

Новые возможности оценки высоты верхней границы облачности на основе синхронных наблюдений высокоэллиптических спутников «Арктика-М» и геостационарных спутников Himawari

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

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*

² *Дальневосточный центр «НИЦ «Планета», Хабаровск, 680000, Россия*

Ввод в эксплуатацию в 2021 г. высокоэллиптической спутниковой системы «Арктика-М» открыл новые возможности наблюдения облачности в северных широтах с высокой частотой (каждые 15 мин). Это потенциально позволяет осуществлять одномоментные наблюдения облачности как геостационарными, так и высокоэллиптическими спутниками, т. е. появился ещё один источник информации для использования прямых методов определения высоты облачности. В данной работе представлены первые результаты исследования с целью создания метода автоматизированного регулярного (не реже чем один раз в 30 мин) восстановления полей высоты верхней границы облачности на основе данных, поступающих со спутников системы «Арктика-М» и геостационарных спутников Himawari-8/9. Кратко описаны возникающие при этом проблемы и приведены первые результаты оценки точности разработанного метода. Показано, что даже текущее качество данных, обеспечиваемых системой «Арктика-М», позволяет получать оценки высоты облачности, сопоставимые с результатами других методов, основанных на спутниковых данных. Также обсуждается возможность реализации технологии автоматизированного регулярного (не реже одного раза в 30 мин) восстановления полей высоты верхней границы облачности по данным геостационарных и высокоэллиптических спутниковых систем.

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

Одобрена к печати: 29.10.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-387-396

Введение

Оценка высоты облачности — одна из важных задач исследования и прогноза динамики атмосферы. При этом для подавляющего большинства задач данного класса обычно требуется получение не информации в отдельных точках, а полей высоты облачности на достаточно протяжённых территориях в определённые моменты времени. Получение такой информации возможно только с использованием дистанционных, в первую очередь спутниковых, методов, поэтому их развитие и совершенствование становится достаточно актуальной задачей. Одним из таких методов оценки высоты верхней границы облачности (ВГО) по спутниковым данным выступает метод на основе одновременных наблюдений облачности с различных космических аппаратов (КА). В отличие от подходов, связанных с моделированием и восстановлением различных физических характеристик облачности, он не требует привлечения дополнительной информации, например, о вертикальном распределении в атмосфере температуры, водяного пара, давления и т. д. Однако реализация данного метода требует наличия именно одномоментной съёмки с различных КА, поскольку облачность является достаточно динамичным объектом и её состояние может заметно меняться в течение нескольких минут. Поэтому для реализации прямых методов восстановления высоты облачности обычно используются следующие виды информации:

1. Данные приборов, установленных на низкоорбитальных КА и ведущих одномоментную съёмку одних и тех же территорий под разными углами, например данные

приборов SLSTR (*англ.* Sea and Land Surface Temperature Radiometer), установленных на КА серии Sentinel-3 (Coppo et al., 2010).

2. Данные, полученные при одномоментных наблюдениях территории различными низкоорбитальными КА или низкоорбитальным и геостационарным КА (Hasler et al., 1991).
3. Данные, полученные при одномоментных наблюдениях территории геостационарными КА, находящимися в разных точках стояния (см., например, (Hasler, 1981; Merucci et al., 2016)).

Все перечисленные данные обладают существенными недостатками. В первых двух случаях информация получается редко (не более нескольких раз в сутки) и по ограниченным, постоянно изменяющимся территориям, а в третьем случае информация хотя и может получаться достаточно часто (в современных условиях — каждые 10–15 мин), но только в зонах перекрытия полей наблюдения геостационарных спутников, находящихся в различных точках стояния. На сегодня такие зоны невелики и пространственное разрешение данных в этих зонах довольно низкое, что также ограничивает возможности восстановления высот облачности.

Ввод в эксплуатацию в 2021 г. высокоэллиптической спутниковой системы «Арктика-М» (Асмус и др., 2021) открыл новые возможности наблюдения облачности в северных широтах с высокой частотой (каждые 15 мин). Это потенциально позволяет осуществлять одномоментные наблюдения как с геостационарных, так и с высокоэллиптических спутников, т. е. появился ещё один источник информации для использования прямых методов определения высот облачности.

В данной работе кратко представлены первые результаты исследования, направленного на создание метода автоматизированного регулярного (не реже чем один раз в 30 мин) восстановления полей высоты ВГО на основе данных, поступающих со спутников системы «Арктика-М» и геостационарных спутников Himawari 8/9 (Bessho et al., 2016). В ней кратко описаны возникающие при этом проблемы и приведены первые результаты оценки точности разработанного метода. Показано, что даже текущее качество данных, предоставляемых системой «Арктика-М», позволяет получать оценки высоты облачности, сопоставимые с результатами других методов, основанных на спутниковых данных. Также обсуждается возможность реализации технологии автоматизированного регулярного (не реже чем раз в 30 мин) восстановления полей высоты ВГО по данным геостационарных и высокоэллиптических спутниковых систем.

