

## МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

### К ВОЗМОЖНОСТИ ИНДИКАЦИИ СБОЕВ В РАБОТЕ РОССИЙСКИХ СКАНЕРОВ-ЗОНДИРОВЩИКОВ СЕРИИ МТВЗА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА КАЧЕСТВА ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ПРИВЯЗКИ

© 2024 г. И. Н. Садовский<sup>1</sup> \*, Д. С. Сазонов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

\*E-mail: ilya\_nik\_sad@mail.ru

Поступила в редакцию 20.03.2024 г.

В работе рассматривается одно из последствий изменения штатного режима функционирования российского микроволнового сканера-зондировщика МТВЗА-ГЯ — существенное снижение точности географической привязки данных измерений этого прибора, имевшее место в апреле 2022 года. Ухудшение точности было обнаружено в ходе ретроспективной тематической обработки данных МТВЗА-ГЯ, на этапе визуального анализа качества входных данных. Обнаруженное смещение радиотепловых портретов относительно реальной береговой линии составило порядка 70 км. Анализ описанных изменений проводился в два этапа. На первом из них, в ходе ручного просмотра данных измерений с каждого полувитка, удалось определить временные рамки сбоя (с 10 апреля по 25 мая), а также выделить основную причину наблюдаемых смещений — изменение угла рыскания МТВЗА-ГЯ. На втором этапе, в результате сквозной машинной обработки суточных композитов, формируемых прибором, было определено и конкретное значение изменившегося угла, составившее  $(-2.64 \pm 0.23)^\circ$  (вместо используемого в штатном режиме  $(-0.84 \pm 0.15)^\circ$ ). Проведенные исследования продемонстрировали возможность использования алгоритма определения корректирующих геопривязку углов МТВЗА-ГЯ в качестве индикатора сбоев в работе отдельных систем этого инструмента. Также была продемонстрирована потенциальная возможность корректировки географической привязки измерений МТВЗА-ГЯ при возникновении подобных сбоев. В частности, для рассматриваемого в работе случая, удалось снизить ошибку геопривязки практически в 6 раз.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, СВЧ-радиометрия, микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ГЯ, спутник, радиометр, географическая привязка данных ДЗЗ

**DOI:** 10.31857/S0205961424050052, **EDN:** RRRXCB

#### ВВЕДЕНИЕ

Применение средств пассивной радиометрии на спутниковых носителях позволяет успешно решать широкий спектр научных и прикладных задач дистанционного зондирования Земли. Предоставляемые в свободном доступе продукты (см., например, <https://remss.com>), используются при проведении экологических и климатических исследований, построении краткосрочных и долгосрочных прогнозов погоды, корректировки климатических моделей, и уже активно ассимилируются различными базами данных реанализа.

Микроволновые сканеры-зондировщики серии МТВЗА (Барсуков и др., 2021) являются единственными отечественными радиометрическими комплексами, функционирующими в составе российской космической группировки метеорологического назначения. Не смотря на огромный тех-

нический потенциал (Ермаков и др., 2021; Филей и др., 2021; Заболотских и др., 2022а; Заболотских и др., 2022b), результаты измерений МТВЗА, по сравнению с зарубежными аналогами, используются крайне мало при решении смежных научных и практических задач. По мнению авторов настоящей публикации, это вызвано несколькими причинами: отсутствие детального описания алгоритмов проведения измерений и подходов к реализации этапов первичной обработки, отсутствие в свободном доступе данных уровня L0 и L1, отсутствие актуальной информации о функционировании системы на орбите (сбои, нештатные ситуации, запланированные работы и пр.), отсутствие утвержденных и верифицированных алгоритмов получения готовых продуктов, отсутствие системы оценки их качества и т.д. Обсуждение этих актуальных проблем, как и поиск их возможных решений, выходят за рамки данной работы.

Одним из направлений работы сотрудников отдела “Исследований Земли из космоса” ИКИ РАН является разработка методов и алгоритмов обработки данных спутниковых измерений, получаемых, в том числе, и эти сканером-зондировщиком. Соответственно, коллектив авторов знает об описанных выше проблемах не понаслышке, и, в силу своих возможностей (в кооперации с разработчиками аппаратуры МТВЗА), пытается их устранять. К настоящему моменту уже детально описан алгоритм географической привязки данных МТВЗА (Садовский и Сазонов, 2022), разработаны алгоритмы повышения ее качества для различных частотных каналов (Садовский и Сазонов, 2023) с учетом особенностей функционирования аппаратуры (Сазонов и Садовский, 2024). Проведены работы по ретроспективной корректровке геопривязки данных измерений, полученных этим инструментом с борта КА Метеор – М №2-2. Разработаны и обнародованы в виде научных публикаций алгоритмы получения готовых продуктов на основе данных измерений МТВЗА-ГЯ (Пашинов, 2018; Сазонов, 2022; Сазонов, 2023).

