

Концепция потоковой обработки данных российских спутниковых СВЧ-радиометров серии МТВЗА на базе ЦКП «ИКИ-Мониторинг»

Д. М. Ермаков^{1,2}, А. В. Кузьмин¹, А. А. Мазуров¹, Е. В. Пашинов¹,
И. Н. Садовский¹, Д. С. Сазонов¹, В. В. Стерлядкин^{1,3}, А. П. Чернушич²,
И. В. Черный⁴, А. М. Стрельцов⁴, Е. А. Шарков¹, Н. С. Екимов⁵

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: pldime@gmail.com*

² *Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН,
Фрязинский филиал, Фрязино, 141190, Московская обл., Россия
E-mail: andrey@ire216.msk.su*

³ *МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, 119454, Россия
E-mail: sterlyadkin@mail.ru*

⁴ *АО «Российские космические системы», Россия, Москва, 111250, Россия
E-mail: icherny53@yandex.ru*

⁵ *Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета»,
Москва, 123242, Россия
E-mail: nikitaekimov@planet.iitp.ru*

В работе представлена концепция потоковой обработки данных российских спутниковых СВЧ-радиометров серии МТВЗА, реализовываемая на базе ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Цель проекта — обеспечение научного сообщества максимально полными рядами открытых продуктов обработки данных измерений российскими СВЧ-радиометрическими системами космического базирования. Описаны инфраструктурное решение, первые результаты пробной обработки данных МТВЗА-ГЯ, некоторые выявленные проблемные аспекты и перспективы развития работы. В части инфраструктурного решения за основу принята технология, внедрённая и отработанная в нескольких информационных сервисах ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Результаты пробной обработки данных в целом свидетельствуют о высокой конкурентоспособности МТВЗА-ГЯ с известными зарубежными аналогами (SSMIS, AMSR-2). К проблемным аспектам, требующим первоочередного решения, следует отнести повышение точности географической привязки и радиометрической калибровки данных.

Ключевые слова: МТВЗА-ГЯ, ИКИ-Мониторинг, геофизические поля, потоковая обработка

Одобрена к печати: 30.08.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-298-303

Введение

Спутниковый радиотепловой мониторинг — одна из важнейших составляющих космических программ дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и имеет долгую историю развития в СССР/России, США, Японии и других странах (Шарков, 2014). Российские приборы серии МТВЗА (модуль температурно-влажностного зондирования атмосферы) по многим показателям как минимум не уступают своим более известным иностранным аналогам (Кутуза и др., 2016; Черный и др., 2003). Однако возможность практического применения данных ДЗЗ определяется не только характеристиками приборов, но также доступностью первичной спутниковой информации и детальностью её технического описания. В этом отношении потенциальные возможности приборов серии МТВЗА реализованы далеко не в полной мере, а качество информационного обеспечения пользователей сильно уступает стандартам основных научных конкурентов.

В работе анонсируется впервые начатый в России проект потоковой обработки информации МТВЗА от уровня сырых данных до свободно распространяемых документированных

продуктов уровня L2/L3 (полей геофизических параметров). Кратко описаны: инфраструктура сбора, обработки и распространения информации; первые результаты анализа данных на основе пробного восстановления геофизических параметров; некоторые выявленные проблемные аспекты; план и перспективы дальнейшей работы.

Источник исходных данных и инфраструктурная основа потоковой обработки

Создаваемая инфраструктура основана на использовании данных МТВЗА-ГЯ (ГЯ — в память о Геннадии Яковлевиче Гуськове (1918–2002)), поступающих с космических аппаратов серии «Метеор-М» в центры приёма ФБГУ «НИЦ Планета» (<http://planet.iitp.ru/>) — ведущей организации по эксплуатации и развитию национальных космических систем гидрометеорологического, океанографического, гелиогеофизического назначения и мониторинга окружающей среды. Данные поступают в центры дважды в сутки и оттуда, по запросу, — в ЦКП (Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа данных спутниковых наблюдений Института космических исследований РАН (ИКИ РАН)) «ИКИ-Мониторинг» в виде сформированных потоков данных МТВЗА-ГЯ и сопутствующей информации звёздных датчиков. Основные этапы их первичной обработки в ЦКП «ИКИ-Мониторинг» до уровня L1B таковы: 1) распаковка и фильтрация (отбраковка по несовпадению контрольной суммы); 2) геопривязка с использованием прогностической модели движения и известных начальных параметров космического аппарата (файл TLE); 3) радиометрическая калибровка по усреднённым измерениям излучения космоса и чёрного тела и показаниям датчиков температуры.