Данные, используемые для проведения оценки высоты облачности

Для проведения анализа использовались данные отечественных спутников на высокоэллиптической орбите «Арктика-М» № 1 и 2 и японского геостационарного КА Himawari-9.

Космические высокоэллиптические аппараты серии «Арктика-М» предназначены для наблюдения за атмосферными явлениями в высоких широтах с частотой съёмки один раз в 15 мин, что позволяет осуществлять постоянное наблюдение за северными регионами в квазигеостационарном режиме с зоной чёткого обзора радиусом примерно 60°. Спутник Himawari-9 работает на геостационарной орбите с точкой стояния 140,7° в.д. и осуществляет непрерывный мониторинг погодных условий в восточной Азии и Тихом океане (зона видимости КА от 80 до –160° по долготе и от –60 до 60° по широте), частота съёмки — каждые 10 мин. Таким образом, с учётом наклона орбиты КА «Арктика-М», равного 63°, можно утверждать, что возможно получать качественные перекрытия данными в диапазоне широты от 0 до 60° и долготы от 80 до –160° при текущем положении КА «Арктика-М». В данной зоне за счёт одновременности наблюдений спутниками «Арктика-М» № 1 и 2 и Himawari-9 имеется возможность частого (не реже чем раз в 30 мин) проведения одномоментной съёмки, необходимой для восстановления высоты различных объектов, в первую очередь ВГО.

Следует также отметить, что приборы на данных спутниках имеют наборы каналов, ведущих съёмку в схожих спектральных диапазонах, что облегчает сопоставление поступающей с них информации.

Методы оценки высоты объектов на основе одновременного наблюдения с разных ракурсов

При наличии подобных наблюдений для определения высоты может быть использован метод стереопары, основанный на вычислении трёхмерных координат объектов по трёхмерным координатам точек, из которых проводятся наблюдения, и углам, под которыми видны объекты из этих точек (Argyriou, Petrou, 2009).

Классический алгоритм вычисления высоты с помощью стереопары состоит из четырёх этапов:

- подбора пар изображений с объектом интереса;
- поиска, сопоставления и фильтрации пар точек на изображении;
- оценки расстояний между точками;
- вычисления высоты объектов.

Для проведения работ по оценке высоты облачности на основе данных КА «Арктика-М» (прибор МСУ-ГС/ВЭ — многозональное сканирующее устройство геостационарное, адаптированное под высокоэллиптическую орбиту) и КА Himawari-9 (прибор АИ — *англ.* Advanced Himawari Imager) данный алгоритм был реализован в виде интерактивной и автоматической технологии. Интерактивный инструмент позволяет эксперту подобрать пару изображений с указанных КА по зоне интереса в картографическом интерфейсе, поставить на них точки для формирования стереопары, после чего получить результат измерения. Инструмент реализован в составе информационной системы мониторинга вулканической активности Камчатки и Северных Курил (ИС VolSatView, <http://volcanoes.smislab.ru>) (Гирина и др., 2018). Следует отметить, что помимо возможности оценки высоты на основе данных КА «Арктика-М» и Himawari-9 реализованный интерактивный инструмент позволяет строить стереопары для всех доступных сочетаний данных приборов MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, КА Terra, Aqua), VIIRS (*англ.* Visible Infrared Imaging Radiometer Suite, КА Suomi NPP (*англ.* Suomi National Polar-orbiting Partnership), NOAA-20 (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration), NOAA-21), AVHRR (*англ.* Advanced Very High Resolution Radiometer, КА NOAA POES (*англ.* Polar Orbiting Environmental Satellite)), МСУ-МР (многозональное сканирующее устройство малого разрешения, КА «Метеор-М»), MERIS-II (*англ.* Medium Resolution Spectral Imager-2, КА FY-3 (*англ.* Fengyun)), АИ (КА Himawari-8/9), МСУ-ГС/ВЭ (КА «Арктика-М»). Это, в частности, позволило в дальнейшем использовать результаты определения высоты облачности, полученные на основе этих данных, для оценки результатов восстановления высоты по информации КА «Арктика-М» и КА Himawari-9.

Несмотря на то, что интерактивный инструмент достаточно удобен для анализа экспертом отдельных явлений и областей интереса, для регулярной массовой обработки данных на большие территории он требует больших временных затрат операторов и поэтому практически неприменим. Для автоматизации решения подобных задач в настоящее время разработано достаточно много технологий, в том числе алгоритмы вычисления оптического потока (Horn, Schunck, 1981), поиска контрольных точек (Tareen, Saleem, 2018) и т.д. В настоящей работе был использован алгоритм SIFT (*англ.* Scale-Invariant Feature Transform, масштабно-инвариантная трансформация признаков) (Lowe, 2004), который производит поиск контрольных точек на каждом из двух совмещаемых снимков. Для каждой найденной точки создаётся дескриптор, т.е. вектор с уникальными признаками точки, после чего проводится сопоставление пар точек и их дескрипторов на двух совмещаемых снимках. Исходя из результатов сопоставления и с учётом знания положений КА в момент получения совмещаемых снимков осуществляется расчёт высоты в совмещённых точках.

