

Технология автоматизированной оценки высоты верхней границы облачности на основе совместных наблюдений с геостационарных и высокоэллиптических спутниковых систем

Е. Е. Волкова¹, А. А. Бриль¹, М. А. Бурцев¹,
Е. А. Лупян¹, А. И. Андреев², Е. И. Холодов²

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*
E-mail: volkova@d902.iki.rssi.ru

² *Дальневосточный центр НИЦ «Планета», Хабаровск, 680000, Россия*
E-mail: a.andreev@dvrpod.ru

Представлена технология автоматизированной оценки высоты верхней границы облачности на основе стереоскопических наблюдений с различных космических аппаратов, реализованная для пар наблюдений высокоэллиптических спутников серии «Арктика-М» и геостационарных спутников Himawari-8/-9. Технология обеспечивает получение полей высоты облаков в автоматическом режиме с частотой обновления раз в 30 мин для региона от 0 до 60° с. ш. и от 80° в. д. до 160° з. д., что значительно расширяет возможности оперативного мониторинга атмосферных процессов и чрезвычайных ситуаций. Описаны основные методы, использованные для построения оценок высоты, и общая структура реализованной технологии, в том числе инструментарий для работы с ней. Для оценки точности работы технологии проведён массовый сравнительный анализ получаемых результатов с данными спутникового продукта CLTH (*англ.* Cloud Top Height), показавший их соизмеримую точность, особенно на средних высотах. Для дополнительной оценки точности было проведено сопоставление полученных результатов с оценками высоты облачности по данным прибора SLSTR (*англ.* Sea and Land Surface Temperature Radiometer) спутников серии Sentinel-3, продемонстрировавшее их хорошее соответствие на всём диапазоне высот, включая слой тропопаузы. В заключение приведены перспективы развития технологии для работы с другими геостационарными спутниками для увеличения её пространственного охвата на широтный пояс 0–60° для всего Северного полушария.

Ключевые слова: стереопара, высота верхней границы облачности, Арктика-М, Himawari

Одобрена к печати: 08.10.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-99-113

Введение

Построение методов оперативной и регулярной оценки высоты верхней границы облачности (ВГО) представляет собой одну из ключевых задач в современной метеорологии, которая в том числе важна для анализа различных атмосферных процессов и вулканической активности. В настоящее время разработаны и активно используются методы дистанционной оценки ВГО, основанные преимущественно на восстановлении высоты по температурным профилям в различных инфракрасных каналах, позволяющие достаточно точно восстанавливать высоту ВГО до высот 8–12 км, соответствующих нижней границе тропопаузы. При использовании данных геостационарных спутников такие методы позволяют регулярно получать поля высоты с высоким временным разрешением — раз в 10–15 мин, что делает их незаменимыми для оперативного мониторинга. Тем не менее для анализа облаков на больших высотах такие методы имеют низкую эффективность в силу наличия температурной инверсии в атмосфере. Для оценки ВГО также достаточно активно используются методы, основанные на лидарных измерениях. Они на сегодняшний день считаются наиболее точными и одинаково хорошо работают для всех диапазонов высот, однако не позволяют регулярно получать информацию о высоте облачности по значительным регионам из-за точечного характера измерений, а также малого числа действующих спутниковых систем для таких измерений. Это делает

подобные подходы пока малопригодными для постоянного мониторинга и контроля атмосферных явлений. Ещё одним подходом восстановления высоты ВГО представляются стереоскопические методы, основанные на оценке высоты по одновременной съёмке анализируемого района под разными углами (либо специализированными приборами наблюдений, либо с различных космических аппаратов (КА)). Следует отметить, что стереоскопические методы в спутниковой метеорологии применяются уже несколько десятилетий, начиная с работ по анализу облачности с помощью стереопар, сформированных из снимков геостационарных спутников (Hasler, 1981; Hasler et al., 1991). Несмотря на концептуальную простоту, стереоскопические методы имеют ряд существенных ограничений. При использовании в качестве входных данных пар снимков с геостационарных спутников получаемые поля высоты охватывают лишь сравнительно небольшие территории в силу фиксированной области пересечения обзора спутников и сильных геометрических искажений на краях изображений (за исключением случаев, когда геостационарные КА имеют достаточно близкие точки стояния). В случае применения пары снимков с геостационарного и низкоорбитального КА главным ограничением является необходимость строгой синхронизации наблюдений по времени, поскольку даже незначительный временной сдвиг (в несколько минут) может привести к существенным ошибкам из-за динамики облаков. Кроме того, в этом случае возникают проблемы с регулярностью получения полей высоты, так как временное разрешение низкоорбитальных КА обычно не превышает двух–четырёх наблюдений заданного региона в сутки. В приполярных же широтах применение классических геостационарных спутников для подобных задач в целом практически невозможно из-за низких углов наблюдения. Таким образом, данные подходы не позволяют строить регулярные поля высоты облачности с высокой частотой по большим территориям.

Отметим, что возможности использования стереоскопических методов для регулярного определения высоты ВГО в регионах севернее 60° с.ш. принципиально изменились после ввода в эксплуатацию первого КА в составе спутниковой системы «Арктика-М» (Асмус и др., 2021). Ключевое отличие данной орбитальной группировки заключается в использовании высокоэллиптической орбиты типа «Молния», что позволяет вести регулярные наблюдения Северного полушария с высокой частотой (раз в 15 мин) с близких к оптимальным углов визирования. В результате появилась возможность оперативно получать данные, сопоставимые по временному разрешению с данными геостационарных спутников, для областей Арктики и прилегающих территорий, ранее слабо охваченных наблюдениями. Наличие таких данных позволяет формировать стереопары со значительным количеством других спутниковых систем (как геостационарных, так и низкоорбитальных) с минимальным разрывом во времени, что обеспечивает качественно новый уровень мониторинга облачности и атмосферных процессов в приполярных широтах. Это, в свою очередь, делает возможным создание новой технологии автоматизированной оценки высоты ВГО на основе совместных наблюдений с геостационарных и высокоэллиптических спутниковых систем.

Настоящая работа посвящена описанию такой технологии, реализованной на базе обработки данных КА серии «Арктика-М» в сочетании с данными КА Himawari-8/-9 (Bessho et al., 2016). Совместные разработки Научно-исследовательского центра (НИЦ) «Планета» и Института космических исследований (ИКИ РАН) показали возможность создания автоматизированного метода восстановления полей высоты ВГО (Бриль и др., 2024) на основе одновременных наблюдений КА «Арктика-М» и Himawari-8/-9. Выбор пары спутниковых систем «Арктика-М» и Himawari-8/-9 обусловлен рядом существенных преимуществ. Во-первых, эти КА обладают близкими по характеристикам каналами в схожих спектральных диапазонах, что обеспечивает согласованность получаемых данных. Во-вторых, обеспечивается синхронность наблюдений: частота получения информации с Himawari-8/-9 составляет 10 мин, а с «Арктики-М» — 15 мин, что позволяет два раза в час получать одновременное покрытие одной территории. В-третьих, комбинация высокоэллиптической и геостационарной орбит создаёт оптимальные условия для стереоскопического анализа облачности, в том числе за счёт большой базы стереопары. Принципиальным преимуществом разрабатываемого подхода является переход от единичных, точечных измерений высоты облачно-

сти к массовому, систематическому мониторингу. Комбинация данных с «Арктики-М» и Himawari-8/-9 позволяет реализовать технологию автоматического регулярного (раз в 30 мин) восстановления полей высоты ВГО для обширных территорий. Следует, однако, подчеркнуть, что текущая реализация метода ограничена территорией, где обеспечивается перекрытие зон видимости «Арктики-М» и Himawari-8/-9, что соответствует диапазону от 0 до 60° по широте и от 80 до –160° по долготе.

