

**УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ
ВЕКТОРОВ ВЕТРА ПО ИНФОРМАЦИИ АППАРАТУРЫ
МСУ-ГС/ВЭ ВЫСОКОЭЛЛИПТИЧЕСКОГО КА АРКТИКА-М №1
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИЧЕСКОГО ПОТОКА**

*Дальневосточный центр ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической
гидрометеорологии «Планета», г. Хабаровск*

Введение

В течение 2022 года в рамках темы 2.5 Плана научно-исследовательских и опытно-конструкторских, технологических и других работ Росгидромета была разработана усовершенствованная технология построения векторов ветра с использованием оптического потока по информации аппаратуры МСУ-ГС/ВЭ высокоэллиптического космического аппарата (КА) Арктика-М №1, которая в течение 2022 года была испытана отделом математического обеспечения регионального вычислительного центра ФГБУ «Дальневосточное УГМС».

105

Необходимость разработки технологии построения векторов ветра по информации, полученной с КА Арктика-М №1, обусловлена недостаточностью покрытия большей части северных территорий Российской Федерации, Сибири и Дальнего Востока оперативными данными наземных наблюдений, радиолокационного и аэрологического зондирования в качестве основы для построения алгоритмов наукастинга, а также возможного ограничения доступа к данным зарубежных КА и моделям ЧПП.

Ранее разработанная технология построения векторов ветра по данным инфракрасного канала с центральной длиной волны 10.7 мкм прибора МСУ-ГС геостационарных спутников серии Электро-Л не обеспечивала высокую плотность расчета на данных КА Арктика-М №1, в связи с чем были проведены работы по усовершенствованию технологии путем применения оптического потока и дополнительного построения векторов ветра для инфракрасного канала с центральной длиной волны 6.3 мкм.

Краткое описание технологии

Ядром предлагаемой технологии расчета векторов ветра является дифференциальный метод вычисления оптического потока – модифицированный метод Брокса с нормализацией ограничений на данные [2]. Использование дифференциальных методик дает возможность получить векторное поле с высокой плотностью и точностью. Последнее справедливо ввиду того, что подобные методы точнее восстанавливают вектора для областей, имеющих вращательные траектории движения. Сам метод сводится к задаче минимизации функционала энергии изображения с помощью численного решения соответствующих уравнений Эйлера – Лагранжа методом Якоби. Технология расчета оптического потока реализована на программно-аппаратной архитектуре CUDA, что позволяет в десятки раз увеличить скорость обработки изображений по сравнению с процессорными вычислениями.

На основе оптического потока реализуется алгоритм вычисления векторов ветра по перемещению облачности (для канала с центральной длиной волны 10.7 мкм) и полей водяного пара (для канала с центральной длиной волны 6.3 мкм) в атмосфере, который состоит из нескольких этапов. На первом этапе извлекаются данные двух смежных изображений инфракрасных каналов с центральными длинами волн 10.7 мкм и 6.3 мкм (9 и 5 каналы) прибора МСУ-ГС/ВЭ КА Арктика-М №1, а также рассчитываются маска облачности, высоты верхней границы облачности для канала 10.7 мкм и полей водяного пара для канала 6.3 мкм [3]. Извлеченные данные преобразуются в стереографическую проекцию для Северного полюса (ESRI:102018). Далее с помощью оптического потока извлекается информация о перемещении каждого пикселя на смежных изображениях рассматриваемых каналов и по географическим координатам производится расчет U и V компонент смещения пикселей, которые пересчитываются в значения скорости и направления векторов ветра. Каждому рассчитанному вектору присваивается конкретное значение уровня давления, соответствующее давлению на верхней границе облачности и поля водяного пара. После этого применяется ряд тестов, позволяющих исключить некорректные вектора, рассчитанные вне облачности, в областях с достаточно низким градиентом радиояркостных температур и малым смещением. Дополнительно с помощью алгоритма кластеризации DBSCAN исключаются ошибки, связанные с несогласованностью смежных векторов, и рассчитывается показатель качества QI , по которому на разных высотах отсекаются вектора, не подошедшие по установленным критериям. Данные критерии выбраны эмпирическим методом при проведении экспериментов на определение наилучшего соотношения точности работы алгоритма и предоставляемого покрытия.

