

Комбинирование методов геометрической и физической оптики для расчета рассеяния света на атмосферных ледяных кристаллах в задачах лидарного зондирования

Кан. Н.В.^{1,2}, Кустова Н.В.^{1,2}, Шишко В.А.^{1,2}, Коношонкин А.В.^{2,1}, Тимофеев Д.Н.^{1,2}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

²НИ Томский государственный университет, г. Томск, Россия



Национальный
исследовательский

**Томский
государственный
университет**



**ИНСТИТУТ
ОПТИКИ АТМОСФЕРЫ
им. В.Е. ЗУЕВА СО РАН**



**Российский
научный
фонд**

Исследование выполнено за счет
гранта Российского научного фонда
№ 25-17-00087

Аннотация

В докладе предлагается комбинированный подход, использующий методы геометрической и физической оптики, для расчета рассеяния света на атмосферных ледяных кристаллах в задачах лидарного зондирования. Данный подход позволит использовать плюсы двух методов для эффективного расчета результатов для решения задач рассеяния света во всем диапазоне углов.

Методами ГО и ФО рассчитаны элементы матрицы Мюллера для гексагональных столбиков и произвольной формы, на длинах волн 0.532 мкм и 2.13 мкм с учетом и без мнимой части показателя преломления.

Актуальность

Лазерное зондирование кристаллических облаков представляет собой сложную задачу дистанционного зондирования из-за трудностей интерпретации лидарного сигнала. Эти трудности связаны с необходимостью решения фундаментальной проблемы рассеяния света на ледяных кристаллах, составляющих такие облака. Точные численные методы слишком ресурсоемки и неприменимы для частиц крупнее 30 мкм, которые преобладают в облаках. Приближенные методы имеют свои ограничения: геометрическая оптика (ГО) работает быстро, но не дает корректных решений в областях прямого и обратного рассеяния, а также для мелких фракций кристаллов. Физическая оптика (ФО) точнее, но требует значительно больше вычислительных мощностей. Также для учета многократного рассеяния в оптически плотных облаках необходимо решение задачи рассеяния света во всем диапазоне углов рассеяния.

Гексагональный столбик

Наиболее типичная форма атмосферных ледяных кристаллов – гексагональный столбик.

Решение задачи рассеяния света такой частицей (в диапазоне размеров от 10 до 30 мкм) в рамках приближения физической оптики (ФО) для длины волны 0,532 мкм представлено на **рисунке 1** в виде элемента M_{11} матрицы Мюллера.

Важно отметить, что вычислительная сложность метода физической оптики возрастает пропорционально квадрату размера частицы. Вследствие этого, даже при использовании ресурсов суперкомпьютеров, получение решения для всего диапазона углов рассеяния частиц размером более 30 мкм представляет значительные трудности.

С другой стороны, решение может быть получено и в рамках приближения геометрической оптики (ГО). На **рисунке 2** представлено сравнение решений для частиц размером 10, 20 и 30 мкм. Видно, что решение, полученное в рамках ГО, недостаточно точно для данных размеров, хотя по мере увеличения размера наблюдается сходимость методов.

