

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Петрова Дмитрия Владимировича

«Метод матриц формы и его применение для интерпретации поляриметрических наблюдений безатмосферных тел Солнечной системы и атмосфер комет», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Представленная диссертационная работа посвящена развитию методов изучения рассеяния света частицами неправильной формы и их применению к интерпретации поляриметрических наблюдений объектов Солнечной системы, таких как кометы и астероиды. Поляриметрия является одним из основных методов дистанционного исследования этих тел, поскольку позволяет независимо получать информацию о размерах, морфологии и химическом составе частиц кометной комы и реголита поверхности. С помощью разработанного им метода численного моделирования автор анализирует такую важную характеристику рассеянного этими объектами света, как фазовую зависимость степени линейной поляризации.

Работа соискателя состоит из Введения, четырёх Глав, Заключение и Приложения. По результатам работы опубликовано 38 статей в рецензируемых научных журналах. Список литературы содержит 486 работ.

Во **Введении** обоснованы новизна, актуальность и практическая значимость работы. Также сформулированы положения, выносимые на защиту, личный вклад автора и апробация полученных результатов.

В обзорной **первой** главе описано развитие общих представлений о поляризации света и сделан обзор наблюдений отрицательной поляризации света, рассеянного различными телами Солнечной системы. Сформулированы основные определения, описаны математические подходы

и методы, которые применяются для численного моделирования процессов рассеяния света частицами разной морфологии.

Вторая глава посвящена математической формулировке и обоснованию метода матриц формы, который разработан автором. Показано применение метода для вычисления интенсивности и поляризации света, рассеянного частицами, сопоставимыми по размерам с длиной волны и имеющими различную форму.

Третья глава посвящена анализу фазовых функций степени линейной поляризации астероидов Главного пояса по данным наземных наблюдений. Установлена эмпирическая связь формы отрицательной ветви этих кривых с геометрическим альбедо астероидов. Она может быть использована для оценки этой характеристики астероида по степени асимметрии измеренной отрицательной ветви поляризации.

В четвёртой главе представлено применение метода матриц формы для анализа рассеивающих свойств различных объектов. Для моделирования сложной морфологии частиц была разработана модель иерархических гауссовских частиц, учитывающая как крупномасштабную, так и мелкомасштабную шероховатость. С помощью этой модели и метода матриц формы рассчитаны характеристики рассеяния частиц, состоящих из слабопоглощающих (водяного льда и различных силикатов) и сильнопоглощающих (аморфного углерода и органических соединений) веществ. Это позволило автору сделать оценки свойств частиц кометной пыли и реголита астероида по данным поляриметрических измерений.

В Заключении изложены основные выводы относительно возможности приложения разработанного метода матриц формы к интерпретации результатов дальнейших исследований.

В Приложении приведены результаты измерений степени линейной поляризации различных астероидов.

Научная новизна данной работы определяется, в первую очередь, разработкой метода матриц формы для вычисления характеристик рассеяния

частиц различной формы, в том числе случайной и неправильной, имеющих размеры, сравнимые с длиной волны. Решение этой задачи является актуальным для дистанционного зондирования тел Солнечной системы.

Остановимся более подробно на замечаниях по представленной диссертации.

Автор представляет разработанный им метод как удобный и перспективный, но не делает общедоступным соответствующий компьютерный код. Поэтому использование данного метода другими исследователями в их работе и независимая оценка его достоинств и недостатков затруднительны.

Сделанные автором выводы о необходимости мультиспектральных наблюдений для однозначной оценки свойств кометной пыли и о том, что «изучаемые объекты состоят из льда, органики и силикатов, смешанных в различных пропорциях», не новы (см., напр., Mishchenko et al., *J. Phys.: Conf. Ser.* 2005, 6, 73; Levasseur-Regourd et al. *Cometary Dust. Space Sci. Rev.* 2018, 214, 64).

