

# ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРИСТЫХ ОБЛАКОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ФИЗИЧЕСКОЙ ОПТИКИ В ЗАДАЧАХ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС

Ткачев И.В.<sup>1,2</sup>, Кустова Н.В.<sup>1,2</sup>, Шишко В.А.<sup>1,2</sup>, Тимофеев Д.Н.<sup>1,2</sup>, Коношонкин А.В.<sup>1,2</sup>

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

(2) Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
**ИНСТИТУТ ОПТИКИ АТМОСФЕРЫ им. В.Е. ЗУЕВА**  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК



Национальный  
исследовательский  
**Томский  
государственный  
университет**

# Актуальность исследования

Российская спутниковая система навигации ГЛОНАСС играет важную роль, находя применение не только в военных, но и в гражданских целях. Для ее эффективной работы необходимо постоянно отслеживать положение космических аппаратов на орбите. В этом помогают квантово-оптические станции. Например, лазерные дальномеры «Сажень-ТМ-Д» и «Точка» позволяют с высокой точностью (до субсантиметра) определять расстояние до спутника. Однако этот метод требует ясного неба, что бывает далеко не всегда, так как около 60–70% поверхности Земли покрыто облаками, из которых порядка 30% — перистые.

Чтобы увеличить количество благоприятных дней для мониторинга, Роскосмос создает сеть квантово-оптических станций (КОС) и беззапросных измерительных станций (БИС) ГЛОНАСС. В настоящее время построено 11 отечественных и 4 зарубежных станций. Они расположены как в северном, так и в южном полушариях (Бразилия, Венесуэла, ЮАР и другие страны). Ведутся переговоры о строительстве новых станций в странах БРИКС.

# Цель исследования

Специалистами НПК «СПП» выдвигается гипотеза\*, что перистые облака не оказывают значительного влияния на точность ГЛОНАСС. Если получится ее подтвердить, это позволит сократить расходы на строительство дополнительных станций и повысить точность системы.

Для подтверждения гипотезы необходимо построить модель, описывающую взаимодействие лазерного излучения с перистыми облаками. Роскосмос занимается изучением этого процесса, фокусируясь на взаимодействии лазера с микроскопическими ледяными кристаллами в облаках, однако для более точного анализа поведения взаимодействия лазерного излучения требуется более детализированная модель.

\*[Бусыгин В. П., Кузьмина И. Ю. // Опт. атмосф. и океана. 2024. Т. 37. С. 176–183. DOI: 10.15372/A0020240213]

# Разрабатываемая модель

Модель представляет собой банк данных матриц рассеяния света на атмосферных частицах перистых облаков, для хаотической пространственной ориентации, полученный в рамках метода физической оптики. Расчеты проводятся для конуса рассеяния «вперёд» ( $0-25^\circ$ ) и «назад» ( $170^\circ-180^\circ$ ), что позволяет оценивать поведение, как сигнала прошедшего через атмосферу, так и отраженного от спутника, наиболее важное для оптических дальномеров. Диапазон исследуемых размеров частиц составляет от 10 до 1000 мкм. На данный момент модель находится в разработке, потому в работе представлена лишь часть полученных результатов на примере крупных гексагональных столбиков размерами от 100 мкм для длин волн ( $\lambda = 1.55, 1.064, 0.532$  и  $0.85$  мкм).

Полученная модель поможет подтвердить или опровергнуть выдвинутую гипотезу, а так же в свою очередь повысить эффективность системы ГЛОНАСС и расширить возможности для исследований в новых научных областях, таких как дистанционное зондирование Земли, перенос солнечного излучения в атмосфере, и многих других.

Исследование выполняется за счет гранта Российского научного фонда №25-17-00087, <https://rscf.ru/project/25-17-00087/>.

