}) = 100\% - \xi(\text{силикат}) - \xi(\text{лед}). \quad (11)$$

Из рисунка видно, что содержание льда способно меняться в достаточно широких пределах — от 5 до 40%, тогда как содержание силиката спо-

**Таблица 1.** Используемые для моделирования параметры для трех типов частиц

Тип частиц	Показатель преломления	$X_{min}$	$X_{max}$	$n$	$\xi$ , %
Водяной лед	$1.313 + i0$	2.8	14.1	3.7	20
Силикат (форстерит)	$1.677 + i0.0044$	1.2	15.5	5.8	36
Органика	$1.5 + i0.1$	2.5	14.6	5.0	44



**Рис. 8.** Область возможных значений содержания льда и силиката в кометной пыли, для которых модель способна достаточно точно описывать наблюдательные данные.

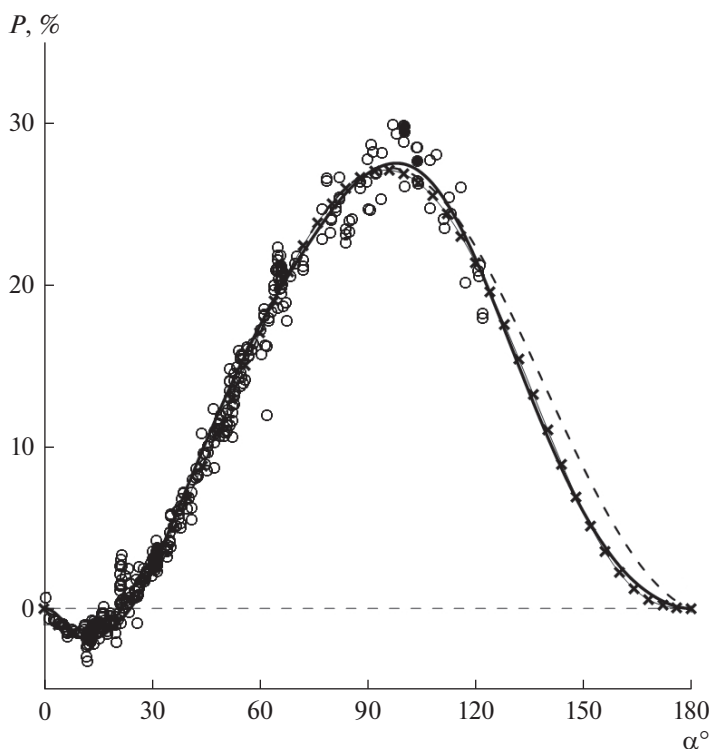
собно меняться в более узких пределах — от 25 до 44%. Отметим также, что содержание органики может достигать 68% (левый нижний угол выделенной области), или уменьшаться примерно до 30%.

Достаточно интересно посмотреть поведение модельной кривой на фазовых углах  $>120^\circ$ . Наблюдательных данных для комет на подобных фазовых углах не существует из-за трудностей наземных наблюдений комет, находящихся на небольших углах элонгации от Солнца. Однако по мере освоения космического пространства такие наблюдения могут появиться, потому данные моделирования и на этих углах представляют интерес.

Полная модельная кривая, соответствующая параметрам из таблицы, приведена на рис. 9 (сплошная линия). Пунктиром обозначена эмпирическая кривая, описываемая формулой (10). Как видно, на фазовых углах  $<120^\circ$  кривые очень близки, однако на больших фазовых углах наблюдается значительное расхождение. Это говорит о необходимости уточнения формулы (9), чтобы она была применима и на больших фазовых углах. Мы предлагаем формулу следующего вида:

$$P(\alpha) = b(\sin \alpha)^{c_1} \left[ \cos \frac{\alpha}{2} \right]^{c_2} \times \sin(\alpha - \alpha_{\text{inv}}) \left[ \frac{2}{\pi} \arccos \left( \left( \frac{\alpha}{\pi} \right)^{c_3} \right) \right]^{c_4}. \quad (12)$$

На рис. 9 кривая, описываемая формулой (12), соответствует тонкой линии с крестиками при параметрах  $c_3 = 9.2$  и  $c_4 = 3$ . Как видно, она практически не отличается от пунктирной кривой при



**Рис. 9.** Кривая, соответствующая параметрам из табл. 1 (сплошная линия), эмпирическая кривая, соответствующая уравнению (10) — пунктир, уточненная эмпирическая кривая, описываемая уравнением (12) — линия с крестами.

