УДК 551.576.1
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-479
ORCID: 0000-0002-5986-3981

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЛАЧНЫХ ПОЛЕЙ НАД ТОМСКОМ ПО ДАННЫМ КОМПЛЕКСНОГО МОНИТОРИНГА ЗА ПЕРИОД 2018-2025 гг.

В.А. Шишко, А.И. Елизаров, А.В. Шалеев, Г.П. Коханенко, А.С. Насонова, А.В. Скороходов

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

CHARACTERISTICS OF CLOUDING OVER TOMSK BASED ON INTEGRATED MONITORING DATA FOR THE PERIOD FROM 2018 TO 2025

V.A. Shishko, A.I. Elizarov, A.V. Shaleev, G.P. Kokhanenko, A.S. Nasonova, A.V. Skorokhodov

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia, sva@iao.ru

Аннотация. Комплексный мониторинг посредством активного лидарного зондирования и пассивного наблюдения камерой полного неба (all-sky-камера) позволяет одновременно как исследовать динамику микроструктуры облачности, так и осуществлять ее визуальный контроль. Дополнительное использование результатов спутникового мониторинга района расположения лидарной станции позволяет оценить следующие характеристики облачности: оптическую толщину, эффективный радиус частиц, водозапас, высоту верхней границы, а также давление и температуру на ней, коэффициенты излучения и отражения, фазовый состав. Такой подход существенно облегчает морфологическую классификацию облачности и повышает достоверность восстановления микрофизических параметров.

Ключевые слова: облака, лидарное зондирование, характеристики облаков, MODIS, all-sky камера, классификация облаков.

Abstract. Complex monitoring with the use of active lidar sounding and passive all-sky camera observation allows us to study cloud microstructure dynamics simultaneously with visual monitoring. The additional use of satellite monitoring data above the lidar station allows for the assessment of cloud characteristics such as optical thickness, effective particle radius, liquid water content, cloud-top height, cloud-top pressure and temperature, emissivity and reflectivity, and phase composition. This approach significantly simplifies cloud morphological classification and improves the reliability of microphysical parameter retrieval.

Keywords: clouds, lidar sounding, cloud characteristics, MODIS, all-sky camera, cloud classification.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время облачность остается одним из ключевых источников неопределенности при оценке современных и будущих изменений климата Земли [Baker, 1997]. Наибольший вклад в разброс климатических оценок вносят облака нижнего яруса (слоистые и слоисто-кучевые) над океанами, существенно влияющие на планетарное альбедо, а также кристаллические облака (относящиеся к облакам верхнего яруса), которые удерживают уходящее длинноволновое излучение в тропосфере [Liou, 1986]. При исследовании кристаллической облачности особое внимание уделяется микрофизическим характеристикам частиц, из которых они состоят (размер, форма и пространственная ориентация ледяных частиц), поскольку эти параметры определяют поляризационные и радиационные свойства облачного слоя [Um et al., 2015].

Одним из наиболее информативных методов исследования кристаллических облаков является лазерное поляризационное зондирование. Его преимущество состоит в дистанционном характере измерений: атмосферные частицы исследуются без нарушения их естественного состояния. Сканирующие лидарные системы, включая мобильные модификации, позволяют менять угол зондирования относительно вертикали и выполнять азимутальное сканирование. Такая геометрия дает возможность анализировать угловую зависимость поляризационных характеристик рассеянного сигнала и получать информацию об анизотропии рассеивающих частиц, в том числе о преимущественной ориентации ледяных кристаллов.

Сканирующие лидарные системы, в отличие от вертикально-направленных инструментов, как правило, не функционируют в режиме непрерывного мониторинга. Их работа ориентирована на проведение целевых наблюдений, например, при наличии кристаллических облаков, поскольку изменение геометрии зондирования требует активного управления системой. Поэтому при планировании экспериментов необходимо знание статистики повторяемости целевых объектов и сопутствующих синоптических условий.

Цель работы — изучение статистических характеристик облачных полей над районом расположения наземной сканирующей лидарной станции ЛОЗА-М3 в Томске на основе данных многолетних лидарных наблюдений с 2018 по 2025 г. и all-sky-изображений камеры полного неба TomSky с привлечением спутниковых продуктов MODIS и данных реанализа ERA5.

МЕТОДОЛОГИЯ

С 2018 г. лидар ЛОЗА-М3 и камера полного неба TomSky эксплуатируются в режиме совместных наблюдений. Оба прибора расположены в Томске (56°28′ с.ш., 85°00′ в.д.). Географическое положение пункта наблюдения определяет выраженную сезонность облачного режима и высокую изменчивость синоптических условий. Для региона характерен активный меридиональный перенос воздушных масс, сопровождающийся вторжениями холодного арктического воздуха с севера и теплых воздушных масс с юга. Такая обстановка формирует сложный режим эволюции кристаллических облаков и требует исследования статистики повторяемости облаков и сопутствующих синоптических условий.