Результаты сохраняются в архивах ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019; <http://skp.geosmis.ru/>), что обеспечивает автоматическое формирование наборов данных для дальнейшей обработки до уровней L2/L3 и отображения в картографическом веб-интерфейсе системы Vega-Science (<http://sci-vega.ru/>).

Предварительный анализ возможности восстановления геофизических параметров

Авторами предложены корреляционно-статистические алгоритмы, связывающие измерения МТВЗА-ГЯ с рядом геофизических параметров системы «атмосфера — подстилающая поверхность». Для настройки алгоритмов использованы данные реанализа ECMWF ERA5 (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>).

Предварительная оценка СКО восстановленных геофизических параметров по данным МТВЗА-ГЯ от данных реанализа

Геофизический параметр	СКО по МТВЗА-ГЯ (диапазон)	Требования ВМО (http://www.wmo-sat.info/oscar/requirements)
ТПО, К	<2 (273–305)	<2
СПВ, м/с	<3 (0–22)	<3
ИВА ¹ , мм	<2,5 (0–75)	<5
ВПТ ^{1,2} , К	<2 (220–310)	<3
ВПВ ^{1,2} , г·м ⁻³	5–30 % (от среднего значения)	<20 % (от среднего значения)

¹ Для всех типов подстилающей поверхности.

² На восьми горизонтах.

Предварительные оценки точности восстановления (среднеквадратичных отклонений от данных реанализа, СКО) на выборке данных МТВЗА-ГЯ за 2020 г. приведены в *таблице*:

ТПО — температура поверхности океана; СПВ — скорость приводного ветра; ИВА — интегральное влагосодержание; ВПТ/В — вертикальные профили температуры/абсолютной влажности атмосферы; ВМО — Всемирная метеорологическая организация. Документирование и развитие алгоритмов обработки станут предметом дальнейших публикаций и исследований.

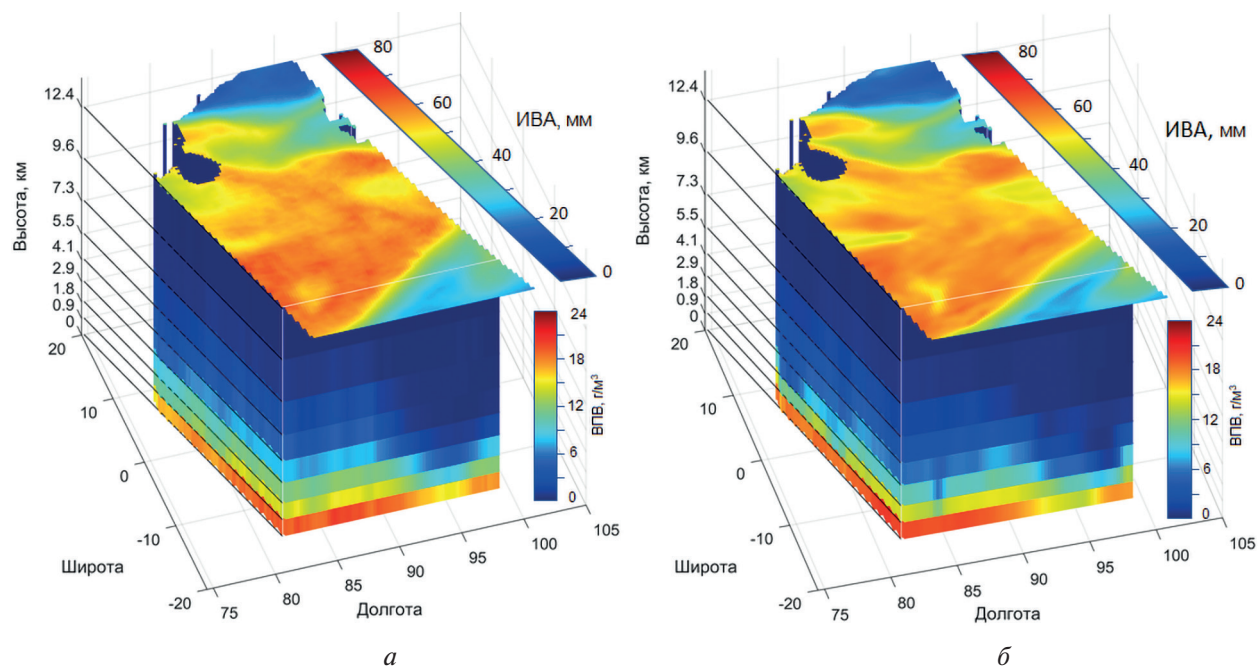


Рис. 1. Сопоставление фрагментов полей ИВА и ВПВ по МТВЗА-ГЯ (а) и ECMWF ERA5 (б): верхняя поверхность — поле ИВА, шкала значений (мм) — справа вверху; боковые поверхности — поля ВПВ на соответствующих сечениях, шкала значений ($\text{г}\cdot\text{м}^{-3}$) — справа, границы слоёв — на шкале высот слева; на нижних шкалах — географические координаты

Пример восстановления полей ИВА и ВПВ (вдоль показанного сечения) по данным МТВЗА-ГЯ в сопоставлении с реанализом приведён на рис. 1. Наблюдаемые различия частично вызваны несинхронностью (до получаса) измерений и оценок по реанализу.

