

# Реконструкция трёхмерных моделей облаков на основе информации о высоте их верхней и нижней границ по данным пассивного спутникового зондирования

А. В. Скороходов

*Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, Томск, 634055, Россия  
E-mail: vazime@yandex.ru*

Информация о распределении параметров облачности в трёхмерном пространстве (включая форму и объём) требуется для улучшения понимания механизмов конвекции, радиационного переноса и распространения потоков скрытого тепла, а также необходима в авиации. В работе представлены результаты оценки возможностей реконструкции трёхмерных моделей различных разновидностей однослойных облаков только на основе информации о высоте их верхней и нижней границы, полученной по данным пассивного спутникового зондирования. При этом рассмотрены не только основные типы облачности, но и некоторые их подтипы. Исходной информацией стали снимки MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) в видимом диапазоне спектра с пространственным разрешением 1000 м, а также тематические продукты их обработки. Приведено описание методики реконструкции трёхмерных моделей облаков по данным пассивного спутникового зондирования. Обсуждаются результаты восстановления формы для различных типов облачности, наблюдаемых над территорией Западной Сибири в летнее время. Показано, что рассматриваемый подход позволяет реконструировать трёхмерные модели не только отдельных облаков, но и облачных полей в целом. Установлено, что из-за низкого пространственного разрешения не могут быть восстановлены формы кучевых плоских облаков, а модели некоторых типов облачности имеют сильное сходство между собой. Даны рекомендации по использованию полученных результатов для решения различных научных и прикладных задач.

**Ключевые слова:** спутниковые данные, типы облачности, трёхмерная модель облака, характеристики облачности, MODIS

Одобрена к печати: 29.03.2024  
DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-23-35

## Введение

В настоящее время данные дистанционного зондирования Земли из космоса являются основным источником оперативной информации о характеристиках облачных полей в глобальном масштабе. Большая часть этих сведений представлена в двумерном виде, т. е. набором географических координат и единственных (в том числе и вертикально интегрированных) значений каждого параметра облачности в этих точках, поскольку получены по результатам сканирования пассивными спутниковыми инструментами. Современные системы космического базирования указанного типа позволяют восстанавливать «напрямую» (на основе спектральной яркости) такие характеристики облаков, как, например, высота, давление и температура на их верхней границе, эффективная излучательная способность, а «косвенно» (используя модели переноса излучения) — оптическую толщину, эффективный радиус частиц, водозпас и др. (Platnick et al., 2017). Однако для полного понимания механизмов конвекции, радиационного переноса и распространения потоков скрытого тепла необходима информация о распределении параметров облачности (особенно фазового состояния и размеров частиц) в трёхмерном пространстве, а также о её форме и объёме (Marshak, Davis, 2005; Singer et al., 2021; Wallace, Hobbs, 2006). Кроме этого, такие сведения выглядят весьма востребованными и в авиации для обеспечения безопасности, контроля и планирования полётов летательных аппаратов различного типа и назначения (Marzban et al., 2007; Mecikalski et al., 2007; Smith et al., 2012).

Основным препятствием для создания реальных трёхмерных моделей облаков, наблюдаемых из космоса, становится отсутствие информации об их вертикальной структуре,

включая высоту их нижней границы. Наземные средства (например, лидары), хотя и позволяют регистрировать протекание некоторых физических процессов внутри облака, но делают это очень локально (Kokhanenko et al., 2022; Razenkov, 2021; Russkova, Shishko, 2023). В середине 2000-х гг. на орбиту Земли были запущены активные сенсоры CALIOP (*англ.* Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization) (спутник CALIPSO (*англ.* Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation)) (активное использование прекращено) и CPR (*англ.* Cloud Profiling Radar) (спутник CloudSat) в составе группировки A-Train, в которую входил и спутник Aqua с установленным на его борту спектрорадиометром MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Полученные с их помощью синхронные измерения позволили существенно улучшить понимание вертикального строения аэрозолей и облачности (Koffi et al., 2012; Oreopoulos et al., 2017; Stubenrauch et al., 2010). Однако основным недостатком этих активных приборов видится узкая полоса сканирования, что не позволяет реконструировать трёхмерную модель всего облака целиком, горизонтальные размеры которого могут достигать нескольких сотен километров. Значения же восстанавливаемых характеристик в различных частях облачного поля могут существенно различаться, что было показано, например, в работе (Saito et al., 2019). Кроме этого, лидар CALIOP позволяет регистрировать основание только у облачности с оптической толщиной меньше 10, а радар CALIOP — меньше 30 из-за затухания испускаемых ими сигналов в ней, что делает невозможным целостную оценку вертикальной структуры и формы мощных конвективных и слоисто-дождевых облаков (Скороходов, Курьянович, 2022; Mace, Zhang, 2014). Здесь уместно будет упомянуть спектрорадиометр MISR (*англ.* Multi-angle Imaging Spectroradiometer) (спутник Terra) и инструмент DPC (*англ.* Directional Polarimetric Camera) (спутник GF-5 (*англ.* Gaofen, Гаофэн)), которые позволяют получать изображения одного и того же объекта под девятью разными углами, что даёт возможность достаточно детально описывать геометрию верхней части облаков с пространственным разрешением в надире 275 и 1700 м соответственно (Lee et al., 2018; Yu et al., 2019). Однако информацию о нижней границе облаков данные приборы в полном объёме предоставить неспособны (чаще всего она считается плоской).

Несмотря на упомянутые выше инструментальные ограничения, существует несколько подходов к восстановлению трёхмерных моделей облаков по данным пассивного спутникового зондирования. Первый из них заключается в использовании методов компьютерной графики для воссоздания «реалистичных» объёмных форм облачности по двумерным изображениям из космоса (Goswami, 2021). В частности, применяются алгоритмы на основе использования клеточных автоматов, метасфер (*англ.* metaballs) и цифровых моделей рельефа (Dobashi et al., 1999; Kowsuwan, Kanongchaiyos, 2009; Xie et al., 2007; Zhou et al., 2019). Главный недостаток этого подхода заключается в практически полном отсутствии взаимосвязи между физическими характеристиками наблюдаемых облаков и их трёхмерными моделями. Поэтому их применение ограничено различными игровыми симуляторами. Основная идея второй группы методов заключается в использовании результатов активного зондирования облачности сенсором CPR и их экстраполяция на участки синхронного изображения MODIS, прилегающих с обеих сторон к трассе радара, наложенной на него, с помощью методов искусственного интеллекта (Brüning et al., 2024; Wang et al., 2023). Данный подход был назван «облачной томографией», поскольку позволяет оценить радиолокационную отражаемость внутри облачного поля. Главный недостаток этих методов состоит в невозможности определения высоты нижней границы у оптически плотных облаков и расположенной близко к подстилающей поверхности слоистой и слоисто-кучевой облачности (из-за характеристик CPR), а также снижении эффективности экстраполяции при удалении от трассы радара (Chen et al., 2020). Третий подход заключается в использовании результатов восстановления значений высоты нижней и верхней границы облаков, полученных по данным пассивного спутникового зондирования (Noh et al., 2022; Wang, Xu, 2018). Методы этой группы, хотя и не позволяют охарактеризовать внутреннюю структуру облачности, но дают возможность наиболее детально описать её форму и местоположение в пространстве, что имеет решающее значение, например для авиации. Основным недостатком третьего подхода — зависимость результатов реконструкции трёхмерных моделей облаков от полноты и точности восстановления значений

высоты их нижней и верхней границы. При этом в исследовании (Skorokhodov et al., 2023) предложен алгоритм, позволяющий идентифицировать основание однослойной облачности с любой оптической толщиной (в отличие от остальных работ в этом направлении) со средним смещением  $-0,2$  км при среднеквадратическом отклонении  $1,2$  км только по данным пассивного спутникового зондирования.

