

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2026-3-99-113>

УДК 551.501.75

**Восстановление векторов ветра
по данным канала видимого диапазона
прибора МСУ-ГС/ВЭ
космического аппарата серии «Арктика-М»**

В.Д. Блощинский, А.А. Филей, Ю.А. Шамилова

*Дальневосточный центр ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической
гидрометеорологии «Планета», г. Хабаровск, Россия
v.bloshchinsky@dvrpod.ru*

В работе рассматривается задача восстановления полей векторов ветра по спутниковым данным. Представлен алгоритм, разработанный для канала 0,7 мкм видимого диапазона прибора МСУ-ГС/ВЭ, установленного на космических аппаратах серии «Арктика-М». В основе метода лежит модифицированный дифференциальный алгоритм оптического потока (метод Брокса), оптимизированный для вычислений на графических процессорах. Для обеспечения надежности продукта разработана система фильтрации получаемых векторов ветра, включающая тесты на контрастность, минимальную скорость, а также вертикальную и пространственную согласованность векторов. Валидация результатов за период 2025–2026 гг. показала высокое соответствие эталонным данным: среднеквадратичная векторная разность составила 5,22 м/с по сравнению с радиозондированием и 5,33 м/с относительно модели GFS. Установлено, что точность расчетов снижается при больших зенитных углах съемки и в верхней тропосфере, однако общие показатели удовлетворяют требованиям Всемирной метеорологической организации. Полученные продукты обладают высокой пространственной плотностью и могут использоваться как для синоптического анализа арктической атмосферы, так и для последующей ассимиляции в модели численного прогноза погоды.

Ключевые слова: векторы ветра, видимый диапазон, Арктика-М, МСУ-ГС, оптический поток, метод Брокса

**Retrieval of wind vectors
from the Arktika-M
MSU-GS/VE visible channel data**

V.D. Bloshchinskiy, A.A. Filei, Yu.A. Shamilova

*Far-Eastern Center of State Research Center for Space
Hydrometeorology “Planeta”, Khabarovsk, Russia
yshipko@mail.ru*

The study addresses a retrieval of wind vector fields from satellite data. An algorithm developed for the 0.7 μm channel of the MSU-GS/VE instrument aboard the Arktika-M series satellites is presented. The method is based on a modified differential optical flow algorithm (the Brox method) optimized for GPU-based computations. To ensure the product reliability, a quality control and filtering system was developed, incorporating tests for image contrast, minimum wind speed, and both vertical and spatial consistency of the vectors.

Validation of the results for 2025–2026 demonstrated high agreement with reference data: the root-mean-square vector difference reached 5.22 m/s against radiosonde observations and 5.33 m/s as compared to the GFS model. While accuracy decreases at large satellite zenith angles and in the upper troposphere, the overall performance meets the standards set by the World Meteorological Organization. The resulting products feature high spatial density and are suitable for both the synoptic analysis of the Arctic atmosphere and subsequent assimilation into numerical weather prediction models.

Keywords: wind vectors, visible band, Arktika-M, MSU-GS, optical flow, Brox method

Введение

Современные системы численного прогноза погоды играют важную роль в обеспечении безопасности жизнедеятельности, планировании авиационных и морских перевозок, а также в мониторинге климатических изменений. Точность прогнозов напрямую зависит от качества задания начальных условий, ключевым элементом которых являются трехмерные поля метеорологических величин, в том числе векторы ветра в атмосфере. Ошибки в определении потоков ветра на различных вертикальных уровнях атмосферы могут приводить к существенным искажениям в моделировании переноса тепла и влаги, что особенно критично для прогнозирования экстремальных метеорологических явлений, связанных с прохождением глубоких циклонов и атмосферных фронтов. В практике ведущих метеорологических центров мира (ECMWF, NCEP, Гидрометцентр России) для уточнения начальных полей широко применяются методы ассимиляции данных, включая вариационные методы (4D-Var) [7] и фильтрацию Калмана [3]. Однако эффективность этих методов ограничена доступностью наблюдений, особенно над обширными территориями Мирового океана, пустынь и полярных регионов, где сеть наземных станций аэрологического зондирования крайне разрежена или отсутствует совсем.

В условиях недостаточности наземных наблюдений данные дистанционного зондирования Земли из космоса становятся основным источником информации о состоянии атмосферы в глобальном масштабе. Спутниковые оценки векторов движения в атмосфере позволяют получать сведения о скорости и направлении ветра путем детектирования перемещения облачных образований и полей водяного пара на последовательности изображений. На сегодняшний день существует несколько группировок метеорологических космических аппаратов (КА), обеспечивающих мониторинг атмосферы. Геостационарные спутники серий «Электро-Л», Meteosat и GOES и др. обладают высокой временной дискретностью съемки, но их эффективная зона видимости ограничена экваториальными и умеренными широтами из-за геометрии наблюдения. Полярно-орбитальные КА серий «Метеор-М», NOAA, MetOp лучше подходят для наблюдения приполярных областей, однако редкая периодичность пролета над одной точкой затрудняет мониторинг быстрой эволюции облачных структур, необходимый для точного расчета векторов смещения.