В ходе ретроспективной обработки данных измерений МТВЗА-ГЯ за 2022 год, коллективом авторов был обнаружен сбой, повлекший за собой существенные отклонения в географической привязке данных этого прибора. Описанию этого инцидента, включая визуальное и машинное обнаружение, оценку величины ошибок, анализ возможности их устранения и последующего использования результатов исследований в алгоритмах первичной обработки данных, посвящена содержательная часть настоящей публикации.

### ЭТАП ВИЗУАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ОШИБОК ГЕОПРИВЯЗКИ

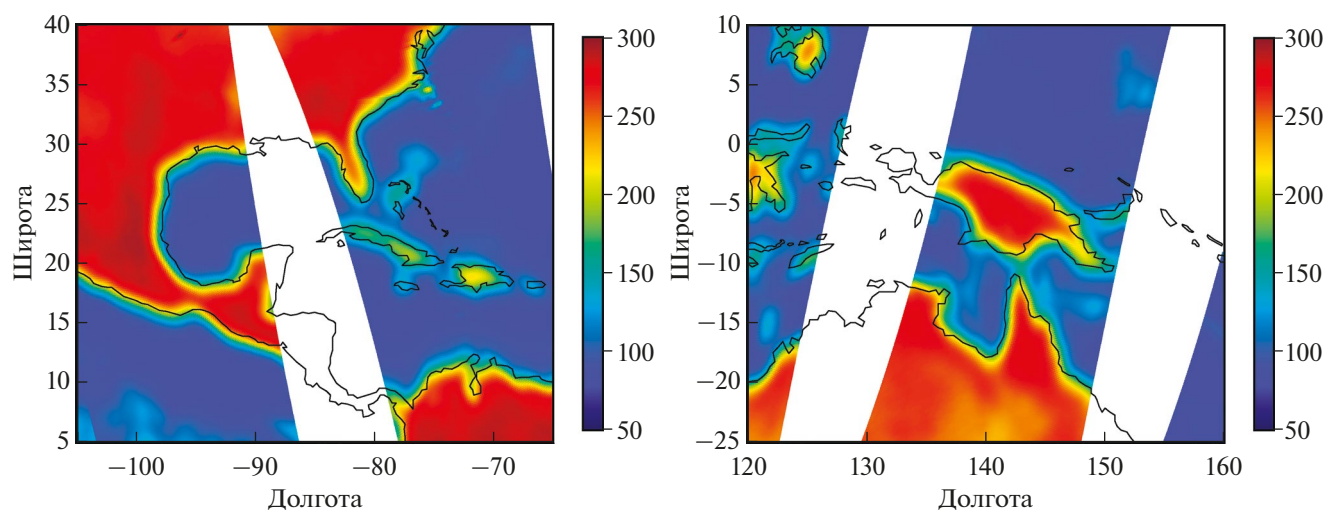
Использование машинных методов обработки спутниковой информации накладывает ряд требований к входным данным. При наличии в них ошибок, эти, заведомо ложные, данные изменяют итоговую статистику решаемой задачи. Среди наиболее критичных следует отметить: сбой в генерации меток бортового времени, записываемых в информационный поток; изменение ориентации спутника-носителя в результате плановых работ или внештатных ситуаций; изменение калибровочных уровней сигналов и т.д. При этом для большинства спутниковых радиометрических комплексов, функционирующих на орбите, проводится постоянный контроль поступающей информации, анализ критичности выявленных сбоев и их устранение (при наличии возможности). Результатом такого мониторинга проводимых измерений является присвоение каждому из них соответствующего

значения параметра качества. Его использование при обработке длинных рядов данных позволяет отсеивать результаты измерений, не удовлетворяющих некоторому минимальному порогу. Как уже было отмечено во Введении – оценка качества данных МТВЗА-ГЯ в существующих версиях программ предварительной обработки данных не реализована. Соответственно, сквозная (при малых объемах спутниковых данных) или выборочная оценка качества данных этого инструмента являются обязательным этапом всех проводимых работ/исследований.

В ходе визуального анализа суточных композитов, сформированных на основе данных МТВЗА-ГЯ, на них были обнаружены ошибки в период с середины апреля по конец мая 2022 года. На рис. 1 приведены характерные для этого периода смещения радиотеплового портрета, формируемого МТВЗА-ГЯ, относительно географических береговых линий. Следует отметить, что географическая привязка данных для всего 2022 года выполнялась в соответствии с алгоритмом, описанным в (Садовский и Сазонов, 2022), и с учетом корректирующих углов, найденных в (Садовский и Сазонов, 2023). При этом для временного интервала, предшествующего указанному периоду, а также более позднему, вплоть до конца года, средние значения ошибок геопривязки не превышали заявленных в (Садовский и Сазонов, 2023) значений в 5 км. Для представленных изображений – смещение составляет более 70 км.