Реализованная в ИС VolSatView автоматическая технология оценок высоты работает по следующей схеме: для всех поступающих в систему данных КА «Арктика-М» и Himawari-9 составляются пары одновременных сеансов. Для каждой пары таких сеансов проводится предварительная подготовка данных, поиск и фильтрация контрольных точек, вычисление высоты для отфильтрованных точек, занесение результатов измерений в специализированную базу данных. После этого информация о восстановленных высотах становится доступной в картографическом интерфейсе ИС VolSatView в привязке к данным, по которым она была получена (рис. 1).

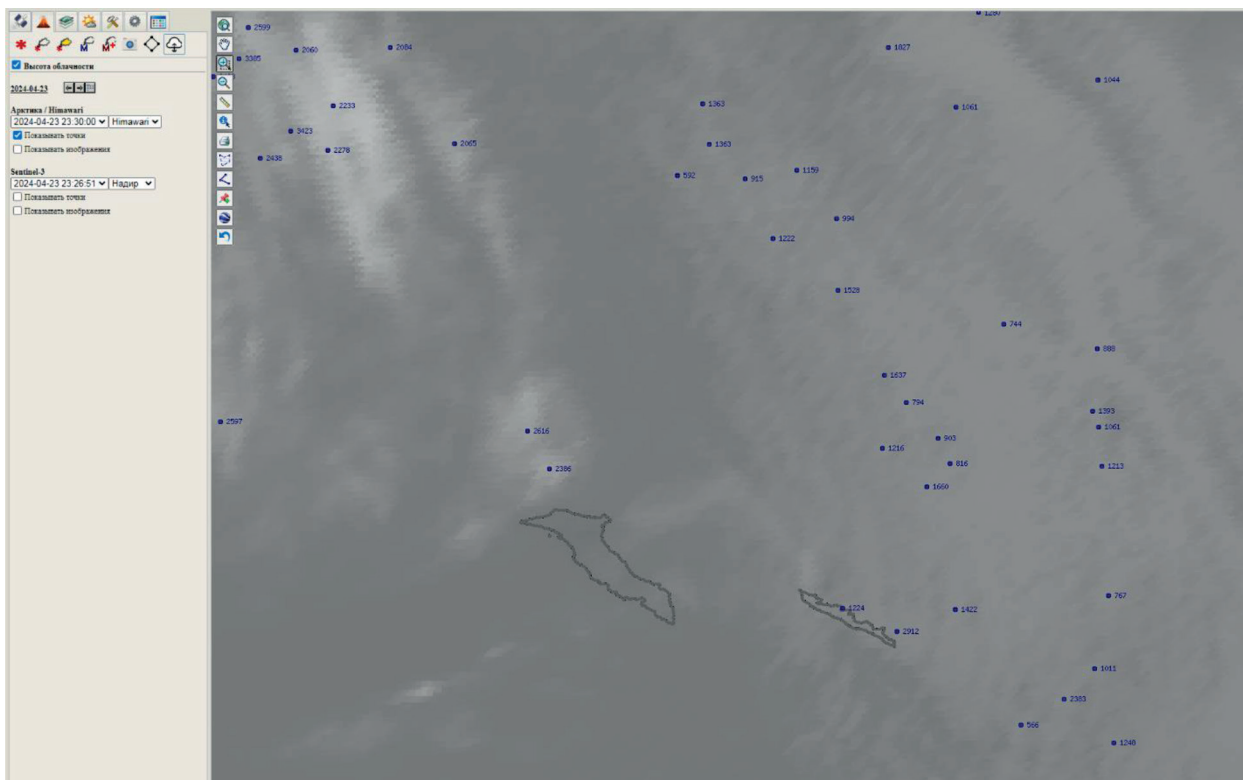


Рис. 1. Пример получаемого поля точек с высотами в ИС VolSatView

Большое значение для практической реализации технологии имеют этапы подготовки данных и фильтрации ложных срабатываний, на описании которых мы кратко остановимся.

Несмотря на отмеченную выше схожесть спектральных каналов съёмочных систем «Арктики-М» и Himawari-9, их спектральные характеристики и пространственное разрешение заметно различаются. В силу этого для повышения эффективности работы алгоритма SIFT требуется предварительная подготовка данных. Так как пространственное разрешение снимков различается фактически в два раза (АНИ (Himawari-9) – 2 км, МСУ-ГС/ВЭ («Арктика-М» № 1 и 2) – 4 км), перед поиском точек изображения приводятся к одному пространственному разрешению. Кроме того, поскольку снимки «Арктики-М» и Himawari-9 в совмещаемых каналах имеют небольшую контрастность, для увеличения числа выделяемых контрольных точек был снижен стандартный порог контрастности, использующийся в SIFT.

Опыт обработки данных показал, что увеличение числа выделяемых точек приводит к появлению значительного числа ложных срабатываний алгоритма. 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 точки фильтруются по порогу яркости для отсекаания поверхности Земли от облачности.