Для обеспечения квазинепрерывного наблюдения за Арктическим регионом, мониторинг которого приобретает особую актуальность в связи с активным освоением Северного морского пути и изменением климатических условий в высоких широтах, была создана группировка КА серии «Арктика-М» [1], функционирующих на высокоэллиптической орбите типа «Молния». Такая орбита позволяет аппаратам длительное время находиться в апогее над Северным полушарием, обеспечивая съемку Арктического региона с высокой частотой на рабочем участке орбиты. Основной целевой аппаратурой КА серии «Арктика-М» является многозональное сканирующее устройство геостационарное высокоэллиптическое (МСУ-ГС/ВЭ). Ранее в рамках научно-исследовательских работ была успешно разработана и апробирована технология восстановления векторов ветра по данным инфракрасных (ИК) каналов прибора МСУ-ГС/ВЭ с центральными длинами волн 10,8 и 6,3 мкм [2], которые позволяют осуществлять мониторинг в любое время суток, что особенно актуально в условиях полярной ночи.

В то же время видимый диапазон спектра обладает существенным преимуществом с точки зрения пространственной детализации. Канал с центральной длиной волны 0,7 мкм прибора МСУ-ГС/ВЭ обеспечивает получение изображений с пространственным разрешением 1 км в надире, что в четыре раза превышает аналогичный показатель для ИК-каналов. Использование данных видимого диапазона в светлое время суток позволяет выявлять и отслеживать более мелкие облачные структуры и конвективные ячейки, которые невозможно отследить в инфракрасном диапазоне. Это открывает возможности для повышения плотности векторного поля ветра и улучшения качества прогнозов мелкомасштабных процессов. В то же время переход на канал видимого диапазона требует адаптации алгоритмов обработки с учетом особенностей отражательной способности облаков, изменения освещенности и геометрии съемки на высокоэллиптической орбите.

В статье рассматривается разработка алгоритма формирования спутниковых информационных продуктов о ветре по данным канала 0,7 мкм аппаратуры МСУ-ГС/ВЭ КА серии «Арктика-М». В качестве математической основы для вычисления векторов смещения облачных трассеров выбран дифференциальный метод оптического потока, а именно модифицированный метод Брокса с нормализацией ограничений на данные [4], ранее показавший высокую эффективность. Описывается технология подготовки исходных данных, а также система контроля качества и фильтрации получаемых векторов. Для оценки точности разработанного алгоритма проведена валидация результатов путем сравнения с данными радиозондирования атмосферы и полями глобальной прогностической модели GFS. Результаты исследования направлены на интеграцию новых информационных продуктов в системы ассимиляции данных для повышения точности численного прогноза погоды в Арктическом регионе.

Используемые данные

В настоящее время космическая группировка гидрометеорологических КА серии «Арктика-М» представлена двумя действующими аппаратами. Согласно утвержденной космической программе, планируется довести размер используемой группировки до четырех космических аппаратов данной серии для обеспечения непрерывного круглосуточного мониторинга. Все спутники серии оснащены идентичной целевой аппаратурой – прибором МСУ-ГС/ВЭ, что позволяет унифицировать алгоритмы обработки данных для всей группировки.

КА серии «Арктика-М» функционируют на орбитах с высотой апогея около 40000 км, высотой перигея около 1000 км и наклоном орбиты $63,4^\circ$, что обеспечивает возможность длительного нахождения аппарата над Северным полушарием. Орбитальная конфигурация определяет специфический режим наблюдения: рабочий участок орбиты, в течение которого осуществляется съемка Арктического региона с высокой частотой (до 15 минут), длится около 6 часов. Потом следует перерыв длиной примерно 6 часов, связанный с прохождением перигея и нахождением над Южным полушарием, после чего начинается новый рабочий участок. Такая цикличность обеспечивает квазинепрерывный обзор высоких широт, однако накладывает ограничения на временную непрерывность данных в глобальном масштабе.

Прибор МСУ-ГС/ВЭ регистрирует излучение Земли и атмосферы в десяти спектральных каналах видимого и инфракрасного диапазонов. Пространственное разрешение данных варьируется в зависимости от спектрального диапазона: каналы видимого диапазона имеют разрешение 1 км в надире, тогда как инфракрасные каналы – 4 км. Основные спектральные диапазоны и области их применения приведены в табл. 1.

Для восстановления векторов ветра по данным видимого диапазона в качестве основного источника информации выбран канал с центральной длиной волны 0,7 мкм (спектральный диапазон 0,65–0,80 мкм) прибора МСУ-ГС. Использование данных видимого канала имеет ряд особенностей по сравнению с ИК-измерениями. Во-первых, измерения возможны только в освещенной Солнцем части земного диска. Вблизи линии терминатора, где зенитные углы Солнца превышают $75\text{--}80^\circ$, возникают условия низкой освещенности, сопровождающиеся уменьшением контрастности облачных структур и снижением отношения сигнал/шум, что увеличивает погрешность определения векторов смещения облачков. Во-вторых, в видимом диапазоне от углов солнечного освещения и от угла наблюдения спутника будет зависеть значение коэффициента спектральной яркости (КСЯ), под которым понимается нормированное значение яркости, характеризующее отражательную способность облаков и подстилающей поверхности. В течение 6-часового рабочего участка орбиты географическое положение подспутниковой точки КА серии «Арктика-М» смещается, что приводит к заметной вариативности КСЯ для одной и той же территории. Кроме того,

из-за особенности высокоэллиптической орбиты и ограничений по углу солнечного освещения покрытие видимой части земного диска данными канала 0,7 мкм может быть неполным.