На первом этапе анализа выявленного сбоя был проведен ручной просмотр порядка 160 полувитков, наложенных на карту береговых линий. Рассматривались изображения начиная с 10 апреля, когда геопривязка еще выполнялась корректно, и по 15 апреля, чтобы отследить момент проявления ошибки. При этом для каждого полувитка делалось предположение о наличии/отсутствии дополнительных углов крена, тангажа и рыскания, обуславливающих наблюдаемое смещение радиометрического портрета. Это возможно с учетом известной геометрии сканирования прибора и практически однозначным влиянием указанных углов на смещение радиометрического портрета относительно береговых линий.

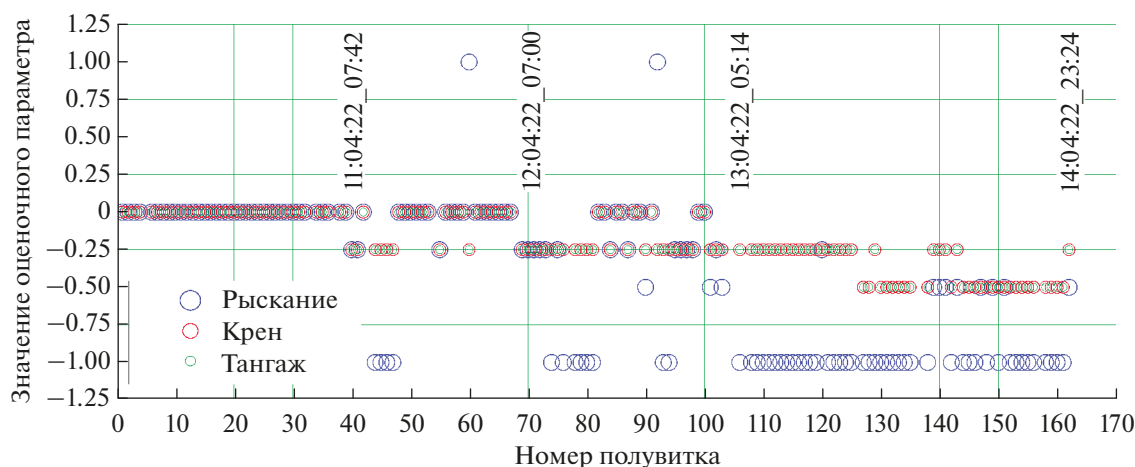
Для последующего графического представления была выбрана следующая система обозначений: если геопривязка выполнялась корректно, то для каждого из трех углов (крена, тангажа и рыскания) выставлялось значение “0”; если влияние какого-то из трех углов было очевидным, то ему присваивалось значение “+1” или “-1” (в зависимости от направления смещения изображения относительно траектории движения спутника); если эффект смещения присутствовал, но было непонятно – каким он вызван углом (сочетанием углов), то выставля-



**Рис. 1.** Примеры радиотепловых композитов, полученных по данным МТВЗА-ГЯ 15 апреля 2022 года, демонстрирующих сбой геопривязки для восходящих (слева) и нисходящих (справа) полувитков. Частота 10,6 ГГц, случай горизонтальной поляризации.

лись значения “+0.5” или “−0.5” всем углам, имеющим аналогичный характер влияния на смещение радиометрического портрета. Не смотря на опыт авторов, приобретенный в рамках работ по геопривязке данных МТВЗА-ГЯ, очевидно, что подобная оценка является субъективной. Особенно с учетом частого возникновения достаточно “сложных” для анализа ситуаций, когда на выделенном полувитке наблюдается малое количество переходов “вода—суша”, или попадающие в поле зрения прибора береговые линии располагались вдоль линии сканирования луча визирования по поверхности. В этих случаях значения параметра устанавливалось равным “+0.25” или “−0.25” для всех корректирующих углов.

Несмотря на наличие достаточно большого числа неопределенностей визуального подхода, итоговые результаты, представленные на рис. 2, свидетельствуют о возможности его использования на начальных этапах анализа. В частности, с его помощью удалось сделать следующие выводы: до 11 апреля 2022 года проблем с географической привязкой не наблюдалось; в районе 6:00 по московскому времени, были обнаружены первые случаи сбоев в работе МТВЗА-ГЯ; в период 11–13 апреля ошибка пропадала и возникала, частота ее возникновения постепенно увеличивалась; начиная с 5:00 13 апреля по московскому времени ошибка приобрела устойчивый характер; наиболее вероятной причиной наблюдаемых изменений можно принять



**Рис. 2.** Графическое представление результатов визуального анализа качества географической привязки и возможных причин, вызвавших ее сбой.

существенное изменение угла рыскания прибора (в сторону, совпадающую с направлением вращения антенного блока МТВЗА-ГЯ).

### АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ПОИСК КОРРЕКТИРУЮЩИХ ГЕОПРИВЯЗКУ УГЛОВ

С целью детального изучения характера поведения углов крена, тангажа и рыскания МТВЗА-ГЯ во время сбоя, была проведена операция их посуточного определения в соответствии с методикой, описанной в (Садовский и Сазонов, 2023). Для анализа был выделен период с 1 апреля по 5 мая (когда, судя по визуальному анализу, ошибка геопривязки уже не наблюдалась) 2022 года, чтобы зафиксировать этап возникновения сбоя, отследить его длительность и оценить стабильность наблюдаемых изменений (поскольку одной из вероятных причин предполагалось появление вращения КА в результате плановых корректировок его траектории, или нештатной ситуации).

Анализ проводился для набора частотных каналов 10.5, 18.7, 23.8, 31.5 и 36.7 ГГц. Рассматривались береговые линии в тестовых областях “Австралия”, “Африка” и “Южная Америка” (аналогичные использованным в (Садовский и Сазонов, 2023)). Регион “Средиземноморье” был исключен по причине малого объема наблюдений в этом районе за указанный временной интервал (для корректной работы алгоритма обязательно наличие измерений как на восходящих, так и на нисходящих полувитках в пределах одних суток).

Результаты автоматического подбора корректирующего географическую привязку угла рыскания, полученные при обработке данных измерений на частоте 10.5 ГГц приведены на рис. 3. Зависимости, полученные на других частотах, – опущены, по

причине их полного соответствия представленным на рис. 3. Также опущены результаты определения корректирующих углов крена и тангажа, поскольку выполненная процедура показала, что сбой практически не затронул их значения, полученные в работе (Садовский и Сазонов, 2023).

Полученный временной ход зависимости корректирующего угла рыскания схож с результатами визуального анализа, представленного на рис. 2. Особенности работы с суточными композитами при реализации машинной обработки существенно (более чем в 24 раза – по числу полувитков за сутки) снижают временное разрешение проводимого анализа, поэтому особенности “переходного” периода (11–13 апреля), наблюдаемые при ручной обработке данных, на нем не видны. При этом сам переход в характеристиках оборудования (если они являются причиной сбоя) достаточно четко прослеживается и в машинном варианте.

Обобщая полученные результаты можно заключить: прибор функционировал в штатном режиме до конца 10 апреля; 11 апреля начали появляться ошибки, приведшие к сбою при реализации штатного алгоритма географической привязки результатов измерений МТВЗА-ГЯ; в районе 13 апреля “переходный” процесс завершился и ошибка ориентации прибора установилась на уровне  $-2^\circ$  по углу рыскания относительно начальной ориентации; прибор функционировал в таком режиме более месяца, вплоть до 22 мая; постепенный возврат к начальным значениям корректирующего угла рыскания начался 23 мая и занял порядка двух суток; 25 мая сбой закончился и показатели качества геопривязки вернулись к значениям, предшествующим ему; в течении периода сбоя, в районе 19 апреля, прибор возвращался к исходным параметрам и это событие также сопровождалось постепенным изменением корректирующего угла рыскания.

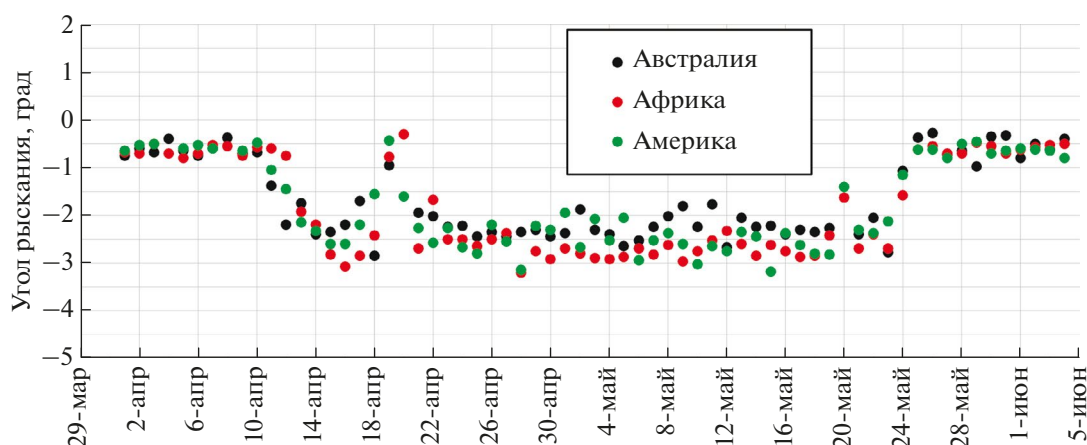


Рис. 3. Результаты машинного поиска значений корректирующего угла рыскания, полученные при анализе данных измерений МТВЗА-ГЯ на частоте 10.6 ГГц.