Также в статье представлены результаты проведённой верификации и массовой оценки точности восстановления высоты верхней границы облачности, рассчитанных с помощью реализованной технологии, которые были определены при проведении массового сравнения полученных результатов с данными стандартного продукта CLTH (*англ.* Cloud Top Height), созданного с использованием данных КА Himawari-8/-9, и данными оценки высоты ВГО на основе информации прибора SLSTR (*англ.* Sea and Land Surface Temperature Radiometer), установленного на КА серии Sentinel-3 (Corpo et al., 2010).

В заключении работы кратко представлены перспективы развития технологии. При этом отмечается, что аналогичные алгоритмы могут быть адаптированы для работы с другими геостационарными спутниками (например, «Электро-Л», Meteosat, GOES (*англ.* Geostationary Operational Environmental Satellite), FY-4 (*англ.* Fengyun)), а также с низкоорбитальными платформами. Это открывает перспективы масштабирования технологии для регулярного получения данных о высоте облачности во всех северных регионах.

Метод автоматической оценки высоты облачности по стереопаре на базе синхронных данных спутниковых систем

Метод восстановления высоты ВГО по одновременным съёмкам с разных КА основан на методе стереопары, т.е. на вычислении трёхмерных координат объектов на основе анализа трёхмерных координат точек, из которых производятся наблюдения, углов, под которыми видны объекты из этих точек, и взаимных смещений оцениваемых объектов на изображениях (Argyriou, Petrou, 2009; Hasler, 1981; Hasler et al., 1991).

Технология включает четыре основных этапа: подбор синхронных пар изображений, поиск и сопоставление контрольных точек на стереопаре, фильтрацию ложных совпадений и вычисление высоты облачности.

При реализации данной технологии для пары снимков «Арктика-М» и Himawari возникают два ключевых класса проблем. Во-первых, это строгие требования к синхронизации времени съёмок, так как облачные структуры динамичны, и даже небольшой временной сдвиг приводит к существенным ошибкам в определении высоты. Во-вторых, значительные различия в пространственном разрешении и спектральных характеристиках приборов-источников данных требуют специальной предварительной обработки данных, а также фильтрации полученных результатов для исключения ошибочных детектирований. Рассмотрим эти проблемы подробнее.

Проблема временной синхронизации является критической для точности восстановления высоты ВГО в силу движения облачности. Подбор синхронных пар снимков определяется особенностями работы приборов МСУ-ГС/ВЭ (многозональное сканирующее устройство геостационарное/высокоэллиптическое) («Арктика-М») и АНІ (*англ.* Advanced Himawari Imager) (Himawari-8/-9). Так, для прибора МСУ-ГС/ВЭ получение полного диска завершается через шесть минут после старта сканирования. Для прибора АНІ сканирование полного диска Земли осуществляется за десять минут, но сам сценарий съёмки достаточно специфичен. Так, широтный пояс 40–60° с.ш., представляющий основной интерес при наблюдении за территорией России, попадает в интервал наблюдения примерно с 30-й по 120-ю секунду от начала сеанса (см. https://www.data.jma.go.jp/mscweb/en/himawari89/space_segment/spsg_ahi.html). В результате, если начало сеансов у обоих спутников совпадает, фактическая разница во времени наблюдения этого пояса составляет около пяти минут. В случае, когда сеанс «Арктики-М» начинается на пять минут раньше, чем у Himawari-8/-9, наблюдения

этих территорий оказываются практически синхронными, с разницей менее одной минуты. Таким образом, необходимые пары составляют снимки в 15 (МСУ-ГС/ВЭ) и 20 (АНИ) минут, а также в 45 (МСУ-ГС/ВЭ) и 50 (АНИ) минут каждого часа. При оценке высоты для близких к экватору широт более подходящими становятся изображения с совпадающими временами сеансов.

Для определения полей высоты облаков используются каналы теплового инфракрасного диапазона: канал 9 прибора МСУ-ГС/ВЭ с центральной длиной волны 10,7 мкм и канал 14 прибора АНИ с центральной длиной волны 11,2 мкм. Несмотря на близость спектральных диапазонов выбранных каналов, их спектральные характеристики и пространственное разрешение (4 км у МСУ-ГС/ВЭ, 2 км у АНИ) существенно различаются. Эти различия требуют специальной предобработки данных для обеспечения корректного поиска контрольных точек, осуществляемого алгоритмом SIFT (*англ.* Scale-Invariant Feature Transform, масштабно-инвариантная трансформация признаков) (Lowe, 2004). Предварительная подготовка включает приведение изображений к единому пространственному разрешению посредством загрузления данных АНИ до разрешения МСУ-ГС/ВЭ. Кроме того, из-за относительно низкой контрастности данных МСУ-ГС/ВЭ был снижен стандартный порог контрастности в алгоритме SIFT, чтобы увеличить число обнаруживаемых контрольных точек. Однако снижение порога обнаружения приводит к росту числа ложных совпадений. Для их устранения применяются три критерия фильтрации: расстояние между сопоставленными точками должно быть менее $0,5^\circ$, пары точек должны совпадать по направлению смещения с другими парами, а также осуществляется фильтрация по порогу яркости, чтобы отделить облачность от поверхности Земли.

Технология автоматической оценки высоты верхней границы облачности

Для имплементации представленного метода была разработана и реализована автоматическая технология построения полей высоты ВГО. В рамках данной технологии были автоматизированы все описанные выше этапы метода. Схема работы технологии представлена на *рис. 1*.