Таблица 1. Характеристики каналов прибора МСУ-ГС/ВЭ
Table 1. Channels characteristics of the MSU-GS/VE instrument

Диапазон длин волн, мкм	Разрешение, км	Область применения
Видимый диапазон		
0,50–0,65	1	Детектирование облачности, слежение за облаками-трассерами для определения ветра, наблюдения аэрозоля
0,65–0,80	1	
0,80–0,90	1	Детектирование облачности малых размеров
Инфракрасный диапазон		
3,5–4,0	4	Детектирование низкой облачности, туманов, оценки температуры поверхности океанов и суши в ночных условиях
5,7–7,0	4	Наблюдения за водяным паром, оценки ветра, высоты полупрозрачной облачности
7,5–8,5	4	Наблюдения полупрозрачной слоистой облачности
8,2–9,2	4	
9,2–10,2	4	Мониторинг общего содержания озона, ветер в нижней стратосфере
10,2–11,2	4	Оценка температуры поверхности океанов и суши, количества осаждаемой воды над океанами
11,2–12,5	4	

Алгоритм

В качестве математической основы для вычисления векторов смещения облачных трассеров выбран дифференциальный метод оптического потока, а именно модифицированный метод Брокса с нормализацией ограничений на данные [4]. Подход базируется на трех предположениях: неизменчивости яркости движущихся объектов во времени, гладкости векторного поля оптического потока и неизменчивости градиента яркости. Физически это реализуется в виде поиска такого поля векторов смещения, которое наилучшим образом согласует изменения между двумя смежными кадрами с учетом плавности движения атмосферных структур. Метод сводится к минимизации функционала энергии изображения, что позволяет находить плотное поле смещений для каждого пикселя, в отличие от корреляционных методов, требующих анализа больших окон. Это преимущество позволяет более корректно восстанавливать векторы в зонах вращательного движения облачных вихрей и получать высокую пространственную плотность данных.

Важным аспектом технологии является ее программная реализация. Вычислительно сложная процедура расчета оптического потока выполнена на программно-аппаратной архитектуре CUDA с использованием графических процессоров. Это обеспечивает кратное увеличение скорости обработки больших массивов спутниковых данных по сравнению с традиционными вычислениями на центральных процессорах, что является важным требованием для оперативного режима формирования метеорологических продуктов.

Для расчета векторов ветра необходимо предварительно подготовить исходные данные, обеспечив их геометрическую и радиометрическую согласованность. Исходной информацией служат два смежных по времени снимка земной поверхности в видимом канале 0,7 мкм прибора МСУ-ГС/ВЭ с временным интервалом, соответствующим периодичности съемки. Для определения высоты векторов ветра используется сопутствующая информация о параметрах облачности, формируемая комплексом ВПО-СД [6] на основе данных инфракрасных каналов. Поскольку расчёт оптического потока ведётся по данным канала видимого диапазона с разрешением 1 км, то производится интерполяция маски облачности и полей давления на верхней границе облачности, рассчитанных по данным ИК-каналов с разрешением 4 км. Для полей давления применяется метод билинейной интерполяции, обеспечивающий плавность изменения значений, а для бинарной маски облачности – метод ближайшего соседа, сохраняющий дискретную природу классификации.

Для минимизации геометрических искажений при вычислении пространственных градиентов, которые возникают ввиду изменения положения подспутниковой точки в течение сеанса наблюдения, исходные данные двух сроков съемки трансформируются в единую ортографическую проекцию. Её центром выбирается географические координаты центра первого снимка. Такое преобразование позволяет исключить ошибки, связанные с изменением угла обзора спутника между сканами, и сохранить структуру облачных образований для корректного вычисления градиентов яркости.

На этапе подготовки производится обнаружение пикселей, непригодных для дальнейшего детектирования смещения облачных трассеров. Исключение таких областей производится на основе геометрических ограничений и свойств облачного покрова. Области (пиксели) помечаются как непригодные для использования в расчете векторов ветра, если соответствуют следующим условиям:

$$\theta_{sat} > 70^\circ,$$

$$\theta_{sun} > 85^\circ,$$

$$M_{er}(i, j) = 0.$$

где θ_{sat} – зенитный угол наблюдения спутника; $\theta_{sun} > 85^\circ$ – зенитный угол Солнца; M_{er} – маска облачности после применения операции морфологической эрозии:

$$M_{er} = M_{cloud} \ominus B,$$

где $\ominus$ – операция морфологической эрозии, представляющая собой процедуру сужения областей на бинарном изображении для удаления граничных пикселей; M_{cloud} – бинарная маска облачности; B – структурный элемент размером 3 пикселя. Таким образом, исключаются из обработки пиксели с большими зенитными углами, где влияние геометрии наблюдения и низкая освещенность вносят существенные искажения в значения КСЯ. Кроме того, исключаются безоблачные участки, а уменьшение маски на 3 пикселя по периметру облачных объектов позволяет исключить зоны с неоднородным отражением на краях облаков, где возможно смешение сигналов от облака и фона.