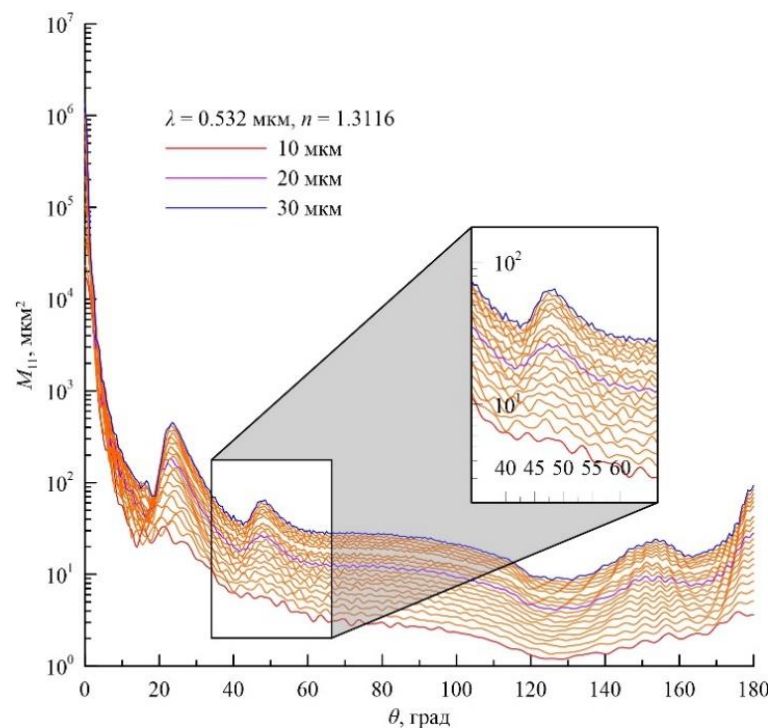


Рисунок 1. Зависимость элемента M_{11} матрицы обратного рассеяния света от угла рассеяния θ в рамках приближения физической оптики (ФО) для гексагонального столбика

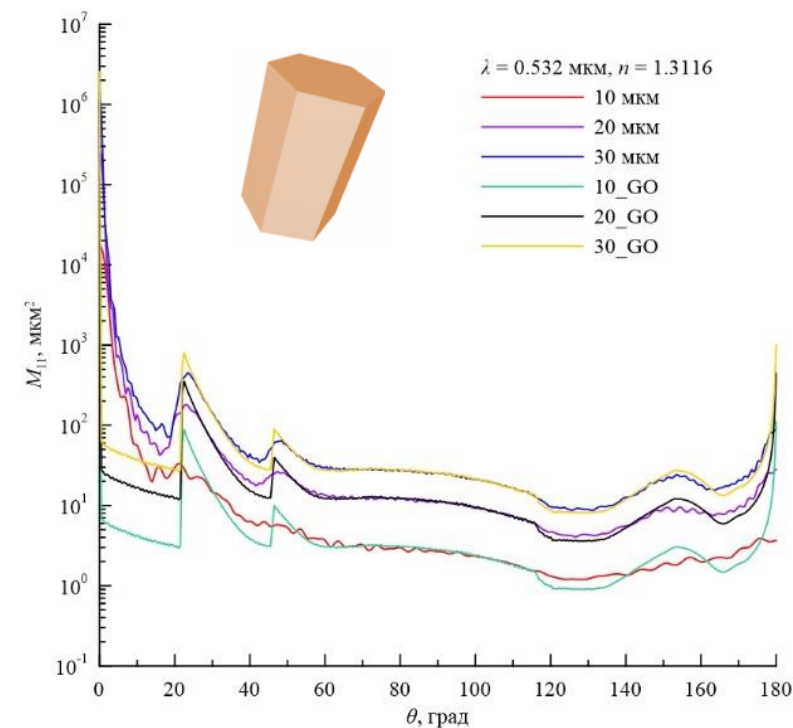


Рисунок 2 – Сравнение элемента M_{11} матрицы рассеяния света от угла рассеяния θ в рамках приближения физической оптики (ФО) и геометрической оптики (ГО) для гексагонального столбика размером 10, 20 и 30 мкм.