Цель настоящей работы состоит в анализе возможности реконструкции трёхмерных моделей различных типов облачности только на основе информации о высоте её нижней и верхней границы, полученной по данным пассивного спутникового зондирования, что становится логическим продолжением исследований, начатых в работе (Skorokhodov et al., 2023).

## Исходные данные

В работе используются снимки сенсора MODIS (спутник Aqua), полученные в видимом диапазоне спектра ( $0,62-0,67$  мкм) с пространственным разрешением  $1000$  м над территорией Западной Сибири в летнее время, тематические продукты их обработки CLDPROP\_L2 и MYD06\_L2, содержащие информацию о характеристиках наблюдаемой облачности, а также файлы геопривязки MYD03. При этом из облачного продукта MYD06 извлекаются только значения флага Cloud\_Multi\_Layer\_Flag для идентификации однослойных облачных полей, для которых осуществляется реконструкция трёхмерных моделей в рамках данной работы. В продукте CLDPROP\_L2 указанный флаг не представлен, но содержащиеся в нём остальные характеристики облаков рассчитаны с помощью более эффективных алгоритмов (в том числе маска и высота верхней границы облачности) по сравнению с MYD06\_L2 (Ackerman et al., 2019). Кроме этого, облачный продукт CLDPROP\_L2 относится к так называемой группе *continuous data* для обеспечения преемственности и согласованности с данными радиометра VIIRS (*англ.* Visible Infrared Imaging Radiometer Suite), который в будущем полностью заместит запущенные более 20 лет назад сенсоры MODIS. Следует отметить, что информация о высоте нижней границе в стандартных продуктах спутниковой съёмки MODIS и VIIRS на данный момент не представлена, а восстанавливается с помощью применения алгоритма из исследования (Skorokhodov et al., 2023), краткое описание которого представлено в следующем разделе работы.

Используемая в работе классификация облачности

|  |  |
|--|--|
| <b>Облака вертикального развития</b>               | <b>Облака среднего яруса</b>                     |
| Кучевые плоские ( <i>Cu hum</i> )                  | Высококучевые ( <i>As</i> )                      |
| Кучевые средние ( <i>Cu med</i> )                  | Высококучевые волнистообразные ( <i>Ac und</i> ) |
| Кучевые мощные ( <i>Cu cong</i> )                  | Высококучевые кучевообразные ( <i>Ac cuf</i> )   |
| Кучево-дождевые лысые ( <i>Cb calv</i> )           | <b>Облака верхнего яруса</b>                     |
| Кучево-дождевые волосатые ( <i>Cb cap</i> )        | Перистые волокнистые ( <i>Ci fib</i> )           |
| <b>Облака нижнего яруса</b>                        | Перистые плотные ( <i>Ci sp</i> )                |
| Слоисто-кучевые кучевообразные ( <i>Sc cuf</i> )   | Перисто-слоистые ( <i>Cs</i> )                   |
| Слоисто-кучевые волнистообразные ( <i>Sc und</i> ) | Перисто-кучевые ( <i>Cc</i> )                    |
| Слоистые ( <i>St</i> )                             |  |
| Слоисто-дождевые ( <i>Ns</i> )                     |  |

В таблице приведены разновидности облаков, для которых оценивается возможность построения трёхмерных моделей, и их условные обозначения. Указанная классификация разработана с учётом возможностей спутниковой съёмки MODIS на основе стандарта ВМО (Всемирная метеорологическая организация, *англ.* World Meteorological Organization — WMO) с помощью анализа статистических моделей текстуры изображений и физических характеристик

различных типов облачности (Астафуров и др., 2013; Беспалов и др., 2011; Skorokhodov et al., 2019). Из *таблицы* видно, что в работе рассматриваются не только 10 основных форм облаков, но и их некоторые подтипы, что позволяет более детально анализировать структуру облачного поля.

## Методика реконструкции трёхмерных моделей облаков

Основная идея реконструкции трёхмерных моделей облаков по данным пассивного спутникового зондирования заключается в использовании результатов восстановления значений высоты их верхней и нижней границы. Поэтому эффективность указанного подхода полностью зависит от точности и полноты полученных оценок для указанных параметров облачности. Информация о высоте верхней границы облаков извлекалась из стандартного продукта CLDPROP\_L2. Согласно исследованию (Heidinger, Li, 2019), среднее смещение восстановленных значений этого параметра от эталонных измерений лидара CALIOP составляет  $-0,4$  км при среднеквадратическом отклонении  $0,75$  км. Оценка высоты нижней границы облаков осуществлялась с помощью алгоритма, предложенного в работе (Skorokhodov et al., 2023). Основная его суть заключается в использовании трёх самоорганизующихся нейронных сетей Кохонена, обученных по синхронным наблюдениям за облаками сенсором MODIS, лидаром CALIOP, радаром CPR и наземными регистраторами высоты их основания на сети ASOS (*англ.* Automated Surface Observing Systems) в зависимости от их оптической толщины. В процессе настройки сетей осуществляется поиск взаимосвязей между конкретными значениями высоты нижней границы облачности и другими её характеристиками, полученными по данным пассивного спутникового зондирования. На этапе функционирования алгоритма используется только информация из тематических продуктов MODIS.