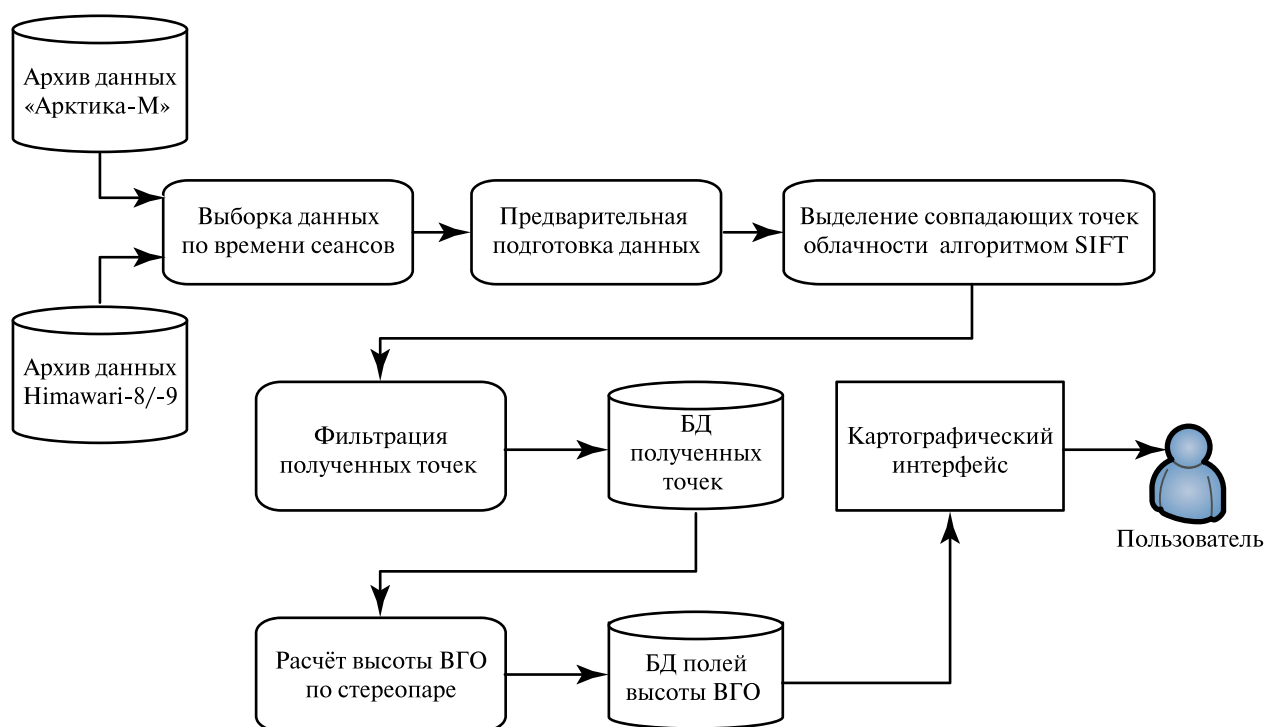


Рис. 1. Этапы технологии восстановления высоты ВГО

В её рамках в автоматическом режиме, по мере обновления архивов канальных данных КА «Арктика-М» и Himawari-8/-9, расположенных в Европейском и Дальневосточном центрах НИЦ «Планета», производится подбор пар сеансов по заданным временным критериям, их предварительная подготовка, выделение совпадающих точек облачности на парах изображений, фильтрация выбросов в полученных результатах, сохранение отфильтрованных точек в специализированной базе данных (БД), расчёт высоты ВГО для сохранённых пар точек и сохранение полученных результатов в БД с привязкой к сеансам исходных данных. Также в рамках технологии был реализован инструментарий доступа к полученным полям высоты для картографических интерфейсов, построенных по технологии GEOSMIS (Толпин и др., 2011). Инструментарий позволяет просматривать полученные поля высоты на карте для выбранных сеансов исходных данных совместно с изображениями, по которым высота была рассчитана. Пример отображения такого поля высоты совместно с данными КА Himawari-8/-9 приведён на *рис. 2*.

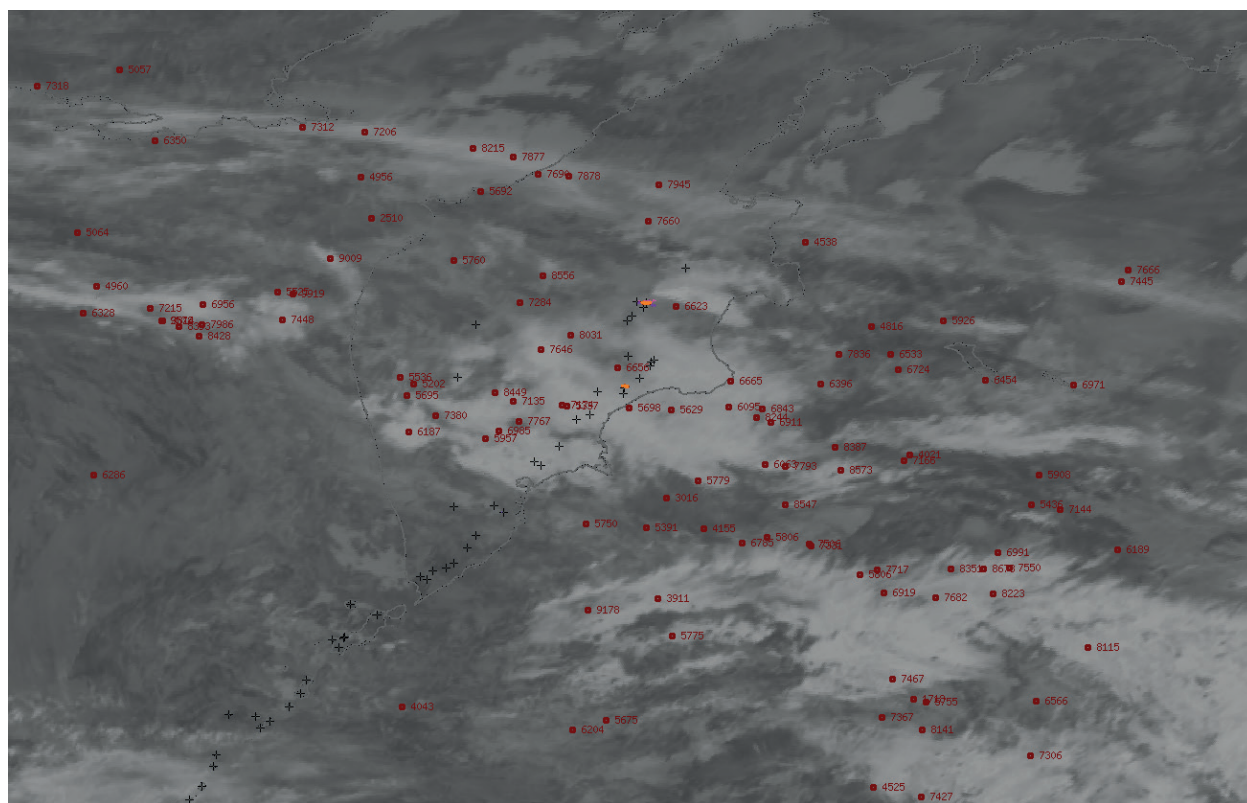


Рис. 2. Пример рассчитанного поля высоты ВГО. Подложка — данные АНІ в канале 11,2 мкм

Реализация автоматической технологии оценки высоты ВГО по данным стереопар «Арктика—Himawari» позволила обеспечить регулярное формирование полей высоты ВГО с временным разрешением 30 мин для регионов совместного обзора спутников «Арктика-М» и Himawari. Кроме того, за счёт внедрения технологии в потоковом варианте появилась возможность провести массовую оценку точности метода оценки высоты.

Оценка точности используемого метода оценки высоты верхней границы облачности

Оценка достоверности и точности методов восстановления высоты ВГО может осуществляться с помощью различных подходов. Наиболее распространёнными вариантами верификации являются сравнение с прямыми измерениями лидаров, радиолокаторов и метеозондов

(Huo et al., 2020a; Mitra et al., 2021; Naud et al., 2005), а также проведение сравнительного анализа с существующими спутниковыми продуктами восстановления высоты ВГО (например, MODIS Level-2 Cloud product (Platnick et al., 2015), MISR Level 3 Cloud-Top-Height Optical Depth product (Moroney, Marchand, 2019)), для которых уже получены соответствующие оценки точности.

В настоящей работе массовая верификация применяемого метода оценки высоты ВГО проводилась на основе сопоставления полученных на его основе значений высоты с данными продукта CLTH, разработанного JMA/MSC (*англ.* Japan Meteorological Agency's Meteorological Satellite Center) (Mouri et al., 2016). Для восстановления высоты облачности алгоритм CLTH использует комбинацию инфракрасных каналов прибора АНІ спутника Himawari-8/-9 с длинами волн 6,2; 7,3; 8,6; 11,2; 12,4 и 13,3 мкм. Алгоритм основывается на сопоставлении измеренной яркостной температуры с результатами моделирования переноса излучения с помощью модели RTTOV (*англ.* Radiative Transfer for TOVS) (Saunders et al., 2018), где высота облаков определяется как уровень атмосферы, обеспечивающий минимальное расхождение между наблюдаемыми и смоделированными значениями.

Согласно результатам валидационного исследования, выполненного в работе К. Моури (Mouri, 2019), продукт CLTH характеризуется систематическим занижением высоты ВГО по сравнению с лидарными измерениями CALIOP (*англ.* Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization) со средней ошибкой в -420 м и коэффициентом корреляции 0,82. Также в этой работе отмечается уменьшение точности продукта CLTH в случаях неверной классификации типа облака, при частичном покрытии облачностью целевого пикселя и для полупрозрачных облаков в случае многослойного облака. Кроме того, зафиксирована тенденция к завышению оценок высоты облачности в верхнем слое.