фазовых углах  $<120^\circ$  и достаточно точно совпадает с модельной кривой на больших фазовых углах.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные космических миссий показывают, что частицы кометной пыли представляют собой частицы неправильной формы. Попытки провести компьютерное моделирование поляриметрических свойств этой пыли с использованием упрощенных моделей пылевых частиц, таких как полидисперсные наборы частиц сугубо правильной формы (сферы, сфероиды, цилиндры), нередко оказываются неудачны, поскольку эти модели не могут последовательно воспроизводить наблюдаемые поляриметрические характеристики. В данной работе мы представляем новую модель частиц кометной пыли, разработанную на базе предложенных Muinonen случайных гауссовских частиц (Muinonen и др., 1996). Сопряженные случайные гауссовские частицы оказались достаточно удобны для моделирования неправильных частиц, составляющих кометную пыль. Проведено компьютерное моделирование поляриметрических свойств таких частиц. На основании расчетов произведена интерпретация поляриметрических наблюдений комет, определены их возможные физико-химические характеристики и диапазон их изменений. На основании модельных расчетов предложено уточнение эмпирической формулы, описывающей фазовую зависимость степени линейной поляризации пылевых комет.

Однако микрофизические свойства, восстановленные авторами у комет с высоким  $P_{\max}$ , пока не вполне согласуются с данными космических исследований – в частности, показатели степени оказываются завышенными по сравнению с данными космических миссий. Авторы намерены работать над усовершенствованием данной модели, в частности путем включения в нее частиц больших размеров, что, как мы надеемся, позволит стать на путь преодоления вышеозначенных расхождений.

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

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Добровольский О.В. Кометы. М.: Наука, 1966. 288 с.
- Шульман Л.М. Динамика кометных атмосфер. Нейтральный газ. Киев: Наукова думка, 1972. 242 с.
- Bertaux J.-L., Lallement R. Diffuse interstellar bands carriers and cometary organic material // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2017. V. 469. Iss. Suppl. 2. P. S646–S660.
- Bertini I., Thomas N., Barbieri C. Modeling of the light scattering properties of cometary dust using fractal aggregates // *Astron. and Astrophys.* 2007. V. 461. Iss. 1. P. 351–364.
- 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.
- Dubovik O., Sinyuk A., Lapyonok T., Holben B.N., Mishchenko M., Yang P., Eck T.F., Volten H., Muñoz O., Veihelmann B., van der Zande, Wim J., Leon J.-F., Sorokin M., Slutsker I. Application of spheroid models to account for aerosol particle nonsphericity in remote sensing of desert dust // *J. Geophys. Res.: Atmospheres.* 2006. V. 111. Iss. D11208.
- Grynko Ye., Shkuratov Yu. Scattering matrix for semitransparent particles of different shapes in geometric optics approximation // *J. Quant. Spectrosc. Rad. Transr.* 2003. V. 78. Iss. 3–4. P. 319–340.
- Grynko Y., Shkuratov Y., Förstner J. Light scattering by randomly irregular dielectric particles larger than the wavelength // *Opt. Lett.* 2013. V. 38. Iss. 23. P. 5153–5156.
- Grynko Y., Shkuratov Y., Förstner J. Light scattering by irregular particles much larger than the wavelength with wavelength-scale surface roughness // *Opt. Lett.* 2016. V. 41. Iss. 15. P. 3491–3494.  
<https://doi.org/10.1364/OL.41.003491>
- Jenniskens P. Optical constants of organic refractory residue // *Astron. and Astrophys.* 1993. V. 274. P. 653–661.
- Kearsley A.T., Borg J., Graham G.A., Burchell M.J., Cole H., Leroux J.C., Bridges F., Hörz P.J., Wozniakiewicz P.A., Bland J.P., Bradley Z.R., Dai N., Teslich T., See P., Hoppe P.R., Heck J., Huth F.J., Stadermann C., Floss K., Marhas T., Stephan J., Leitner J. Dust from comet Wild 2: Interpreting particle size, shape, structure, and composition from impact features on the Stardust aluminum foils // *Meteorit. and Planet. Sci.* 2008. V. 43. P. 41–73.
- Kimura H., Kolokolova L., Mann I. Optical properties of cometary dust: constraints from numerical studies on light scattering by aggregate particles // *Astronomy & Astrophysics.* 2003. V. 407, Issue 1. P. L5–L8.
- Kiselev N.N., Rosenbush V.K., Levasseur-Regourd A.-Ch., Kolokolova L. Comets // *Polarimetry of Stars and Planetary Systems* / Eds Kolokolova L., Hough J., Levasseur-Regourd A.-Ch. Cambridge Univ. Press, 2015. P. 379–404.
- Kiselev N., Shubina E., Velichko S., Jockers K., Rosenbush V., Kikuchi S. (Eds). NASA: pds:compil-comet:polarimetry.1.0, NASA Planetary Data System, 2017. <https://pdssbn.astro.umd.edu/holdings/pds4-compil-comet:polarimetry-v1.0/SUPPORT/dataset.html>.
- Kolokolova L., Kimura H., Mann I. Characterization of dust particles using photopolarimetric data: Example of cometary dust // *Photopolarimetry in Remote Sensing* / Eds Videen G., Yatskiv Ya., Mishchenko M. Netherlands: Springer, 2005. P. 431–454.
- Kolokolova L., Kimura H., Kiselev N., Rosenbush V. Polarimetric and infrared evidence of two types of dust in comets // *Astronomy & Astrophysics.* 2007. V. 463. P. 1189–1196.
- Kolokolova L., Das H., Dubovik O., Lapyonok T., Yang P. Polarization of cosmic dust simulated with the rough spheroid model // *Planetary and Space Science.* 2015. V. 116. P. 30–38.
- Lasue J., Levasseur-Regourd A.C., Hadamcik E., Alcouffe G. Cometary dust properties retrieved from polarization observations: Application to C/1995 O1 Hale–Bopp and 1P/Halley // *Icarus.* 2009. V. 199. Iss. 1. P. 129–144.
- Le Borgne J.F., Leroy J.L., Arnaud J. Polarimetry of visible and near-UV molecular bands: Comet P/Halley and Hartley-Good // *Astron. and Astrophys.* 1987. V. 173. P. 180–182.