На следующем этапе выполняется реконструкция трёхмерных моделей отдельных облаков или облачных полей в целом с использованием массивов значений высоты их нижней и верхней границы. При этом решение о наблюдении конкретной разновидности облаков из *таблицы* принималось на основе сопоставления результатов классификации облачности по спутниковым снимкам алгоритмом из работы (Skorokhodov et al., 2019) с данными наземных метеостанций региона. На трёхмерном графике строятся поля указанных двух параметров, где по осям  $x$  и  $y$  отложены отсчёты фрагмента изображения наблюдаемой облачности или соответствующие им географические координаты из продукта MYD03, а по оси  $z$  — высота над уровнем моря в метрах. Точки с одинаковыми значениями  $x$  и  $y$ , но разными  $z$  на данном этапе исследований просто соединяются между собой для заполнения пространства. В перспективе здесь могут быть представлены результаты «облачной томографии», как и в работе (Brüning et al., 2024). Сами поля значений высоты нижней и верхней границы облачности отображаются одним из трёх способов: в виде облаков точек, поверхностей или каркасов в зависимости от необходимой степени наглядности результатов моделирования. Следует отметить, что значения оптической толщины, эффективного радиуса частиц и водозапаса, которые необходимы для расчёта высоты нижней границы, восстанавливаются не для всех облачных пикселей спутникового снимка, поскольку определяются с помощью таблиц поиска (*англ.* look-up tables), сформированных на основе модели переноса излучения (Platnick et al., 2017). Высота же верхней границы облачности вычисляется «напрямую» по данным спектрального канала MODIS 11 мкм. Поэтому при реконструкции трёхмерных моделей облаков могут наблюдаться пропуски данных в основании облачного поля.

На *рис. 1* (см. с. 27) показаны общая схема и пример реконструкции трёхмерной модели кучевого мощного облака по спутниковым данным MODIS от 03.07.2013 (07:00 UTC (*англ.* Coordinated Universal Time, всемирное координированное время)), полученным над северной частью Западной Сибири. По умолчанию поле значений высоты верхней границы облачности в трёхмерной модели обозначается синим цветом, а основания — красным. Однако предусмотрена возможность отображения модели цветами, соответствующими легенде, приведённой на *рис. 1*.



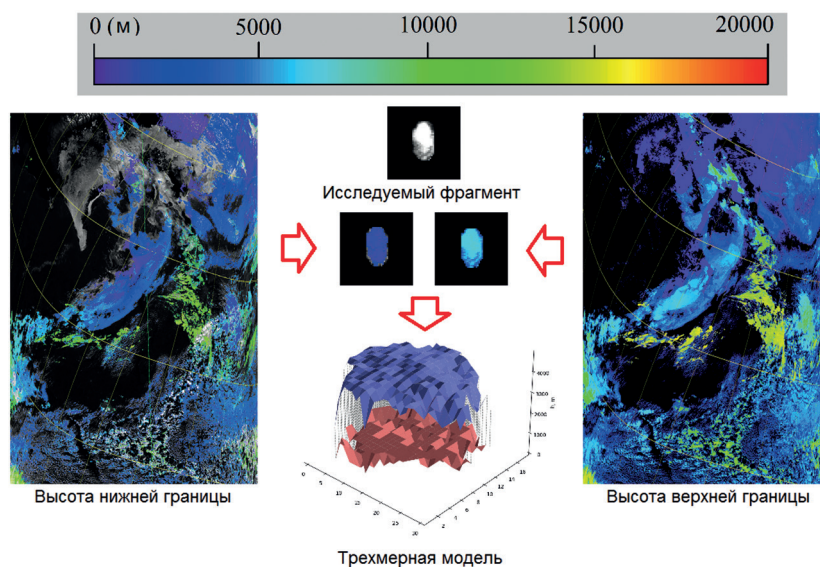


Рис. 1. Общая схема реконструкции трёхмерной модели облаков на основе информации о высоте их нижней и верхней границы по спутниковым данным MODIS

При анализе результата реконструкции видно, что вершина облака имеет куполообразный вид, а его основание практически плоское. Таким образом, модель хорошо согласуется с описанием указанного типа облачности, представленным в работах (Беспалов и др., 2011; Облака..., 1989). Однако края облака практически не воссозданы, что в первую очередь связано с пространственным разрешением спутникового снимка MODIS, которое составляет 1000 м и не позволяет более детализировано их охарактеризовать. Возможным решением этой проблемы становится применение методов компьютерной графики, что можно рассматривать в качестве перспективного направления развития настоящей работы. Анализ результатов реконструкции трёхмерных моделей для остальных типов облачности из *таблицы* представлен в следующем разделе.

### Обсуждение результатов

Реконструкция трёхмерных моделей осуществлялась по фрагментам спутниковых снимков MODIS отдельных облаков или небольших участков мезомасштабных облачных полей одного яруса с практически полным отсутствием пропусков значений оптической толщины, эффективного радиуса частиц и водозапаса для лучшей наглядности и облегчения анализа полученных результатов. На *рис. 2* (см. с. 28) показаны результаты реконструкции трёхмерных моделей и их изображения из космоса в видимом диапазоне спектра для всех разновидностей конвективной облачности, за исключением *Cu hum*, которые из-за своих малых размеров плохо идентифицируются на спутниковых снимках с низким пространственным разрешением (Askerman et al., 2006). Из *рис. 1a* видно, что методика позволяет воссоздавать модели не только для отдельных облаков одного типа, но и их групп. Результаты построения трёхмерных моделей конвективной облачности хорошо согласуются с наземными наблюдениями, согласно которым их основание становится практически плоским, а вершина — куполообразной. Исключением выступают облака *Cb cap*, которые, достигнув высоты тропопазузы, начинают «растекаться» под ней, что отчётливо видно из *рис. 4g* (см. с. 29). При этом только для указанного подтипа конвективной облачности были реконструированы боковые границы, предположительно из-за их размеров, а также наличия «короны» перистых облаков. Отметим, что результаты построения трёхмерных моделей облаков вертикального развития могут быть использованы, например, для определения местоположения центра конвективного потока в облаке и оценки степени его интенсивности.