Лидар ЛОЗА-М3 реализует схему конического сканирования с плавным изменением угла наклона оптической оси. Это позволяет исследовать преимущественную ориентацию ледяных кристаллов и проявления зеркального отражения в облаках верхнего яруса. Информацию о микрофизических параметрах обеспечивают две длины волны излучения (532 и 1064 нм) и рамановский канал (607 нм), подробное описание лидара приведено в [Kokhanenko et al., 2020].

Для визуального сопровождения лидарных измерений используется камера полного неба TomSky [Galileyskii et al., 2021]. Она позволяет контролировать общую облачную обстановку в реальном времени, что критически важно для интерпретации данных активного зондирования, особенно при наличии нижележащих слоев.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В этом году дорабатывается решение задачи автоматической классификации типов облачности на all-sky-изображениях путем подключения методов глубокого обучения (Deep Learning). Такой подход позволяет проводить автоматическую классификацию типов облачности с пределом точности 85 %. Примеры распознавания типов облачности приведены на рис. 1.

Преодолеть предел точности классификации облачности позволяет переход к подходу, ориентированному на качество данных (Data-Centric AI), с учетом мультимодальных метеоданных перед масштабированием алгоритмов. В качестве метеоданных могут быть использованы ежедневные продукты спутниковой съемки спектрорадиометром MODIS (англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). В этом случае могут использоваться MOD06_L2 (спутник Terra) и MYD06_L2 (спутник Aqua), а также соответствующие им файлы геопривязки MOD03 и MYD03, полученные над местом расположения лидарной станции. Использование продукта реанализа ERA5 (англ. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Reanalysis v5) позволяет восстановить почасовые данные синоптической обстановки на различных высотах, что должно повысить точность классификации.

Общий объем выборки по данным двух спутниковых систем за выбранный временной период составляет порядка 2800 эпизодов наблюдений облачности. Из них кристаллические облака составили порядка 800 эпизодов (29 %), жидкокапельные — 1800 (64 %), неопределенные — 200 эпизодов (7 %). Наиболее часто встречаются однослойные облака (0 на гистограмме слойности облаков обозначает, что слойность не определена). Статистические данные по выборке эпизодов представлены на рис. 2, где вертикальная шкала соответствует количеству эпизодов, а горизонтальная — исследуемой характеристике.

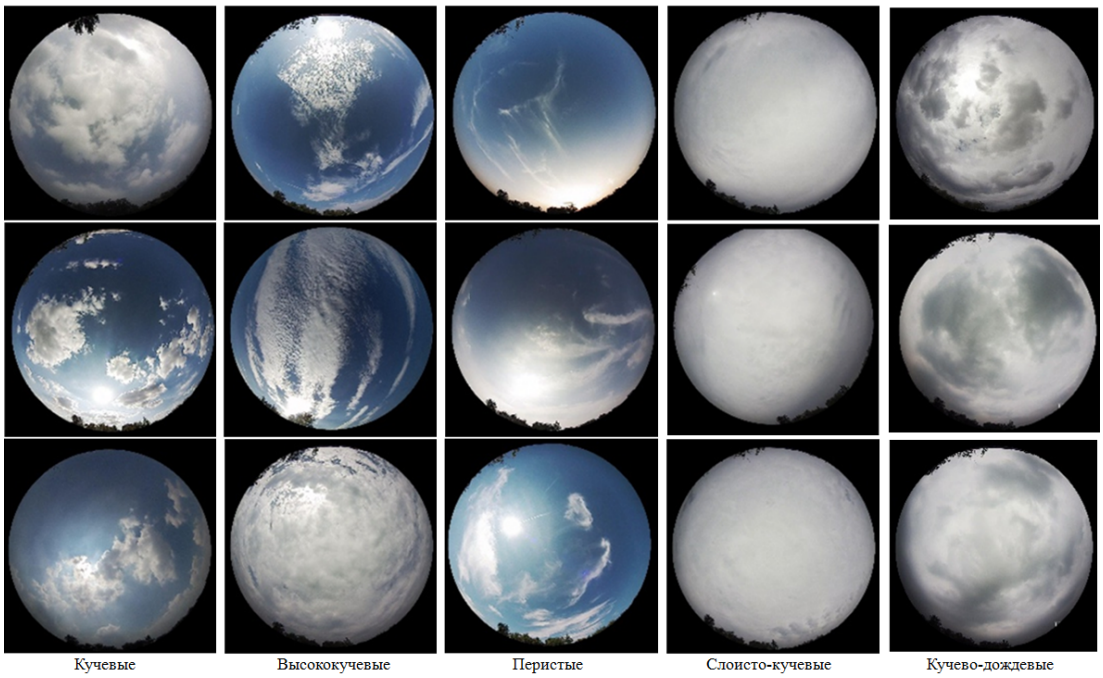

Рис. 1. Примеры оригинальных all-sky-изображений, распознанных методом глубокого обучения