Выбор данных CLTH для сравнения обусловлен рядом причин. Продукт CLTH регулярно применяется для мониторинга облаков на региональном и глобальном уровне, а точность измерений неоднократно оценивалась по независимым лидарным и радарным данным (Huang et al., 2019; Huo et al., 2020b; Mouri, 2019; Mouri et al., 2016). Так как продукт CLTH строится по данным прибора АНІ, его пространственное покрытие полностью совпадает с покрытием исходных данных АНІ, по которым строится стереопара «Арктика – Himawari». Это позволяет существенно облегчить сопоставление полученных значений высоты между собой, как будет показано далее. Кроме того, данные продукта CLTH уже использовались в работе авторов (Бриль и др., 2024), в которой были сделаны первые оценки точности представленного метода на основе анализа хорошо локализованных пепловых облаков, которые были выброшены вулканами Ключевской и Безымянный во время их извержений в ноябре 2023 и июле 2024 г. соответственно. При этом показано, что значения высоты ВГО, полученные по стереопаре «Арктика – Himawari», почти в 50 % случаев (с учётом ошибки метода CLTH) совпадали с оценкой, которую даёт данный метод, а почти в 90 % случаев оценки, полученные методами «Арктика – Himawari» и CLTH, попадали в пересечение коридоров ошибок обоих методов. В то же время следует отметить, что в исследовании (Бриль и др., 2024) для проведения оценок точности предлагаемого метода был использован достаточно ограниченный ряд данных.

В настоящей же работе предложена и реализована механика автоматизированного сопоставления накопленных полей высоты с данными продукта CLTH для проведения оценки точности метода на больших объёмах данных. Для этого было реализовано потоковое получение и усвоение данных CLTH в архивы Центра коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг», а также разработаны и автоматизированы методики сопоставления полученных по стереопаре «Арктика – Himawari» высот с данными CLTH. Кроме того, для дополнительной оценки точности была разработана методика сопоставления высоты по стереопаре «Арктика – Himawari» с полями высоты, полученными по стереопаре Sentinel-3 – Sentinel-3 (далее S3-S3).

Первым шагом в реализации проведённой оценки стала организация массового накопления данных CLTH в архивах ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019) в полностью автоматическом режиме. Данные продукта CLTH открыто распространяются из центрального

репозитория информации AWS (*англ.* Amazon Web Services) (<https://dagshub.com/DagsHub-Datasets/noaa-himawari-dataset>), чьи вычислительные ресурсы используются для хранения больших массивов данных с помощью платформы Dagshub — сервиса на основе платформы Git для управления данными и ML-проектами (*англ.* Machine Learning). Реализованный программный код на языке Python регулярно опрашивает каталоги Dagshub на наличие данных, после чего создаётся очередь на загрузку и запускается утилита скачивания продуктов. Для оптимизации процесса получения данных был организован двухрежимный поток загрузки: оперативный (для получения актуальных данных) и архивный (для накопления исторических данных). На текущий момент скачано свыше 30 Тб данных за период с ноября 2024 г. по настоящее время, наполнение архивов историческими данными продолжается. Скачанные данные в автоматическом режиме обрабатываются и аннотируются, после чего добавляются в архивы ЦКП «ИКИ-Мониторинг» с использованием технологии UNISAT (Прошин и др., 2016). После усвоения в архивы эти данные автоматически становятся доступны в программных и веб-интерфейсах различных информационных систем, реализованных ИКИ РАН с использованием возможностей ЦКП «ИКИ-Мониторинг», в том числе в системе «Вега-Science» (<http://sci-vega.ru/>) (Лупян и др., 2021).

Параллельно с накоплением данных были разработаны методики сопоставления полученных полей высоты с данными CLTH. Для стереопары «Арктика – Himawari» точки Himawari-8/-9, найденные алгоритмом SIFT для определения сдвига и оценки высоты, подбираются непосредственно на растре продукта CLTH, так как географические координаты соответствующих пикселей на сеансовых данных Himawari-8/-9 и CLTH совпадают. Это обусловлено тем, что продукт CLTH получен по тем же данным Himawari-8/-9 и позволяет провести прямое сопоставление данных полей высоты стереопары «Арктика – Himawari» и CLTH в каждой конкретной точке.

Кроме того, для дополнительной оценки точности данных, полученных по стереопаре «Арктика – Himawari», была разработана методика сопоставления полей высоты по стереопарам «Арктика – Himawari» и S3-S3. Поскольку различия в пространственном и спектральном разрешении данных для приборов АНІ, МСУ-ГС/ВЭ и SLSTR могут приводить к затруднённости и даже невозможности сопоставления одинаковых объектов на изображениях в автоматическом режиме, было решено провести кросс-валидацию оценок высоты ВГО по данным «Арктика – Himawari» и S3-S3 с тем же продуктом CLTH. Для этого поля высоты CLTH в диапазоне от 0 до 10 000 м были разбиты на интервалы с шагом 500 м и для каждого интервала были рассчитаны средние высоты для измерений «Арктика – Himawari» и S3-S3, сопоставленных с данными CLTH в этом интервале.

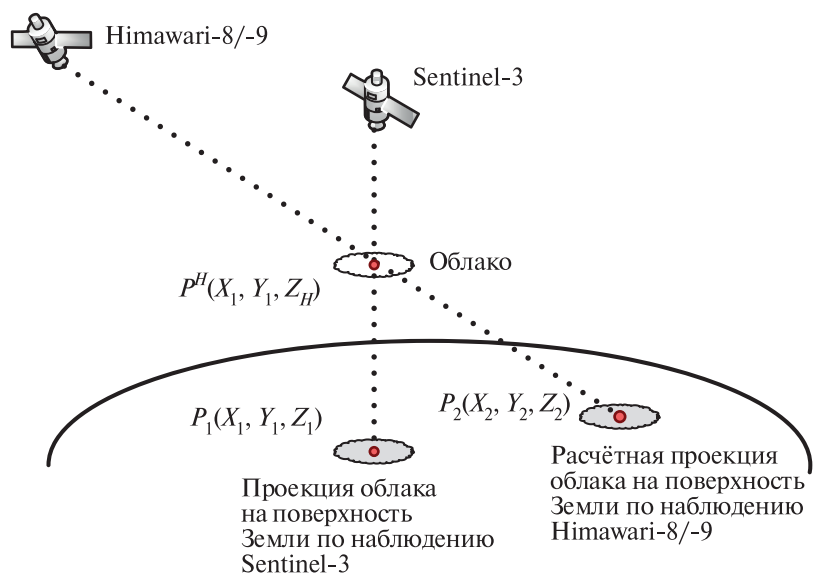


Рис. 3. Восстановление координат CLTH по наблюдениям Sentinel-3

Кроме того, была разработана отдельная методика сопоставления оценок высоты по данным S3-S3 и продукта CLTH, так как методика прямого сопоставления координат на изображениях для них неприменима. Она может давать существенные ошибки, поскольку одни и те же облака на изображениях SLSTR и CLTH, как правило, по-разному географически привязаны из-за разных точек и углов наблюдения с КА Sentinel-3 и Himawari-8/-9. Для компенсации этой потенциальной ошибки была разработана схема пересчёта координат облаков из наблюдений Sentinel-3 в наблюдения Himawari-8/-9, показанная на *рис. 3* (см. с. 105).

Для пересчёта берётся точка P_1 с координатами (X_1, Y_1, Z_1) , получаемая из проекции точки облака на поверхность Земли по наблюдению Sentinel-3. Далее на её основе строится точка P^H с координатами (X_1, Y_1, Z_H) , где Z_H — высота облака, восстановленная по стереопаре S3-S3. Далее на основе модели сканирования прибора АНІ строится расчётная проекция точки P^H на поверхность Земли при её наблюдении КА Himawari-8/-9 — точка P_2 с координатами (X_2, Y_2, Z_2) , и для этих координат берётся значение высоты из продукта CLTH, с которым и проводится дальнейшее сопоставление.

Все методики сопоставления были реализованы в виде утилит на языке Python, что позволило в автоматизированном режиме провести накопление, сравнение и анализ массивов данных с ноября 2024 по апрель 2025 г. Для стереопары «Арктика — Himawari» с данными продукта CLTH было сопоставлено около 220 тыс. точек, с данными S3-S3 — около 8 тыс., что объясняется гораздо меньшими зонами покрытия и частотой наблюдения КА Sentinel-3. Результаты поиска соответствий и анализа представлены ниже.