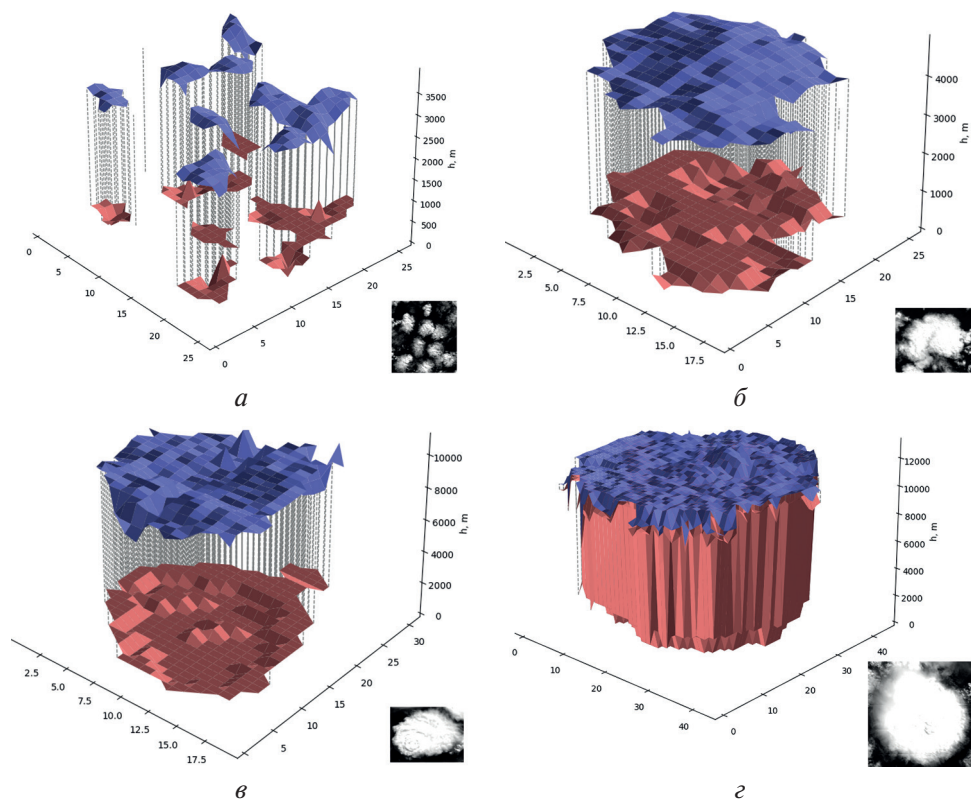


Рис. 2. Трёхмерные модели кучевых средних (а) и мощных (б) облаков, а также кучево-дождевой лысой (в) и волосатой (г) облачности на основе данных пассивного спутникового зондирования

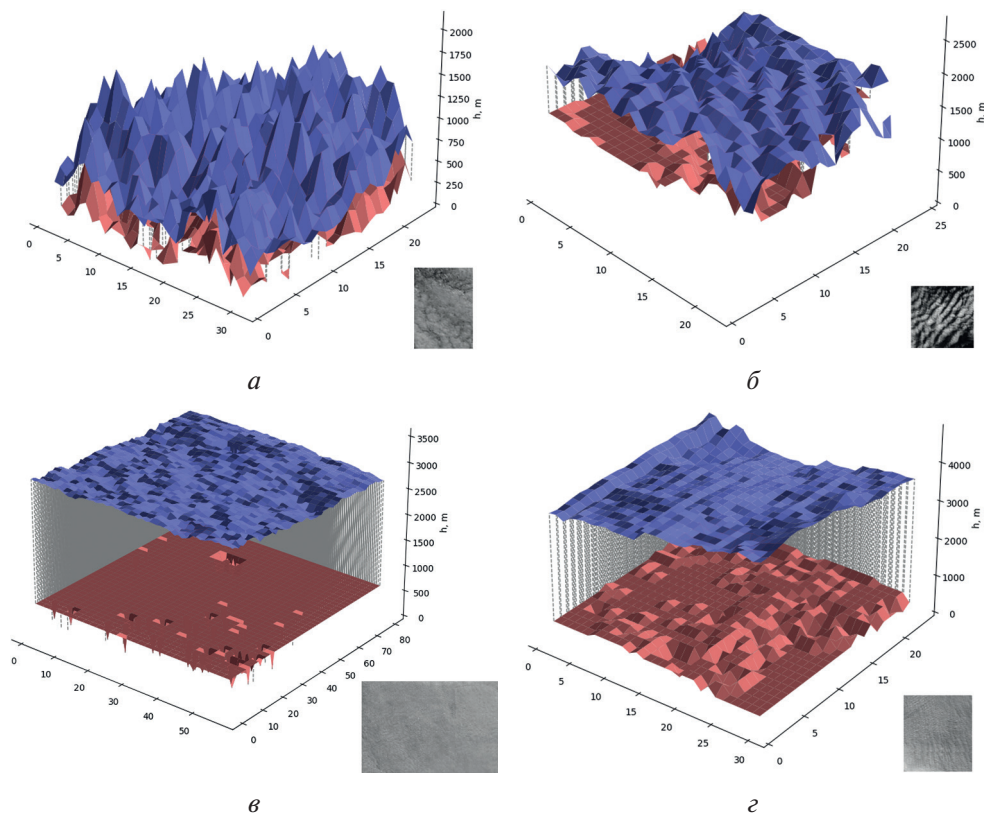


Рис. 3. Трёхмерные модели слоисто-кучевых кучевообразных (а) и волнистообразных (б) облаков, а также слоистой (в) и слоисто-дождевой (г) облачности на основе данных пассивного спутникового зондирования

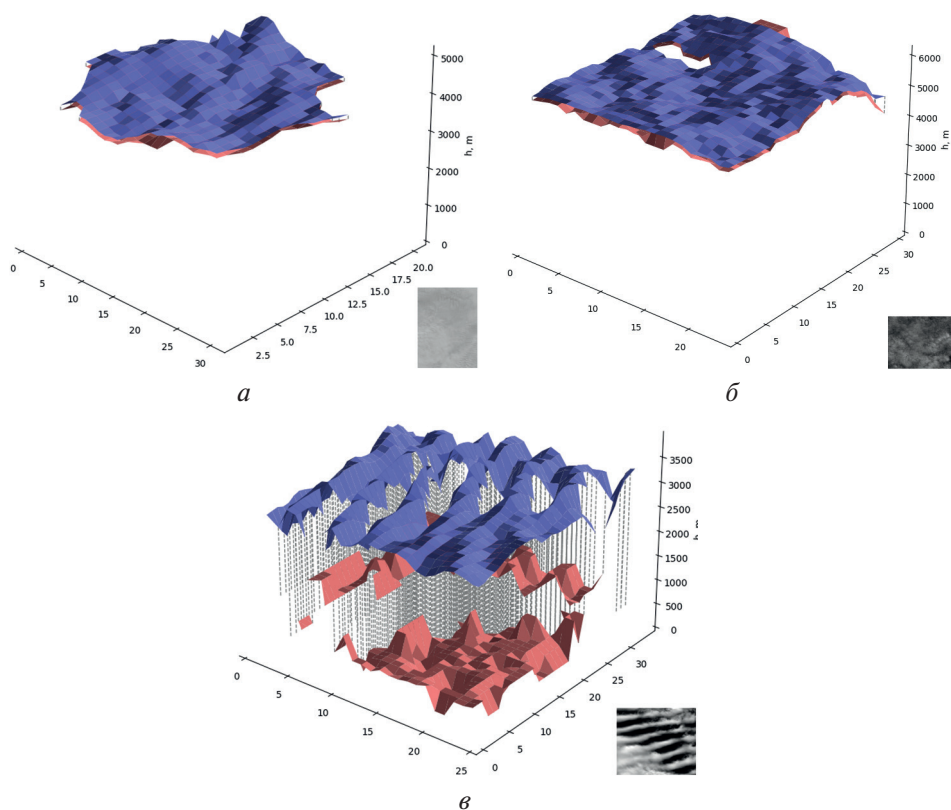


Рис. 4. Трёхмерные модели высокослойных (а), высококучевых кучевообразных (б) и волнистообразных (в) облаков на основе данных пассивного спутникового зондирования