**Таблица 1.** Результаты оценки корректирующих углов и точности геопривязки

| Параметр/Дата                            | 10.03–10.04        | 23.04–23.05        | 26.05–26.07        |
|------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Угол рыскания, град.                     | $-(0.74 \pm 0.24)$ | $-(2.64 \pm 0.23)$ | $-(0.66 \pm 0.26)$ |
| Угол крена, град.                        | $-(0.41 \pm 0.17)$ | $-(0.74 \pm 0.19)$ | $-(0.43 \pm 0.18)$ |
| Угол тангажа, град.                      | $+(1.11 \pm 0.11)$ | $+(0.96 \pm 0.13)$ | $+(1.14 \pm 0.12)$ |
| Среднее значение ошибки геопривязки, км. | 4.6                | 9.7                | 4.9                |

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ КОРРЕКТИРОВКИ ГЕОПРИВЯЗКИ НА ПЕРИОД СБОЯ

В работе (Садовский и Сазонов, 2023) поиск корректирующих углов крена, тангажа и рыскания, позволивших обеспечить среднюю точность геопривязки данных МТВЗА-ГЯ на уровне 4,5 км, выполнялся путем анализа и последующего усреднения результатов обработки измерений за весь 2020 год. При этом, для каждого частотного канала задача была решена более 350 раз, с последующей отбраковкой ошибочных решений и итоговым усреднением. Очевидно, что обеспечить такой объем выборки данных для описываемого периода сбоя невозможно, поэтому представленные ниже результаты следует воспринимать как предварительные, демонстрирующие потенциальную возможность оперативной корректировки геопривязки приборов серии МТВЗА-ГЯ.

Задача оценки корректирующих углов была решена для трех временных интервалов: 10 марта – 10 апреля 2022 года (до сбоя), 23 апреля – 23 мая (период устойчивого проявления сбоя) и 26 мая – 26 июня (после сбоя). Для каждого из них поиск корректирующих углов крена, тангажа и рыскания выполнялся в полном соответствии с методикой, изложенной в (Садовский и Сазонов, 2023), для тех же частотных каналов и тестовых регионов. Полученные усредненные результаты приведены в таблице 1.

Из представленных данных видно, что результаты, полученные для первого и третьего периодов практически совпадают с данными, полученными в работе (Садовский и Сазонов, 2023). Незначительные отклонения средних значений и среднеквадратического отклонения объясняется существенным снижением объема выборки. Решение, полученное для периода сбоя, имеет существенные отклонения по углу рыскания, а также по углу крена. Последнее, скорее всего, вызвано схожим характером влияния углов рыскания и крена на смещение формируемого радиометрического изображения (обсужденном в (Садовский и Сазонов, 2023)), а также малым объемом суточных

композигов, вошедших в анализ. В будущем, если причина смещения геопривязки заранее известна, алгоритм поиска корректирующих углов может быть изменен, путем фиксации заведомо непричастных к инциденту углов. Таким образом удастся избежать ошибок, связанных с микшированием вклада корректирующих углов, а также вызывающих необходимость последующей переоценки углов встречи с землей, учета возникающих кроссполяризационных эффектов и пр.

В отличие от результатов оценки качества геопривязки, выполненной в работе (Садовский и Сазонов, 2023) и имеющий сквозной характер, значения, приведенные в последней строке таблицы 1, получены путем единичных оценок случайно выбранных суточных композигов в пределах анализируемых временных интервалов. Соответственно, опущено указание доверительных интервалов. Для периода сбоя, качество геопривязки оценивалось на основе суточного радиометрического портрета, сформированного для 5 мая 2022 года. Без учета изменения корректирующих геопривязку углов крена, тангажа и рыскания, средние значения расхождения восстановленной по радиометрическому портрету и истинной береговых линий составили (в пределах тестового полигона):  $-(57.43 \pm 15.77)$  км. С учетом вновь найденных значений, приведенных во втором столбце таблицы 1, расхождение существенно уменьшилось:  $-(9.65 \pm 11.21)$  км. Получить в рамках одного суточного композита, соответствующего периоду сбоя, качество географической привязки на уровне “до” и “после” его проявления не удалось, но это и не являлось основной целью данной работы. Приведенные значения лишь демонстрируют потенциальную возможность такого рода оперативной корректировки геопривязки в будущем.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе тематической обработки данных МТВЗА-ГЯ (КА “Метеор-М” №2-2) был обнаружен сбой географической привязки в апреле 2022 года. На основе визуального анализа суточных композигов полей яркостных температур, фор-

мируемых прибором, удалось определить его временные рамки (с 10 апреля по 25 мая), а также выделить основную причину сбоя — изменение угла рыскания прибора на величину порядка 2 градусов. Последующая сквозная обработка данных измерений МТВЗА-ГЯ с целью определения значений корректирующих углов крена, тангажа и рыскания позволили исследовать динамику происходивших изменений. Было показано, что с 10 по 14 апреля происходило постепенное изменение характеристик какого-то элемента системы (скорее всего, отвечающего за формирование временных меток), достигших своих предельных значений к 15 апреля; в таком режиме осуществлялась работа комплекса до 23 мая; в период с 23 по 25 мая, в результате корректировки (или самопроизвольно) параметров вышедшей из строя системы, ошибка была устранена; начиная с 26 мая комплекс МТВЗА-ГЯ вернулся к параметрам, предшествующим сбою.

