

УТВЕРЖДАЮ

Директор
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Главной (Пулковской)
астрономической обсерватории
Российской академии наук
(ГАО РАН)
доктор физико-математических наук

Н.Р. Ихсанов

«15» июля 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

**Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук
(ГАО РАН)**

на диссертационную работу **Петрова Дмитрия Владимировича** на тему **«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»

Актуальность

Диссертационная работа Петрова Дмитрия Владимировича посвящена разработке нового метода компьютерного моделирования рассеивающих свойств частиц неправильной формы и его применению для исследования объектов Солнечной системы, таких как астероиды и атмосферы комет. Это одно из наиболее активно развивающихся направлений современной астрофизики, напрямую связанное с решением таких фундаментальных проблем, как формирование и эволюция Солнечной системы.

Пылевые частицы являются ключевым объектом исследования в физике и химии Солнечной системы. Анализ их свойств в кометах и на поверхностях безатмосферных тел необходим для понимания процессов формирования планетной системы и зарождения жизни. Несмотря на успехи космических миссий, дистанционное зондирование с Земли остается базовым методом изучения этих объектов в силу высокой стоимости и редкости полетов. Текущие исследования накопили большой массив данных о характеристиках рассеянного излучения, однако для их точной интерпретации требуется развитие теоретической базы механизмов светорассеяния. Таким образом, совершенствование методов моделирования и их использование для дистанционного зондирования объектов Солнечной системы выступают приоритетными задачами, определяющими **научную новизну и актуальность** данной диссертации.

Структура и содержание работы

Диссертация Д.В. Петрова состоит из Введения, четырех Глав, Заключения и Приложения. Полный объем диссертации составляет 311 страниц, включая 145 рисунков и 7 таблиц. Список литературы содержит 486 наименований.

Во **Введении** обосновывается актуальность диссертационной работы, формируются цели и задачи, раскрывается научная новизна и практическая значимость, указывается личный вклад соискателя, положения, выносимые на защиту, их апробация и список основных публикаций соискателя по теме диссертации.

В **Главе 1** определены основные термины и понятия, описаны особенности фазовой зависимости степени линейной поляризации. Приведены основные соотношения, используемые при изучении характеристик рассеянного света.

Описано современное состояние наземных наблюдений безатмосферных тел Солнечной системы, а также атмосфер комет. Показано, что наблюдательные данные демонстрируют большое разнообразие фазовых кривых степени поляризации.

Описаны основные механизмы, формирующие отрицательную поляризацию на малых фазовых углах. Представлены основные методы, применяемые для компьютерного моделирования процессов рассеяния света. Показано, что, несмотря на развитие вычислительной техники, многие методы обладают целым набором недостатков и ограничений, сокращающих область их применимости. Из этого следует вывод о необходимости разработки новых методов компьютерного моделирования процессов светорассеяния, способных дополнить уже существующие.

В **Главе 2** рассматривается задача рассеяния света частицами, сравнимыми по размеру с длиной волны. Для ее решения автором был разработан особый подход, основанный на введении матриц формы, зависящих от формы рассеивающей частицы. Зная матрицы формы, можно вычислить любые характеристики рассеяния. В данной главе также продемонстрировано, что метод матриц формы может быть использован для усреднения характеристик рассеяния по размерам частиц и применен к частицам различной, в том числе произвольной случайной, формы.

В **Главе 3** на основании наблюдательных данных проанализированы фазовые зависимости степени линейной поляризации астероидов главного пояса. Доказано, что форма кривой индивидуальна для каждого астероида и тесно связана с его альбедо. Для интерпретации данного факта проведено компьютерное моделирование характеристик рассеянного света при помощи метода матриц формы. Показано, что в фильтрах B, V и R наблюдается четкая корреляция между альбедо и величиной асимметрии отрицательной ветви поляризационной кривой. На основании этого предложена новая калибровка альбедо астероидов в зависимости от степени асимметрии их отрицательных ветвей.

В **Главе 4** метод матриц формы применен к изучению особенностей рассеяния различными объектами, в первую очередь кометами и астероидами. Для воспроизведения неправильной формы рассеивающих частиц этих объектов Солнечной системы разработана модель сопряженных случайных гауссовских частиц, обладающих иерархией уровней шероховатости – как на крупном, так и на мелком масштабе. Изучены особенности светорассеяния такими частицами трех типов – ледяными (слабопоглощающими и слабопреломляющими), силикатными (слабопоглощающими и сильнопреломляющими), а также органическими (сильнопоглощающими и сильнопреломляющими). С помощью метода матриц формы проинтерпретированы результаты поляриметрических наблюдений пылевых комет и установлен их химический состав.

Также показано, что основным фактором, влияющим на положение и на величину максимума положительной ветви степени линейной поляризации, является мнимая часть показателя преломления рассеивающих частиц. Для ряда фильтров были определены фиксированные показатели преломления льда, которые наилучшим образом воспроизводят

характеристики рассеянного света с учетом спектральной зависимости показателя преломления.