- Li A., Greenberg J.M.* From interstellar dust to comets: infrared emission from comet Hale–Bopp (C/1995 O1) // *Astrophys. J.* 1998. V. 498. P. L83–L87.
- Lumme K., Muinonen K.* A two-parameter system for linear polarization of some Solar System objects // *IAU Symposium 160: Asteroids, Comets, Meteors, LPI Contribution 810.* Houston: LPI, 1993. P. 194–197.
- 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. Iss. 11. P. 1658–1670.
- Merouane S., Zaprudin B., Stenzel O., Langevin Y., Altobelli N., Della Corte V., Fischer H., Fulle M., Hornung K., Silén J., Ligier N., Rotundi A., Ryno J., Schulz R., Hilchenbach M., Kissel I. and the COSIMA Team.* Dust particle flux and size distribution in the coma of 67P/Churyumov-Gerasimenko measured in situ by the COSIMA instrument on board Rosetta // *Astron. and Astrophys.* 2016. V. 596. A87.
- 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. Iss. 30. P. 7206–7225.
- Mishchenko, M.I., Travis, L.D., Mackowski, D.W.* T-matrix computations of light scattering by nonspherical particles: a review. // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer.* 1996. Vol. 55, Issue 5. P. 535–575.
- 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.: Atmospheres.* 1997. V. 102. Iss. D14. P. 16831–16847.
- Mishchenko M.I., Travis L.D., Lacis A.A.* Scattering, Absorption, and Emission of Light by Small Particles. Cambridge Univ. Press, UK, USA. 2002.
- Muinonen K., Saarinen K.* Ray optics approximation for Gaussian random cylinders // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2000. V. 64. Iss. 2. P. 201–218.
- Muinonen K.* Light scattering by Gaussian random particles // *Earth, Moon, and Planets.* 1996. V. 72. P. 339–342.
- Muinonen, K.* Introducing the Gaussian shape hypothesis for asteroids and comets // *Astron. and Astrophys.* 1998. V. 332. P. 1087–1098.
- Muinonen K., Zubko E., Tyynelä J., Shkuratov Yu.G., Videen G.* Light scattering by Gaussian random particles with discrete-dipole approximation // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2007. V. 106. P. 360–377.
- Moreno F., Muñoz O., Guirado D., Vilaplana R.* Comet dust as a size distribution of irregularly shaped, compact particles // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2007. V. 106. Iss. 1. P. 348–359.
- Ohman Y.* Measurements of polarization in the spectra of comet Gunningham (1940 C) and comet Parakevopoulos (1941 C) // *Stockholms Obs. Ann.* 1941. V. 13. Iss. 11. P. 11.1–11.20.
- Petrov D., Synelnyk E., Shkuratov Yu., Videen G.* The T-matrix technique for calculations of scattering properties of ensembles of randomly oriented particles with different size // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2006. V. 102. P. 85–110.
- Petrov D., Shkuratov Yu., Videen G.* Electromagnetic wave scattering from particles of arbitrary shapes // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2011. V. 112. Iss. 11. P. 1636–1645.
- Petrov D., Shkuratov Yu., Videen G.* Light scattering by arbitrary shaped particles with rough surfaces: Sh-matrices approach // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2012. V. 113. P. 2406–2418.