На рис. 3 представлен пример сеанса сканирующего зондирования лидаром ЛОЗА-М3. Вертикальная шкала на рисунке соответствует высоте зондируемого объекта. Цветовая шкала показывает интенсивность сигнала I, умноженную на квадрат расстояния R^2, и деполяризационное отношение δ. В отличие от вертикального лазерного зондирования, сканирование под различными углами позволяет выявить анизотропию рассеяния, характерную для ориентированных ледяных кристаллов. Анализ угловой зависимости I и δ позволяет идентифицировать фазовый состав облаков и оценить распределение отклонения частиц относительно горизонтальной плоскости (флаттер).

Поведение деполяризационного отношения говорит о том, что в верхней части кристаллического облака на высоте 10000 м имеется слой кристаллических частиц с квазигоризонтальной ориентаций с большим углом флаттера. Этот слой проявляет себя более низким значением деполяризационного отношения, что видно в начале сеанса зондирования, где происходит калибровка лидара по вертикали. Обычно калибровка выполняется пересечением оси сканирующего лидара через зенит, сканирование выполняется с небольшим углом наклона лидара, примерно 5° (зеленые области на рис. 3). При большем угле сканирования лидара видны только хаотически ориентированные частицы. В конце сеанса сканирования лидар направлен вертикально вверх в течение одной минуты и можно увидеть в деполяризационном отношении слоистую структуру облака, в нижней части которой имеются хаотически ориентированные гексагональные частицы, а в верхней — квазигоризонтально ориентированные частицы с сильным флаттером.

Согласно данным наблюдений со спутника Terra (продукт MOD06_L2/MYD06_L2) в 13:05 местного времени, были получены следующие синоптические параметры:

— высота верхней границы облаков: 11450 м;

— температура верхней границы облаков: 219.82 К;

— давление на верхней границе облаков: 225 мм рт. ст.;

— коэффициент излучения облаков: 0.91;

— коэффициент отражения облаков: 0.34;

— оптическая толщина облаков: 4;

— эффективный радиус облаков: 37.46 мкм;

— содержание воды в облаках: 92 г/м².

Спутниковые данные коррелируют с данными визуального контроля и лидарного зондирования. Проведение почасового реанализа ERA5 позволит добиться большего понимания условий формирования кристаллической облачности в выбранном эпизоде.