Важно отметить, что на данном этапе производится лишь маркировка невалидных пикселей, однако сам расчет оптического потока выполняется по полному непрерывному изображению. Применение жесткой маски на этапе вычисления градиентов нарушило бы непрерывность поля яркости, что недопустимо для дифференциальных методов. Пиксели, отмеченные как невалидные, не исключаются из расчета смещений немедленно, а фиксируются для последующего удаления соответствующих векторов на этапе фильтрации готового поля векторов смещения.

Далее происходит определение векторов смещения пикселей изображения по методу Брокса. После чего по рассчитанным величинам смещения и по их известным географическим координатам происходит пересчет в значения U и V компонент ветра. Далее пиксели, которые были ранее отмечены как невалидные, исключаются из дальнейшего анализа, а оставшимся присваиваются значения вертикального положения согласно давлению на верхней границе облачности. Это позволяет сформировать трехмерное поле векторов ветра, готовое для последующего анализа.

На этапе постобработки применяется система фильтрации, состоящая из нескольких тестов и направленная на минимизацию ложных векторов и повышение достоверности итогового продукта. Первый тест основан на оценке локальной контрастности изображения. Для каждого пикселя рассчитывается стандартное отклонение значений КСЯ в скользящем окне размером 15×15 пикселей

$$\sigma_{i,j} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{(m,n) \in W_{i,j}} (K_{m,n} - \bar{K}_{i,j})^2},$$

где $K_{m,n}$ – значение КСЯ в пикселе (m,n) ; $\bar{K}_{i,j}$ – среднее значение в окне $W_{i,j}$; N – количество элементов в окне. Пиксель помечается как невалидный, если $\sigma_{i,j} < 1.8$. Данный порог выбран эмпирически и позволяет исключить области с текстурами, для которых расчет оптического потока становится неустойчивым из-за недостатка градиентной информации.

Второй тест направлен на фильтрацию векторов с малыми скоростями, которые могут быть сопоставимы с уровнем инструментального шума или ошибок привязки. Вектор ветра исключается из рассмотрения, если выполняется условие:

$$|\overline{V}_{i,j}| = \sqrt{U_{i,j}^2 + V_{i,j}^2} < 2 \text{ м/с},$$

где $U_{i,j}$ и $V_{i,j}$ – рассчитанные значения компонент векторов ветра.

Третий тест проверяет вертикальную согласованность перемещения трассера. Поскольку метод оптического потока предполагает преимущественно горизонтальный перенос облачных образований, значительное изменение высоты между начальным и конечным положением вектора может указывать на ошибку трекинга или вертикальное развитие облачности. Пиксель отбраковывается, если разница давлений на верхней границе облачности превышает допустимое значение:

$$|\Delta P_{i,j}| = |P_1(i,j) - P_2(i + \Delta i, j + \Delta j)| > 100 \text{ гПа},$$

где P_1 и P_2 – рассчитанные значения давления на верхней границе облачности для первого и второго срока съемки; Δi и Δj – вычисленные вектора смещения пикселей на изображениях.

Четвертый тест направлен на проверку пространственной согласованности векторов. В ранее разработанном алгоритме для инфракрасных каналов с разрешением 4 км успешно применялся метод кластеризации DBSCAN в скользящем окне, который позволял выявлять и исключать выбросы, несогласованные с окружающим полем ветра. Однако при работе с данными видимого канала, имеющими разрешение 1 км, применение DBSCAN становится вычислительно неэффективным из-за 16-кратного увеличения количества пикселей. В связи с этим был реализован упрощенный алгоритм проверки согласованности, основанный на анализе угловых и скоростных характеристик соседних векторов. Для каждого пикселя в окне 7×7 подсчитывается количество соседей, удовлетворяющих двум критериям: близости по направлению и по скорости. Вектор считается согласованным, если найдено не менее 20 «похожих» соседей согласно выражению:

$$N_{val} = \sum_{(m,n) \in W_{i,j}} I \left[\cos(\theta_{i,j} - \theta_{m,n}) > \cos(\alpha_{thr}) \wedge \frac{\|\overline{V}_{i,j} - \overline{V}_{m,n}\|}{|\overline{V}_{i,j}|} < \beta_{thr} \right] > 20,$$

где $\theta_{i,j}$ и $\theta_{m,n}$ – направления векторов ветра для центрального и соседнего пикселей соответственно; $|\overline{V}_{i,j}|$ и $|\overline{V}_{m,n}|$ – скорости векторов ветра для центрального и соседнего пикселей соответственно; $\alpha_{thr} = 30^\circ$ – порог

по углу; $\beta_{thr} = 0,3$ – относительный порог по скорости. Функция $I[\]$ возвращает 1, если условие истинно, и 0 в противном случае. Данный подход позволяет сократить вычислительные затраты при сохранении высокой эффективности фильтрации выбросов.