Оценка свойств частиц кометной пыли, сделанная по синтетической фазовой кривой поляризации в единственной длине волны в очень ограниченных рамках как состава частиц, так и их типа (Табл. 4.1), явно неоднозначна. Более того, распределение частиц по размерам, подобранное в модели, не согласуется с измерениями космических зондов.

Во всех разделах диссертации, посвященных интерпретации результатов измерений поляризации астероидов, автор отождествляет рассеяние света отдельной микронной частицей (пусть и неправильной формы) и рассеяние поверхностью небесного тела. Без каких-либо объяснений автор проводит прямую параллель между фазовыми кривыми поляризации астероидов и модельными кривыми, рассчитанными для отдельных частиц, не учитывая многократное рассеяние и плотность упаковки частиц в слое реголита. Такое упрощение не позволяет корректно оценивать свойства реголита, особенно

если анализ проводится без учета результатов измерений интенсивности отраженного астероидом света.

Отдельно необходимо отметить небрежность диссертанта в отношении термина «геометрическое альбедо». Именно эта физическая величина, которая часто является предметом обсуждения в данной работе, характеризует яркость астероида, которую можно получить из интегральных наблюдений. Однако, введя эту величину формулой (1.20), автор дальше почти везде, где речь должна идти о геометрическом альбедо, оперирует термином «альбедо», который приложим только к участкам поверхности астероида.

Структура диссертации не всегда представляется логичной. Так, описание применения метода к объяснению результатов наблюдений астероидов разбросано по гл. 3, разд. 4.2 и 4.7, а его применение к кометным наблюдениям - по разд. 4.1.3 и 4.6. Очевидно, что раздел 1.1 слишком обширный и содержит чрезмерно подробные описания элементарных для специалистов понятий, таких как угол фазы, например, а также детали, которые не требуются для дальнейшего изложения результатов автора, типа формул для поляризационных отношений или для рэлеевского рассеяния. Глава 2 перегружена формулами – вряд ли все они необходимы для описания сути метода и его приложений.

В работе нарушается единая система обозначений (например, буквы k и n имеют разный смысл в разных разделах, а геометрическое альбедо астероида имеет два обозначения - A_p и ω). Названия главы 3 и раздела 3.3 одинаковые. Неясно результаты каких именно измерений представлены в Приложении.

В тексте часто встречаются грамматически не согласованные предложения и стилистические небрежности, такие как «...огромное множество разнообразной информации...» (стр. 21), «наблюдения за линиями поглощения...» (стр. 22), «отрицательные поляризационные

кривые» (стр. 36), «фазозависимая поляризация» (стр. 158). Этот список может быть продолжен.

Указанные замечания не критичны и не умаляют ценности и значимости диссертационной работы, которая представляет собой законченное исследование и содержит ряд новых результатов. Диссертантом выполнен большой объём теоретических исследований и численных расчетов. Основная часть полученных результатов соответствует мировому уровню и достаточно обоснована. Название работы соответствует содержанию диссертации, автореферат и опубликованные статьи правильно и полно отражают содержание диссертационной работы. Из всего перечисленного делаю вывод, что диссертационная работа «Метод матриц формы и его применение для интерпретации поляриметрических наблюдений безатмосферных тел Солнечной системы и атмосфер комет» отвечает критериям п. 9 Положения о порядке присуждения учёных степеней, утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 г., а её автор, Петров Дмитрий Владимирович, заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1. – Физика космоса, астрономия.

Официальный оппонент

Бусарев Владимир Васильевич,

доктор физико-математических наук,

специальность 01.03.02 – астрофизика,

ведущий научный сотрудник Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (ГАИШ МГУ),

119234, Москва, Университетский проспект. д. 13

Тел. 8(495)939-1029; электронная почта: busarev@sai.msu.ru

Дата 03.09.2026

Согласен на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Подпись Бусарева В.В. заверяю



[Handwritten signature of V.V. Busarev]

(Бусарев В.В.)

Нот. отделе компетенции

[Handwritten signature]

Н. Н. Никитова