УДК 537.876; 535.36; 535.44
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-372
ORCID: 0000-0001-5412-8323

БАНК ДАННЫХ МАТРИЦ МЮЛЛЕРА ДЛЯ ВСЕЙ СФЕРЫ НАПРАВЛЕНИЙ РАССЕЯНИЯ СВЕТА, ПОЛУЧЕННЫЙ В РАМКАХ МЕТОДА ФИЗИЧЕСКОЙ ОПТИКИ ДЛЯ ГЕКСАГОНАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ

И.В. Ткачев, В.А. Шишко, Д.Н. Тимофеев, Н.В. Кустова, А.В. Коношонкин, Н.В. Кан, К.С. Сальников

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия, tiv@iao.ru

DATABASE OF MUELLER MATRICES FOR THE FULL SPHERE OF LIGHT-SCATTERING DIRECTIONS, COMPUTED USING THE PHYSICAL OPTICS METHOD FOR HEXAGONAL PARTICLES

I.V. Tkachev, V.A. Shishko, D.N. Timofeev, N.V. Kustova, A.V. Konoshonkin, N.V. Kan, K.S. Salnikov

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia, tiv@iao.ru

Аннотация. Представлено решение задачи рассеяния света на хаотически ориентированных ледяных кристаллах (гексагональных пластинках и столбиках) размером от 10 до 100 мкм. Результат представлен в виде банка данных матриц рассеяния света и обусловлен практическими потребностями обеспечения работы российской навигационной системы ГЛОНАСС. Расчеты были проведены с использованием метода физической оптики для длин волн, применяемых в лазерном зондировании: 0.532; 0.85; 1.064 мкм, а также для длины волны в ближнем ИК-диапазоне (1.55 мкм). Проведено сравнение дифференциального сечения рассеяния для представленных длин волн и типов частиц.

Ключевые слова: рассеяние света, поглощение, атмосферные ледяные частицы, перистые облака, лазерное зондирование, лидар, ГЛОНАСС.

Abstract. A solution to the problem of light scattering on chaotically oriented ice crystals (hexagonal plates and columns) ranging in size from 10 to 100 microns is presented. The result is presented in the form of a data bank of light scattering matrices and is determined by the practical needs of ensuring the operation of the Russian GLONASS navigation system. The calculations were performed using the method of physical optics for the wavelengths used in laser sounding: 0.532; 0.85; 1.064 microns, as well as for the wavelength in the near-infrared range (1.55 microns). We made a comparison of the differential scattering cross section for the presented wavelengths and particle types.

Keywords: light scattering, absorption, atmospheric ice crystals, cirrus clouds, laser sounding, lidar, GLONASS.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования обусловлена прикладными задачами обеспечения функционирования отечественной навигационной системы ГЛОНАСС. Современные квантово-оптические станции лазерного дальномерного типа («Сажень-ТМ-Д», «Точка») [Бурмистров и др., 2023], обеспечивающие субсантиметровую точность определения орбит спутников, критически зависят от метеоусловий и работают только при ясном небе. Поскольку 60–70% поверхности Земли постоянно покрыто облаками (из них около трети — кристаллические), они ограничивают временное окно сеанса связи. Для компенсации метеозависимости Госкорпорация «Роскосмос» вынуждена разворачивать дорогостоящую глобальную сеть станций [https://fcnd.ru/data/].

Данная ситуация привела специалистов АО «НПК СПП» к формированию гипотезы о том, что облака верхнего яруса не вносят существенной временной задержки лазерного излучения из-за специфики рассеяния на ледяных кристаллах, что позволило бы существенно расширить количество благоприятных дней для калибровки спутников без строительства новых станций [Бусыгин, Кузьмина, 2024]. Предварительные оценки на основе зарубежных моделей [Yang et al., 2004] уже продемонстрировали перспективность подхода, однако для детальной верификации гипотезы требуется специализированная оптическая модель по всей сфере направлений рассеяния ($\theta = 0 – 180°$) с высокой детализацией в окрестности направления рассеяния «вперёд» ($\theta = 0 – 25°$).