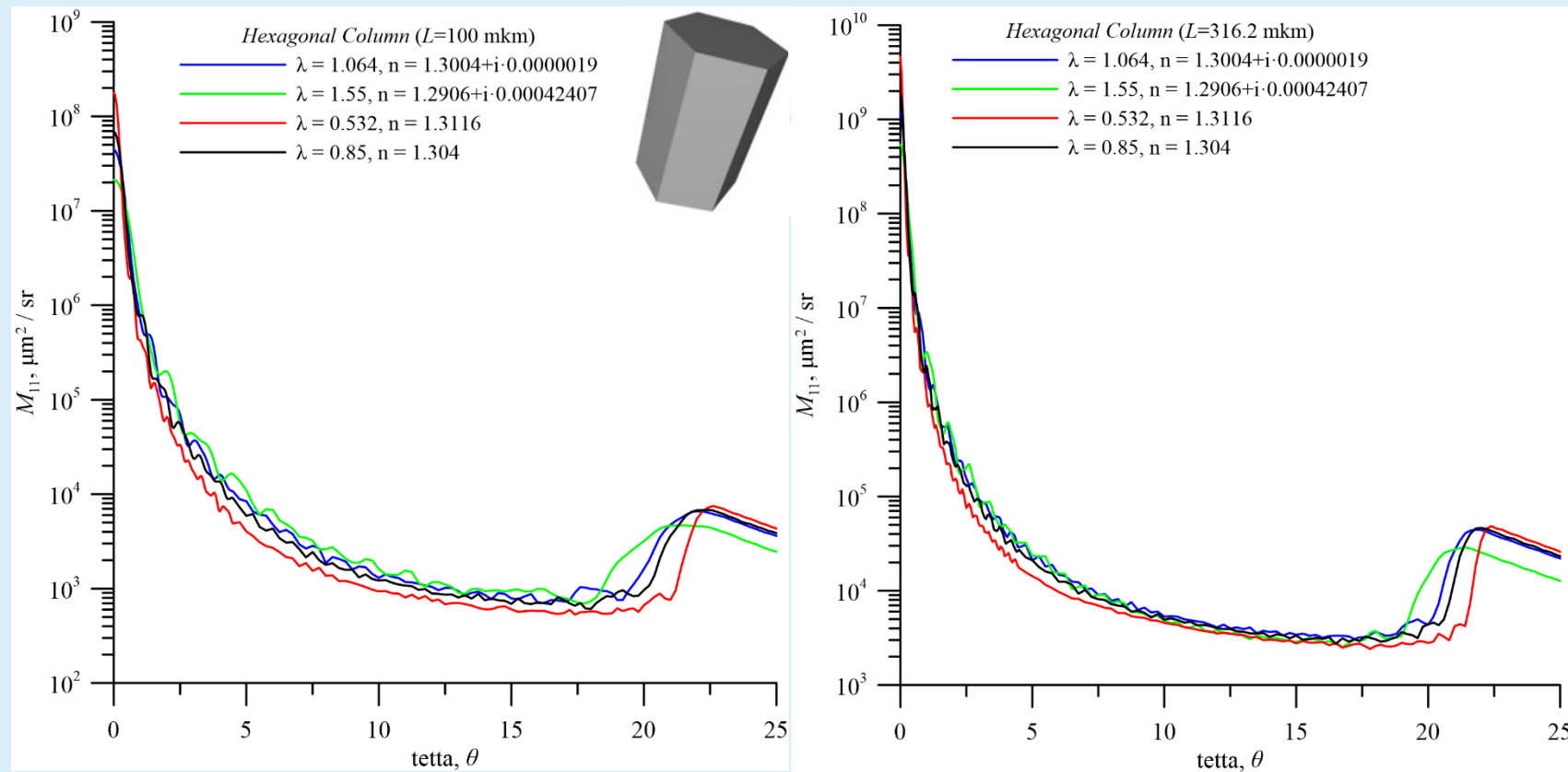


Рис.1 Зависимость первого элемента матрицы Мюллера ( $M_{11}$ ) от угла рассеяния света в интервале от 0 до 25° для частиц размером 100 мкм и 316.2 мкм.

Для наглядного представления рассеяния света в направлении «вперед», на слайде представлен результат для гексагонального столбика ( $L = 100$  и 316.2 мкм).

Расчеты проводились в диапазоне рассеяния света от 0 до 25°. Данный выбор был обусловлен необходимостью учета Гало, расположенного в окрестности 22°. Исследование направления «вперед» имеет важное значение, поскольку оно предоставляет данные о том, как сигнал достигает спутника при прохождении через перистые облака, а также о влиянии этих облаков на качество и характеристики сигнала.