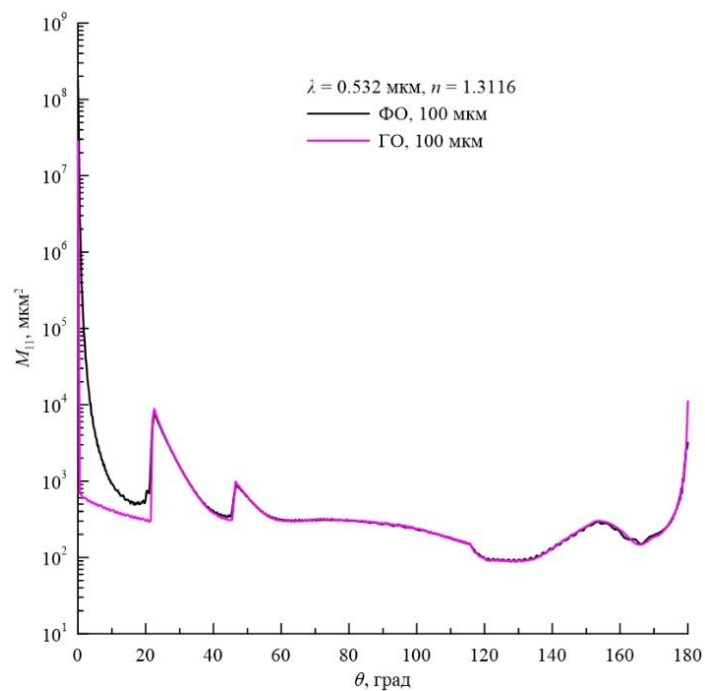


Рисунок 3. Сравнения методов ГО и ФО на гексагональном столбике 100мкм

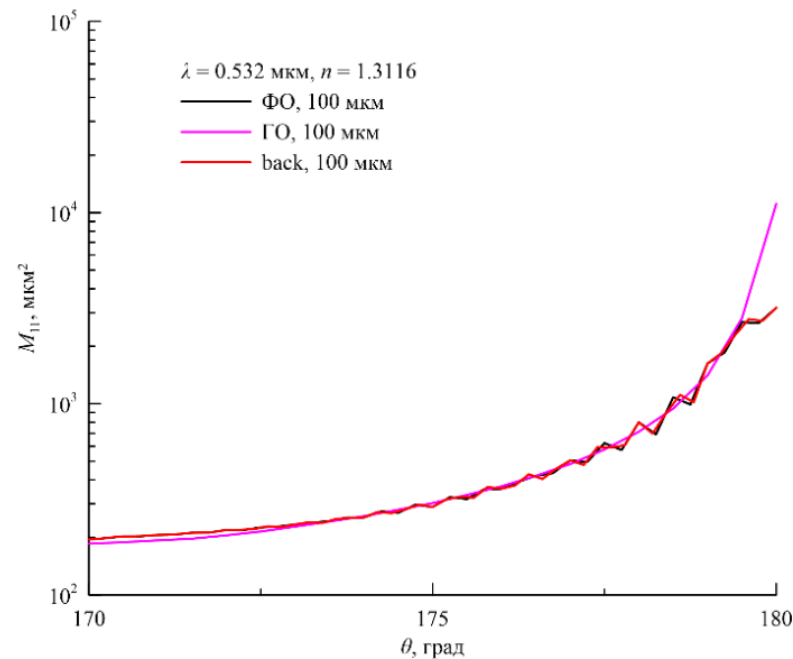


Рисунок 4. Сравнения методов ГО и ФО в направление назад

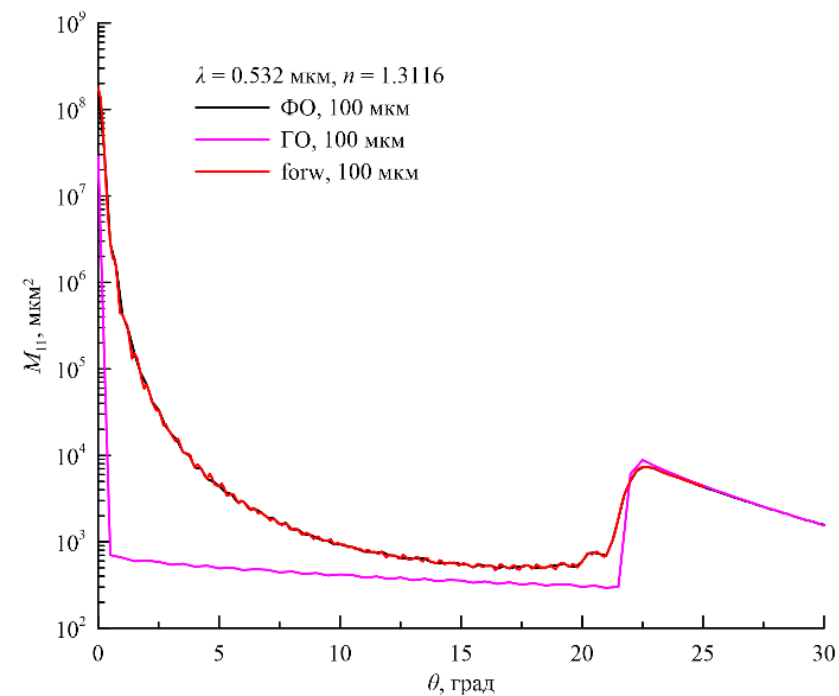


Рисунок 5. Сравнения методов ГО и ФО в направление вперед

Установлено, что для частиц размером более 100 мкм в диапазоне углов рассеяния 25–175° наблюдается хорошее согласие между результатами, полученными различными методами (**рисунке 3**). Однако в направление вперед и назад рассеяния результаты существенно расходятся (**рисунке 4 и 5**).

Произвольная частица

Таким образом, установлено, что решение для частиц размером более 100 мкм может быть получено с использованием комбинации двух методов: быстрый метод геометрической оптики (ГО) применяется в диапазоне углов рассеяния $25\text{--}175^\circ$, тогда как более медленный метод физической оптики (ФО) используется только в областях рассеяния вперед и назад.

Этот вывод справедлив и для частиц произвольной формы, за тем лишь исключением, что решение методом ГО может быть получено в диапазоне углов $15\text{--}178^\circ$ ввиду отсутствия эффектов гало. Результаты сравнения методов представлены на **рисунке 6** и **7** на примере двух элементов матрицы Мюллера.

