Угольников О.С. (отдел 64)

**Высоты, микрофизические свойства частиц полярных мезосферных облаков и реакция на волновые возмущения в стратосфере и мезосфере**

Цикл из 7 статей:

1. Ugolnikov, O.S., 2024. Noctilucent clouds altitude and particle size mapping based on spread observations by ground-based all-sky cameras. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. v.259, p.106242. https://doi.org/10.1016/j.jastp.2024.106242.

2. Ugolnikov, O.S., Pertsev, N.N., Perminov, V.I., et al., 2025. Five-years altitude statistics of noctilucent clouds based on multi-site wide-field camera survey. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. v.269, p.106491. https://doi.org/10.1016/j.jastp.2025.106491.
(*О.С. Угольников – единственный автор из ИКИ*)

3. Ugolnikov, O.S. 2025. Winter noctilucent clouds following sudden stratospheric warming: first observations. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. v.270, p.106507. https://doi.org/10.1016/j.jastp.2025.106507.

4. Ugolnikov, O.S., 2026. Multiple scattering effects in noctilucent clouds: numerical estimation and application to altitude and particle size measurements. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. V.353, p.109836. https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2026.109836.

5. Ugolnikov, O.S., Yankovsky, I.S., Pertsev, N.N., et al., 2026. Noctilucent clouds modulated by strong 5-day planetary wave in 2025: amplitudes, phases and altitudes based on ground-based observations and satellite temperature data. Advances in Space Research, v.77, p. 12466-12475. https://doi.org/10.1016/j.asr.2026.04.038.
*(О.С. Угольников – единственный автор из ИКИ*)

6. Ugolnikov, O.S., Golubeva, O.Yu., Ugolnikov, E.O., 2026. Three-dimensional velocity analysis and particle size dynamics from multi-site RGB-photometry of noctilucent clouds. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics (in press)
*(О.С. Угольников – единственный автор из ИКИ, принята в печать, справка прилагается*)

7. Угольников, О.С., Янковский, И.С., 2026. Высота и поле скоростей внесезонных мезосферных облаков, связанных с запуском космического аппарата. Космические исследования (в печати)
*(О.С. Угольников – единственный автор из ИКИ, принята в печать, справка прилагается*)

Общая формулировка проблемы и ее актуальность

Проблема мониторинга глобальных и микрофизических характеристик полярных мезосферных облаков актуальна в свете их долговременных трендов, вызванных климатическими изменениями (похолоданием) за счет роста содержания парниковых газов и увлажнением всех слоев атмосферы в течение последних десятилетий. Отдельной актуальной задачей является исследования отклика мезосферных облаков на волновые возмущения и кратковременные воздействия, такие, как внезапное стратосферное потепление или запуск космического аппарата в высоких широтах.

Для решения задачи необходима методика, позволяющая проводить систематический мониторинг большого числа событий и определения характеристик частиц облаков и их производных по времени. Экспериментальной основой является сеть ручных и автоматических камер в средних широтах, существенно расширенная за последние годы. Высота облаков определяется двумя принципиально разными подходами, что важно для контроля точности всей методики.

Отдельной задачей стало исследование свойств и причин появления нового типа облаков – зимних мезосферных облаков естественного происхождения, которые наблюдались впервые в истории в ходе выполнения проекта.

Конкретная решаемая в работе задача и ее значение

Основные задачи, решавшиеся в ходе цикла работ:

1) Разработка триангуляционного метода измерения скорости и высоты отдельных фрагментов поля мезосферных облаков на основе измерений большого числа камер и анализа корреляционных функций (работы [1, 2, 6, 7]);

2) Разработка и уточнение метода измерения высоты мезосферных облаков на основе колориметрических измерений вблизи края тени Земли. Методика была создана в работах до 2024 года, в данном цикле было проведено сравнение с триангуляционными данными (работы [2, 5]). Оценка влияния вклада многократного рассеяния на основе модели численного анализа методом Монте-Карло (работа [4]).

3) Определение высоты внесезонных мезосферных облаков, вызванных запуском космического аппарата (работа [7]) и появившихся зимой в результате внезапного стратосферного потепления и, как следствие, резкого похолодания мезосферы (работа [3]).