Проведенные исследования продемонстрировали возможность использования процедуры поиска корректирующих геопривязку углов, описанную в (Садовский и Сазонов, 2023), для контроля корректности работы отдельных систем МТВЗА-ГЯ. По мнению авторов настоящей работы, включение алгоритма посуточного контроля качества географической привязки в программу предварительной обработки данных измерений этого прибора может способствовать оперативному обнаружению возникающих ошибок. Следует отметить, что в доступных источниках информации (таких как, например, сайты: НИЦ “Планета” <http://planet.iitp.ru>, Росгидромета <https://www.meteorf.gov.ru>, Роскосмоса <https://www.roscosmos.ru> и пр.) никаких сведений о плановых работах в этот период на “Метеор-М” №2-2 или сбоях в работе отдельных систем самого КА или аппаратуры МТВЗА-ГЯ, найти не удалось. Как и любой другой информации о появлении в данных измерений этого прибора описанных в настоящей работе изменений. В свою очередь, при условии их автоматического усвоения для получения итоговых продуктов это не могло не привести к формированию ошибочных результатов. Этот факт в очередной раз подтверждает необходимость разработки соответствующей системы оценки качества данных приборов серии МТВЗА-ГЯ и ее скорейшей интеграции в продукты уровней L0 - L1 и выше.

Основываясь на опыте, полученном в рамках работы над описанным сбоем, можно указать на особенность предлагаемого подхода: достоверное обнаружение ошибок, исходя из идеологии работы привлекаемого алгоритма, возможно лишь спустя 24 часа, начиная с момента достижения системой некоторого “стабильного” состояния. За это время возможно сформировать два суточных композита, отдельно для восходящих и нисходящих полувит-

ков (уже содержащих ошибку), совместная обработка которых позволяет делать оценку степени близости истинной и “радиотепловой” береговых линий. На меньших временных интервалах, например, при работе с отдельными полувитками, как показали результаты визуального анализа (рис. 2), высока вероятность принятия ошибочных решений. Особенно, если рассматривать частотные каналы с сильной чувствительностью к атмосферным процессам.

Продемонстрированная потенциальная возможность оперативной коррекции геопривязки данных МТВЗА-ГЯ при выявлении подобных сбоев также зависит от их длительности. В рассмотренном случае удалось в шесть раз снизить ошибку геопривязки для периода сбоя. При этом поиск корректирующих углов был выполнен на основе одного месяца измерений прибора. Вопросы оценки дальнейшего улучшения качества геопривязки при возникновении аналогичных инцидентов, как и возможности принятия решений на основе меньших размеров выборок входных данных, являются предметом дальнейших исследований.

В настоящей реализации описанный подход не позволяет компенсировать ошибки в “переходные” периоды напрямую. Это вызвано вероятностью ошибочного определения корректирующих углов на основе одиночных суточных композитов, даже при отсутствии критичных сбоев. Для рассматриваемого случая, когда по результатам анализа вполне очевиден практически пятидневный переход параметров системы (как от нормального функционирования к ошибочной геопривязке, так и обратно), и, удалось достаточно точно вычислить корректирующие углы по обе стороны от перехода, возможно использовать различные виды их интерполяции для отдельных полувитков. Данный подход требует детального изучения в будущем, а наибольшие вопросы вызывает выбор метода оценки качества геопривязки, основывающегося на суточных, или полувитковых данных.