Методика испытаний

Для оценки точности работы разработанной технологии было проведено сравнение получаемых параметров ветра с данными фактического радиозондирования атмосферы. Сравнение проводилось для всех доступных пунктов зондирования, имеющихся в базе данных РВЦ ФГБУ «Дальневосточное УГМС» и базе данных центра GSL (NOAA). Дополнительно проводилась оценка точности векторов ветра по прогностическим полям центра NCEP в сетке $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ для дат, близких к срокам предыдущего сравнения. Рассчитывался коэффициент корреляции Пирсона (PIRS), средняя абсолютная ошибка (MAE) и среднеквадратическая ошибка (RMSE) отдельно для скорости и направления ветра, а также среднее квадратичное модуля векторной разности компонентов U и V вектора ветра (RMSVD).

Результаты испытаний

Первым этапом испытаний разработанной технологии было сравнение с данными фактического радиозондирования атмосферы. Для этого в течение 2022 года выбирались сроки съемки КА Арктика-М №1, наиболее близкие к 00 и 12 ч UTC (основные сроки запуска аэрологических зондов). Результаты сравнения представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты сравнения векторов ветра по данным КА Арктика-М №1 и данных радиозондирования атмосферы

107

	PIRS	MAE	RMSE	RMSVD	Количество точек
Канал с центральной длиной волны 10.7 мкм					
Направление	97.3 %	12.7 град.	17.1 град.	4.94 м/с	1172
Скорость	96.1 %	2.7 м/с	3.4 м/с		
Канал с центральной длиной волны 6.3 мкм					
Направление	84.1 %	12.9 град.	34.8 град.	4.33 м/с	2982
Скорость	96.2 %	2.3 м/с	2.9 м/с		

Полученные результаты показывают хорошую корреляцию сравниваемых данных с низкими значениями ошибок. Погрешность оценок по показателю RMSVD соответствует требованиям к измерениям, сформулированным рабочими группами Всемирной метеорологической организации [1].

Ввиду малого количества точек по данным радиозондирования, аналогичным способом было проведено сравнение с данными прогностических полей центра NCEP. Модельные значения векторов ветра выбирались из прогноза с заблаговременностью, не превышающей 12 часов от исходных сроков 00 и 12 ч по UTC (аналогичные сроки при сравнении с данными радиозондирования). Результаты сравнения представлены в табл. 2.

**Результаты сравнения векторов ветра по данным КА Арктика-М №1
и параметров ветра по данным прогностической модели**

	PIRS	MAE	RMSE	RMSVD	Количество точек
Канал с центральной длиной волны 10.7 мкм					
Направление	81.7 %	14.7 град.	49.8 град.	5.01 м/с	10071737
Скорость	95.5 %	2.8 м/с	3.6 м/с		
Канал с центральной длиной волны 6.3 мкм					
Направление	83.8 %	13.6 град.	43.1 град.	4.19 м/с	20403589
Скорость	95.3 %	2.4 м/с	3.0 м/с		

По результатам сравнения наблюдаются ошибки RMSE выше, чем при сравнении с данными радиозондирования, что, возможно, связано с наличием некоторого количества грубых выбросов, но остальные результаты аналогичны предыдущему сравнению.

Для проведения сравнительного анализа с аналогичными данными, рассчитываемыми для зарубежных КА, было проведено сравнение параметров ветра, полученных по данным серии спутников GOES (NOAA) [4], с прогностическими полями центра NCEP. Для этого были выбраны аналогичные предыдущим сравнениям сроки съемки, но в меньшем количестве. Результаты представлены в табл. 3.

**Результаты сравнения векторов ветра по данным КА GOES-16
и параметров ветра по данным прогностической модели**

	PIRS	MAE	RMSE	RMSVD	Количество точек
Канал с центральной длиной волны 11.2 мкм					
Направление	70.9 %	8.9 град.	31.5 град.	4.67 м/с	50 358
Скорость	95.1 %	2.5 м/с	3.3 м/с		
Канал с центральной длиной волны 6.15 мкм					
Направление	84.7 %	8.1 град.	23.4 град.	5.34 м/с	52 611
Скорость	94.1 %	2.9 м/с	3.7 м/с		

Результаты сравнения достаточно близки к сравнениям восстановленных значений векторов ветра по данным КА Арктика-М №1, что позволяет сделать вывод о том, что точность расчетов разработанной технологии соответствует зарубежным аналогам.

В качестве дополнительной меры оценки было построено вертикальное распределение ошибки RMSVD по различным уровням давления атмосферы. Результаты представлены в табл. 4, где показано распределение по трем основным срезам уровней, и на рис. 1, где показано полное распределение ошибки для КА Арктика-М №1 в сравнении с КА серии GOES.