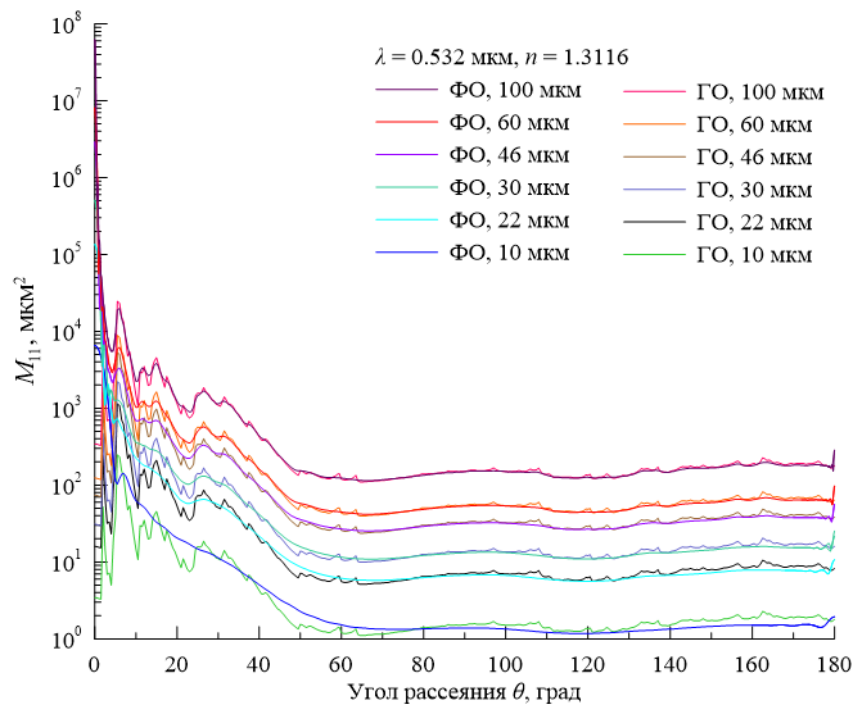


Рисунок 7. Элемент матрицы рассеяния света m_{22} для частицы произвольной формы

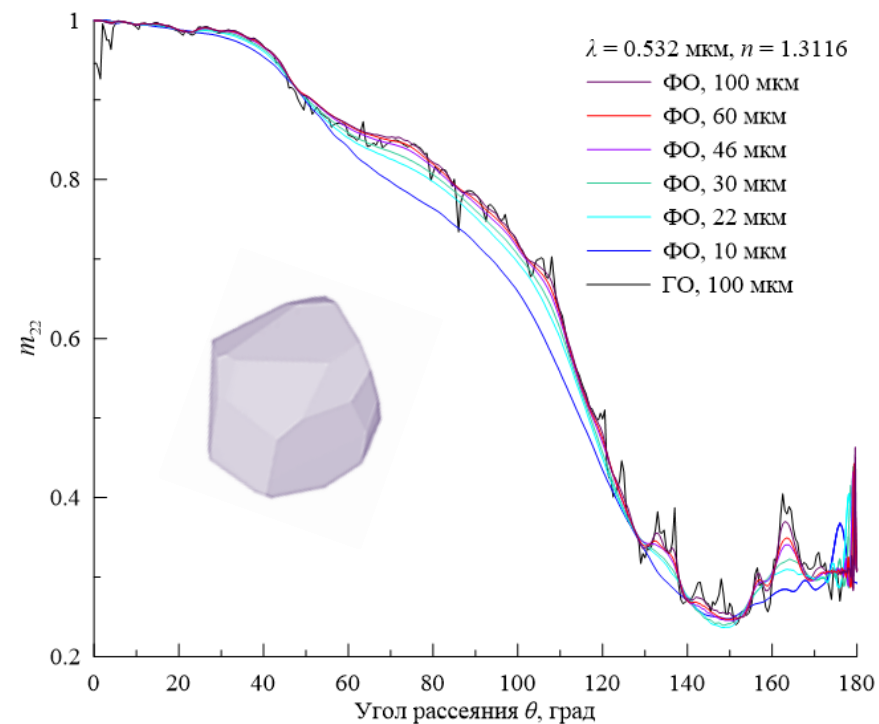


Рисунок 6. Элемент матрицы рассеяния света M_{11} для частицы произвольной формы

Ансамбль частиц произвольной формы

Проблема учета влияния формы возникает из-за того, что исследователи часто ограничиваются небольшим набором форм частиц, поскольку получение соответствующих решений сопряжено с трудностями. Например, в масштабном научном проекте **MOPSMAP** используются лишь 6 базовых форм частиц. Однако наши расчеты для 500 случайно сгенерированных частиц многогранной формы одинакового размера показывают, что форма частицы может приводить к более чем двукратному разбросу значений элемента M_{11} , тогда как нормированные элементы матрицы Мюллера варьируются в пределах до 30% (**рисунок 8**). В связи с этим критически важно выполнять усреднение по формам частиц в облаке, используя достаточно представительный ансамбль частиц.