Несмотря на то, что инструмент МТВЗА-ГЯ, установленный на КА “Метеор-М” №2-2, на момент подготовки данной публикации уже не функционирует, его архивные данные позволяют отрабатывать технологические приемы, подобные описанной в настоящей работе, а также разрабатывать новые алгоритмы и методики восстановления целевых продуктов на их основе. В соответствии с Федеральной космической программой, помимо уже находящихся на орбите КА “Метеор-М” №2-3 и №2-4 с приборами МТВЗА-ГЯ на борту, планируется еще, как минимум, запуск двух сканеров/зондировщиков этой серии. Авторы уверены, что проведенные исследования и полученные результаты будут полезны при работе с данными всех этих инструментов.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность А.М. Стрельцову (АО “Российские космические системы”) за своевременное и оперативное предоставление преобразованных данных измерений МТВЗА-ГЯ, использованных в работе.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке темы “Мониторинг” (госрегистрация № 122042500031-8).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барсуков И.А., Болдырев В.В., Гаврилов М.И., Евсеев Г.Е., Егоров А.Н., Ильгасов П.А., Панцов В.Ю., Стрельников Н.И., Стрельцов А.М., Черный И.В., Чернявский Г.М., Яковлев В.В. Спутниковая СВЧ-радиометрия для решения задач дистанционного зондирования Земли // Ракетно-косм. приборостроение и информац. системы. 2021. Т. 8. Вып. 1. С. 11–23.
- Ермаков Д.М., Кузьмин А.В., Мазуров А.А., Пашинов Е.В., Садовский И.Н., Сазонов Д.С., Стерлядкин В.В., Чернушич А.П., Черный И.В., Стрельцов А.М., Шарков Е.А., Екимов Н.С. Концепция потоковой обработки данных российских спутниковых СВЧ-радиометров серии МТВЗА на базе ЦКП “ИКИ-Мониторинг” // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 298–303. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-4-298-303>.
- Заболотских Е.В., Азаров С.М., Животовская М.А. Восстановление влагозапаса атмосферы и скорости приводного ветра по данным МТВЗА // Материалы 20-й Международной конференции “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. Москва: ИКИ РАН. 2022а. С. 419. <https://doi.org/10.21046/20DZZconf-2022a>.
- Заболотских Е.В., Балашова Е.А., Азаров С.М. Восстановление сплоченности морского льда по данным измерений МТВЗА-ГЯ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022б. Т. 19. № 1. С. 27–38. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-1-27-38>.
- Пашинов Е.В. Восстановление интегрального паросодержания атмосферы по данным прибора МТВЗА-ГЯ (“Метеор-М” № 2) над поверхностью океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 225–235. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-4-225-235>.
- Садовский И.Н., Сазонов Д.С. Географическая привязка данных дистанционных радиометрических измерений МТВЗА-ГЯ // Исслед. Земли из космоса. 2022. Т. 202. № 6. С. 101–112. <https://doi.org/10.31857/S0205961422060100>.
- Садовский И.Н., Сазонов Д.С. Корректировка географической привязки данных МТВЗА-ГЯ // Исслед. Земли из космоса. 2023. № 6. С. 73–85. <https://doi.org/10.31857/S0205961423060076>.
- Сазонов Д.С. Алгоритм восстановления температуры поверхности океана, скорости приводного ветра и интегрального паросодержания по данным МТВЗА-ГЯ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 50–64. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-1-50-64>.
- Сазонов Д.С. Исследование возможности восстановления интенсивности осадков по измерениям МТВЗА-ГЯ // Исслед. Земли из космоса. 2023. № 5. С. 23–35. <https://doi.org/10.31857/S020596142305007X>.
- Сазонов Д.С., Садовский И.Н. Корректировка географической привязки частотных каналов 52 – 91 ГГц спутникового микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ // Исслед. Земли из космоса. 2024 (в печати).
- Филей, А.А., Андреев А.И., Успенский А.Б. Использование искусственных нейронных сетей для восстановления температурно-влажностного состояния атмосферы по данным спутникового микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ КА Метеор-М № 2-2 // Исслед. Земли из космоса. 2021. № 6. С. 83–95. <https://doi.org/10.31857/S0205961421060087>.

## On the Possibility of Failures Indication in Operation of MTVZA’s Series Russian Scanner/Sounders Based on Georeference Quality Analysis

I. N. Sadovsky<sup>1</sup>, D. S. Sazonov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Space Research Institute, Moscow, Russia

The paper examines one of the consequences of a change in the normal operating mode of the Russian microwave scanner/sounder MTVZA-GYa – a significant decrease in the accuracy of georeferencing of this device measurements data, which took place in April 2022. Deterioration in accuracy was discovered during retrospective thematic processing of MTVZA-GYa data, at the stage of visual analysis of the input data quality. The detected displacement of radio thermal portraits relative to the real coastline was about 70 km. The analysis of the described changes was carried out in two stages. At the first of them, during manual review of measurement data from each half-orbit, it was possible to determine the failure’s time frame (from April 10 to May 25), and also to identify the main cause of the observed displacements – change in the yaw angle of the MTVZA-GYa. At the second stage, as a result of end-to-end machine processing of the daily composites, formed by the device, an accurate value of the changed angle was determined, amounted to  $(-2.64 \pm 0.23)^\circ$  (instead of that used in normal mode  $(-0.84 \pm 0.15)^\circ$ ). The conducted studies demonstrated the possibility of using the algorithm for determining MTVZA-GYa georeference-correcting angles as an indicator of failures in the operation of

individual systems of this instrument. The potential possibility of adjusting the georeferencing of MTVZA-GYa measurements in the event of such failures was also demonstrated. In particular, for the case considered in this work, it was possible to reduce the georeferencing error by almost 6 times.