Результаты проведённой оценки точности

Основной целью проведения анализа полученных результатов сопоставления помимо интегральной оценки точности метода стало получение оценки зависимости его точности от высоты наблюдаемых облаков. Это обусловлено тем, что точность продуктов определения высоты ВГО, основанных на температурных методах, к которым относится и использованный в работе продукт CLTH, варьируется в зависимости от высоты облаков и на больших высотах на уровне тропопаузы и выше, т.е. порядка 8–12 км, может быть достаточно низкой, и методы, основанные на стереопаре, могут быть более точными. Для получения такой зависимости накопленные результаты сопоставления значений высоты по стереопаре «Арктика — Himawari» с продуктом CLTH были представлены в виде двумерной гистограммы, приведённой на *рис. 4* (см. с. 107).

Форма распределения показывает резкое расхождение с продуктом CLTH на низких высотах и существенное завышение значений стереопары относительно данных CLTH на высотах более 7000 м. Рассмотрим эти расхождения.

Всего для низких высот (от 0 до 2000 м) было сопоставлено около 9000 точек, т.е. меньше 5 % от общего объёма данных. Резкое расхождение с данными CLTH в этом диапазоне для пары «Арктика — Himawari» можно объяснить в первую очередь пространственным разрешением прибора МСУ-ГС/ВЭ, установленного на КА серии «Арктика-М», которое составляет 4 км и к которому приводятся данные прибора АНІ КА Himawari-8/-9 для расчёта стереопары. Оно не позволяет фиксировать характерные для низких высот относительно небольшие облака и, соответственно, получать для них оценки высоты. Кроме того, на точность оценки также могут влиять качество географической привязки данных и малая база для расчёта стереопары. Для данных «Арктики-М», как было показано в работе (Бриль и др., 2024), ошибки привязки, даже в хорошем случае, могут составлять порядка пикселя при пространственном разрешении в 4 км. В то же время ошибка привязки в 1 км даёт ошибку в определении высоты порядка 0,5 км. Таким образом, погрешность определения высоты может составлять порядка 2 км только из-за этого фактора.

В среднем высотном диапазоне (от 2000 до 7000 м) оценки высоты по стереопаре «Арктика — Himawari» и CLTH близки, в диапазоне же от 7000 м и больше наблюдается резкое завышение высоты оценками по стереопаре «Арктика — Himawari» относительно CLTH.

Сам продукт CLTH, как показано в работе (Нюо et al., 2020b), на основе сопоставления с данными наземных радиолокаторов в основном даёт заниженную высоту ВГО. Кроме того, сами методы восстановления высоты ВГО на базе анализа яркостной температуры, несмотря на их постоянное совершенствование, не позволяют однозначно определять высоту в слое температурной инверсии в атмосфере, т. е. как раз на высотах от 7000 м и больше. Методы, основанные на стереопаре, лишены таких особенностей. Кроме того, с увеличением высоты наблюдаемых облаков увеличивается и база стереопары, что потенциально приводит к повышению точности расчёта высоты.

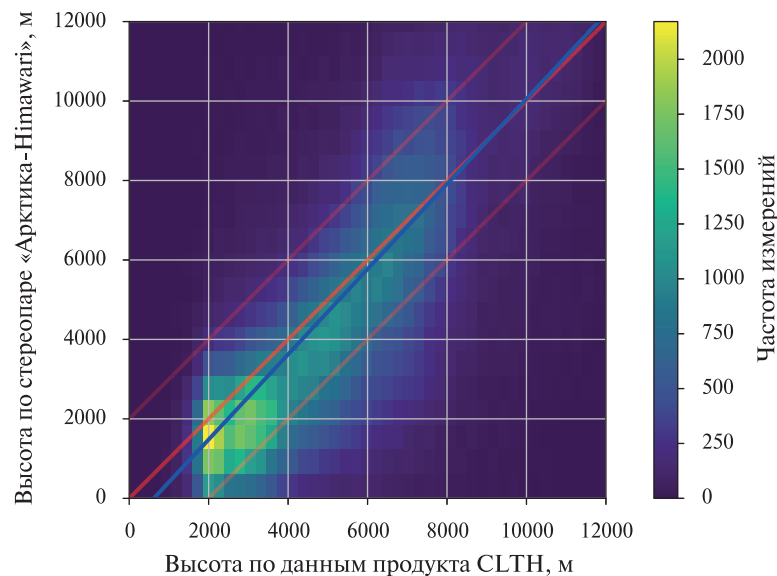


Рис. 4. Двумерная гистограмма сопоставления высоты по стереопаре «Арктика–Himawari» и данных CLTH. Розовым цветом показаны границы коридора двух ошибок продукта CLTH, красным — линия $x = y$, синим — линия регрессии для отфильтрованной выборки

С учётом приведённых замечаний сопоставление продукта CLTH и значений высоты, получаемых на основе метода, предлагаемого в статье, следует проводить после дополнительной фильтрации выбросов и шумов. Учитывая ошибку определения высоты для продукта CLTH, оптимистичная оценка которой составляет 1000 м (Нюо et al., 2020b), для сопоставления была проведена дополнительная фильтрация данных стереопары по принципу попадания детектированных высот в коридор двух ошибок продукта CLTH. Границы заданного коридора ошибок для фильтрации, а также линия регрессии для отфильтрованного набора также приведены на рис. 4. Коэффициент детерминации для сопоставления после фильтрации составил 0,83.

Таким образом, можно предположить, что для большей высоты ВГО метод стереопары даёт более корректные значения, хотя это предположение требует дальнейших подтверждений, в том числе с использованием лидарных данных.

Для дополнительной оценки точности метода было проведено сопоставление усреднённых результатов восстановления высоты по данным стереопар «Арктика–Himawari» и S3-S3 между собой в интервале высот от 0 до 10 000 м с шагом 500 м. На рис. 5 (см. с. 108) представлена диаграмма проведённого сопоставления. Для каждого высотного интервала CLTH, отмеченного определённым цветом, на ней дана соответствующая точка для данных «Арктика–Himawari» и S3-S3. Кроме того, для каждой точки отложено среднее квадратическое отклонение для данных «Арктика–Himawari» (по горизонтали) и S3-S3 (по вертикали). Диаграмма показывает хорошую согласованность результатов между собой, особенно на высотах более 8000 м, за исключением диапазона высот 0–2000 м, для которого данные стереопары «Арктика–Himawari» слабо достоверны.

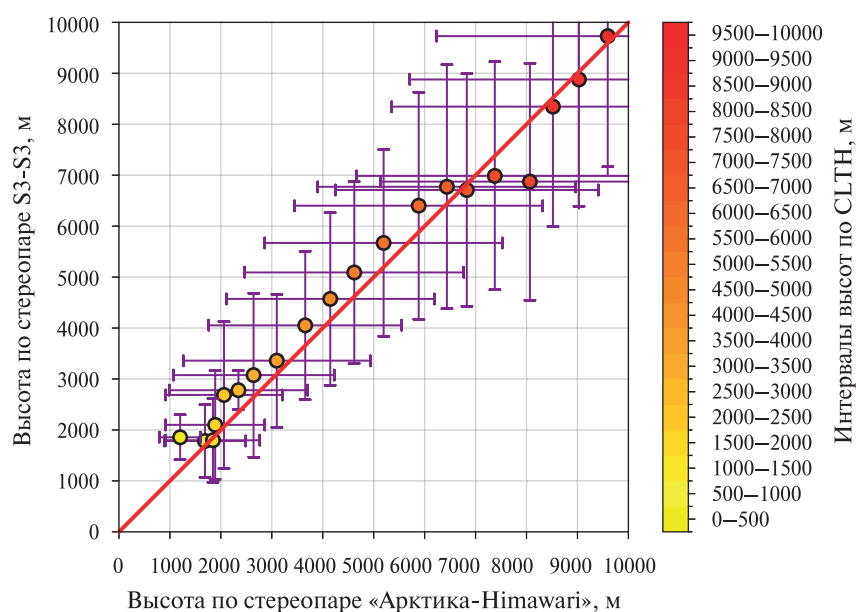


Рис. 5. Точечный график сопоставления высот по стереопарам «Арктика—Нимавари» и S3-S3 посредством кросс-валидации по данным CLTN на интервале от 0 до 10 000 м с шагом 500 м. Красным цветом показана линия $x = y$