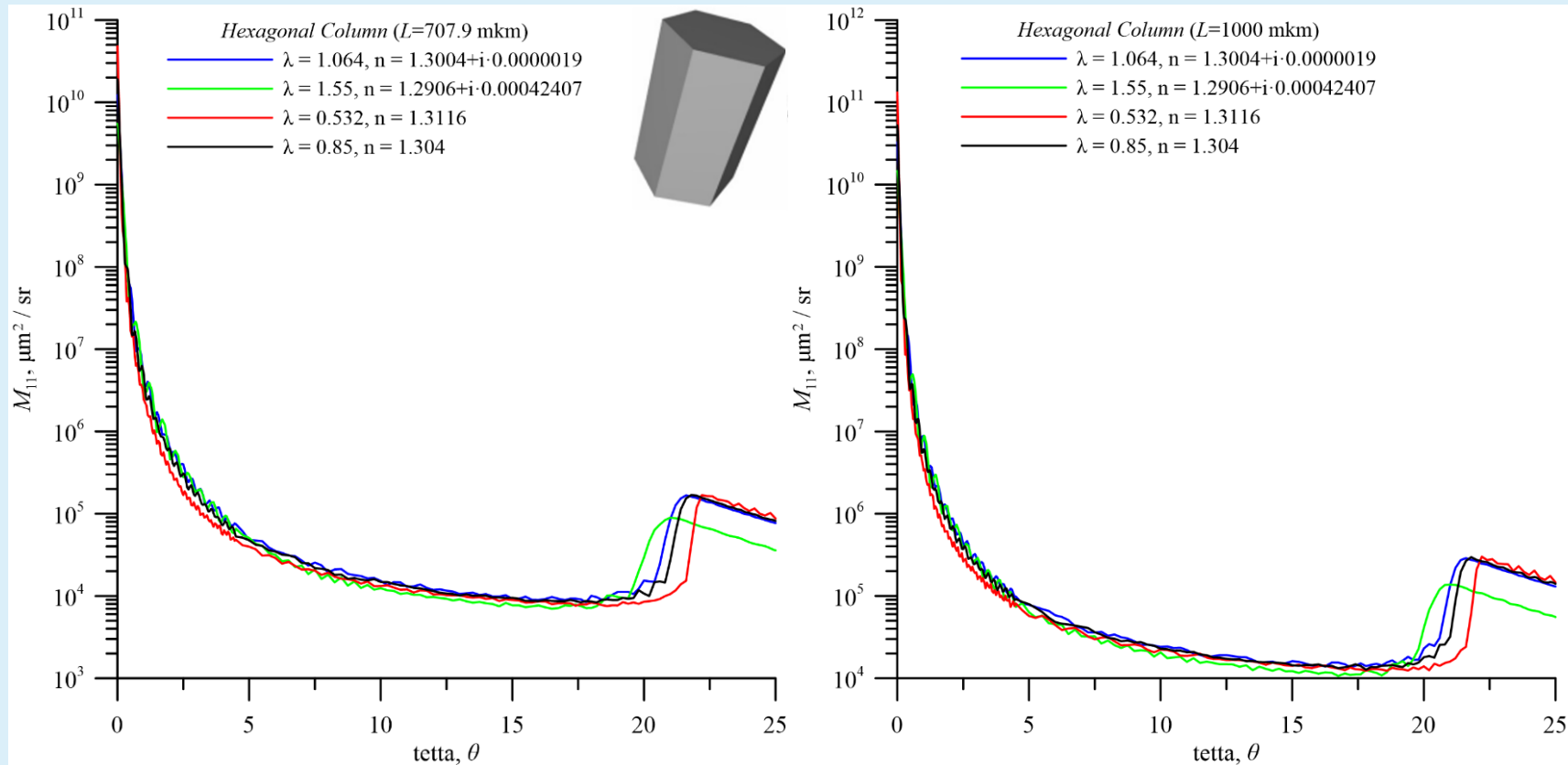


Рис.2 Зависимость первого элемента матрицы Мюллера ( $M_{11}$ ) от угла рассеяния света в интервале от  $0^\circ$  до  $25^\circ$  для частиц размером 707.9 мкм и 1000 мкм.

Так же в качестве примера представлены результаты для частицы размером 707.9 мкм и 1000 мкм. По завершению всей работы будут представлен 21 размер в диапазоне от 100 до 1000, который так же включит в себя длины волн ( $\lambda = 0.355$  и  $0.4$  мкм).

Полученные результаты будут дополняться расчетами по геометрической оптике в диапазоне от  $25$  до  $170^\circ$ , что в итоге даст полный диапазон рассеяния света от  $0$  до  $180^\circ$ , необходимый для интерпретации лидарных данных.