Исследовано влияние формы рассеивающих частиц на силикатную особенность SiO_2 . Сделан вывод, что в случае частиц размером менее 1 мкм, вносящих максимальный вклад в 10-микронные эмиссионные особенности комет, положение максимума спектральной особенности смещено в область больших длин волн. Определен силикатный состав кометы Ikeya-Seki (C/1965 S1). Показано, что ни при каком наборе параметров частицы неправильной формы не могут обеспечить столь крутой наклон фазовой кривой степени линейной поляризации, полученный в ходе поляриметрических наблюдений. В то же время использование сферических частиц обеспечивает очень хорошее согласие наблюдательных данных и компьютерного моделирования. Таким образом, при изучении рассеяния света околосолнечными кометами необходимо учитывать наличие частиц правильной формы, образующихся под воздействием высоких температур.

Проведено компьютерное моделирование поляриметрических наблюдений комет. Установлено, что для интерпретации данных наблюдений необходимы мультиспектральные наблюдения как минимум в трех диапазонах. Осуществлено компьютерное моделирование поляриметрических наблюдений астероидов. Показано, что наилучшее совпадение наблюдательных данных и результатов компьютерного моделирования соответствует однородной смеси частиц, состоящей из 90% богатого магнием силиката и 10% углерода, с размерами частиц порядка длины волны.

В **Заключении** представлены основные итоги диссертационной работы и обсуждаются перспективные направления дальнейших исследований.

В **Приложении** приведено детальное описание параметров фазовых зависимостей степени линейной поляризации различных астероидов, основанных на поляриметрических наблюдениях.

Тематика диссертационной работы лежит на пересечении областей электромагнетизма, оптики, дистанционного зондирования и астрофизики, **научная и практическая значимость** исследования не вызывает сомнений. **Достоверность** полученных результатов обеспечивается автором посредством ряда значимых публикаций и выступлений на научных конференциях.

Замечания по диссертационной работе

Диссертационная работа представляет собой законченное научное исследование. Она логично построена и хорошо структурирована. Тем не менее, есть ряд замечаний по содержанию проведенного исследования и форме представления полученных результатов.

1. В диссертации изучается влияние таких параметров рассеивающих частиц, как форма, размер и показатель преломления, на степень линейной поляризации. Однако также было бы интересно рассмотреть влияние вышеозначенных параметров на другие характеристики рассеяния, например на фотометрический цвет, играющий важную роль в исследовании объектов Солнечной системы. Было бы полезно расширить диссертационную работу, включив в нее, помимо поляризации, иные характеристики рассеяния.

2. В третьей главе исследуется корреляция между степенью асимметрии отрицательной ветви степени линейной поляризации и альбедо астероидов для трех спектральных фильтров – B, V и R. Представляется целесообразным расширить список исследуемых фильтров, включив в него как широкополосные фильтры U и I, так и ряд узкополосных фильтров.

3. Встречаются опечатки, которые, впрочем, немногочисленны и не приводят к искаженному пониманию сути излагаемых вопросов.

Заключение

Сделанные замечания не меняют общей положительной оценки работы.

Диссертационная работа Петрова Дмитрия Владимировича «Метод матриц формы и его применение для интерпретации поляриметрических наблюдений безатмосферных тел Солнечной системы и атмосфер комет» удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, и является завершенным научным исследованием.

Разработанные автором метод матриц формы и модель сопряженных случайных гауссовских частиц вносят новый вклад в понимание физики рассеянного излучения. Они существенно расширили возможности моделирования физических свойств частиц реголитовых поверхностей безатмосферных тел, а также частиц атмосфер комет.

Результаты, полученные в диссертационной работе, могут быть использованы при интерпретации наблюдательных данных и построении теоретических моделей полидисперсных сред, состоящих из случайных наборов частиц неправильной формы, различных размеров и химического состава, в ГАО РАН, КрАО РАН, САО РАН, ИКИ РАН, ГАИШ МГУ и других астрономических учреждениях.

Автореферат в полном объеме отражает основные результаты, полученные в работе.

Соискатель Петров Дмитрий Владимирович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1. – «Физика космоса, астрономия».

Отзыв обсужден и утвержден на заседании объединенного семинара научных подразделений Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН. Протокол № 21 от 15 июля 2026 г.

Отзыв подготовил:

Главный научный сотрудник
лаборатории физики звезд ГАО РАН,
доктор физико-математических наук

Телефон: +7 (921) 774-56-58

Адрес электронной почты: nsilant@bk.ru

Подпись Силантьева Н.А. заверяю

И.о. ученого секретаря ГАО РАН,
кандидат физико-математических наук

Силантьев Н.А.

Королькова О.А.

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук (ГАО РАН)

Адрес: 196140, Россия, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе д. 65, кор. 1

Телефон: +7 (812) 604-19-89, доб. 7207, 7400

Адрес электронной почты: map@gaoran.ru

Официальный сайт: <https://www.gaoran.ru/>