4) Определение эффективного радиуса частиц мезосферных облаков (работа [1]) и его изменения со временем (работа [6]) на основе фотометрии и колориметрии фиксированных фрагментов облаков при разных углах рассеяния. Восстановление связи размера частиц и его изменения со скоростью ветра и особенностями распределения температур в мезосфере средних широт. Оценка характерного времени испарения частиц, сравнение с известными теоретическими результатами.

5) Восстановление связи появления мезосферных облаков с прохождением планетарной волны. Оценка времени роста частиц на основе сравнения фаз волны и времени появления облаков (работа [5]).

Используемый подход, его новизна и оригинальность

Триангуляционная методика измерения высоты мезосферных облаков использовалась, фактически, с момента их открытия в конце XIX века. Необходимость продолжения подобных измерений в настоящее время определяется задачей поиска векового тренда высоты. При измерении высот другими методами (например, лидарным зондированием) и сравнением с историческими триангуляционными данными возникает ошибка, связанная с зависимостью измеренной высоты от самой методики. Современная триангуляция дает возможность измерения высот большого числа фрагментов за счет анализа широких массивов данных из разных точек наблюдения, чего не могло быть раньше.

Колориметрическая методика связана с измерением спектрального состава свечения облаков при их вхождении в тень озонового слоя, а затем тропосферы Земли. Точные спутниковые данные о температуре и профиле озона в атмосфере позволяют достичь точности измерения высоты, сравнимой с триангуляцией. Для этого достаточен минимальный объем измерений только из одного пункта поверхности Земли. Именно так была оценена высота зимних мезосферных облаков, внезапно появившихся в декабре 2024 года в восточной Сибири, где не существовало сети автоматических камер, способных провести триангуляционные измерения. Данные о высоте позволили сделать вывод о причине появления облаков.

Размер частиц облаков определяется по сравнению интенсивности и цветовых индексов одного и того же фрагмента при наблюдении из разных пунктов, соответствующих разным углам рассеяния. Точность измерений доходит до нескольких нанометров, а для наиболее ярких фрагментов удается измерить скорость нуклеации/испарения частиц на масштабе времени 10-20 минут.

Полученные результаты и их значимость

Основным результатом цикла работ является обширный массив данных о высотах фрагментов мезосферных облаков за последние 7 лет. Сравнение с историческими данными показывает признаки понижения слоя облаков за все время их наблюдения, предсказанного теоретическими моделями с учетом роста содержания парниковых газов. Точная количественная оценка тренда будет проведена в будущем с учетом таких факторов, как солнечная активность. Важно, что настоящие измерения охватывали эпоху ее максимума.

Наряду с триангуляционным методом, развивался колориметрический метод измерения высоты. Одной из возможных проблем этого метода считался вклад многократного рассеяния в свечение облаков. Для оценки этого вклада специально была создана модель рассеяния излучения Солнца в атмосфере в период сумерек методом Монте-Карло. В результате, был сделан вывод о незначительности вклада многократного рассеяния и его малом влиянии на измерения высоты и размера частиц облаков.

Впервые в истории были зафиксированы зимние мезосферные облака природного происхождения на высоте 70 км. В обычных условиях частицы льда образоваться там зимой не могут, так как температура примерно на 70-80 K выше порога замерзания для данного давления. Она может достаточно быстро уменьшиться над зоной внезапного стратосферного потепления, но даже и в это время оставалась выше пороговых значений. В декабре 2024 года после необычного по своим характеристикам стратосферного потепления (оно затронуло только верхние слои стратосферы) температура достигла порога в 155 K. Высота появившихся мезосферных облаков, измеренная колориметрическим методом, совпала с высотой температурного минимума.

Измерение среднего фазового сдвига между появлением облаков и температурного минимума сильной планетарной волны, а также производной радиуса частиц по времени позволили определить характерные времена нуклеации и испарения частиц и сравнить их с теоретическими оценками. Необходимо отметить, что широкоугольное зондирование наземными камерами остается единственной возможностью следить за фиксированным фрагментом облачного поля в течение длительного времени. Результаты показали важность горизонтального переноса как основного фактора, определяющего появление мезосферных облаков в средних широтах.