Оценка качества географической привязки данных «Арктики-М» и Himawari

Точность географической привязки используемых данных напрямую влияет на точность восстановления высоты на основе рассматриваемого подхода, поэтому данный вопрос будет кратко рассмотрен в настоящем разделе. Данные КА Himawari-9 обладают хорошей (фактически субпиксельной) точностью географической привязки (Yamamoto et al., 2020). В связи со сложностью схемы наблюдения КА «Арктика-М» в настоящее время сталкивается с определёнными проблемами в географической привязке данных. Для массового анализа её качества с помощью программного пакета AROSICS (*англ.* Automated and Robust Open-Source Image Co-registration Software) (Scheffler et al., 2017) осуществлялось совмещение соответствующих снимков «Арктики-М» на одинаковых рабочих участках орбиты (участках орбиты «Арктики-М» на высотах 27–40–27 тыс. км, на которых ведётся съёмка; в сутки у одного КА «Арктика-М» есть два рабочих участка) и вычислялось среднее смещение между различными совмещёнными точками. Анализ показал, что качество географической привязки данных варьируется в зависимости от спутника и витка орбиты (*рис. 2*).

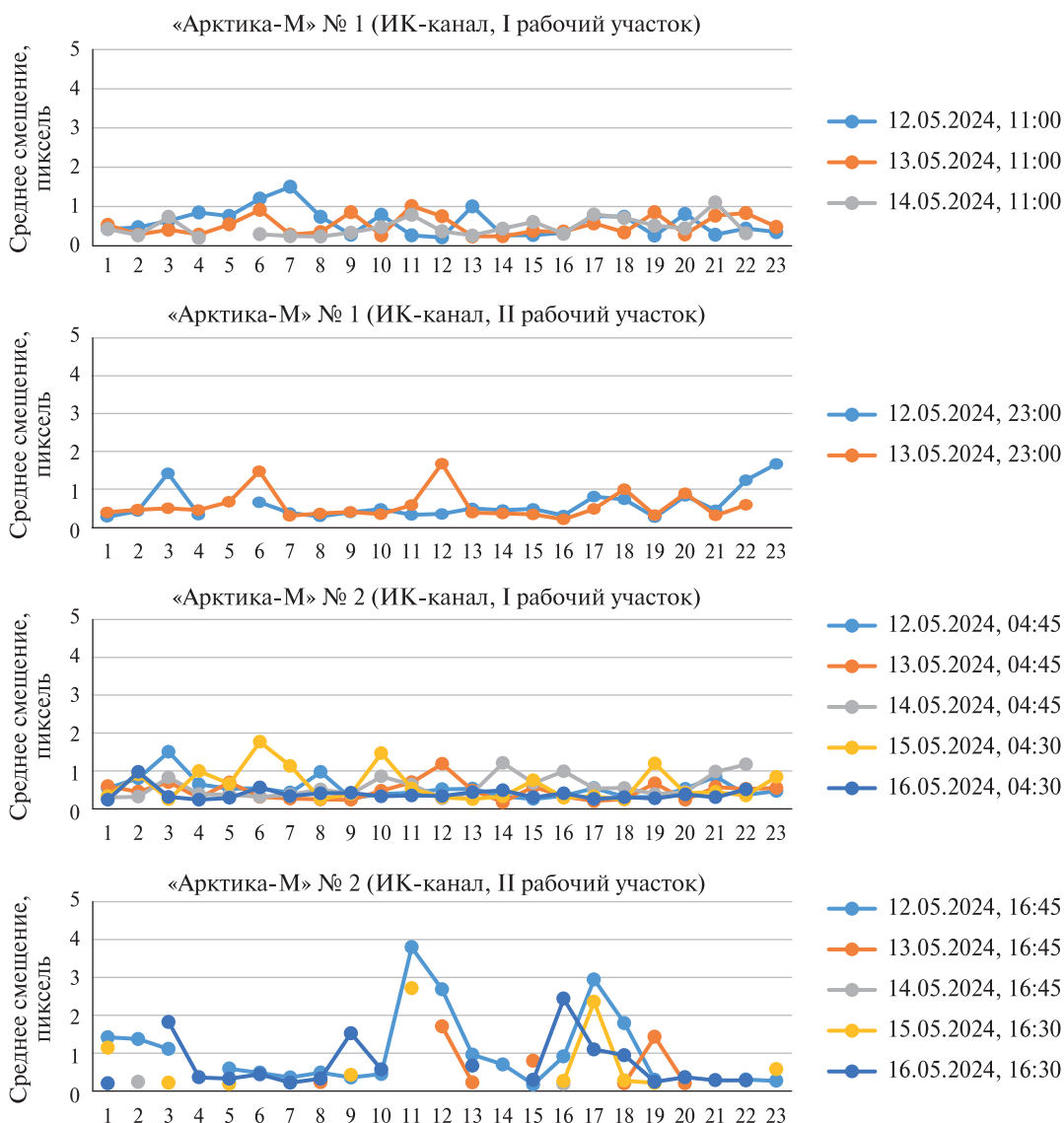


Рис. 2. Качество взаимной привязки между снимками «Арктики-М» № 1 и 2 на одних и тех же рабочих участках орбиты. Время UTC (*англ.* Coordinated Universal Time)

Графики демонстрируют, что в определённых ситуациях ошибки могут достигать нескольких пикселей, что может приводить к значительным погрешностям в определении высоты облаков. По предварительным оценкам, ошибка привязки в 1 км даёт ошибку в определении высоты порядка 0,5 км. Поэтому для повышения точности определения высоты ВГО с использованием данных КА «Арктика-М» необходимо проводить дополнительные работы по повышению точности географической привязки поступающих с них данных.