Локализация проблем в технологической цепочке обработки данных

В соответствии с приведённым описанием на серверах ЦКП «ИКИ-Мониторинг» запущен процесс потоковой обработки данных МТВЗА-ГЯ в ограниченном тестовом режиме. Массивы данных представлены в виде отдельных «сцен», соответствующих полувиткам орбиты спутника «Метеор-М» № 2-2, на регулярной сетке 25×25 км. Реализован сервис просмотра и получения продуктов обработки, номенклатура которых расширяется.

Запуск сервиса позволил выявить ряд проблем в цепочке предварительной обработки. Выделим две наиболее существенные. Операция географической привязки измерений требует доработки. Реализованный в настоящее время алгоритм использует предиктивную модель орбиты спутника. В нём не учитываются истинные значения углов ориентации. Это приводит как к пространственным сдвигам, заметным при проверке по положению береговых линий (рис. 2, см. с. 301), так и к радиометрическим ошибкам, вызванным изменением наклона луча зрения к горизонту и кросс-поляризационными эффектами.

На борту космического аппарата «Метеор-М» № 2-2 функционируют звёздные датчики для определения положения и ориентации спутника. Уточнение алгоритма географической привязки за счёт использования их данных становится приоритетной задачей.

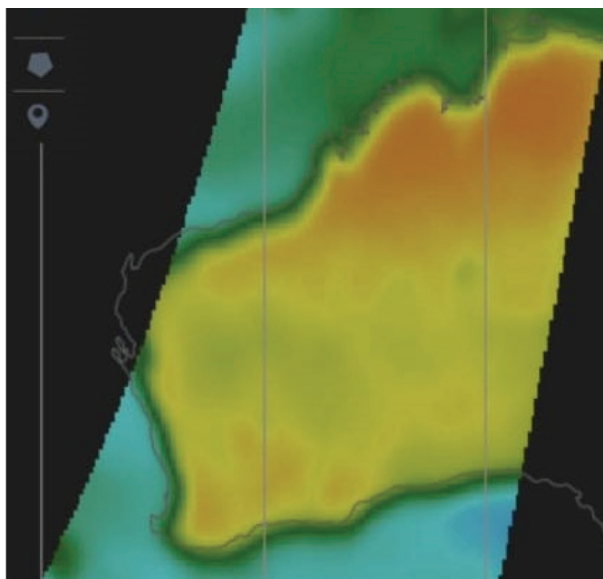


Рис. 2. Береговые линии Австралии и наблюдения МТВЗА-ГЯ

Вторая существенная проблема автоматизации потоковой обработки заключается в регулярном возникновении ошибок расчёта, приводящих к генерации физически невозможных значений восстанавливаемых параметров. По предварительным оценкам, подавляющая доля ошибок вызвана либо неточностями географической привязки, либо наличием сбоев в файлах входной информации. Устранение этой проблемы требует внедрения автоматической процедуры контроля качества входных данных и результатов всех этапов их обработки. Остальные проблемы имеют спорадический характер и будут локализованы и купированы в ходе штатной работы сервиса.

Перспективы и планы развития

Запланированы следующие этапы развития начатой работы: реализация и отладка инфраструктуры потокового сбора и первичной обработки данных (географическая привязка, радиометрическая калибровка) — этап 1; реализация процедур расчёта пробного набора геофизических параметров системы «океан – атмосфера» и предоставления их в режиме свободного доступа через интерфейсы ЦКП «ИКИ-Мониторинг» — этап 2; максимальное расширение номенклатуры восстанавливаемых геофизических параметров системы «океан – атмосфера», переход к расчёту пробного набора продуктов системы «атмосфера – суша» — этап 3; восстановление трёхмерных температурно-влажностных полей атмосферы над различными подстилающими поверхностями — этап 4; расчёт векторов атмосферных движений в двумерной и трёхмерной постановках — этап 5. Документирование, уточнение и развитие всех процедур обработки будет продолжаться в ходе штатного функционирования сервиса информационного пользовательского обеспечения.