**Keywords:** remote sensing, microwave radiometry, microwave scanner/sounder MTVZA-GYa, satellite, radiometer, remote sensing data georeferencing

## REFERENCES

- Barsukov I.A., Boldyrev V.V., Gavrilov M.I., Evseev G.E., Egorov N., Il'gasov P.A., Panczov V.Yu., Strel'nikov N.I., Strel'czov A.M., Chernyj I.V., Chernyavskij G.M., Yakovlev V.V. Sputnikovaya SVCh-radiometriya dlya resheniya zadach distancionnogo zondirovaniya Zemli [Satellite microwave radiometry for Earth remote sensing] // Raketno-kosm. priborostroyeniye i informacz. sistemy. 2021. V. 8. № 1. P. 11–23. (In Russian). <https://doi.org/10.30894/issn2409-0239.2021.8.1.11.23>.
- Ermakov D.M., Kuz'min A.V., Mazurov A.A., Pashinov E.V., Sadovsky I.N., Sazonov D.S., Sterlyadkin V.V., Chernushich A.P., Chernyj I.V., Strel'czov A.M., Sharkov E.A., Ekimov N.S. Konceptiya potokovoy obrabotki dannyh rossijskix sputnikovyx SVCh-radiometrov serii MTVZA na baze CzKP "IKI-Monitoring" [The concept of streaming data processing of Russian satellite microwave radiometers of the MTVZA series based on IKI-Monitoring Center for Collective Use] // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2021. V. 18. № 4. P. 298–303. (In Russian). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-4-298-303>.
- Zabolotskikh E.V., Azarov S.M., Zhivotovskaya M.A. Vostanovlenie vlagozapasa atmosfery i skorosti privodnogo vetra po dannym MTVZA [Water vapor and surface wind speed retrieval according to MTVZA data] // Materialy 20-i Mezhdunarodnoi konferentsii "Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa". Moskva: IKI RAN. 2022a. P. 419. (In Russian). <https://doi.org/10.21046/20DZZconf-2022a>.
- Zabolotskikh E.V., Balashova E.A., Azarov S.M. Vostanovlenie splochnosti morskogo l'da po dannym izmerenii MTVZA-GYA [Sea ice concentration retrieval from MTVZA GYa measurements] // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2022b. V. 19. № 1. P. 27–38. (In Russian). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-1-27-38>.
- Pashinov E.V. Vostanovlenie integral'nogo parosoderzhaniya atmosfery po dannym pribora MTVZA-GYa ("Meteor-M" № 2) nad poverkhnost'yu okeana [Retrieval of integrated water vapor content of the atmosphere over the ocean using MTVZA-GYa (Meteor-M No. 2) data] // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2018. V. 15. № 4. P. 225–235. (In Russian). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-4-225-235>.
- Sadovsky I.N., Sazonov D.S. Geograficheskaya privyazka dannykh distantsionnykh radiometricheskikh izmerenii MTVZA-GYa [Geographic Reference of MTVZA-GYa Radiometric Remote-Sensing Data] // Issled. Zemli iz kosmosa. 2022. V. 202. № 6. P. 101–112. (In Russian). <https://doi.org/10.31857/S0205961422060100>.
- Sadovsky I.N., Sazonov D.S. Korrektirovka geograficheskoi privyazki dannykh MTVZA-GYa [Correction Procedure for MTVZA-GYa Georeference] // Issled. Zemli iz kosmosa. 2023. № 6. P. 73–85. (In Russian). <https://doi.org/10.31857/S0205961423060076>.
- Sazonov D.S. Algoritm vosstanovleniya temperatury poverkhnosti okeana, skorosti privodnogo vetra i integral'nogo parosoderzhaniya po dannym MTVZA-GYa [Algorithm for reconstructing ocean surface temperature, near-surface wind speed and integral vapor content from MTVZA-GYa data] // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2022. V. 19. № 1. P. 50–64. (In Russian). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-1-50-64>.
- Sazonov D.S. Issledovanie vozmozhnosti vosstanovleniya intensivnosti osadkov po izmereniyam MTVZA-GYa [Study of the possibility of reconstructing precipitation intensity from MTVZA-GY measurements] // Issled. Zemli iz kosmosa. 2023. № 5. P. 23–35. (In Russian). <https://doi.org/10.31857/S020596142305007X>.
- Sazonov D.S., Sadovskii I.N. Korrektirovka geograficheskoi privyazki chastotnykh kanalov 52 – 91 GGts sputnikovogo mikrovolnovogo radiometra MTVZA-GYA [Geographical reference adjustment of MTVZA-GYa satellite microwave radiometer frequency channels 52-91 GHz] // Issled. Zemli iz kosmosa. 2024. (in print). (In Russian).
- Filei A.A., Andreev A.I., Uspenskii A.B. Ispol'zovanie iskusstvennykh neironnykh setei dlya vosstanovleniya temperaturno-vlazhnostnogo sostoyaniya atmosfery po dannym sputnikovogo mikrovolnovogo radiometra MTVZA-GYA KA Meteor-M № 2-2 [Using of a neural network algorithm for retrieval temperature and humidity sounding of the atmosphere from satellite-based microwave radiometer MTVZA-GYa measurements on-board Meteor-M No. 2-2] // Issled. Zemli iz kosmosa. 2021. № 6. P. 83–95. (In Russian). <https://doi.org/10.31857/S0205961421060087>.