Предварительные оценки точности восстановления высоты верхней границы облачности на основе наблюдений КА «Арктика-М» и Himawari-9

Предварительные оценки точности восстановления высоты проводились на основе анализа хорошо локализованных пепловых облаков, которые были выброшены вулканами Ключевской и Безымянный во время извержений в ноябре 2023 г. и июле 2024 г. соответственно.

Верификация результатов проводилась сравнением полученных значений с данными, полученными другими методами, а именно CLTH (*англ.* CCloudTopHeight) — специализированным продуктом для оценки высоты ВГО по данным Himawari AHI (Mouri et al., 2016), а также со стереопарами MODIS AHI и VIIRS AHI. Для пары «Арктика-М» — Himawari оценивались как номинально синхронные измерения с совпадающим временем начала наблюдения, полученные с частотой 30 мин, так и измерения, принятые в промежутках между синхронными, с близким, но не совпадающим временем наблюдения с разницей моментов начала наблюдения не более 5 мин.

Такой выбор пар измерений обусловлен логикой наблюдения приборов АHI и МСУ-ГС/ВЭ. Прибор АHI обеспечивает скан полного диска за 10 мин сеанса наблюдения, но зона интереса в нашем исследовании, т. е. Камчатка и её окрестности, наблюдается в примерно интервале от 30-й до 60-й секунды с момента начала сеанса (https://www.data.jma.go.jp/mcsw/eng/himawari89/space_segment/spsg_ahi.html). Прибор МСУ-ГС/ВЭ обеспечивает получение полного диска через 6 мин после начала сканирования. Таким образом, для пар наблюдений с совпадающим временем начала сеанса реальная разница во времени наблюдения Δt будет составлять примерно 5 мин, для пар наблюдений, где сеанс «Арктики-М» стартует на 5 мин раньше, чем сеанс Himawari-9 (пары времени «Арктика-М» в 15 и 45 мин часа, Himawari-9 — в 20 и 50 мин часа соответственно), измерения будут практически синхронными, в пределах 1 мин. Для пар же, где сеанс Himawari-9 стартует на 5 мин раньше, чем сеанс «Арктики-М» (Himawari-9 в 10 и 40 мин часа, «Арктика-М» в 15 и 45 мин соответственно), расхождение во времени наблюдения Δt будет составлять примерно 10 мин.

Все измерения, полученные методом стереопар, сопоставлялись со значением продукта CLTH, полученным в то же время и в той же точке. Коридор ошибки для метода стереопары рассчитан, исходя из оптимистичной ошибки привязки данных КА «Арктика-М» в пределах одного пикселя, что приводит к ошибке определения высоты порядка 1500 м, хотя в ряде случаев ошибка может достигать трёх пикселей и более. Коридор ошибки для продукта CLTH построен, исходя из оптимистичной средней ошибки 1000 м, хотя исследования показывают, что она сильно варьируется в зависимости от параметров облачности и может быть значительно выше (Huo et al., 2020). Графики временного хода и сопоставления результатов измерений для извержений Ключевского и Безымянного вулканов приведены на *рис. 3* и *4* (см. с. 393) соответственно.

Результаты проведённого предварительного анализа показывают, что значения высоты ВГО, получаемые по стереопаре «Арктика-М» — Himawari, почти в 50 % случаев с учётом ошибки метода CLTH совпадают с оценкой, которую даёт данный метод, а почти в 90 % случаев оценки, полученные методами стереопары «Арктика-М» — Himawari и CLTH, попадают в пересечение коридоров ошибок обоих методов. Также, как и следовало ожидать, при увеличении времени расхождения между наблюдениями «Арктика-М» и Himawari-9 растёт расхождение между оценками, полученными методами стереопары «Арктика-М» — Himawari

и CLTH. Причём это расхождение заметно увеличивается даже при различиях по времени в несколько минут. Это лишний раз подтверждает важность синхронности наблюдений для получения корректных результатов измерений высоты ВГО методом стереопары.

Всего было сопоставлено 74 измерения высоты ВГО, полученные для двух проанализированных событий. Итоговая статистика сопоставления приведена в *таблице*.