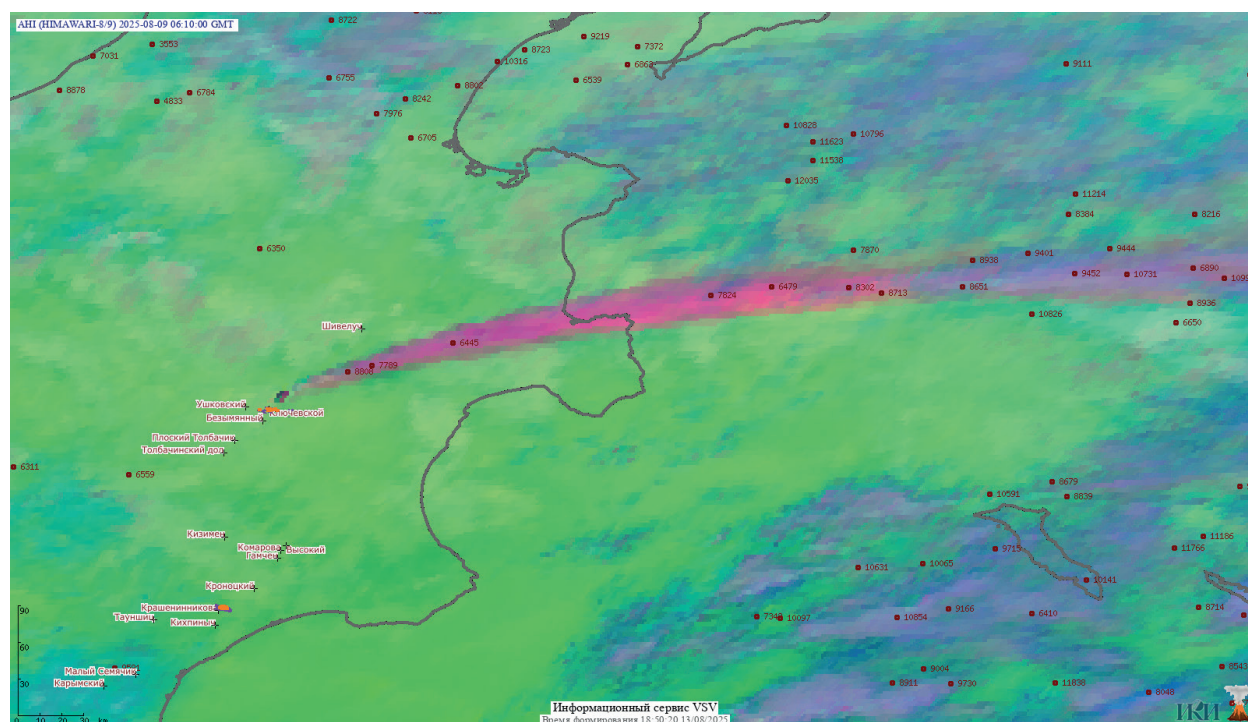


Рис. 6. Поле высоты по данным «Арктика—Нимавари» за 06:10 UTC 09.08.2025. Подложка — цветосинтез «цветной пепел» по данным прибора АНИ (R: IR12.3-IR10.4, G: IR10.4-IR8.6, B: IR10.4), фиолетовым показан пепловый шлейф вулкана Ключевской

Также корректность получаемых по предложенному методу оценок высоты нами проверялась при оценках высоты пепловых выбросов. Например, 30 июля 2025 г. на территории Камчатского края и Сахалинской области произошло сильное землетрясение магнитудой 8,8, повлёкшее за собой активизацию ряда вулканов, в том числе Ключевского и Крашенинникова. По сообщениям Камчатской группы реагирования на вулканические

извержения (англ. Kamchatka Volcanoes Eruption Response Team — KVERT) Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН извержения сопровождались сильными пепловыми выбросами на высоту до 10 км (см. <https://ria.ru/20250808/vulkan-2034048732.html>), что дало дополнительную возможность оценить работу представленной технологии. Для вулкана Ключевской были проанализированы детектированные высоты пепловых шлейфов за 6–12 августа 2025 г. Пример построенного поля высоты по состоянию на 06:10 UTC (англ. Universal Time Coordinated, универсальное координированное время) 9 августа 2025 г. приведён на *рис. 6* (см. с. 108).

На *рис. 7* показан график детектированных высот шлейфов за временной промежуток с 6 по 12 августа; на нём даны средние, максимальные и минимальные высоты, детектированные за сутки. Полученные значения в среднем подтверждают оценки, полученные специалистами группы KVERT, о высоте выбросов порядка 10 км.

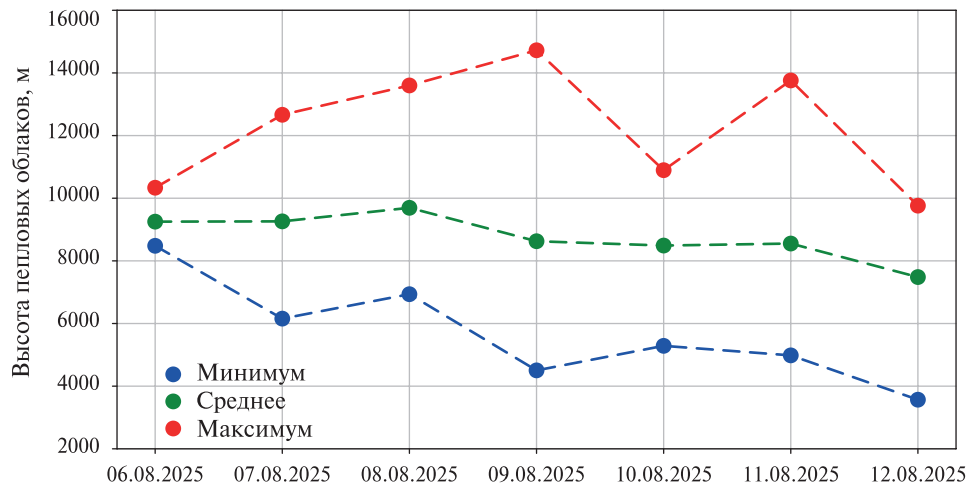


Рис. 7. Посуточные значения высоты детектированных пепловых шлейфов, выброшенных вулканом Ключевской, с 6 по 12 августа 2025 г.

Заключение

Таким образом, в работе представлены созданная автоматизированная технология оценки высоты верхней границы облачности на основе синхронных стереоскопических наблюдений с высокоэллиптического спутника «Арктика-М» и геостационарных спутников Himawari-8/-9 и результаты проведённой с её использованием оценки точности получаемых полей высоты ВГО. Технология позволяет в автоматическом режиме получать поля высоты облачности с высокой частотой обновления — два раза в час, что заметно превышает такую для классических стереопар «геостационарный КА—низкоорбитальный КА». В текущей реализации поля высоты строятся для региона от 0 до 60° по широте и от 80 до –160° по долготе. При адаптации технологии к данным других геостационарных КА, в первую очередь «Электро-Л», поля высоты могут строиться для широтного пояса 0–60° всего Северного полушария.