Все рассчитанные векторы ветра, успешно прошедшие описанные выше тесты контроля качества, считаются корректно определёнными и сохраняются в качестве итогового результата работы алгоритма. На рис. 1 представлен пример карты векторов ветра, рассчитанных по данным видимого канала 0,7 мкм прибора МСУ-ГС/ВЭ КА серии «Арктика-М». На карте отражены не все векторы, а только их часть для удобства восприятия, а также указано цветовое кодирование в зависимости от высоты.

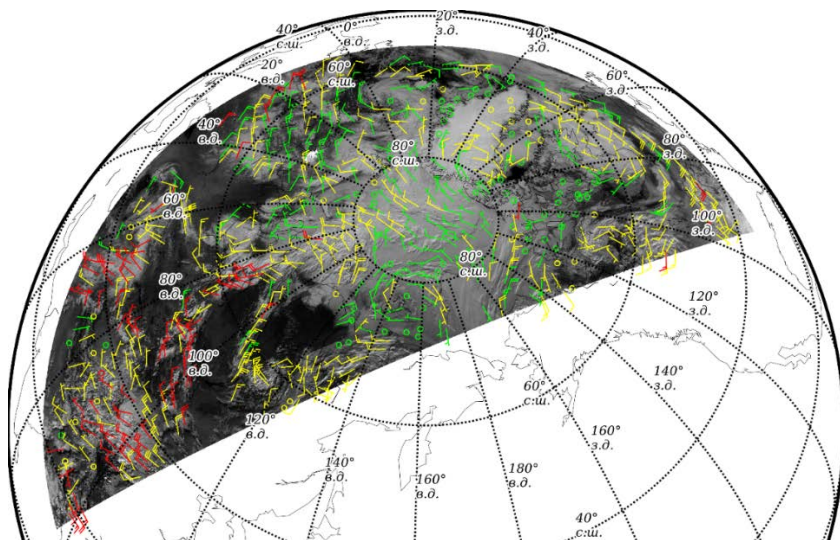


Рис. 1. Пример карты векторов ветра по данным канала 0,7 мкм прибора МСУ-ГС/ВЭ КА «Арктика-М» №1 за срок 2025-06-06 11:30 с цветовым кодированием давления (зеленый – от 1000 до 700 гПа; желтый – от 700 до 400 гПа; красный – от 400 до 100 гПа).

Fig. 1. Example of a map of wind vectors according to the 0.7 μm channel of the MSU-GS/VE instrument of the Arktika-M No. 1 satellite for the period 2025-06-06 11:30 with color-coded pressure (green – from 1000 to 700 hPa; yellow – from 700 to 400 hPa; red – from 400 to 100 hPa).

Валидация

Для количественной оценки точности и достоверности работы предложенного алгоритма было проведено сравнение с результатами аэрологического радиозондирования из баз данных Росгидромета и центра GSL (NOAA), а также с полями ветра из глобальной модели численного прогноза погоды GFS.

Период валидации охватывал временной интервал с апреля 2025 г. по апрель 2026 г. Для обеспечения корректности сравнения с данными радиозондирования отбирались сроки съемки КА серии «Арктика-М», наиболее близкие к стандартным срокам запуска зондов (00 и 12 ч ВСВ), при этом временное рассогласование между сроком съемки и сроком зондирования не превышало одного часа. Для тех же самых сроков проводилось сравнение с данными модели GFS.

Основной метрикой точности служило среднее квадратичное модуля векторной разности компонентов U и V вектора ветра (RMSVD). Дополнительно рассчитывались коэффициент корреляции Пирсона (PCC), средняя абсолютная ошибка (MAE) по скорости и направлению. Результаты валидации представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты сравнения рассчитанных векторов ветра с данными радиозондирования и модели GFS

Table 2. Comparison results of calculated wind vectors with radiosonde data and GFS model

Источник данных	RMSVD, м/с	PCC, %	MAE скорость, м/с	MAE направление, град	Количество точек
Радиозондирование	5.22	93.83	3.02	18.10	524
Модель GFS	5.33	85.11	3.19	15.06	3813679

Полученные результаты демонстрируют высокую степень корреляции рассчитываемых векторов ветра с эталонными данными. Значения показателя RMSVD находятся в пределах требований, предъявляемых Всемирной метеорологической организацией к спутниковым данным о ветре [5], а также сопоставимы с точностью оценок векторов ветра, полученной ведущими зарубежными центрами (EUMETSAT, NOAA) [8]. При сравнении с моделью GFS метрики оказались незначительно хуже, что может быть обусловлено как увеличенным объемом анализируемых точек, так и погрешностями пространственной интерполяции модельных полей при их согласовании со спутниковыми наблюдениями. Тем не менее общая точность алгоритма позволяет рассматривать данные канала 0,7 мкм как надёжный источник информации о полях ветра в светлое время суток, пригодный для использования в задачах численного прогноза погоды и синоптического анализа.