В целом работа включает весь спектр наблюдаемых в атмосфере ледяных кристаллов – диапазон размеров частиц составляет от 10 до 1000 мкм, где рассмотрены все типичные формы кристаллов (от гексагональных частиц до агрегатов) на длинах волн 0.355; 0.4; 0.532; 0.85; 1.064 и 1.55 мкм. Но в контексте данного доклада мы рассмотрим лишь некоторые длины волн.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты решения задачи рассеяния света для двух типов хаотически ориентированных ледяных частиц: гексагональные пластинки и столбики, представлены на рисунках 1-2.

Благодаря использованию вычислительных ресурсов кластера ИОА СО РАН [Konoshonkin et.al., 2017] удалось получить расчет с мелким интервалом разбиения по размеру частиц, для пластинок и столбиков в окрестности направления рассеяния

«вперёд» ($\theta = 0 – 25°$). Было рассчитано от 90 до 250 точек в зависимости от размера, что в полной степени позволяет с высокой точностью построить сферу направлений рассеяния света.

В работе будут представлены 4 длины волны 0.532, 0.85, 1.064 и 1.55 мкм. В частности, для столбика будет дополнительно использована длина волны 0.85 мкм, а для пластинки 0.532 мкм.

На рисунке 1 и 2 представлены результаты для столбиков и пластинок соответственно, демонстрирующие распределение интенсивности рассеянного света в диапазоне углов от 0 до 180 градусов по углу θ. В начальной области наблюдается ярко выраженный пик, который соответствует максимальному световому излучению, практически совпадающему с направлением исходного луча сразу за ледяной частицей. Данное явление обусловлено дифракцией света, который огибает края кристалла льда и подвергается интерференции, формируя узкий направленный пучок. Следует отметить, что с увеличением размеров ледяного кристалла ширина прямого пика уменьшается, а его форма становится более острой. Расчет данного пика как раз и необходим для задач позиционирования спутниковых систем ГЛОНАСС, так как необходимо чтобы сигнал с Земли был доставлен с требуемой точностью и минимальной задержкой.

Следом за этим пиком следуют гало, которые в научной литературе обозначаются как «гало 22 и 46 градусов». Гало на 22° и 46° – это яркие световые кольца вокруг Солнца или Луны, которые иногда можно увидеть на фоне перистых облаков. Эти явления хорошо изучены и обусловлена формой кристалла. Поэтому важно учитывая хорошую детализацию ($\theta = 0 – 25°$), включить в расчет гало 22°, для точной корректировки результатов.

Диапазон обратного рассеяния, представленный на рисунке 1 и 2, традиционно применяется в задачах лидарного зондирования, однако полученные в этой области результаты приобретают особую прикладную значимость в контексте подготовки к созданию Российской орбитальной станции (РОС). Формирование РОС запланировано на 2027 год с вывода на орбиту базового модуля, а утверждённая в 2023 году концепция станции предусматривает оснащение её поляризационным лидаром для непрерывного мониторинга атмосферы в интересах климатических исследований и контроля её состава [Евдокимов, Грибков и др., 2025].