- Petrova E.V., Jockers K., Kiselev N.N.* Light scattering by aggregates with sizes comparable to the wavelength: an application to cometary dust // *Icarus.* 2008. V. 148. Iss. 2. P. 526–536.
- Rietmeijer F.J.M., Nakamura T., Tsuchiyama A., Uesugi K., Nakano T., Leroux H.* Origin and formation of iron silicide phases in the aerogel of the Stardust mission // *Meteorit. and Planet. Sci.* 2008. V. 43. Iss. 1. P. 121–134.
- Shen Y., Draine B.T., Johnson E.T.* Modeling porous dust grains with ballistic aggregates. II. Light scattering properties // *Astrophys. J.* 2009. V. 696. Iss. 2. P. 2126.
- Stankevich D., Shkuratov Yu., Grynko E., Muinonen K.* Computer simulation of multiple scattering in random gaussian media // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2003. V. 76. Iss. 1. P. 1–16.
- Stoyan D., Stoyan H.* Fractals, Random Shapes and Point Fields. Methods of Geometrical Statistics. Chichester: John Wiley & Sons. 1994. 389 p.
- Voshchinnikov N.V., Das H.K.* Modelling interstellar extinction and polarization with spheroidal grains // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2008. V. 109. Iss. 8. P. 1527–1535.
- Waterman P.C.* Numerical solution of electromagnetic scattering problems. Computer Techniques for Electromagnetics, Pergamon Press, 1973. P. 97–157.
- Warren S.G.* Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave // *Appl. Opt.* 1984. V. 23. № 8. P. 1206–1225.
- Zubko E., Petrov D., Shkuratov Y., Videen G.* Discrete dipole approximation simulations of scattering by particles with hierarchical structure // *Appl. Opt.* 2005. V. 44. P. 6479–6485.
- Zubko E., Shkuratov Y., Kiselev N., Videen G.* DDA simulations of light scattering by small irregular particles with various structure // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2006. V. 101. Iss. 3. P. 416–434. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2006.02.055>
- Zubko E., Muinonen K., Shkuratov Yu.G., Videen G., Nousiainen T.* Scattering of light by roughened Gaussian random particles // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2007. V. 106. P. 604–615.
- Zubko E., Muinonen K., Shkuratov Yu., Hadamcik E., Lévassieur-Regourd A.-C., Videen G.* Evaluating the carbon depletion found by the Stardust mission in Comet 81P/Wild 2 // *Astron. and Astrophys.* 2012. V. 544. P. L8.
- Zubko E.* Light scattering by cometary dust: Large-particle contribution // *Earth, Planets and Space.* 2013. V. 65. P. 139–148. <https://doi.org/10.5047/eps.2012.02.003>
- Zubko E., Muinonen K., Videen G., Kiselev N.* Dust in Comet C/1975 V1 (West) // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2014. V. 440. P. 2928–2943
- Zubko E., Videen G., Hines D., Shkuratov Y., Kaydash K., Muinonen K., Knight M., Siiko M., Lisse C., Mutchler M, Li Jian-Yang, Kobayashi H.* Comet C/2012 S1 (ISON) coma composition at ~4 AU from HST observations // *Planet. and Space Sci.* 2015. V. 118. P. 138–163. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2015.08.002>
- Zubko E., Videen G., Hines D., Shkuratov Y.* The positive-polarization of cometary comae // *Planet. and Space Sci.* 2016. V. 123. P. 63–76.
- Zubko E., Videen G., Shkuratov Y., Hines D.* On the reflectance of dust in comets // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2017. V. 202. P. 104–113.