Дополнительно была исследована зависимость точности алгоритма от сезонных условий. Для данного анализа результаты представлены только на основе сравнения с моделью GFS, поскольку, как показано выше, метрики качества при валидации по GFS и радиозондированию демонстрируют высокую степень согласованности и схожие значения ошибок. Это позволяет использовать более представительную выборку модельных

данных для оценки устойчивости алгоритма в различных метеорологических условиях. Выборка была разделена на два периода: холодный сезон (октябрь–март), характеризующийся низкой освещённостью, преобладанием снежного и ледового покрова, а также специфической динамикой арктических циклонов; и тёплый сезон (апрель–сентябрь), отличающийся более высокой контрастностью облачных структур над свободной ото льда поверхностью и лучшими условиями освещения в высоких широтах. Результаты данного сравнения представлены в табл. 3.

Таблица 3. Сезонная статистика ошибок

Table 3. Seasonal error statistics

Сезон	RMSVD, м/с	PCC, %	MAE скорость, м/с	MAE направление, град	Количество точек
Холодный	5.42	84.86	3.26	15.07	1600118
Теплый	5.29	85.23	3.16	15.05	2213561

Анализ сезонной зависимости показывает улучшение точности в тёплый период года. Однако различия в метриках между сезонами находятся в пределах статистической погрешности, что может свидетельствовать о робастности алгоритма к изменению условий подстилающей поверхности и освещённости.

Одним из аспектов, влияющих на итоговую точность получаемых векторов ветра, является зависимость от геометрии съёмки. На рис. 2 представлена зависимость ошибки RMSVD от зенитного угла спутника.

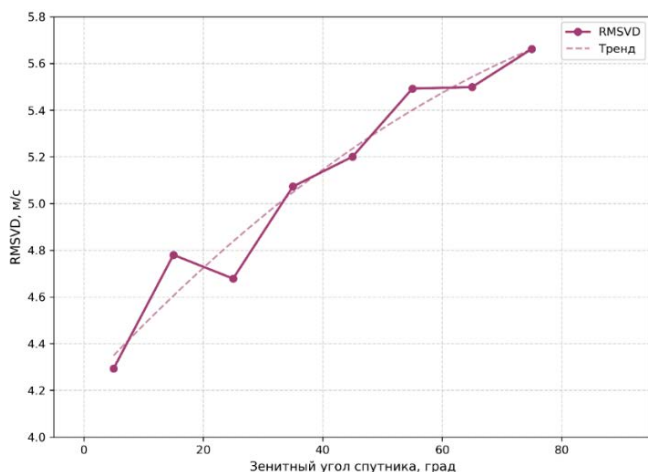


Рис. 2. Зависимость ошибки RMSVD от зенитного угла наблюдения спутника.

Fig. 2. Error dependence of the RMSVD on the zenith angle of the satellite observation.

Как видно из графика, наблюдается монотонный рост ошибки с увеличением зенитного угла наблюдения. В надирах (углы $0-20^\circ$) ошибка минимальна и составляет около 4,3 м/с, тогда как на периферии видимого диска Земли (углы $60-80^\circ$) она возрастает до 5,7 м/с. Это связано с ухудшением пространственного разрешения и увеличением геометрических искажений при увеличении угла наблюдения, что затрудняет точное пространственное позиционирование и вычисление градиентов яркости для метода оптического потока. Аналогичная зависимость наблюдается и для зенитного угла Солнца, представленная на рис. 3.

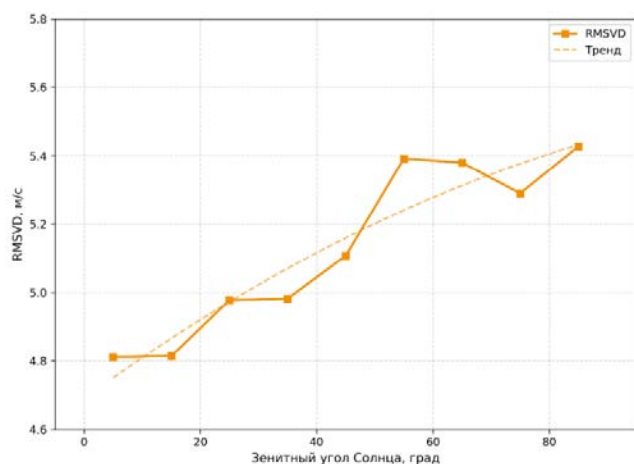


Рис. 3. Зависимость ошибки RMSVD от зенитного угла Солнца.

Fig. 3. Error dependence of the RMSVD on the zenith angle of the Sun.

Увеличение зенитного угла Солнца приводит к росту ошибки с 4.8 до 5.4 м/с. При меньшей освещенности Солнцем (углы $> 60^\circ$) снижение контрастности облачных текстур может вносить дополнительные погрешности в расчет оптического потока. Тем не менее даже при критических углах ошибка не превышает допустимых пределов, что подтверждает работоспособность методики в широком диапазоне условий освещенности.