Проведённая массовая верификация полученных результатов относительно стандартного продукта CLTH для оценки высоты ВГО, основанного на температурных методах, показала:

- что формируемые на основе созданной технологии поля высоты ВГО стабильны, это в том числе подтверждается сопоставлением с данными прибора SLSTR;
- коэффициент детерминации при сопоставлении результатов восстановления высоты по стереопаре «Арктика—Himawari» и продукта CLTH с учётом предварительной фильтрации данных достаточно высок и примерно равен 0,83, что позволяет говорить о хорошей точности получаемых в результате работы технологии значений, сопоставимой с точностью продукта CLTH;

- автоматическая фильтрация получаемых результатов от шумов и выбросов является одним из приоритетных направлений дальнейшего развития технологии;
- специфика данных (в первую очередь, КА «Арктика-М»), используемых в реализованной технологии, не позволяет применять её для достоверного детектирования низких облаков на высотах до 2000 м;
- для больших высот ВГО, превышающих 7000 м, реализованная технология может давать более достоверные результаты, чем продукт CLTH, что требует дальнейшей проверки.

Таким образом, можно сказать, что реализованная технология позволяет оперативно и регулярно восстанавливать поля высоты ВГО на средних и больших высотах с точностью, сопоставимой с продуктом CLTH. Тем не менее для подтверждения оценок точности метода для больших высот необходимы дополнительные сравнения, в частности, с данными лидарных систем, таких как EarthCare.

Следует отметить, что разработанная технология может быть адаптирована для обеспечения работы системы «Арктика-М» совместно с различными геостационарными КА (например, «Электро-Л», Meteosat, GOES, FY-4) для обеспечения постоянного формирования карт оценок высоты ВГО по территории широтного пояса 0–60° всего Северного полушария.

На сегодня реализованная технология внедрена в состав объединённой системы работы с данными НИЦ «Планета» (Бурцев и др., 2019), а также в систему мониторинга вулканической активности Камчатки и Северных Курил VolSatView (Гирина и др., 2019). Необходимо отметить, что инструменты работы с результатами оценки полей высоты облачности можно достаточно легко внедрить и в другие информационные системы, реализованные на базе ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019).

Работа выполняется при поддержке Минобрнауки РФ (тема «Мониторинг», госрегистрация № 122042500031-8) с использованием возможностей Дальневосточного Центра НИЦ «Планета» и Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг».

Литература

1. Асмус В. В., Милехин О. Е., Крамарева Л. С. и др. Первая в мире высокоэллиптическая гидрометеорологическая космическая система «Арктика-М» // Метеорология и гидрология. 2021. № 12. С. 11–26. DOI: 10.52002/0130-2906-2021-12-11-26.
2. Бриль А. А., Андреев А. И., Бурцев М. А. и др. Новые возможности оценки высоты верхней границы облачности на основе синхронных наблюдений высокоэллиптических спутников «Арктика-М» и геостационарных спутников Himawari // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 5. С. 387–396. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-387-396.
3. Бурцев М. А., Успенский С. А., Крамарева Л. С. и др. Современные возможности и перспективы развития Объединённой системы распределённой работы с данными НИЦ «Планета» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 198–212. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-198-212.
4. Гирина О. А., Лупян Е. А., Крамарева Л. С. и др. Информационная система «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил» (ИС VolSatView): возможности и опыт работы // Материалы 16-й конф. «Информационные технологии в дистанционном зондировании Земли — RORSE 2018». ИКИ РАН, 2019. С. 359–366. DOI: 10.21046/rorse2018.359.
5. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А. и др. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
6. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А. и др. Система «Beta-Science»: особенности построения, основные возможности и опыт использования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. С. 9–31. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-9-31.
7. Прошин А. А., Лупян Е. А., Балашов И. В. и др. Создание унифицированной системы ведения архивов спутниковых данных, предназначенной для построения современных систем дистанционного

- мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 3. С. 9–27. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-9-27.
8. Толпин В. А., Балашов И. В., Ефремов В. Ю. и др. Создание интерфейсов для работы с данными современных систем дистанционного мониторинга (система GEOSMIS) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 3. С. 93–108.
9. Argyriou V., Petrou M. Photometric stereo: an overview // Advances in Imaging and Electron Physics. 2009. V. 156. P. 1–54. DOI: 10.1016/S1076-5670(08)01401-8.
10. Bessho K., Date K., Hayashi M. et al. An introduction to Himawari-8/9 — Japan's new-generation geostationary meteorological satellites // J. Meteorological Soc. of Japan. Ser. II. 2016. V. 94. No. 2. P. 151–183. DOI: 10.2151/jmsj.2016-009.
11. Coppo P., Ricciarelli B., Brandani F. et al. SLSTR: a high accuracy dual scan temperature radiometer for sea and land surface monitoring from space // J. Modern Optics. 2010. V. 57. No. 18. P. 1815–1830. DOI: 10.1080/09500340.2010.503010.
12. Hasler A. F. Stereographic observations from geosynchronous satellites: An important new tool for the atmospheric sciences // Bull. American Meteorological Soc. 1981. V. 62. No. 2. P. 194–212. DOI: 10.1175/1520-0477(1981)062<0194:S0FGSA>2.0.CO;2.
13. Hasler A. F., Strong J., Woodward R. H., Pierce H. Automatic analysis of stereoscopic satellite image pairs for determination of cloud-top height and structure // J. Applied Meteorology and Climatology. 1991. V. 30. No. 3. P. 257–281. DOI: 10.1175/1520-0450(1991)030<0257:AAOSSI>2.0.CO;2.
14. Huang Y., Siems S., Manton M. et al. Evaluating Himawari-8 cloud products using shipborne and CALIPSO observations: Cloud-top height and cloud-top temperature // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 2019. V. 36. No. 12. P. 2327–2347. DOI: 10.1175/JTECH-D-18-0231.1.
15. Huo J., Li J., Duan M. et al. (2020a) Measurement of cloud top height: Comparison of MODIS and ground-based millimeter radar // Remote Sensing. 2020. V. 12. No. 10. Article 1616. DOI: 10.3390/rs12101616.
16. Huo J., Lu D., Duan S. et al. (2020b) Comparison of the cloud top heights retrieved from MODIS and AHI satellite data with ground-based Ka-band radar // Atmospheric Measurement Techniques. 2020. V. 13. No. 1. P. 1–11. DOI: 10.5194/amt-13-1-2020.
17. Lowe D. G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints // Intern. J. Computer Vision. 2004. V. 60. P. 91–110. DOI: 10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94.
18. Mitra A., Di Girolamo L., Hong Y. et al. Assessment and error analysis of Terra-MODIS and MISR cloud-top heights through comparison with ISS-CATS lidar // J. Geophysical Research: Atmospheres. 2021. V. 126. Article e2020JD034281. DOI: 10.1029/2020JD034281.
19. Moroney C., Marchand R. Data product specification for the MISR cloud top height-optical depth product. JPL D-101964. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, NASA, 2019. 14 p.
20. Mouri K. Improvement of the cloud top height algorithm for the fundamental cloud product and related evaluation // Meteorological Satellite Center Technical Note. 2019. No. 64. P. 23–36.
21. Mouri K., Suzue H., Yoshida R., Izumi T. Algorithm theoretical basis document for cloud top height product // Meteorological Satellite Center Technical Note. 2016. No. 61. P. 33–42.
22. Naud C. M., Muller J.-P., Clothiaux E. E. et al. Intercomparison of multiple years of MODIS, MISR and radar cloud-top heights // Annales Geophysicae. 2005. V. 23. P. 2415–2424. DOI: 10.5194/angeo-23-2415-2005.
23. Platnick S., Ackerman S., King M. et al. MODIS Atmosphere L2 Cloud Product (06_L2). NASA MODIS Adaptive Processing System, Goddard Space Flight Center, 2015. DOI: 10.5067/MODIS/MYD06_L2.061.
24. Saunders R., Hocking J., Turner E. et al. An update on the RTTOV fast radiative transfer model (currently at version 12) // Geoscientific Model Development. 2018. V. 11. P. 2717–2737. DOI: 10.5194/gmd-11-2717-2018.