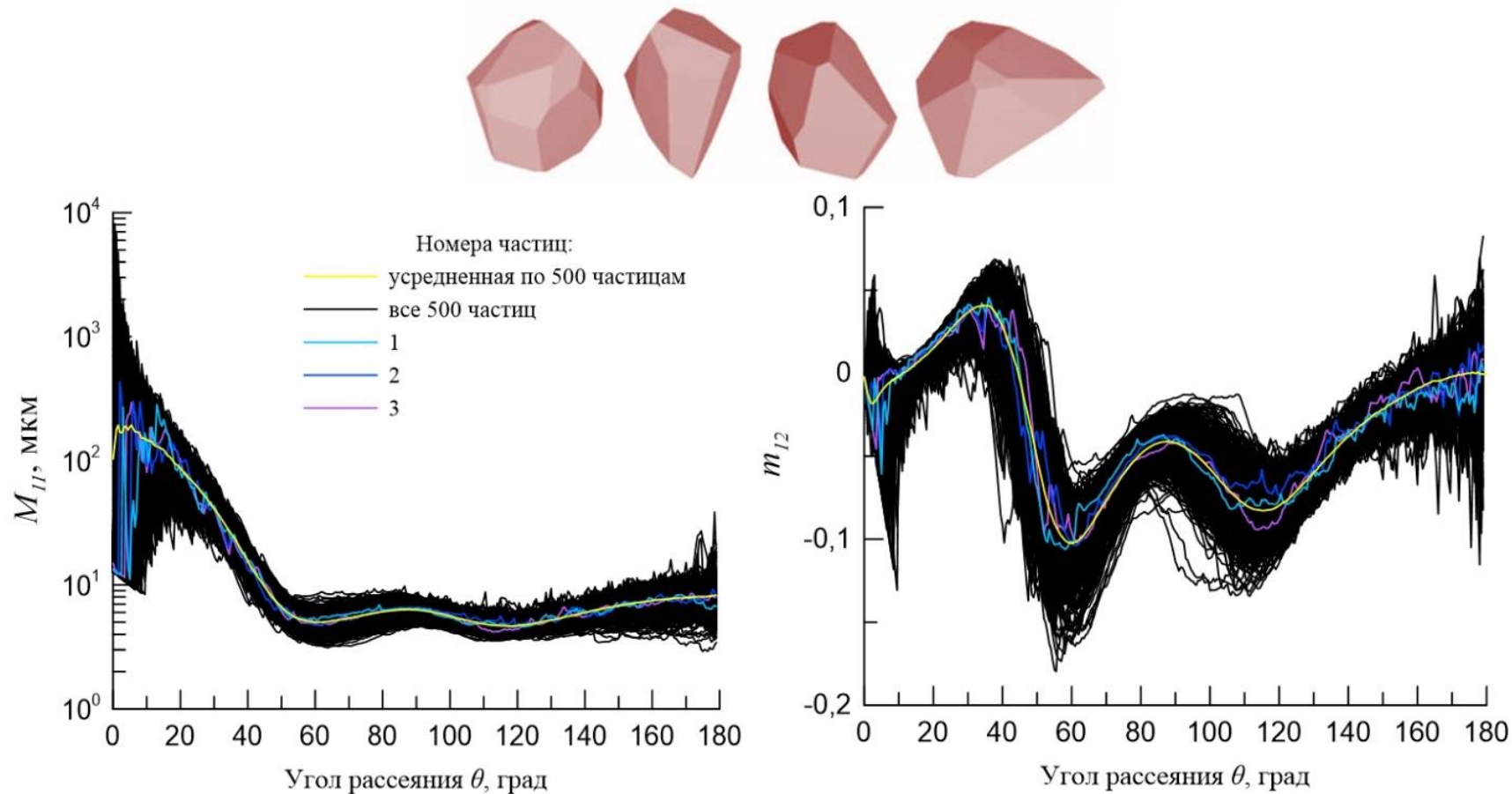


Рисунок 8 – Элементы M_{ij} матрицы рассеяния света для 500 частиц произвольной формы, для набора отдельных частиц №1 и усредненный по 500 частицам.

Влияние коэффициента поглощения на рассеяние света крупными частицами атмосферного аэрозоля

Проблема влияния коэффициента поглощения возникает прежде всего при решении задач рассеяния света крупными частицами атмосферного аэрозоля. На **рисунке 9** (для всех направлений рассеяния) и на **рисунке 10** (для отдельных углов рассеяния) представлено сравнение характеристик рассеяния света с учетом поглощения и без него для произвольной несферической частицы при увеличении ее размеров.