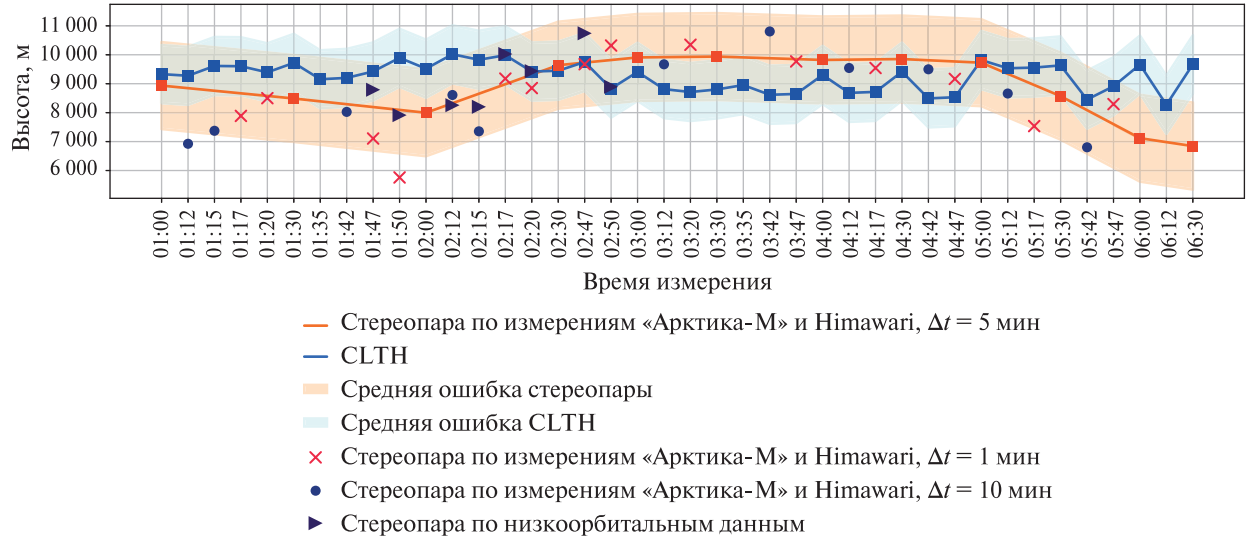


Рис. 3. Сопоставление измерений высоты ВГО при извержении вулкана Ключевской 1 ноября 2023 г., полученной различными методами

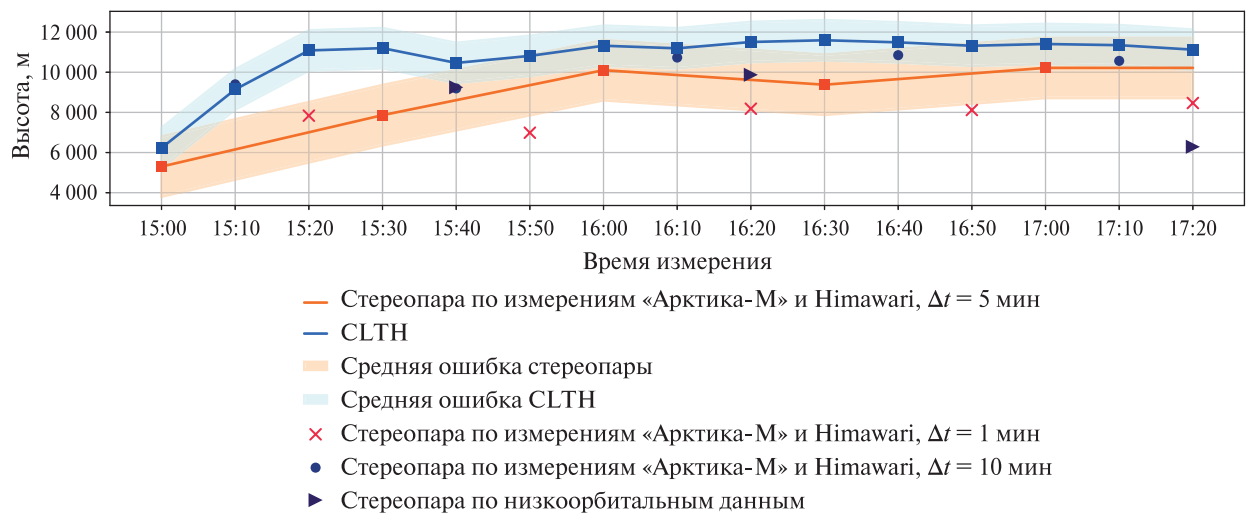


Рис. 4. Сопоставление измерений высоты ВГО при извержении вулкана Безымянный 24 июля 2024 г., полученной различными методами

Статистика сопоставления измерений стереопары «Арктика-М» – Himawari с продуктом CLTH

	Всего	$\Delta t = 1$ мин	$\Delta t = 5$ мин	$\Delta t = 10$ мин
Кол-во точек	74	19	35	20
Попадание точки в диапазон ошибки CLTH, %	44,60	42,10	48,50	40
Попадание коридора ошибки точки в диапазон ошибки CLTH, %	87,80	100	91,40	70

Несмотря на достаточно хорошие результаты проведённой выборочной оценки работы метода, в дальнейшем необходимо реализовать массовую проверку качества его работы. Оптимальным тут представляется развитие автоматического инструмента оценки высоты, в рамках которого проводилась бы автоматическая сверка рассчитанной высоты с данными продукта CLTH и, возможно, какими-либо другими специализированными продуктами или моделями для получения статистики по большой выборке.