В дополнение была рассмотрена зависимость ошибок RMSVD по вертикальным уровням атмосферы, которая показана на рис. 4.

Вертикальный профиль показывает, что ошибка неравномерна по высоте. Минимальные значения RMSVD наблюдаются в нижней тропосфере (1000–800 гПа).

В верхней тропосфере (400–200 гПа) ошибка возрастает. Это может быть связано с особенностями облачности верхнего яруса, для которой характерны полупрозрачность и более быстрая эволюция, что затрудняет точное отслеживание смещений методом оптического потока. Кроме того, повышенные ошибки в верхних слоях могут быть обусловлены меньшей точностью определения высоты верхней границы облачности по данным

инфракрасных каналов, особенно в областях, близких к тропопаузе, где вертикальный градиент температуры существенно изменяется, что приводит к дополнительным неопределенностям при привязке векторов ветра к изобарическим уровням.

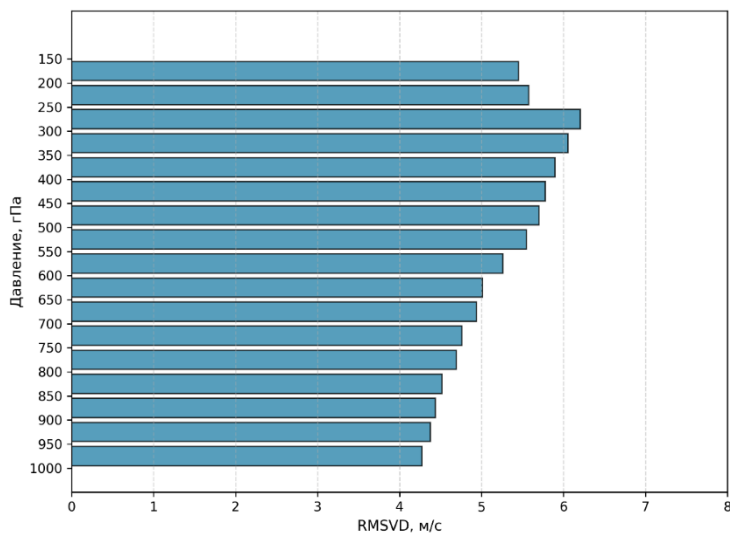


Рис. 4. Зависимость ошибки RMSVD по уровням атмосферы.

Fig. 4. Error dependence of the RMSVD in atmospheric levels.

Далее было рассмотрено общее распределение ошибок в виде векторной разности (VD) эталонного вектора и рассчитанного, представленное на рис. 5.

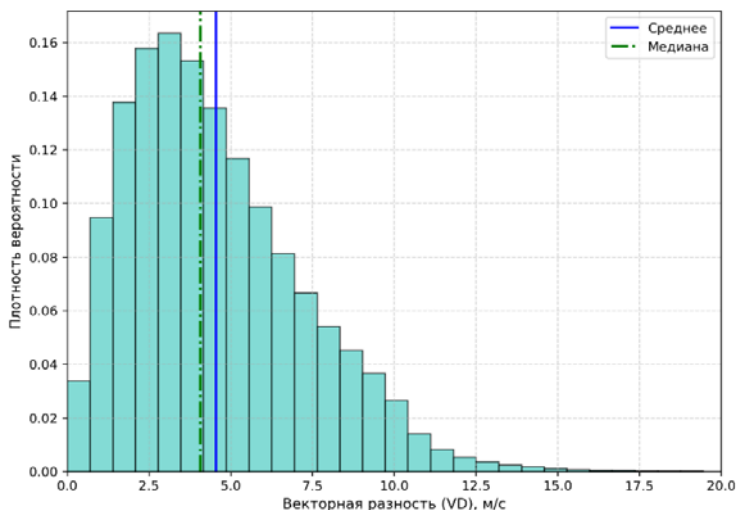


Рис. 5. Распределение ошибок VD.

Fig. 5. Distribution of vector difference errors.

Гистограмма распределения имеет правостороннюю асимметрию, то есть медианное значение ошибки меньше среднего значения, что позволяет предположить наличие небольшого количества выбросов с большой ошибкой. Основная масса векторов (более 75 %) имеет ошибку менее 6 м/с, что подтверждает пригодность продукта для использования в задачах численного прогноза погоды и синоптического анализа.

Заключение

В работе представлен алгоритм восстановления векторов ветра по данным видимого канала с центральной длиной волны 0,7 мкм прибора МСУ-ГС/ВЭ КА серии «Арктика-М». Разработанный алгоритм основан на применении дифференциального метода оптического потока, а именно модифицированного метода Брокса с нормализацией ограничений на данные. Реализованная многоуровневая система фильтрации, включающая тесты на проверку градиента яркости, минимальной скорости, вертикальной согласованности и пространственной однородности векторного поля, позволяет эффективно отсеивать ошибочные значения и минимизировать влияние грубых выбросов.