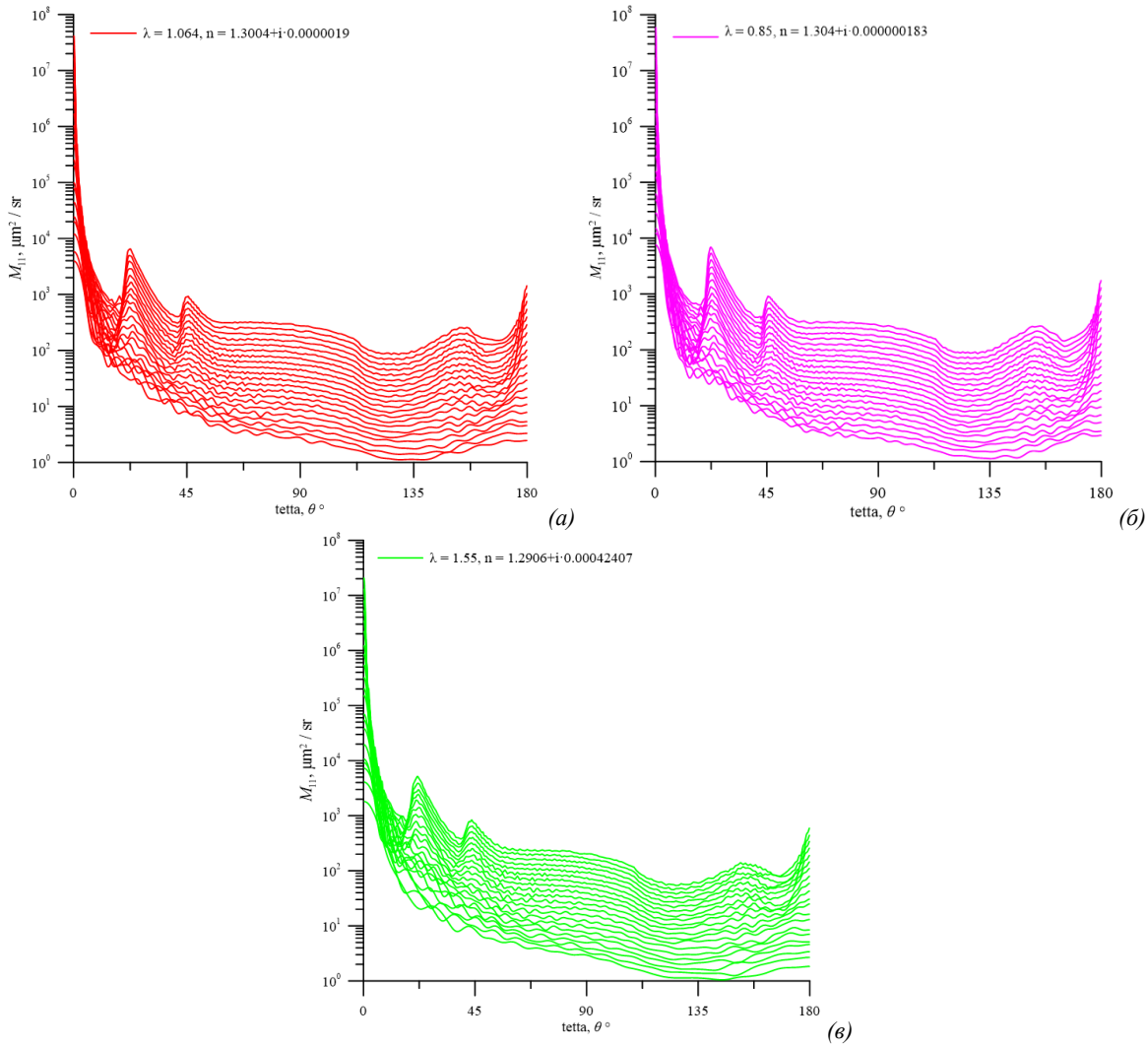

Рис. 1. Элемент M_{11} матрицы Мюллера в зависимости от индикатрисы рассеяния света ($\theta = 0 – 180°$) для гексагонального столбика с размерами частиц от 10 до 100 мкм для (а) 1.064 мкм, (б) 0.85 мкм, (в) 1.55 мкм

