

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ВЫСОТНОГО МАТРИЧНОГО ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ЛИДАРА ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИИ АЭРОЛОГИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ, РЕАНАЛИЗОВ И СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Самохвалов И.В., Брюханов И.Д.^{*}, Кучинская О.И., Пустовалов К.Н., Пензин М.С.,

Животенюк И.В., Ни Е.В., Локтюшин О.Ю., Акимов И.М., Романов Д.А.

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

e-mail: ^{*}plyton@mail.tsu.ru

В работе представлен комплексный подход к изучению облаков верхнего яруса (ОВЯ), сочетающий лидарные наблюдения, аэрологическое зондирование, спутниковую спектрорадиометрию (MODIS) и атмосферные реанализы (ERA5, MERRA-2). Особое внимание уделено ОВЯ с горизонтально ориентированными кристаллами льда (зеркальным). Описаны их пространственные параметры и характерные метеорологические условия формирования. Показана эффективность интеграции разнородных источников данных для уточнения микрофизических и оптических характеристик облаков. Полученные результаты могут использоваться для повышения точности климатических моделей и краткосрочного прогноза облачности, подтверждая значимость междисциплинарного анализа в метеорологии и климатологии.

Облачность является регулятором поступления солнечной энергии к поверхности Земли и, вместе с тем, важнейшим фактором, определяющим радиационный баланс в климатической системе Земли. Облака верхнего яруса (ОВЯ) простираются на расстояния до тысячи километров [1], покрывая до 50% поверхности нашей планеты [2] и существенно влияя на климатические процессы [3]. Эти облака одновременно отражают солнечное излучение, способствуя охлаждению атмосферы, и задерживают инфракрасное, усиливая парниковый эффект [4]. Современные модели атмосферы слабо учитывают микроструктуру ОВЯ, что снижает точность прогнозов погоды и климата.

ОВЯ отличаются от облаков на более низких высотах тем, что состоят преимущественно из ледяных кристаллов. При определённых условиях они приобретают горизонтальную ориентацию и размеры, значительно превышающие длину волны коротковолнового оптического диапазона (сотни микрон). Плоские грани таких частиц вызывают зеркальное рассеяние, из-за чего облака называют зеркальными. Наблюдаемое явление солнечного гало подтверждает наличие такой ориентации частиц в атмосфере.

Конденсационные следы самолётов по оптическим свойствам схожи с ОВЯ. Они ослабляют солнечное излучение и служат основой для образования перистых облаков. Длительно существующие (более 10 минут) следы признаны Всемирной метеорологической организацией (WMO) единственным искусственным типом ледяных облаков – *Cirrus homogenitus* [5]. Их изучение затруднено: контактные приборы (например, на авиационных

носителях) не фиксируют (и вовсе нарушают) ориентацию кристаллов, а спутниковые инструменты плохо выявляют следы на начальных стадиях формирования следов [6], которые существуют всего 1–6 часов. Хотя ОВЯ активно исследуются, их прогнозирование на основе метеоданных затруднено, особенно при наличии горизонтально ориентированных кристаллов.

Единственный метод дистанционного изучения микроструктуры ОВЯ – поляризационное лазерное зондирование (ПЛЗ). Этот метод позволяет дистанционно определить форму, размеры и ориентацию частиц в облаках посредством анализа матрицы обратного рассеяния света (МОРС), описывающей изменение состояние поляризации зондирующего излучения при его взаимодействии с рассеивающей средой [7]. Метод реализован в высотном матричном поляризационном лидаре (ВМПЛ), разработанном в Национальном исследовательском Томском государственном университете (НИ ТГУ) [8].

Согласно результатам экспериментов на ВМПЛ, облака классифицируются зеркальными при выполнении трёх условий [8]: отношение рассеяния $R \geq 10$, оптическая толщина $\tau_h \leq 1$, и элемент m_{44} МОРС не превышает $-0,4$. С декабря 2009 г. по ноябрь 2024 г. ОВЯ зарегистрированы более чем в 820 сериях лидарных измерений (каждая длительностью 15–17 минут), но лишь 22% из них классифицированы как зеркальные. Ранее публиковались распределения оптической толщи и отношения рассеяния ОВЯ за 2009–2023 гг. [9]. Чаще всего оптическая толщина не превышала 1, а отношение рассеяния примерно в половине случаев соответствовало незеркальным облакам. Чаще всего зеркальные ОВЯ наблюдались в тёплое время года (май–сентябрь).

На основе совместного анализа скорости ветра по данным аэрологического зондирования [10] и длительности наблюдений зеркальных участков облаков лидаром выполнены оценки их протяжённости в направлении, продольном относительно направления ветра. По данным 2016–2020 гг., длина таких участков варьировала от 4 до 30 км, при этом около 10 км – наиболее частый результат (56% случаев), а значения 4–20 км наблюдались в 96% лидарных экспериментов. Максимальные значения (30 км) встречались лишь в 2% случаев [8]. Эти данные указывают на важность учёта не только ориентации кристаллов льда, но и пространственной неоднородности облаков в моделях радиационного переноса. Диапазон высот зеркальных ОВЯ за 2009–2024 гг. составил 5–11 км, при этом чаще всего они наблюдались на высотах около 6–7 и 9–10 км. Сопоставление лидарных и аэрологических данных позволило определить условия формирования зеркальных облаков. В [8] приведены распределения температуры, точки росы и относительной влажности воздуха в момент наблюдения таких облаков. Чаще всего они возникали при температурах $-60 \dots -50$ °С, точке росы $-70 \dots -60$ °С и относительной влажности 30–40%.