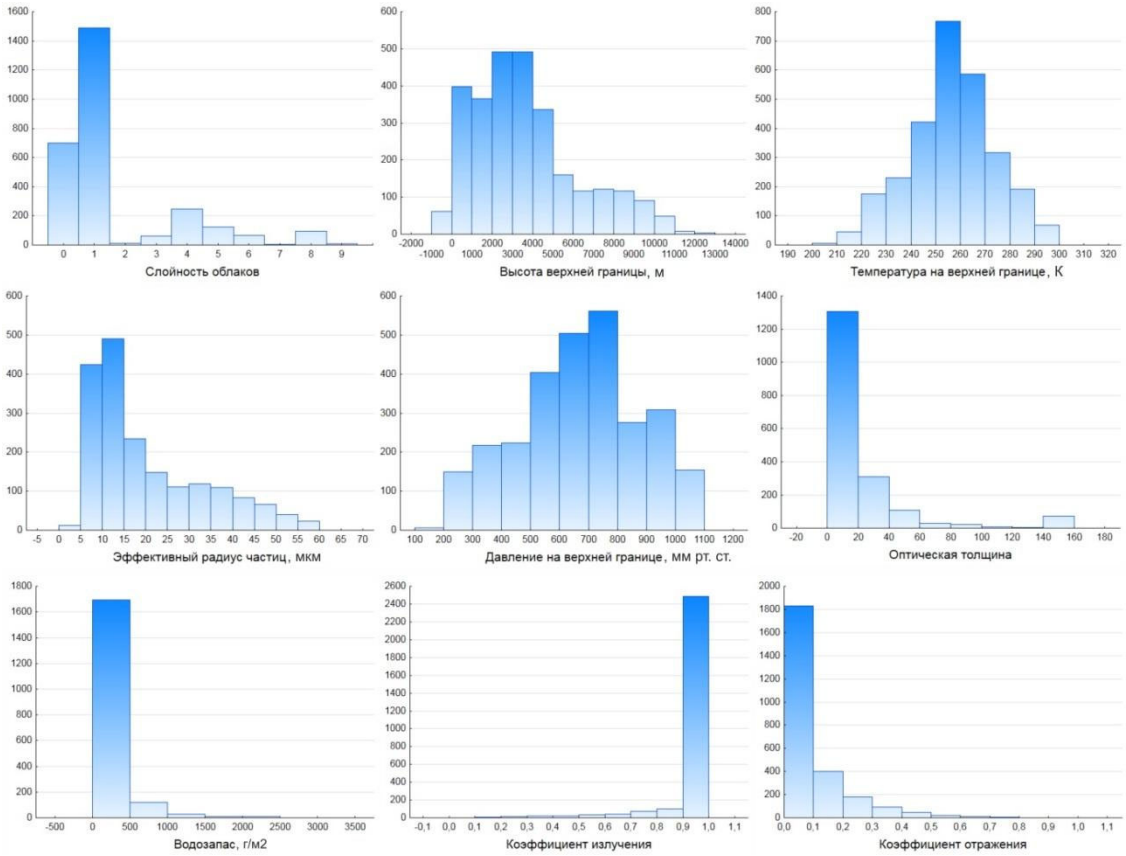

Рис. 2. Примеры статистических данных по выборке эпизодов наблюдения облаков, полученные со спутников Terra и Aqua

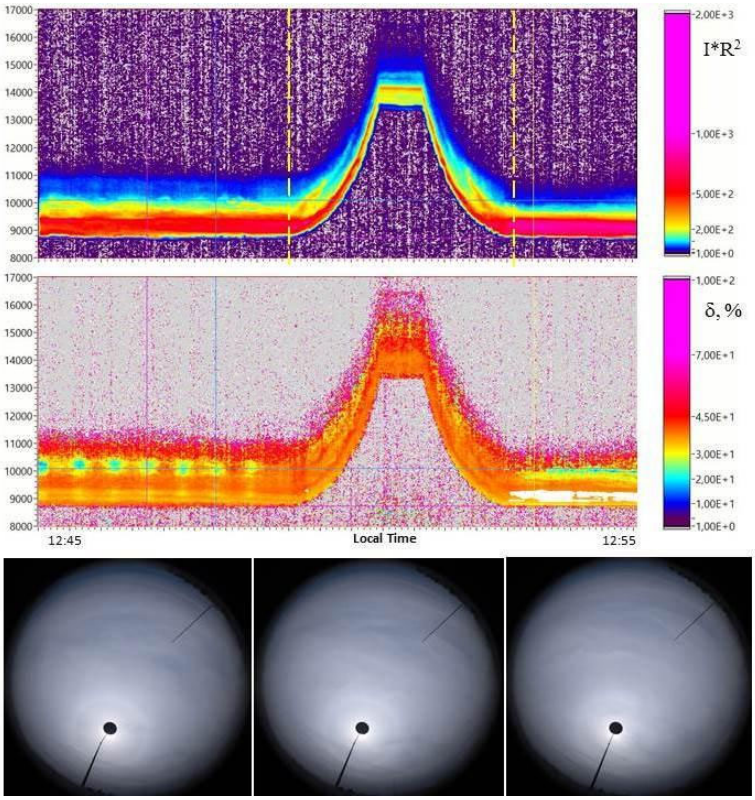

Рис. 3. Сеанс сканирующего зондирования с 12:45 по 12:55 по местному времени 20 июля 2023 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интеграция визуального контроля и данных активного зондирования позволяет компенсировать ограничения каждого метода в отдельности. Камера обеспечивает контекст общей облачности, а лидар количественные параметры микроструктуры. В результате достоверность классификации оказывается выше, чем при раздельном использовании приборов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 25-77-10053, https://rscf.ru/project/ 25-77-10053/).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Baker B.M. Cloud microphysics and climate // Science. 1997. V. 276. P. 1072–1078.

Galileyskii V.P., Elizarov A.I., Kokarev D.V., et al. Software and hardware system for monitoring and control of the optical-physical state of the atmosphere: part 1: panoramic optical station // Proc. SPIE. 2021. V. 11916, 119168K.

Kokhanenko G.P., Balin Y.S., Klemasheva M.G., et al. Scanning polarization lidar LOSA-M3: Opportunity for research of crystal particle orientation in the clouds of upper layers // Atmos. Meas. Tech. 2020. V. 13. P. 1113–1127.

Liou K.N. Influence of cirrus clouds on weather and climate processes — a global perspective // Mon. Weather Rev. 1986. V. 114. P. 1167–1199.

Um J., McFarquhar G.M., Hong Y.P., et al. Dimensions and aspect ratios of natural ice crystals // Atmos. Chem. Phys. 2015. V. 15. P. 3933–3956.