Выводы

Представленные в работе результаты анализа возможностей оценки высоты верхней границы облачности на основе синхронных наблюдений высокоэллиптических спутников «Арктика-М» и геостационарных спутников Himawari-9 в целом подтвердили работоспособность предложенного подхода даже в условиях текущих проблем с качеством географической привязки данных КА «Арктика-М». Поэтому можно считать, что появился реальный потенциал создания нового инструмента, который может обеспечить проведение оперативной оценки высоты ВГО с высокой временной частотой и на достаточно больших территориях. Поэтому следует продолжать развитие и совершенствование данного подхода, включая проведение полномасштабной верификации получаемой на его основе информации.

Также следует отметить, что в настоящее время специалистами Дальневосточного центра «НИЦ «Планета» и Института космических исследований РАН с использованием возможностей Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019) создана потоковая схема обработки данных КА «Арктика-М» и Himawari-9, обеспечивающая возможность автоматического построения полей оценок ВГО. Получаемая информация интегрирована в систему мониторинга вулканической активности VolSatView (Гирина и др., 2018) и уже сегодня может использоваться для проведения анализа высоты пепловых выбросов. Кроме того, получаемые результаты реализованной обработки позволяют организовать проведение их массового сравнения с другими данными оценки ВГО для проведения верификации и развития имеющейся в настоящий момент процедуры обработки данных.

Работа выполняется при поддержке Министерства науки и высшего образования 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. *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 // *Информ. технологии в дистанц. зондировании Земли — RORSE 2018*. ИКИ РАН, 2018. С. 359–366. DOI: 10.21046/rorse2018.359.
3. *Лупян Е. А., Прошин А. А., Буццев 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.
4. *Argyriou V., Petrou M.* Photometric stereo: an overview // *Advances in Imaging and Electron Physics*. 2009. V. 156. P. 1–54. [https://doi.org/10.1016/S1076-5670\(08\)01401-8](https://doi.org/10.1016/S1076-5670(08)01401-8).
5. *Bessho K., Date K., Hayashi M. et al.* An introduction to Himawari-8/9 — Japan's new-generation geostationary meteorological satellites // *J. Meteorological Society of Japan*. Ser. II. 2016. V. 94. Iss. 2. P. 151–183. <https://doi:10.2151/jmsj.2016-009>.
6. *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. Iss. 18. P. 1815–1830. <https://doi.org/10.1080/09500340.2010.503010>.

7. *Hasler A. F.* Stereographic observations from geosynchronous satellites: An important new tool for the atmospheric sciences // *Bull. American Meteorological Society*. 1981. V. 62. Iss. 2. P. 194–212. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1981\)062%3C0194:S0FGSA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1981)062%3C0194:S0FGSA%3E2.0.CO;2).
8. *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. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1991\)030%3C0257:AAOSSI%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1991)030%3C0257:AAOSSI%3E2.0.CO;2).
9. *Horn B. K. P., Schunck B. G.* Determining optical flow // *Artificial Intelligence*. 1981. V. 17. Iss. 1–3. P. 185–203. [https://doi.org/10.1016/0004-3702\(81\)90024-2](https://doi.org/10.1016/0004-3702(81)90024-2).
10. *Huo J., Lu D., Duan S. et al.* 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. P. 1–11. <https://doi.org/10.5194/amt-13-1-2020>.
11. *Lowe D. G.* Distinctive image features from scale-invariant keypoints // *Intern. J. Computer Vision*. 2004. V. 60. P. 91–110. <https://doi.org/10.1023/B%3AVISI.0000029664.99615.94>.
12. *Merucci L., Zakšek K., Carboni E. et al.* Stereoscopic estimation of volcanic ash cloud-top height from two geostationary satellites // *Remote Sensing*. 2016. V. 8. Iss. 3. Article 206. <https://doi.org/10.3390/rs8030206>.
13. *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.
14. *Scheffler D., Hollstein A., Diedrich H. et al.* AROSICS: An automated and robust open-source image co-registration software for multi-sensor satellite data // *Remote Sensing*. 2017. V. 9. Iss. 7. Article 676. <https://doi.org/10.3390/rs9070676>.
15. *Tareen S. A. K., Saleem Z.* A comparative analysis of SIFT, SURF, KAZE, AKAZE, ORB, and BRISK // *2018 Intern. Conf. Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET)*. IEEE. 2018. P. 1–10. <http://dx.doi.org/10.1109/ICOMET.2018.8346440>.
16. *Yamamoto Y., Ichii K., Higuchi A., Takenaka H.* Geolocation accuracy assessment of Himawari-8/AHI imagery for application to terrestrial monitoring // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. Iss. 9. Article 1372. <https://doi.org/10.3390/rs12091372>.