Распределение ошибки RMSVD по уровням давления

Уровень давления, гПа	RMSVD для канала с центральной длиной волны 10.7 мкм, м/с	RMSVD для канала с центральной длиной волны 6.3 мкм, м/с
0–300	5.95	4.38
300–500	5.18	4.19
500–1000	4.22	4.12

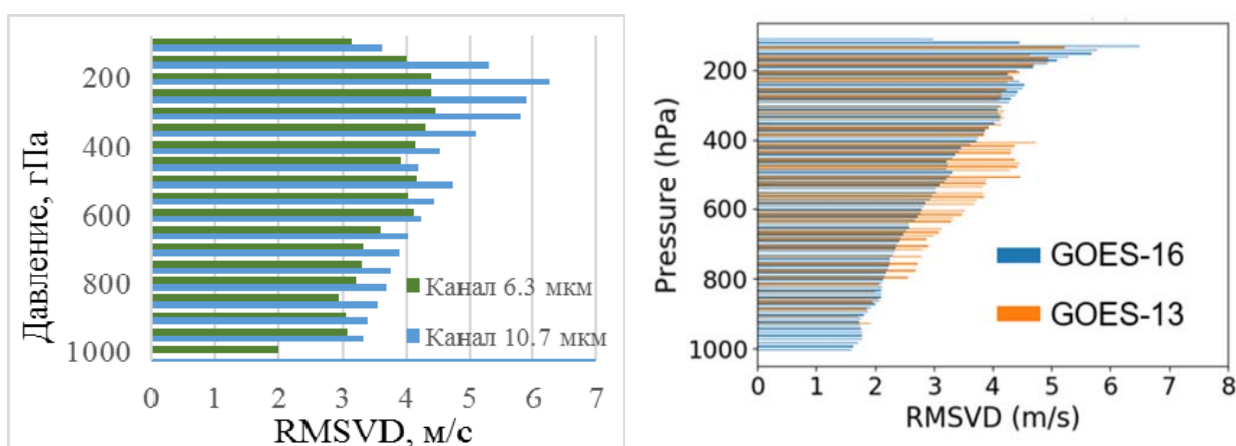


Рис. 1. Распределение ошибки RMSVD по уровням давления для КА Арктика-М №1 (слева) и КА GOES (справа).

Разработанная технология расчета векторов ветра обеспечивает схожие показатели точности работы по всем сезонам года, что подтверждается результатами сравнений векторов ветра по данным КА Арктика-М №1 и параметров ветра по данным прогностической модели за летний и осенний период, представленными в табл. 5 и 6 соответственно.

Таблица 5

Результаты сравнения векторов ветра по данным КА Арктика-М №1 и параметров ветра по данным прогностической модели (август 2022)

	PIRS	MAE	RMSE	RMSVD	Количество точек
Канал с центральной длиной волны 10.7 мкм					
Направление	81.5 %	14.9 град.	50.1 град.	4.97 м/с	831859
Скорость	95.4 %	2.8 м/с	3.5 м/с		
Канал с центральной длиной волны 6.315 мкм					
Направление	83.8 %	13.5 град.	42.9 град.	4.16 м/с	1641558
Скорость	95.1 %	2.3 м/с	3.0 м/с		

Результаты сравнения векторов ветра по данным КА Арктика-М №1 и параметров ветра по данным прогностической модели (ноябрь 2022)

	PIRS	MAE	RMSE	RMSVD	Количество точек
Канал с центральной длиной волны 10.7 мкм					
Направление	85.9 %	10.6 град.	41.1 град.	5.82 м/с	811257
Скорость	96.5 %	3.3 м/с	4.2 м/с		
Канал с центральной длиной волны 6.3 мкм					
Направление	81.3 %	10.9 град.	47.3 град.	5.27 м/с	1231878
Скорость	96.4 %	2.9 м/с	3.7 м/с		

Ошибка в осенний период незначительно выше, что может быть связано с особенностями распределения температур в атмосфере и используемым подходом к определению высот полей облачности и водяного пара. Но в относительном выражении показатели близки друг к другу.

Одним из основных преимуществ усовершенствованной технологии построения векторов ветра, по сравнению с ранее применяемой технологией для КА серии Электро-Л, кроме возможности расчета по каналу с центральной длиной волны 6.3 мкм, стало увеличение плотности результирующего пространственного покрытия данными о векторах ветра. На рис. 2 представлен пример пространственного покрытия ранее применяемой технологии (красный цвет) и усовершенствованной (желтый).