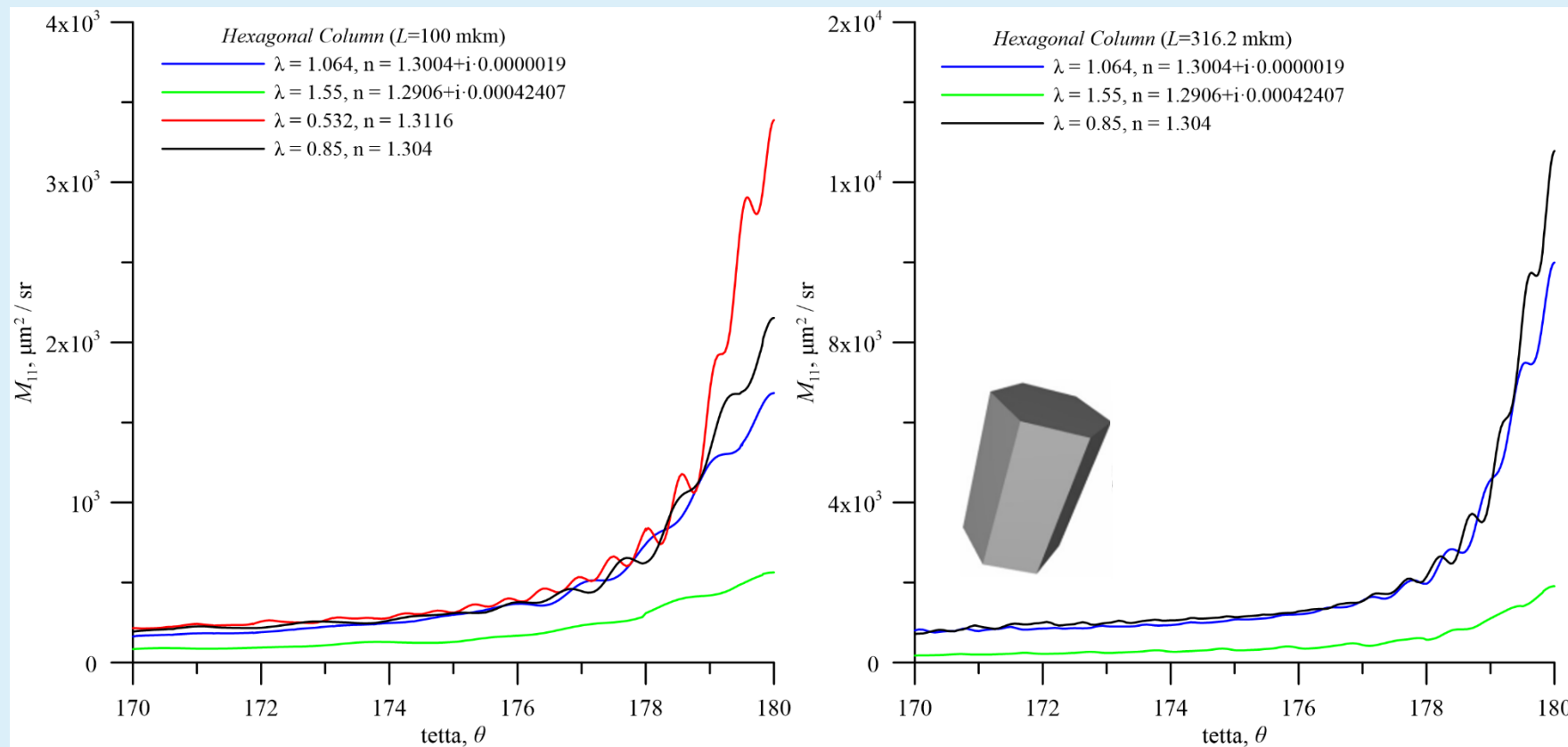


Рис.3 Зависимость первого элемента матрицы Мюллера ( $M_{11}$ ) от угла рассеяния света в интервале от 170 до 180° для частиц размером 100 мкм и 316.2 мкм.

На данном слайде представлен результат расчета для диапазона рассеяния в направлении «назад» при хаотической пространственной ориентации частиц, для гексагонального столбика ( $L= 100$  и  $316.2$  мкм). Расчеты проводились в диапазоне рассеяния света от 170 до 180°.

Ранее проводилось исследования для различных частиц перистых облаков в направлении «строго назад», т.е. ровно 180°, в результате чего в 2023 году был построен банк данных\*.

\* [ftp://ftp.iao.ru/pub/GWDT/Physical\\_optics/Backscattering/Data\\_bank\\_2023\\_level\\_2/](ftp://ftp.iao.ru/pub/GWDT/Physical_optics/Backscattering/Data_bank_2023_level_2/) (ссылка на банк данных 2023 года)