Заключение

По предварительным оценкам, результаты реализации описанного проекта в части генерации стандартных геофизических продуктов будут соответствовать современным стандартам качества. Ряд из них (в частности, поля атмосферных параметров над сушей, потоки скрытого тепла) производятся по уникальным технологиям и до настоящего времени не имеют прямых аналогов в мире. Важно подчеркнуть, что цель проекта состоит в обеспечении свободного доступа к продуктам обработки данных МТВЗА-ГЯ всему научному сообществу. На базе

достигнутых основных результатов будут сформированы прототипы решения задач следующих этапов. К ним относятся разработка прогностических критериев формирования экстремальных погодных условий, природных катастроф, мониторинг динамической структуры глобальной циркуляции влаги и тепла, климатических изменений в Арктике.

Работа выполнена в рамках тем «Мониторинг» (госрегистрация № 01.20.0.2.00164) и «Космос» (госрегистрация № 0030-2019-0008).

Литература

1. Кутуза Б. Г., Данилычев М. В., Яковлев О. И. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. М.: ЛЕНАНД, 2016. 336 с.
2. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Кашицкий А. В., Балашов И. В., Барталев С. А., Константинова А. М., Кобец Д. А., Мазуров А. А., Марченков В. В., Матвеев А. М., Радченко М. В., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А. 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.
3. Черный И. В., Чернявский Г. М., Успенский А. Б., Пегасов В. М. СВЧ-радиометр МТВЗА спутника «Метеор-3М» № 1: Предварительные результаты летных испытаний // Исслед. Земли из космоса. 2003. № 6. С. 35–49.
4. Шарков Е. А. Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы. В 2 т. Т. 1. М.: ИКИ РАН, 2014. 544 с.

The concept of streaming data processing of Russian satellite microwave radiometers of the MTVZA series based on IKI-Monitoring Center for Collective Use

D. M. Ermakov^{1,2}, A. V. Kuzmin¹, A. A. Mazurov¹, E. V. Pashinov¹, I. N. Sadovsky¹,
D. S. Sazonov¹, V. V. Sterlyadkin^{1,3}, A. P. Chernushich², I. V. Cherny⁴,
A. M. Streltsov⁴, E. A. Sharkov¹, N. S. Ekimov⁵

¹ Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: pldime@gmail.com

² Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS, Fryazino Branch,
Fryazino 141190, Moscow Region, Russia
E-mail: andrey@ire216.msk.su

³ MIREA — Russian Technological University, Moscow 119454, Russia
E-mail: sterlyadkin@mail.ru

⁴ JSC Russian Space Systems, Moscow 111250, Russia
E-mail: icherny53@yandex.ru

⁵ State Research Center for Space Hydrometeorology “Planeta”, Moscow 123242, Russia
E-mail: nikitaekimov@planet.iitp.ru

The paper presents the concept of streaming data processing of Russian satellite microwave radiometers of the MTVZA series implemented on the basis of IKI-Monitoring Center for Collective Use. The aim of the project is to provide the scientific community with the most complete series of open products for processing measurement data from Russian space-based microwave radiometric systems. The infrastructural solution, the first results of the trial data processing of MTVZA-GYa, some identified problems and development prospects are described. Regarding the infrastructure solution, the basis is the technology implemented and tested in several information services of IKI-Monitoring Center

for Collective Use. In general, the results of trial data processing indicate high competitiveness of MTVZA-GYa with well-known foreign analogues (SSMIS, AMSR-2). Further improving the accuracy of georeferencing and data calibration are currently the priority tasks.

Keywords: MTVZA-GYa, IKI-Monitoring, geophysical fields, streaming processing

Accepted: 30.08.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-298-303

References

1. Kutuza B. G., Danilychev M. V., Yakovlev O. I., *Satellite monitoring of the Earth: microwave radiometry of the atmosphere and surface*, Moscow: LENAND, 2016, 336 p. (in Russian).
2. Loupian E. A., Proshin A. A., Bourtsev M. A., Kashnitskii A. V., Balashov I. V., Bartalev S. A., Konstantinova A. M., Kobets D. A., Mazurov A. A., Marchenkov V. V., Matveev A. M., Radchenko M. V., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., 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.
3. Cherny I. V., Chernyavsky G. M., Uspensky A. B., Pegasov V. M., Microwave radiometer MTVZA on board “Meteor-3M” No. 1, Satellite — the results of performance test, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2003, No. 6, pp. 35–49 (in Russian).
4. Sharkov E., *Radiothermal Remote Sensing of the Earth, Physical Foundations*, Vol. 1, Moscow: IKI RAN, 2014, 544 p. (in Russian).