New possibilities of estimating the upper cloud boundary height on the basis of synchronous observations from Arktika-M highly elliptical orbit satellites and Himawari geostationary satellites

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

¹ *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*

² *Far Eastern Center of SRC “Planeta”, Khabarovsk 680000, Russia*

Commissioning in 2021 of the highly elliptical orbit Arktika-M satellite system opened up new opportunities to observe cloud cover in northern latitudes with high frequency (every 15 minutes). This potentially provides synchronous observations of cloud cover by both geostationary and highly elliptical orbit satellites, i.e., another source of information for using direct methods to determine cloud cover heights has become available. The paper presents the first results of work on the development of a method for automated regular (at least once every 30 minutes) reconstruction of the upper cloud boundary height fields based on data from Arktika-M and geostationary Himawari-8/9 satellites. Problems arising in this process are discussed and first results of the accuracy assessment of the developed method are presented. It is shown that even the current quality of data provided by the Arktika-M system makes it possible to obtain estimates of cloud cover heights comparable to those obtained from satellite data by other methods. We also discuss the possibility of implementing the technology of automated regular (at least once every 30 minutes) reconstruction of cloud top height fields from geostationary and highly elliptical orbit satellite data.

Keywords: stereopair, upper cloud boundary height, Arktika-M, Himawari

Accepted: 29.10.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-387-396

References

1. Asmus V.V., Milekhin O.E., Kramareva L.S. et al., Arktika-M: The world's first highly elliptical orbit hydrometeorological space system, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2021, Vol. 46, No. 12, pp. 805–816, DOI: doi.org/10.3103/S1068373921120013.
2. Girina O.A., Loupian E.A., Kramareva L.S. et al., The information system “Remote monitoring of Kamchatka and Kuril Islands volcanic activity“ (VolSatView): Capabilities and Experience, *Information Technologies in Remote Sensing of the Earth — RORSE 2018*, IKI RAS, 2019, pp. 359–366 (in Russian), DOI: 10.21046/rorse2018.359.
3. 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, Vol. 16, No. 3, pp. 151–170 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
4. Argyriou V., Petrou M., Photometric stereo: an overview, *Advances in Imaging and Electron Physics*, 2009, Vol. 156, pp. 1–54, DOI: https://doi.org/10.1016/S1076-5670(08)01401-8.
5. Bessho K., Date K., Hayashi M. et al., An introduction to Himawari-8/9 — Japan's new-generation geostationary meteorological satellites, *J. Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 2016, Vol. 94, Issue 2, pp. 151–183, https://doi:10.2151/jmsj.2016-009.
6. 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, Vol. 57, Issue 18, pp. 1815–1830, https://doi.org/10.1080/09500340.2010.503010.
7. Hasler A.F., Stereographic observations from geosynchronous satellites: An important new tool for the atmospheric sciences, *Bull. American Meteorological Society*, 1981, Vol. 62, Issue 2, pp. 194–212, https://doi.org/10.1175/1520-0477(1981)062%3C0194:S0FGSA%3E2.0.CO;2.
8. 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, Vol. 30, No. 3, pp. 257–281, https://doi.org/10.1175/1520-0450(1991)030%3C0257:AAOSS1%3E2.0.CO;2.
9. Horn B.K.P., Schunck B.G., Determining optical flow, *Artificial Intelligence*, 1981, Vol. 17, Issue 1–3, pp. 185–203, https://doi.org/10.1016/0004-3702(81)90024-2.
10. Huo J., Lu D., Duan S. et al., Comparison of the cloud top heights retrieved from MODIS and AHI satellite data with ground-based Ka-band radar, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2020, Vol. 13, No. 11, pp. 1–11, https://doi.org/10.5194/amt-13-1-2020.
11. Lowe D.G., Distinctive image features from scale-invariant keypoints, *Intern. J. Computer Vision*, 2004, Vol. 60, pp. 91–110, https://doi.org/10.1023/B%3AVISI.0000029664.99615.94.
12. Merucci L., Zakšek K., Carboni E. et al., Stereoscopic estimation of volcanic ash cloud-top height from two geostationary satellites, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, Issue 3, Article 206. https://doi.org/10.3390/rs8030206.
13. 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.
14. Scheffler D., Hollstein A., Diedrich H. et al., AROSICS: An automated and robust open-source image co-registration software for multi-sensor satellite data, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9, Issue 7, Article 676, https://doi.org/10.3390/rs9070676.
15. Tareen S.A.K., Saleem Z., A comparative analysis of SIFT, SURF, KAZE, AKAZE, ORB, and BRISK, *2018 Intern. Conf. Computing, mathematics and engineering technologies (iCoMET). IEEE*, 2018, pp. 1–10, http://dx.doi.org/10.1109/ICOMET.2018.8346440.
16. Yamamoto Y., Ichii K., Higuchi A., Takenaka H., Geolocation accuracy assessment of Himawari-8/AHI imagery for application to terrestrial monitoring, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, Issue 9, Article 1372, https://doi.org/10.3390/rs12091372.