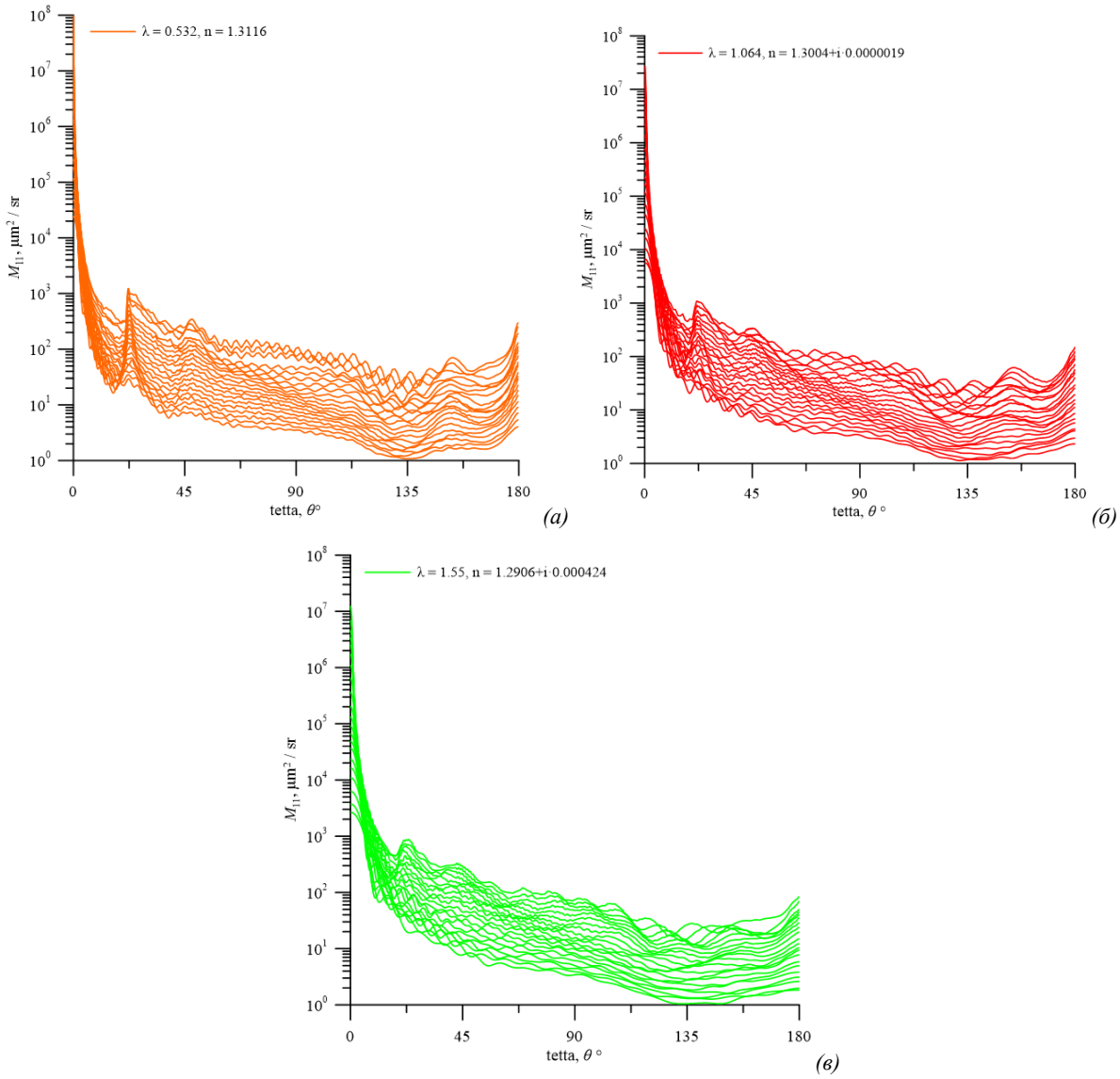

Рис. 2. Элемент M_{11} матрицы Мюллера в зависимости от индикатрисы рассеяния света (θ = 0 – 180°) для гексагональной пластинки с размерами частиц от 10 до 100 мкм (а) 0.532 мкм, (б) 1.064 мкм, (в) 1.55 мкм

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании полученных результатов сформулированы следующие основные выводы. Во-первых, гало существенно различаются для двух исследуемых типов ледяных кристаллов: в гексагональных столбиках они выражены значительно сильнее, чем в гексагональных пластинках. Данная особенность обусловлена различиями в микрофизических параметрах частиц, определяющими условия преломления и отражения лучей внутри кристаллов. Во-вторых, установлено, что формирование устойчивых гало-пиков начинается при размерах частиц в диапазоне 15–30 мкм, где пороговое значение зависит от длины волны падающего излучения. При дальнейшем увеличении размера кристаллов интенсивность и контрастность гало-пиков закономерно возрастают.