Комплексная валидация результатов, проведённая на данных за период с апреля 2025 г. по апрель 2026 года, подтвердила достаточно высокую точность разработанного алгоритма при незначительном количестве грубых выбросов. Показатели RMSVD составили 5,22 м/с при сравнении с данными радиозондирования и 5,33 м/с при сравнении с моделью GFS, что свидетельствует о надёжности методики. Достигнутая точность и высокая пространственная плотность векторного поля позволяют использовать полученные продукты о ветре в задачах синоптического анализа для мониторинга атмосферных процессов в Арктическом регионе, а также подтверждают их пригодность для ассимиляции в модели численного прогноза погоды с целью улучшения качества начальных полей и повышения точности прогностических расчётов.

Список литературы

1. Асмус В.В., Милехин О.Е., Крамарева Л.С., Хайлов М.Н., Шишаков А.Е., Шумаков И.А. 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. Блюшинский В.Д., Крамарева Л.С., Давиденко А.Н., Кучма М.О. Получение глобальных оценок векторов ветра по данным инфракрасных каналов прибора МСУ-ГС космических аппаратов серий «Арктика-М» и «Электро-Л» // Метеорология и гидрология. 2026. № 5. С. 36-46. DOI: 10.52002/0130-2906-2026-5-36-46.
3. Рогутков В.С., Толстых М.А. Использование спутниковых данных наблюдений ветра на уровне моря ASCAT в системе усвоения данных на основе локального ансамблевого фильтра Калмана. // Труды Гидрометцентра России. 2016. №. 361. С. 79-94.
4. Симоненко Е.В., Чудин А.О., Давиденко А.Н. Дифференциальный метод вычисления векторов перемещения облачности // Метеорология и гидрология. 2017. №. 3. С. 29-40.

5. Руководство по приборам и методам наблюдений. Том IV – Космические наблюдения. Женева: ВМО, 2021. 229 с.

6. Филей А.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020616622 Программный комплекс «PlanetaVPO-SD» для восстановления параметров облачности по спутниковым данным. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 29 мая 2020.

7. Park S.K., Xu L. (ed.). Data assimilation for atmospheric, oceanic and hydrologic applications (Vol. II). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. P. 730. DOI: 10.1007/978-3-642-35088-7.

8. Wind Product Quality. https://www.star.nesdis.noaa.gov/goesr/quality_statistics.php.

References

1. Asmus V.V., Milehin O.E., Kramareva L.S., Hajlov M.N., Shirshakov A.E., Shumakov I.A. Pervaja v mire vysokojellipticheskaja gidrometeorologicheskaja kosmicheskaja sistema «Arktika-M» [Arktika-M: The world's first highly elliptical orbit hydrometeorological space system]. *Meteorologija i gidrologija* [Russ. *Meteorol. Hydrol.*], 2021, vol. 46, no. 12, pp. 805-816. DOI: 10.3103/S1068373921120013

2. Bloshhinskij V.D., Kramareva L.S., Davidenko A.N., Kuchma M.O. Poluchenie global'nyh ocenok vektorov vetra po dannym infrakrasnyh kanalov pribora MSU-GS KA serij Arktika-M i Jelektro-L [Deriving Global Wind Vector Estimates from Infrared Channel Data Of Msu-Gs Onboard the Arktika-M and Elektro-L Satellites]. *Meteorologiya i Gidrologiya* [Russ. *Meteorol. Hydrol.*], 2026, no. 5, pp. 403-410. DOI: 10.3103/S1068373926050031

3. Rogutov V.S., Tolstyh M.A. Ispol'zovanie sputnikovyh dannyh nabljudenij vetra na urovne morja ASCAT v sisteme usvoenija dannyh na osnove lokal'nogo ansamblevogo fil'tra Kalmana [The use of satellite sea level wind data ASCAT in the data assimilation system based on the local ensemble Kalman filter]. *Trudy Gidrometcentra Rossii* [Proceedings of Hydrometcentre of Russia], 2016, no. 361, pp. 79-94 [in Russ.].

4. Simonenko E.V., Chudin A.O., Davidenko A.N. The differential method for calculation of cloud motion vectors. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2017, vol. 42, no. 3, pp. 159-167. DOI: 10.3103/S1068373917030037

5. Guide to Instruments and Methods of Observation. Volume IV – Space-based Observations. Geneva: WMO, 2021, 195 p.

6. Филей А.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020616622 Программный комплекс «PlanetaVPO-SD» для восстановления параметров облачности по спутниковым данным. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 29 мая 2020 [Certificate of state registration of the computer program No. 2020616622 "PlanetaVPO-SD" software package for restoring cloud parameters based on satellite data. Registered in the Register of Computer Programs on May 29, 2020] [in Russ.].

7. Park S.K., Xu L. (ed.). Data assimilation for atmospheric, oceanic and hydrologic applications (Vol. II). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, 730 p. DOI: 10.1007/978-3-642-35088-7

8. Wind Product Quality. https://www.star.nesdis.noaa.gov/goesr/quality_statistics.php.

Поступила 12.05.2026; принята в печать 22.10.2026.
Submitted 12.05.2026; accepted for publication 22.10.2026.