Для корректного анализа лидарных данных важно учитывать вертикальные профили температуры и влажности воздуха, а также направления и скорости ветра, особенно (хотя и не только) на высотах формирования исследуемых облаков. Эти параметры определяют фазовое состояние облаков и их эволюцию. Основным источником такой информации является аэрологическое зондирование (АЗ) – запуски радиозондов, непосредственно измеряющих метеопараметры до высот около 30 км. Россия располагает одной из крупнейших сетей аэрологических станций, охватывающей всю территорию страны. Наиболее близкие к Томску станции находятся в Колпашево и Новосибирске. Однако частота запусков (согласно требованиям WMO, два раза в сутки) ограничивает возможности использования этих данных в высокочастотных лидарных исследованиях, требующих меньшего временного интервала.

Альтернативой служат атмосферные реанализы – массивы данных о составе и характеристиках атмосферы, сформированные в результате объединения результатов моделирования и измерений с применением ассимиляции данных. Примером такого источника данных об атмосфере является ERA5 – ресурс Европейского центра среднесрочных прогнозов (ECMWF), объединяющий спутниковые, наземные и аэрологические наблюдения с моделированием. Этот реанализ предоставляет вертикальные профили температуры и влажности воздуха вместе с профилями направления и скорости ветра с высоким пространственным ($0,25^\circ$) и временным (1 ч) разрешением для периода времени с 1940 года по настоящее время. Благодаря высокой однородности данных над Сибирью они эффективно дополняют или заменяют данные АЗ при интерпретации лидарных наблюдений ОВЯ.

Ещё одним важным ресурсом является реанализ MERRA-2 (NASA), охватывающий период с 1980 года. Он отличается более широким спектром метеопараметров, включая характеристики аэрозолей и облачного льда, а также параметризованную облачность. Пространственное разрешение MERRA-2 составляет $0,5 \times 0,625^\circ$, временное – от 1 до 3 часов. Это делает его ценным инструментом для комплексного анализа и прогнозирования облачных процессов. Большое количество данных параметров атмосферы с высоким пространственным разрешением позволяет применять методы машинного обучения, в том числе для моделирования формирования и развития ОВЯ.

Дополнительную информацию предоставляет спутниковый спектрорадиометр MODIS (установлен на спутниках Terra и Aqua). Он фиксирует яркостную температуру и отражательную способность в 36 спектральных каналах (длины волн от 0,4 до 14,4 мкм). MODIS обеспечивает широкое сканирование Земли, охватывая всю её поверхность за 1–2 дня. При этом обеспечивается высокое пространственное разрешение: от 250 до 1000 м. Данные уровня обработки L1 дают доступ к результатам физических измерений, а L2 – готовые

продукты: оптическая толщина облаков, эффективный радиус частиц, фазовое состояние, температура и высота вершин облаков. Эти данные уточняют характеристики ОВЯ, полученные лидаром, и помогают выявлять корреляции между микрофизическими и оптическими свойствами облаков.

Совместный анализ данных A3, ERA5, MERRA-2 и MODIS позволяет улучшить понимание природы ОВЯ, повысить точность интерпретации лидарных наблюдений и раскрыть закономерности их формирования и трансформации в контексте климатических процессов. Ключевым достижением работы является демонстрация согласованности между детализированными локальными лидарными измерениями и крупномасштабными данными спутников и реанализов, что позволяет расширить область применения локальных наблюдений и выявлять характерные условия образования облаков. Такой подход может быть использован для уточнения параметров, используемых в климатическом моделировании и краткосрочном прогнозировании формирования и характеристик облачности. Полученные результаты подчёркивают значимость комплексного подхода к обработке данных для улучшения климатических и метеорологических моделей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, Грант № 24-72-10127.

1. Радиационные свойства перистых облаков / Под ред. Е.М. Фейгельсон. М.: Наука, 1989. 223 с.
2. Shanks J.G., Lynch D.K. Specular scattering in cirrus clouds // *Proceedings of SPIE*. 1995. V. 2578. P. 227–238.
3. Li W., Schumacher C., McFarlane S.A. Radiative heating of the ISCCP upper level cloud regimes and its impact on the large-scale tropical circulation // *JGR: Atmospheres*. 2013. V. 118, № 2. P. 592–604.
4. Тарасова Т.А. Расчёт потоков солнечного излучения при перистой облачности и сравнение с экспериментами // *Радиационные свойства перистых облаков*. М.: Наука, 1989. С. 169–176.
5. Kärcher B. Formation and radiative forcing of contrail cirrus // *Nature Communications*. 2018. № 9. Article № 1824.
6. Gierens K., Vazquez-Navarro M. Statistical analysis of contrail lifetimes from a satellite perspective // *Meteorologische Zeitschrift*. 2018. V. 27, № 3. P. 183–193.
7. Кауль Б.В. Оптико-локационный метод поляризационных исследований анизотропных аэрозольных сред: дис. докт. физ.-мат. наук. Томск, 2004. 219 с.
8. Kuchinskaia O., Bryukhanov I., Penzin M., et al. ERA5 Reanalysis for the Data Interpretation on Polarization Laser Sensing of High-Level Clouds // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15, № 1. Article № 109.
9. Брюханов И.Д., Кучинская О.И., Ни Е.В. и др. Оптические и геометрические характеристики облаков верхнего яруса по данным лазерного поляризационного зондирования 2009–2023 гг. в Томске // *Оптика атмосферы и океана*. 2024. Т. 37, № 2. С. 105–113.
10. University of Wyoming [Электронный ресурс]. URL: <http://weather.uwyo.edu> (дата обращения: 20 апреля 2025 г.).