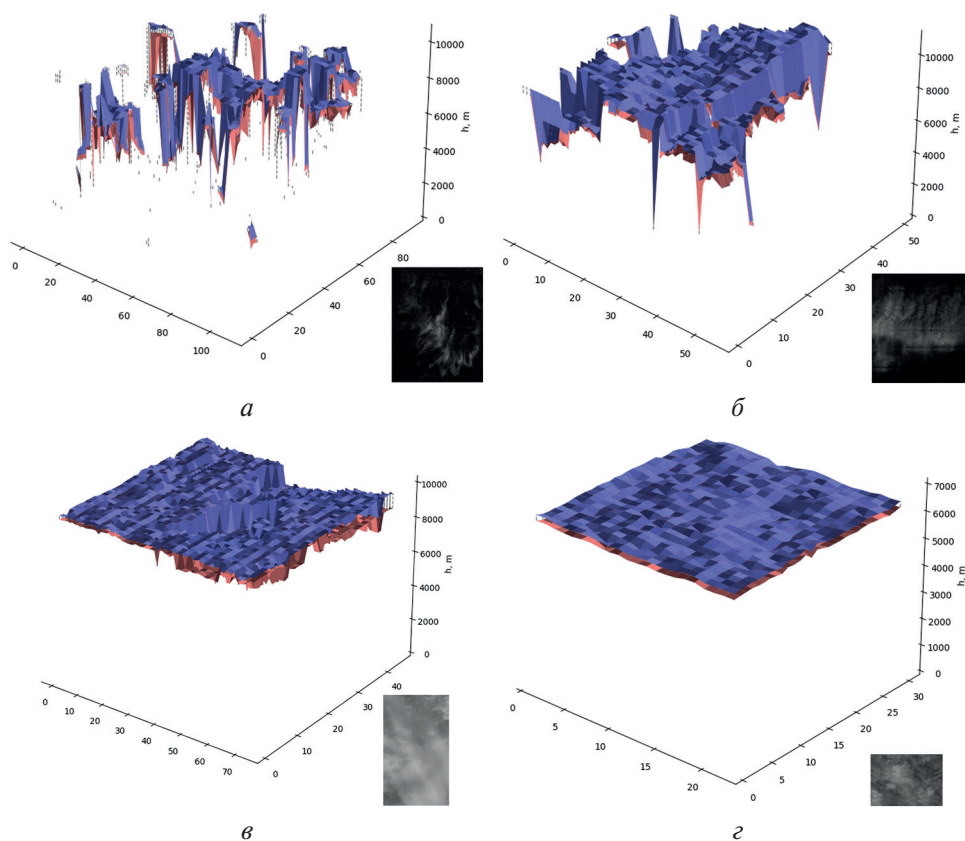


Рис. 5. Трёхмерные модели перистых нитевидных (а) и плотных (б) облаков, а также перисто-слоистой (в) и перисто-кучевой (г) облачности на основе данных пассивного спутникового зондирования



На *рис. 3* (см. с. 28) представлены трёхмерные модели разновидностей облаков нижнего яруса согласно *таблице* и их изображения из космоса. Из *рис. 3а* и *б* видно, что модели хорошо воссоздают «шероховатость» и «периодичность» текстур слоисто-кучевой кучевообразной и волнистообразной облачности соответственно. При этом отметим, что более плоское основание имеет вторая из указанных разновидностей облаков, что, предположительно, вызвано различием механизмов их образования: конвекцией и волнами Кельвина – Гельмгольца соответственно (Облака..., 1989). Анализируя реконструированные на *рис. 3в* и *г* модели слоистой и слоисто-дождевой облачности, можно сделать вывод об их схожести в целом, за исключением большей вертикальной протяжённости и «шероховатости» основания у последней. Поскольку *Ns* — один из типов облаков, имеющих большое влагосодержание, то неровность его основания в модели может быть связана с наличием полос выпадения осадков. По крайней мере, в эпизоде наблюдения облачности на *рис. 4в* (см. с. 29) на метеостанции был зарегистрирован ливневый дождь.

Сходными моделями характеризуются разновидности облаков среднего яруса: высоко-слоистые и высококучевые кучевообразные, что видно из *рис. 4а* и *б* (см. с. 29). Несмотря на то, что последние из них имеют «шероховатую» текстуру на изображении в видимом диапазоне спектра, информация о высоте их нижней и верхней границы не позволяет отразить это в модели. В трёхмерной же модели высококучевой волнистообразной облачности «периодичность» структуры выражена более ярко по сравнению со слоисто-кучевой волнистообразной (см. *рис. 3б*) из-за большего расстояния между квазипараллельными облачными полосами. Однако основание облаков *Sc und* реконструируется значительно лучше по сравнению с *Ac und* вследствие наличия у последних большего числа пропусков в информации об оптической толщине, эффективном радиусе частиц и водозапасе.

Формы моделей облаков верхнего яруса выражены менее ярко по сравнению с остальными типами облачности из *таблицы*. В первую очередь это связано с маленькой вертикальной протяжённостью первых, которая в большинстве случаев не превышает 1 км (Облака..., 1989). При этом на эффективность реконструкции трёхмерных моделей облаков верхнего яруса по данным о высоте их верхней и нижней границы оказывает влияние способность пассивных спутниковых сенсоров к их детектированию (Winker et al., 2009). Так, на изображении из космоса на *рис. 5а* (см. с. 29) в пределах одного поля перистой нитевидной облачности видны полупрозрачные и разорванные участки, которые плохо реконструируются в модели, проявляясь в виде перепада высоты вершины и основания. Модели более плотных облаков *Ci sp*, *Cs* и *Cc* воссоздаются эффективнее, что видно из *рис. 5б–г* (см. с. 29). При этом трёхмерные формы перисто-слоистой и перисто-кучевой облачности практически не различаются из-за низкого пространственного разрешения данных MODIS и схожи с моделями слоистообразной облачности других ярусов. Кроме этого, *рис. 5в* наглядно демонстрирует тот факт, что облака *Cs* располагаются в несколько слоёв, расстояние между которыми составляет 1 км, но флаг многослойности в продукте MYD06\_L2 этого не подтверждает. Таким образом, полученные результаты моделирования могут быть использованы для валидации и коррекции операционных алгоритмов обработки спутниковых данных.