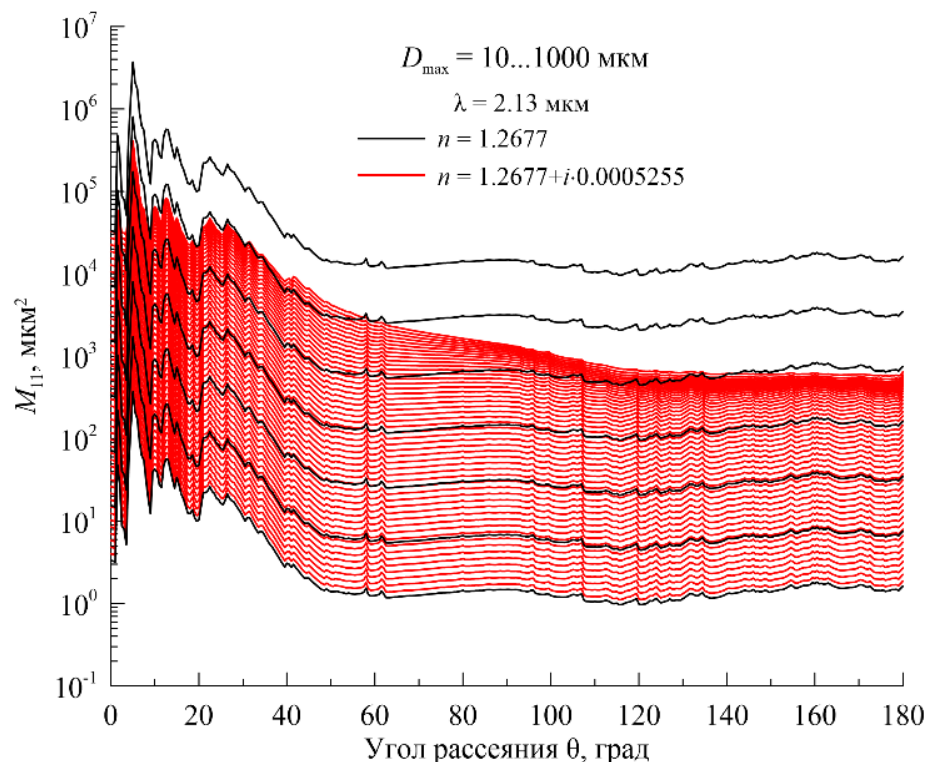


Рисунок 9. Сравнение матрицы рассеяния M_{11} для частиц произвольной формы, с поглощением и без поглощения

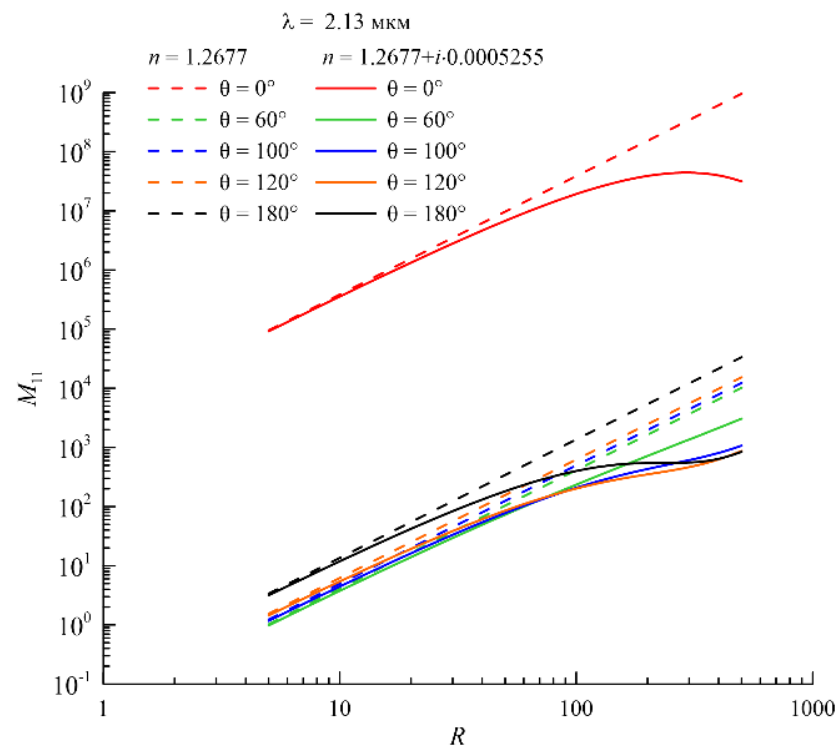


Рисунок 10. Сравнение частиц с поглощением и без поглощения для углов рассеяния $0^\circ, 60^\circ, 100^\circ, 120^\circ, 180^\circ$