Но самое главное удалось рассчитать подробную матрицу рассеяния углов (θ = 0 – 180°), где в большей степени для задач Госкорпорации «Роскосмос» необходимо было уточнить пик направления «вперед» (θ = 0 – 25°). Получилось с высокой детализацией рассчитать данный диапазон, а в свою очередь полученные данные помогут АО «НПК СПП» опровергнуть или доказать выдвинутую ранее гипотезу. Также помимо этого результаты, полученные в диапазонах углов от θ = 170 – 180°), будут полезны для задач лазерного зондирования атмосферы в рамках миссий Российской орбитальной станции (РОС), в частности для интерпретации полученных лидарных сигналов.

Ключевым результатом исследования стало построение детальной матрицы рассеяния в угловом диапазоне (θ = 0 – 180°), где особое внимание было уделено области рассеяния (θ = 0 – 25°). Результаты, которые были получены в данной области в большей степени необходимы для задач Госкорпорации «Роскосмос». Выполненный с высокой детализацией расчёт этого диапазона предоставит АО «НПК СПП» достоверные данные для экспериментальной проверки ранее выдвинутой гипотезы. В свою очередь, результаты,

полученные в области обратного рассеяния (θ = 170–180°), имеют прямое прикладное значение для задач лазерного зондирования атмосферы в рамках миссий Российской орбитальной станции (РОС). Они могут быть использованы для корректной интерпретации сигналов бортового поляризационного лидара.

Построение банка данных выполнено при финансовой поддержке РНФ № 25-17-00087 https://rscf.ru/en/project/25-17-00087.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

В. Б. Бурмистров, Е. В. Бурмистров, И. С. Гаязов, Г. Н. Ильин, А. В. Ипатов, Ю. В. Кацев, В. В. Коваль, А. Ф. Корнев, В. А. Митряев, И. А. Рахимов, С. Г. Смоленцев. Модернизация спутникового лазерного дальномера «Сажень-ТМ» в обсерватории «Светлое» // Труды ИПА РАН. — 2023. — Вып. 66. — С. 3–10.

Бусыгин В. П., Кузьмина И. Ю. Пропускание лазерного излучения кристаллическими облаками на трассах «земля – космос». // Оптика атмосферы и океана. 2024. Т. 37. № 02. С. 176–183. DOI: 10.15372/AOO20240213.

Евдокимов Р.А., Грибков А.С., Конев С.В., Мацак И.С., Тугаенко В.Ю. Перспективы применения лидаров на Российской орбитальной станции. Инженерный журнал: наука и инновации, 2025, вып. 11. EDN KOVPRE

Федеральный центр навигационных данных // URL: https://fcnd.ru/data/ (дата обращения 20.05.2026)

A. Konoshonkin, A. Borovoi, N. Kustova, H. Okamoto, H. Ishimoto, Y. Grynko, and J. Förstner, "Light scattering by ice crystals of cirrus clouds: From exact numerical methods to physical-optics approximation," Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 195, 132–140 (2017).

Yang, P., H. Wei, H.-L.A. Huang, B.A. Baum, Y.X. Hu, K.N. Liou, and M.I. Mishchenko, 2004: Radiative properties of ice crystals within cirrus clouds: application to remote sensing. In Proc.SPIE. H.-L.A. Huang and H.J. Bloom, Eds., vol. 5548, pp. 174-182, doi:10.1117/12.557320.