## Заключение

В результате проведённых исследований выполнена оценка возможностей по реконструкции трёхмерных моделей различных разновидностей облаков на основе информации о высоте их верхней и нижней границы, полученной по данным пассивного спутникового зондирования. Установлено, что с помощью указанной методики могут быть построены трёхмерные модели практически для всех типов облачности из *таблицы*, за исключением кучевых плоских облаков по причине низкого пространственного разрешения данных MODIS. Также из-за недостаточных возможностей указанного прибора практически не проявляются особенности таких типов облачности, как высококучевые кучевообразные и перисто-кучевые, что выражается в сходстве их трёхмерных моделей с высокослоистыми и перисто-слоистыми



ми облаками соответственно. Плохо поддаётся воссозданию форма полупрозрачной и разорванной перистой нитевидной облачности вследствие погрешностей восстановления высоты её нижней и верхней границы. Кроме этого, по причине низкого пространственного разрешения спутниковых данных MODIS практически не реконструируются боковые границы трёхмерных моделей некоторых типов облачности. При этом рассматриваемая в работе методика позволяет воссоздавать формы не только отдельных облаков, но и облачных полей целиком, только расположенных в одном ярусе на данном этапе исследования. Полученные таким образом трёхмерные модели облачности могут быть использованы для улучшения понимания механизмов их образования (атмосферных волн, конвекции), а также при решении различных научных и прикладных задач, связанных с радиационным переносом и авиацией. Перспективным направлением развития данной работы представляется «наполнение» трёхмерных моделей облаков с помощью методов «облачной томографии» на основе экстраполяции результатов активного зондирования облаков алгоритмами искусственного интеллекта.

Работа в части реконструкции трёхмерных моделей облаков по данным пассивного спутникового зондирования выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 21-71-10076, <https://rscf.ru/project/21-71-10076/>), а в части изучения статистических характеристик облачности над Западной Сибирью — в рамках государственного задания Института оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН.

## Литература

1. Астафуров В. Г., Евсюткин Т. В., Курьянович К. В., Скороходов А. В. Статистическая модель текстуры изображений различных типов облачности по данным MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 4. С. 188–197.
2. Беспалов Д. П., Девяткин А. В., Довгалонок Ю. А. и др. Атлас облаков. СПб.: Изд-во Д'АРТ, 2011. 248 с.
3. Облака и облачная атмосфера: справ. / под ред. Мазина И. П., Хргиана А. Х. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 647 с.
4. Скороходов А. В., Курьянович К. В. Использование данных CloudSat CPR для повышения эффективности нейросетевого подхода к восстановлению высоты нижней границы облаков на спутниковых снимках Aqua MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 5. С. 63–75. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-63-75.
5. Ackerman S., Strabala K., Menzel P. et al. Discrimination clear-sky from cloud with MODIS. Algorithm theoretical basis document (MOD35). Wisconsin, MD, USA: NOAA NESDIS, 2006. 125 p.
6. Ackerman S. A., Frey R., Heidinger A. et al. EOS MODIS and SNPP VIIRS cloud properties: User guide for the climate data record continuity Level-2 cloud top and optical properties product (CLDPROP). Greenbelt, MD, USA: NASA Goddard Space Flight Center, 2019. 65 p.
7. Brüning S., Niebler S., Tost H. Artificial intelligence (AI)-derived 3D cloud tomography from geostationary 2D satellite data // Atmospheric Measurement Techniques. 2024. V. 17. P. 961–978. DOI: 10.5194/amt-17-961-2024.
8. Chen S., Cheng C., Zhang X. et al. Construction of nighttime cloud layer height and classification of cloud types // Remote Sensing. 2020. V. 12. Article 668. DOI: 10.3390/rs12040668.
9. Dobashi Y., Nishita T., Yamashita H., Okita T. Using metaballs to modeling and animate clouds from satellite images // The Visual Computer. 1999. V. 15(9). P. 471–482. DOI: 10.1007/s003710050193.
10. Goswami P. A survey of modeling, rendering and animation of clouds in computer graphics // The Visual Computer. 2021. V. 37(3–4). P. 1931–1948. DOI: 10.1007/s00371-020-01953-y.
11. Heidinger A., Li Y. Enterprise AWG Cloud Height Algorithm (ACHA). Algorithm theoretical basis document. Silver Spring, MD, USA: NOAA NESDIS, 2019. 64 p.
12. Koffi B., Schulz M., Bréon F.-M. et al. Application of the CALIOP layer product to evaluate the vertical distribution of aerosols estimated by global models: AeroCom phase I results // J. Geophysical Research. 2012. V. 117. Article D10201. DOI: 10.1029/2011JD016858.
13. Kokhanenko G. P., Balin Y. S., Borovoi A. G., Novoselov M. M. Studies of the orientation of crystalline particles in ice clouds by a scanning lidar // Atmospheric and Ocean Optics. 2022. V. 35. P. 509–516. DOI: 10.1134/S1024856022050141.
14. Kowsuwan N., Kanongchaiyos P. 3D cloud animation using CA based method // Proc. Intern. Symp. Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS). 2009. P. 387–392. DOI: 10.1109/ISPACS.2009.5383819.