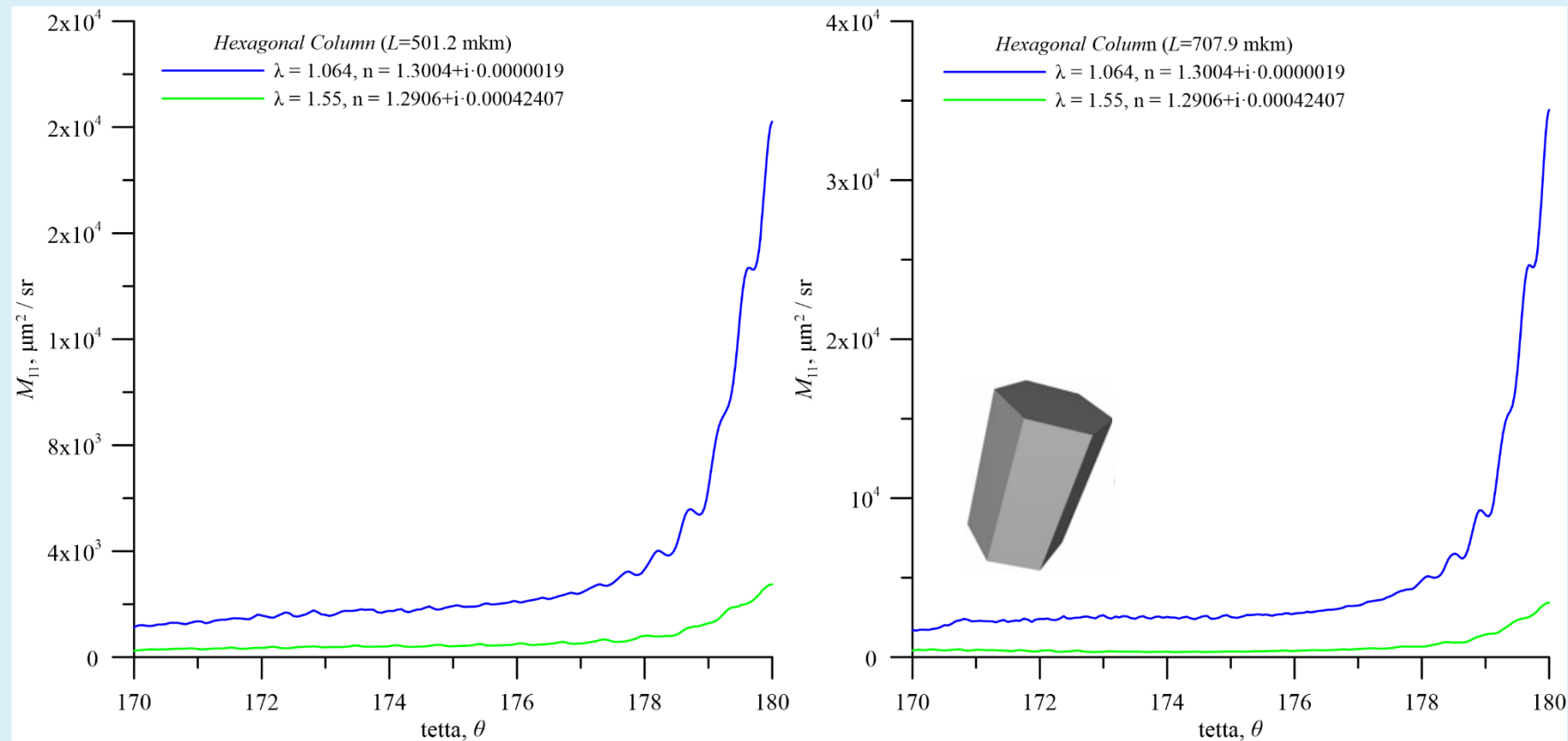


Рис.4 Зависимость первого элемента матрицы Мюллера ( $M_{11}$ ) от угла рассеяния света в интервале от  $170^\circ$  до  $180^\circ$  для частиц размером 501.2 мкм и 707.9 мкм.

Аналогично представлены результаты для гексагонального столбика размером 501.2 мкм и 707.9 мкм. Результаты исследований в направлении «назад» открывают перспективы для разработки инновационных технологий, направленных на изучение поведения сигнала при его отражении от спутника и прохождении через перистые облака. Разработки основанные на полученной базе данных критически важны для калибровки Российской спутниковой системы ГЛОНАСС.



# Вывод

Полученная модель способствует созданию принципиально новых технологий и методов калибровки спутников ГЛОНАСС, отличающихся от существующих возможностью проводить калибровку в присутствии перистых облаков. В частности модель понадобится для таких зарубежных организаций, как Японское агентство аэрокосмических исследований (JAXA), Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA), Немецкая метеорологическая служба (DWD), Европейское космическое агентство (ESA) и Китайская академия наук, для разработки и совершенствования алгоритмов интерпретации данных космического лидара, радиометрических измерений и климатических моделей. Создаваемое решение имеет практическую и социальную значимость, способствует развитию новых научных направлений в Российской Федерации и будет оказывать влияние на мировую науку, углубляя понимание характеристик и структуры перистых облаков.