Technology for automated assessment of cloud top height based on joint geostationary and highly elliptical satellite systems observations

E. E. Volkova¹, A. A. Bril¹, M. A. Burtsev¹,
E. A. Loupian¹, A. I. Andreev², E. I. Kholodov²

¹ Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: volkova@d902.iki.rssi.ru

² Far Eastern Center of SRC "Planeta", Khabarovsk 680000, Russia
E-mail: a.andreev@dvrcpod.ru

The paper presents a technology for automated assessment of the upper cloud top height based on stereoscopic observations from various spacecrafts, implemented for pairs of observations from the high-elliptical Arktika-M series satellites and the geostationary Himawari-8/-9 satellite. The technology enables automatic computation of cloud height fields with a 30-minute refresh rate for the region from 0 to 60° N and from 80° E to 160° W, which significantly expands the capabilities of operational monitoring of atmospheric processes and emergencies. The paper describes the main methods used to estimate heights and the general structure of the implemented technology, including tools to work with it. To assess the accuracy of the technology, a massive comparative analysis of the obtained results with the CLTH (Cloud Top Height) satellite product was carried out, which showed their comparable accuracy, especially at medium altitudes. For an additional assessment of accuracy, the results were compared with cloud height estimates based on data from the SLSTR (Sea and Land Surface Temperature Radiometer) instrument of the Sentinel-3 satellites, showing good comparability across the entire altitude range, including the tropopause layer. In conclusion, the paper outlines the prospects for developing the technology to work with other geostationary satellites to increase its spatial coverage to the 0–60° latitude belt for the entire Northern Hemisphere.

Keywords: stereopair, cloud top height, Arktika-M, Himawari

Accepted: 08.10.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-99-113

References

1. Asmus V. V., Milekhin O. E., Kramareva L. S. et al., The world's first highly elliptical hydrometeorological satellite system "Arktika-M", *Meteorologiya i gidrologiya*, 2021, No. 12, pp. 11–26 (in Russian), DOI: 10.52002/0130-2906-2021-12-11-26.
2. Bril A. A., Andreev A. I., Burtsev M. A. et al., New capabilities of estimating the upper cloud boundary height on the basis of synchronous observations from Arktika-M highly elliptical orbit satellites and Himawari geostationary satellites, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 5, pp. 387–396 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-387-396.
3. Burtsev M. A., Uspenskiy S. A., Kramareva L. S. et al., Actual features and evolution prospects of the SRC "Planeta" distributed data operation united system, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, V. 16, No. 3, pp. 198–212 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-198-212.
4. Girina O. A., Loupian E. A., Kramareva L. S. et al., Information system "Remote monitoring of volcanic activity of Kamchatka and Kuril Islands" (IS VolSatView): capabilities and operational experience, *Materialy 16-i konferentsii "Informatsionnye tekhnologii v distantsionnom zondirovanii Zemli — RORSE 2018"* (Proc. 16th conf. "Information Technologies in Remote Sensing of the Earth — RORSE 2018"), IKI RAS, 2019, pp. 359–366 (in Russian), DOI: 10.21046/rorse2018.359.
5. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A. et al., Experience of development and operation of the IKI-Monitoring center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, V. 16, No. 3, pp. 151–170 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
6. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A. et al., Vega-Science system: design features, main capabilities and usage experience, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, V. 18, No. 6, pp. 9–31 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-9-31.

7. Proshin A. A., Loupian E. A., Balashov I. V. et al., Unified satellite data archive management platform for remote monitoring systems development, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, V. 13, No. 3, pp. 9–27 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-9-27.
8. Tolpin V. A., Balashov I. V., Efremov V. Yu. et al., The GEOSMIS system: Developing interfaces to operate data in modern remote monitoring systems, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, V. 8, No. 3, pp. 93–108 (in Russian).
9. Argyriou V., Petrou M., Photometric stereo: an overview, *Advances in Imaging and Electron Physics*, 2009, V. 156, pp. 1–54, DOI: 10.1016/S1076-5670(08)01401-8.
10. Bessho K., Date K., Hayashi M. et al., An introduction to Himawari-8/9 — Japan's new-generation geostationary meteorological satellites, *J. Meteorological Soc. of Japan*, Ser. II, 2016, V. 94, No. 2, pp. 151–183, DOI: 10.2151/jmsj.2016-009.
11. Coppo P., Ricciarelli B., Brandani F. et al., SLSTR: a high accuracy dual scan temperature radiometer for sea and land surface monitoring from space, *J. Modern Optics*, 2010, V. 57, No. 18, pp. 1815–1830, DOI: 10.1080/09500340.2010.503010.
12. Hasler A. F., Stereographic observations from geosynchronous satellites: An important new tool for the atmospheric sciences, *Bull. American Meteorological Soc.*, 1981, V. 62, No. 2, pp. 194–212, DOI: 10.1175/1520-0477(1981)062<0194:S0FGSA>2.0.CO;2.
13. Hasler A. F., Strong J., Woodward R. H., Pierce H., Automatic analysis of stereoscopic satellite image pairs for determination of cloud-top height and structure, *J. Applied Meteorology and Climatology*, 1991, V. 30, No. 3, pp. 257–281, DOI: 10.1175/1520-0450(1991)030<0257:AAOSSI>2.0.CO;2.
14. Huang Y., Siems S., Manton M. et al., Evaluating Himawari-8 cloud products using shipborne and CALIPSO observations: Cloud-top height and cloud-top temperature, *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 2019, V. 36, No. 12, pp. 2327–2347, DOI: 10.1175/JTECH-D-18-0231.1.
15. Huo J., Li J., Duan M. et al. (2020a), Measurement of cloud top height: Comparison of MODIS and ground-based millimeter radar, *Remote Sensing*, 2020, V. 12, No. 10, Article 1616, DOI: 10.3390/rs12101616.
16. Huo J., Lu D., Duan S. et al. (2020b), Comparison of the cloud top heights retrieved from MODIS and AHI satellite data with ground-based Ka-band radar, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2020, V. 13, No. 11, pp. 1–11, DOI: 10.5194/amt-13-1-2020.
17. Lowe D. G., Distinctive image features from scale-invariant keypoints, *Intern. J. Computer Vision*, 2004, V. 60, pp. 91–110, DOI: 10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94.
18. Mitra A., Di Girolamo L., Hong Y. et al., Assessment and error analysis of Terra-MODIS and MISR cloud-top heights through comparison with ISS-CATS lidar, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, V. 126, Article e2020JD034281, DOI: 10.1029/2020JD034281.
19. Moroney C., Marchand R., *Data product specification for the MISR cloud top height-optical depth product*, JPL D-101964, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, NASA, 2019, 14 p.
20. Mouri K., Improvement of the cloud top height algorithm for the fundamental cloud product and related evaluation, *Meteorological Satellite Center Technical Note*, 2019, No. 64, pp. 23–36.
21. Mouri K., Suzue H., Yoshida R., Izumi T., Algorithm theoretical basis document for cloud top height product, *Meteorological Satellite Center Technical Note*, 2016, No. 61, pp. 33–42.
22. Naud C. M., Muller J.-P., Clothiaux E. E. et al., Intercomparison of multiple years of MODIS, MISR and radar cloud-top heights, *Annales Geophysicae*, 2005, V. 23, pp. 2415–2424, DOI: 10.5194/angeo-23-2415-2005.
23. Platnick S., Ackerman S., King M. et al., *MODIS Atmosphere L2 Cloud Product (06_L2)*, NASA MODIS Adaptive Processing System, Goddard Space Flight Center, 2015, DOI: 10.5067/MODIS/MYD06_L2.061.
24. Saunders R., Hocking J., Turner E. et al., An update on the RTTOV fast radiative transfer model (currently at version 12), *Geoscientific Model Development*, 2018, V. 11, pp. 2717–2737, DOI: 10.5194/gmd-11-2717-2018.