15. Lee B., Di Girolamo L., Zhao G., Zhan Y. Three-dimensional cloud volume reconstruction from the Multi-angle Imaging SpectroRadiometer // *Remote Sensing*. 2018. V. 10. Article 1858. DOI: 10.3390/rs10111858.
16. Mace G. G., Zhang Q. The CloudSat radar-lidar geometrical profile product (RL-GeoProf): updates, improvements and selected results // *J. Geophysical Research: Atmospheres*. 2014. V. 119. P. 9441–9462. DOI: 10.1002/2013JD021374.
17. Marshak A., Davis A. 3D radiative transfer in cloudy atmospheres. N. Y.: Springer, 2005. 687 p.
18. Marzban C., Leyton S., Colman B. Ceiling and visibility forecasts via neural networks // *Weather Forecast*. 2007. V. 22. P. 466–479. DOI: 10.1175/WAF994.1.
19. Mecikalski J. R., Feltz W. F., Murray J. J. et al. Aviation applications for satellite-based observations of cloud properties, convection initiation, in-flight icing, turbulence, and volcanic ash // *Bull. American Meteorological Society*. 2007. V. 88. P. 1589–1607. DOI: 10.1175/BAMS-88-10-1589.
20. Noh Y.-J., Haynes J. M., Miller S. D. et al. A Framework for satellite-based 3D cloud data: An overview of the VIIRS cloud base height retrieval and user engagement for aviation applications // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. Article 5524. DOI: 10.3390/rs14215524.
21. Oreopoulos L., Cho N., Lee D. New insights about cloud vertical structure from CloudSat and CALIPSO observations // *J. Geophysical Research: Atmospheres*. 2017. V. 122. P. 9280–9300. DOI: 10.1002/2017JD026629.
22. Platnick S. K., Meyer G., King M. D. et al. The MODIS cloud optical and microphysical products: Collection 6 updates and examples from Terra and Aqua // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2017. V. 55. P. 502–525. DOI: 10.1109/TGRS.2016.2610522.
23. Razenkov I. A. Capabilities of a turbulent BSE-lidar for the study of the atmospheric boundary layer // *Atmospheric and Ocean Optics*. 2021. V. 34. P. 229–238. DOI: 10.1134/S102485602103012X.
24. Russkova T. V., Shishko V. A. Statistical simulation of laser pulse propagation in cirrus clouds accounting for multiple scattering // *Atmospheric and Ocean Optics*. 2023. V. 36. P. 384–393. DOI: 10.1134/S1024856023040164.
25. Saito M., Yang P., Hu Y. et al. An efficient method for microphysical property retrievals in vertically inhomogeneous marine water clouds using MODIS-CloudSat measurements // *J. Geophysical Research: Atmospheres*. 2019. V. 124. P. 2174–2193. DOI: 10.1029/2018JD029659.
26. Singer C. E., Lopez-Gomez I., Zhang X., Schneider T. Top-of-atmosphere albedo bias from neglecting three-dimensional cloud radiative effects // *J. Atmospheric Sciences*. 2021. V. 78. No. 12. P. 4053–4069. DOI: 10.1175/JAS-D-21-0032.1.
27. Skorokhodov A. V., Astafurov V. G., Evsutkin T. V. Application of statistical models of image texture and physical parameters of clouds for their classification on MODIS satellite images // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2019. V. 55. No. 9. P. 1053–1064. DOI: 10.1134/S0001433819090482.
28. Skorokhodov A. V., Pustovalov K. N., Kharyutkina E. V., Astafurov V. G. Cloud-base height retrieval from MODIS satellite data based on self-organizing neural networks // *Atmospheric and Ocean. Optics*. 2023. V. 36. No. 6. P. 723–734. DOI: 10.1134/S1024856023060209.
29. Smith W. L., Minnis P., Fleegeer C. et al. Determining the flight icing threat to aircraft with single-layer cloud parameters derived from operational satellite data // *J. Applied Meteorology and Climatology*. 2012. V. 51. P. 1794–1810. DOI: 10.1175/JAMC-D-12-057.1.
30. Stubenrauch C. J., Cros S., Guignard A., Lamquin N. A 6-year global cloud climatology from the Atmospheric InfraRed Sounder AIRS and a statistical analysis in synergy with CALIPSO and CloudSat // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2010. V. 10. P. 7197–7214. DOI: 10.5194/acp-10-7197-2010.
31. Wallace J. M., Hobbs P. V. *Atmospheric science: an introductory survey*. L.: Elsevier, 2006. 490 p.
32. Wang H., Xu X. Three-dimensional cloud structure construction with fractal modulation on actual measurement // *Proc. Intern. Conf. Modeling, Simulation and Analysis (ICMSA-2018)*. 2018. P. 247–252. DOI: 10.12783/DTCSE/ICMSA2018/23247.
33. Wang F., Liu Y., Zhou Y. et al. Retrieving vertical cloud radar reflectivity from MODIS cloud products with CGAN: An evaluation for different cloud types and latitudes // *Remote Sensing*. 2023. V. 15. Article 816. DOI: 10.3390/rs15030816.
34. Xie X., Qiao Y., Sun T. The application of the technology of 3D satellite cloud imaging in virtual reality simulation // *Data Science J*. 2007. V. 6. P. S270–S277. DOI: 10.2481/dsj.6.S270.
35. Yu H., Ma J., Ahmad S. et al. Three-dimensional cloud structure reconstruction from the Directional Polarimetric Camera // *Remote Sensing*. 2019. V. 11. Article 2894. DOI: 10.3390/rs11242894.
36. Zhou H., Bi S., Gong Y. et al. Three-dimensional cloud simulation of satellite cloud map based on SPH method // *J. System Simulation*. 2019. V. 31. No. 7. P. 1300–1312. DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17-0233.

## Three-dimensional cloud model reconstruction from cloud base and top heights using passive satellite data

A. V. Skorokhodov

V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk 634055, Russia  
E-mail: vazime@yandex.ru

Information about 3D-distribution of cloud features (including shape and volume) is needed to improve the understanding of convection mechanisms, radiative transfer and propagation of latent heat fluxes, as well as for aviation purposes. The paper presents the results of the estimation of possibilities to reconstruct three-dimensional models for different types of single-layer clouds using only the information about cloud base and top heights obtained from passive satellite data. Not only the main cloud forms are considered, but also some of their subtypes. The input data are MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) images in the visible spectrum range with spatial resolution of 1000 m, as well as their data products. The method of three-dimensional cloud model reconstruction from passive satellite data is described. The results of shape reconstruction for different cloud types observed over the territory of Western Siberia in summer are discussed. It is shown that the considered approach allows reconstructing three-dimensional models not only of individual clouds, but also of a cloud field as a whole. It is found that the shapes of cumulus humilis clouds cannot be reconstructed due to low spatial resolution, and the models of some cloud types have strong similarity. Recommendations on the use of the obtained results for solving various scientific and applied problems are given.

**Keywords:** satellite data, cloud types, three-dimensional cloud model, cloud features, MODIS

Accepted: 29.03.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-23-35

### References

1. Astafurov V. G., Evsyutkin T. V., Kur'yanovich K. V., Skorokhodov A. V., Statistical model of the texture of images of various cloudiness types from MODIS data, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 4, pp. 188–197 (in Russian).
2. Bespalov D. P., Devyatkin A. V., Dovyalyuk Yu. A. et al., *Atlas oblakov* (Cloud atlas), Saint Petersburg: D'ART Publ. House, 2011, 248 p (in Russian).
3. *Oblaka i oblachnaya atmosfera* (Clouds and cloudy atmosphere), Mazin I. P., Khrgian A. Kh. (eds.), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989, 647 p. (in Russian).
4. Skorokhodov A. V., Kur'yanovich K. V., Using CloudSat CPR data to improve the efficiency of the neural network approach to estimating cloud base height in Aqua MODIS satellite images, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 8, pp. 63–75 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-63-75.
5. Ackerman S. A., Strabala K., Menzel P. et al., *Discrimination clear-sky from cloud with MODIS. Algorithm theoretical basis document (MOD35)*, Wisconsin, MD, USA: NOAA NESDIS, 2006, 125 p.
6. Ackerman S. A., Frey R., Heidinger A. et al., *EOS MODIS and SNPP VIIRS cloud properties: User guide for the climate data record continuity Level-2 cloud top and optical properties product (CLDPROP)*, Greenbelt, MD, USA: NASA Goddard Space Flight Center, 2019, 65 p.
7. Brüning S., Niebler S., Tost H., Artificial intelligence (AI)-derived 3D cloud tomography from geostationary 2D satellite data, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2024, Vol. 17, pp. 961–978, DOI: 10.5194/amt-17-961-2024.
8. Chen S., Cheng C., Zhang X. et al., Construction of nighttime cloud layer height and classification of cloud types, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, Article 668, DOI: 10.3390/rs12040668.
9. Dobashi Y., Nishita T., Yamashita H., Okita T., Using metaballs to modeling and animate clouds from satellite images, *The Visual Computer*, 1999, Vol. 15(9), pp. 471–482, DOI: 10.1007/s003710050193.
10. Goswami P., A survey of modeling, rendering and animation of clouds in computer graphics, *The Visual Computer*, 2021, Vol. 37(3–4), pp. 1931–1948, DOI: 10.1007/s00371-020-01953-y.
11. Heidinger A., Li Y., *Enterprise AWG Cloud Height Algorithm (ACHA). Algorithm theoretical basis document*, Silver Spring, MD, USA: NOAA NESDIS, 2019, 64 p.