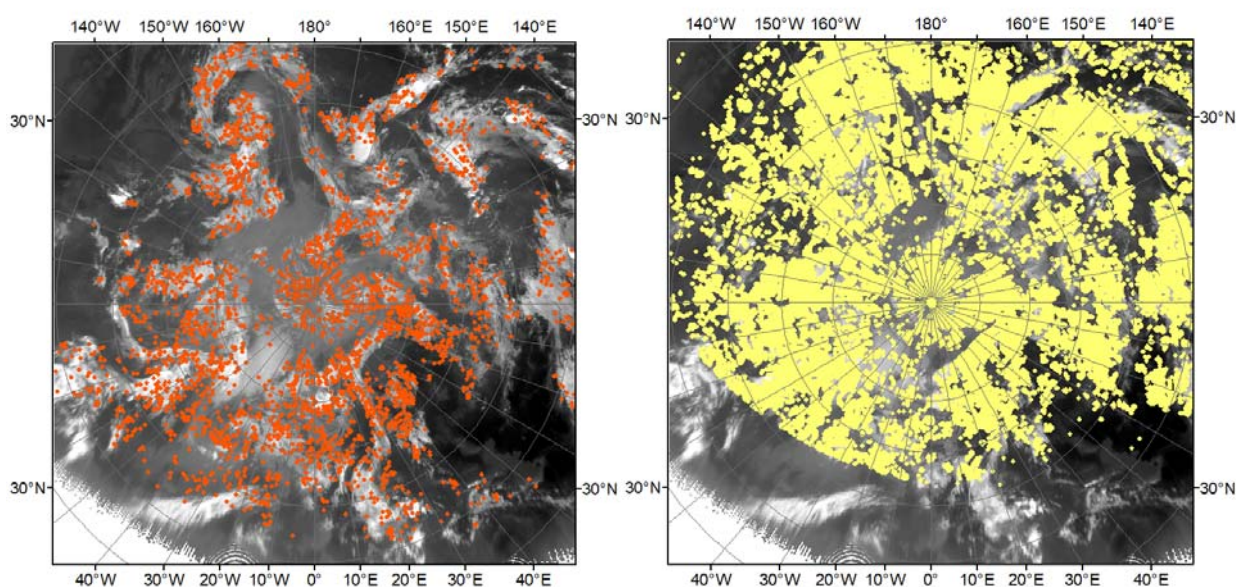


Рис. 2. Пример пространственного покрытия ранее применяемой технологии для КА серии Электро-Л (слева) и усовершенствованной технологии расчета векторов ветра (справа).

Заключение

Результаты проведенных испытаний показали, что погрешности оценки векторов ветра в большинстве случаев соответствуют требованиям к измерениям, сформулированным рабочими группами Всемирной метеорологической организации, и близки к результатам работы алгоритмов восстановления параметров ветра, разработанных в ведущих зарубежных космических центрах (EUMETSAT, NOAA). При этом при использовании дифференциального метода оптического потока достигается более высокая плотность векторного поля относительно ранее применяемой технологии, разработанной для геостационарных КА серии Электро-Л.

Усовершенствованная технология расчета векторов ветра, как и другие технологии дистанционного зондирования, безусловно, необходимы в системах прогностического наукастинга и могут выступать в качестве источника вспомогательной информации при реализации алгоритмов наукастинга параметров атмосферы, в постпроцессинге обработки данных численного прогноза погоды.

Центральной методической комиссией по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета от 16 сентября 2022 г. даны следующие рекомендации:

- использовать в ФГБУ «Дальневосточное УГМС» представленную технологию в оперативной синоптической практике в качестве источника вспомогательной информации;
- авторам продолжить работы по совершенствованию технологии с целью повышения качества получаемой продукции для ее использования в оперативной практике прогностических подразделений.

111

Список литературы

1. Руководство по приборам и методам наблюдений. Том IV – Космические наблюдения. – Женева: ВМО, 2018. – 265 с.
2. Симоненко Е.В., Чудин А.О., Давиденко А.Н. Дифференциальный метод вычисления векторов перемещения // Метеорология и гидрология. – 2017. – № 3. – С. 31–42.
3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программный комплекс "PlanetaVPO-SD" для восстановления параметров облачности по спутниковым данным» № 2020615141 от 19.06.2020.
4. Daniels J., Bresky W., Bailey A., Allegrino A., Wanzong S., Velden C., Berger H. Enterprise Algorithm Theoretical Basis Document For Derived Motion Winds. NOAA NESDIS CENTER for SATELLITE APPLICATIONS and RESEARCH, 2022. 113 с. URL: https://www.star.nesdis.noaa.gov/jpss/documents/ATBD/ATBD_EPS_Winds_DMW_v4.0.pdf (дата обращения: 05.12.2022).