12. Koffi B., Schulz M., Bréon F.-M. et al., Application of the CALIOP layer product to evaluate the vertical distribution of aerosols estimated by global models: AeroCom phase I results, *J. Geophysical Research*, 2012, Vol. 117, Article D10201, DOI: 10.1029/2011JD016858.
13. Kokhanenko G. P., Balin Y. S., Borovoi A. G., Novoselov M. M., Studies of the orientation of crystalline particles in ice clouds by a scanning lidar, *Atmospheric and Ocean Optics*, 2022, Vol. 35, pp. 509–516, DOI: 10.1134/S1024856022050141.
14. Kowsuwan N., Kanongchaiyos P., 3D cloud animation using CA based method, *Proc. Intern. Symp. Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS)*, 2009, pp. 387–392, DOI: 10.1109/ISPACS.2009.5383819.
15. Lee B., Di Girolamo L., Zhao G., Zhan Y., Three-dimensional cloud volume reconstruction from the Multi-angle Imaging SpectroRadiometer, *Remote Sensing*, 2018, Vol. 10, Article 1858, DOI: 10.3390/rs10111858.
16. Mace G. G., Zhang Q., The CloudSat radar-lidar geometrical profile product (RL-GeoProf): updates, improvements and selected results, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, Vol. 119, pp. 9441–9462, DOI: 10.1002/2013JD021374.
17. Marshak A., Davis A., *3D radiative transfer in cloudy atmospheres*, New York: Springer, 2005, 687 p.
18. Marzban C., Leyton S., Colman B., Ceiling and visibility forecasts via neural network, *Weather Forecast*, 2007, Vol. 22, pp. 466–479, DOI: 10.1175/WAF994.1.
19. Mecikalski J. R., Feltz W. F., Murray J. J. et al., Aviation applications for satellite-based observations of cloud properties, convection initiation, in-flight icing, turbulence, and volcanic ash, *Bull. American Meteorological Society*, 2007, Vol. 88, pp. 1589–1607, DOI: 10.1175/BAMS-88-10-1589.
20. Noh Y.-J., Haynes J. M., Miller S. D. et al., A Framework for satellite-based 3D cloud data: An overview of the VIIRS cloud base height retrieval and user engagement for aviation applications, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, Article 5524, DOI: 10.3390/rs14215524.
21. Oreopoulos L., Cho N., Lee D., New insights about cloud vertical structure from CloudSat and CALIPSO observations, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, Vol. 122, pp. 9280–9300, DOI: 10.1002/2017JD026629.
22. Platnick S. K., Meyer G., King M. D. et al., The MODIS cloud optical and microphysical products: Collection 6 updates and examples from Terra and Aqua, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2017, Vol. 55, pp. 502–525, DOI: 10.1109/TGRS.2016.2610522.
23. Razenkov I. A., Capabilities of a turbulent BSE-lidar for the study of the atmospheric boundary layer, *Atmospheric and Ocean Optics*, 2021, Vol. 34, pp. 229–238, DOI: 10.1134/S102485602103012X.
24. Russkova T. V., Shishko V. A., Statistical simulation of laser pulse propagation in cirrus clouds accounting for multiple scattering, *Atmospheric and Ocean Optics*, 2023, Vol. 36, pp. 384–393, DOI: 10.1134/S1024856023040164.
25. Saito M., Yang P., Hu Y. et al., An efficient method for microphysical property retrievals in vertically inhomogeneous marine water clouds using MODIS-CloudSat measurements, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, Vol. 124, pp. 2174–2193, DOI: 10.1029/2018JD029659.
26. Singer C. E., Lopez-Gomez I., Zhang X., Schneider T., Top-of-atmosphere albedo bias from neglecting three-dimensional cloud radiative effects, *J. Atmospheric Sciences*, 2021, Vol. 78, No. 12, pp. 4053–4069, DOI: 10.1175/JAS-D-21-0032.1.
27. Skorokhodov A. V., Astafurov V. G., Evsutkin T. V., Application of statistical models of image texture and physical parameters of clouds for their classification on MODIS satellite images, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2019, Vol. 55, No. 9, pp. 1053–1064, DOI: 10.1134/S0001433819090482.
28. Skorokhodov A. V., Pustovalov K. N., Kharyutkina E. V., Astafurov V. G., Cloud-base height retrieval from MODIS satellite data based on self-organizing neural networks, *Atmospheric and Ocean Optics*, 2023, Vol. 36, No. 6, pp. 723–734, DOI: 10.1134/S1024856023060209.
29. Smith W. L., Minnis P., Fleeger C. et al., Determining the flight icing threat to aircraft with single-layer cloud parameters derived from operational satellite data, *J. Applied Meteorology and Climatology*, 2012, Vol. 51, pp. 1794–1810, DOI: 10.1175/JAMC-D-12-057.1.
30. Stubenrauch C. J., Cros S., Guignard A., Lamquin N., A 6-year global cloud climatology from the Atmospheric InfraRed Sounder AIRS and a statistical analysis in synergy with CALIPSO and CloudSat, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, Vol. 10, pp. 7197–7214, DOI: 10.5194/acp-10-7197-2010.
31. Wallace J. M., Hobbs P. V., *Atmospheric science: an introductory survey*, London: Elsevier, 2006, 490 p.
32. Wang H., Xu X., Three-dimensional cloud structure construction with fractal modulation on actual measurement, *Proc. Intern. Conf. Modeling, Simulation and Analysis (ICMSA-2018)*, 2018, pp. 247–252, DOI: 10.12783/DTCSE/ICMSA2018/23247.
33. Wang F., Liu Y., Zhou Y. et al., Retrieving vertical cloud radar reflectivity from MODIS cloud products with CGAN: An evaluation for different cloud types and latitudes, *Remote Sensing*, 2023, Vol. 15, Article 816, DOI: 10.3390/rs15030816.
34. Xie X., Qiao Y., Sun T., The application of the technology of 3D satellite cloud imaging in virtual reality simulation, *Data Science J.*, 2007, Vol. 6, pp. S270–S277, DOI: 10.2481/dsj.6.S270.



35. Yu H., Ma J., Ahmad S. et al., Three-dimensional cloud structure reconstruction from the Directional Polarimetric Camera, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, Article 2894, DOI: 10.3390/rs11242894.
36. Zhou H., Bi S., Gong Y. et al., Three-dimensional cloud simulation of satellite cloud map based on SPH method, *J. System Simulation*, 2019, Vol. 31, No. 7, pp. 1300–1312, DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17-0233.