

## МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

### КОРРЕКЦИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ПРИВЯЗКИ МИКРОВОЛНОВОГО СКАНЕРА/ЗОНДИРОВЩИКА МТВЗА-ГЯ, ФУНКЦИОНИРУЮЩЕГО НА КА МЕТЕОР-М №2-3

© 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 03.05.2024 г.

Работа посвящена вопросу географической привязки измерений российского сканера/зондировщика МТВЗА-ГЯ, установленного на борту космического аппарата “Метеор-М” № 2-3. Прибор был введен в эксплуатацию в августе 2023 года и продолжает работать в штатном режиме в настоящее время. Выход из строя сантиметровой линии связи на спутнике-носителе в октябре 2023 года существенно снизил область покрытия измерениями МТВЗА-ГЯ. В настоящее время они ограничены областью прямой видимости спутника наземными станциями приема. Отсутствие на территории наблюдения всесезонных четких границ перехода морская поверхность/суша делает невозможным проводить оценку качества и корректировать географическую привязку измерений МТВЗА-ГЯ. В связи с этим, в рамках представленной работы анализировались данные измерений с глобальным покрытием по земному шару, выполненными прибором в августе-сентябре 2023 года. Основываясь на положительном опыте работы с предыдущими версиями приборов МТВЗА, авторы использовали аналогичные методики оценки качества географической привязки и поиска корректирующих ее углов. При этом имеющиеся конструктивные отличия рассматриваемого образца прибора (изменение направления сканирования, изменение рабочих секторов наблюдения) потребовали внесения некоторых корректив в алгоритм реализации геопривязки. Исследования показали, что оптические оси прибора, соответствующие отдельным группам частотных каналов, имеют различную ориентации. В связи с этим, поиск корректирующих геопривязку углов выполнялся для каждой группы отдельно. При выполнении дифференцированного подхода к геопривязке разных групп частотных каналов с использованием найденных значений корректирующих углов крена, тангажа и рыскания, авторам удалось достичь следующих показателей точности: для группы каналов 10.6 – 23.8 ГГц –  $(4.59 \pm 8.22)$  км; для группы каналов 31.5–48.0 ГГц –  $(5.51 \pm 8.83)$  км; для группы каналов 52–91.65 ГГц –  $(8.03 \pm 11.69)$  км.

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

DOI: 10.31857/S0205961424060066, EDN: RQRNNT

#### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время сканеры/зондировщики серии МТВЗА (разрабатываемые АО “Российские космические системы”) являются единственными отечественными радиометрическими комплексами, функционирующими на орбите в целях решения задач дистанционного зондирования Земли. Технические характеристики приборов этой серии позволяют решать широкий круг научных и практических задач в области оперативной метеорологии и океанографии (Ермаков и др., 2021; Филей и др., 2021; Заболотских и др., 2022). При этом уже неоднократно показано (смотри, например, (Пашинов, 2018; Сазонов, 2022; Сазонов, 2023)), что потенциально достижимые точности итоговых продуктов находятся на уровне аналогичных показателей таких ин-

струментов, как ATMS (англ. Advanced Technology Microwave Sounder), SSMIS (англ. Special Sensor Microwave - Imager/Sounder) и AMSR-2 (англ. Advanced Microwave Scanning Radiometer).

Задачи дистанционного зондирования состояния атмосферы, в силу ее постоянной изменчивости, накладывают определенные требования на частоту обновления спутниковых данных. Так, например, оперативность имеет определяющее значение при отслеживании и прогнозировании траекторий тропических ураганов, выявления зон повышенной грозовой активности (интенсивных осадков), позволяя снизить потенциальный ущерб от них в различных частях нашей планеты. В связи с этим, число средств пассивного микроволнового зондирования атмосферы постоянно увеличивает-

ся, а также активно развивается практика совместного анализа данных, поступающих с различных платформ. Наиболее успешной в данном смысле является серия приборов SSMIS, функционирующая в настоящий момент на трех различных спутниках (в рамках программы DMSP (англ. Defense Meteorological Satellite Program)).

Необходимость наращивания российской группировки спутников метеорологического назначения отражена в текстах обновляемых Федеральных космических программ России (ФКП). Так, в соответствии с ФКП на 2006 – 2015 и 2016 – 2025 годы, в период с 2009 по 2025 г., планировалось осуществить восемь запусков КА “Метеор-М” с микроволновыми сканерами/зондировщиками на борту (Барсуков и др., 2021). При этом, с учетом срока активного существования приборов МТВЗА (составляющего 5 лет), это позволило бы обеспечить одновременное функционирование на орбите, как минимум, двух инструментов. Оставляя вне рассмотрения проблемы реализации целевых показателей ФКП в данном направлении, а также возникновение нештатных ситуаций в рамках эксплуатации каждого отдельного экземпляра МТВЗА, поставленная задача требует особого внимания к пространственному совмещению измерений, поступающих с разных приборов.

Основной целью настоящей публикации является описание работ, выполненных авторами в рамках географической привязки данных измерений инструмента МТВЗА-ГЯ, являющегося полезной нагрузкой КА “Метеор-М” №2-3 (производства АО “Корпорация “ВНИИЭМ”), успешно выведенного на целевую орбиту 27 июня 2023 года. Используемые методы и подходы повторяют примененные авторами для географической привязки (и ее уточнения) (Садовский и Сазонов, 2022; Садовский и Сазонов, 2023; Сазонов и Садовский, 2024) данных измерений инструмента МТВЗА-ГЯ, функционировавшего на борту КА “Метеор-М” №2-2. При этом, однако, возник ряд новых особенностей, требующих учета при реализации указанной процедуры. Их описанию и посвящена содержательная часть работы.

### ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МТВЗА-ГЯ, УСТАНОВЛЕННОГО НА БОРТУ КА “МЕТЕОР-М” №2-3

Одним из ключевых отличий прибора, установленного на борту КА “Метеор-М” №2-3, имеющих отношение к реализации процедуры географической привязки данных измерений, является изменение направления сканирования антенного блока. Следует напомнить, что в предыдущих версиях зондировщика, вращение выполнялось “по” часовой

стрелке относительно направления в надир. Соответственно, матрица поворота, используемая в (Садовский и Сазонов, 2022) для определения мгновенной ориентации вектора наблюдения МТВЗА-ГЯ в приборной системе координат, должна быть преобразована с учетом этого факта (с сохранением обозначений, использованных в указанной работе):

$$R_Z(\varphi_i) = \begin{bmatrix} \cos \varphi_i & \sin \varphi_i & \rightarrow -\sin \varphi_i & 0 \\ -\sin \varphi_i & \rightarrow \sin \varphi_i & \cos \varphi_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Изменение направления сканирования повлекло за собой изменения алгоритма расчета времени каждого отдельного измерения ( $i$ -го элемента в каждом скане) и азимутального угла поворота антенного блока МТВЗА-ГЯ ( $\varphi_i$ ) в приборной системе координат. Вместо используемого ранее соотношения

$$\varphi_i = \frac{360}{2.5} \cdot 0.95236 + \frac{145}{200-1} \cdot ((i-1) + 13) + \varphi_{кор},$$

необходимо использовать

$$\varphi_i = \frac{360}{2.5} \cdot 0.6332 + \frac{145}{200-1} \cdot ((i-1) + 46) + \varphi_{кор}.$$

Как и прежде, множители  $360/2.5$  и  $145/(200-1)$  соответствуют угловой скорости вращения антенного блока и шагу квантования по азимутальному углу между соседними векторами наблюдения. Сохраняется и значение начального корректирующего угла  $\varphi_{кор} = -25^\circ$ . Смена множителя  $0.95236$  на  $0.6332$ , совместно с корректировкой слагаемого  $+13$ , связаны с изменением расположения секторов измерения МТВЗА-ГЯ относительно аппаратного датчика, формирующего временную метку начала скана. Следует отметить, что введенные изменения в геометрии сканирования и, вероятно, изменение ориентации прибора на спутнике-носителе, позволили разработчикам расширить полосу обзора прибора. Ранее, неподверженным переотражениям от элементов конструкции КА оставались лишь 123 элемента разрешения каждого скана. В новой конфигурации, это число составляет 140 элементов.

Следующей особенностью, требующей учета в рамках процедуры географической привязки, является отличие оптической схемы антенного блока МТВЗА-ГЯ, установленного на борту КА “Метеор-М” №2-3, от предыдущей версии прибора. Как и ранее, антенная система МТВЗА-ГЯ представляет собой однозеркальную антенну с боковым облучением параболического зеркала размером  $0.65$  м, а групповой многочастотный антенный облучатель включает четыре рупора, каждый из которых оптимизирован в диапазоне  $10.6 - 23.8$ ;  $31.5 - 48$ ;  $52 - 91$

и 183 ГГц. (Болдырев и др., 2008). При этом, если в отношении прибора, установленного на КА “Метеор-М” №2-2, можно было утверждать (на основании результатов работы (Садовский и Сазонов, 2023)), что оптические оси антенных лучей радиометрических каналов 10.6 – 23.8 и 31.5 – 48 ГГц ориентированы практически одинаково и, соответственно, корректировку геопривязки можно считать общей для них, то для образца, установленного на КА “Метеор-М” №2-3, это условие не выполняется (этот эффект будет продемонстрирован ниже). Таким образом, как реализация самой процедуры географической привязки, так и поиск корректирующих ее углов крена, тангажа и рыскания, должны выполняться отдельно для каждой группы каналов.

Положительным, с точки зрения геопривязки, следует считать функционирование обеих поляризаций частотного канала 91.65 ГГц в версии прибора, установленного на борту КА “Метеор-М” №2-3. Это позволяет выполнять корректировку географической привязки этого частотного канала на основе достаточно простой методики, аналогичной работе с более низкочастотными каналами, описанной в (Садовский и Сазонов, 2023) (в отличие от предыдущей версии прибора, где привязка высокочастотных данных была сопряжена с необходимостью накопления долгосрочной информации о положении радиометрической границы перехода “водная поверхность – суша” из-за неработающего канала горизонтальной поляризации 91.65 ГГц (Садовский и Сазонов, 2024)).

Как уже было отмечено ранее, КА “Метеор-М” №2-3 был выведен на запланированную орбиту в конце июня 2023 года. Для запуска и перехода МТВЗА-ГЯ к штатному режиму функционирования

(с учетом корректировок программ предварительной обработки данных) потребовалось около месяца, и с августа 2023 года появилась возможность доступа к данным измерений этого прибора уровня L0. К сожалению, в октябре 2023 года вышла из строя линия передачи сантиметрового диапазона КА “Метеор-М” №2-3. Как следствие – трансляция всей служебной и научной информации на Землю ведется посредством линий дециметрового и метрового диапазонов. В связи с этим, данные измерений МТВЗА-ГЯ имеют ряд существенных ограничений.

Во-первых, – это значительное снижение площади покрытия измерениями в связи с тем, что обеспечивается прием лишь в пределах прямой видимости аппарата наземными станциями (при этом инструмент выполняет измерения в течении всех суток в штатном режиме). Стандартная суточная картина покрытия данными измерений МТВЗА-ГЯ представлена на рис. 1.

С учетом траектории движения КА “Метеор-М” №2-3 и геометрии сканирования прибора, зона покрытия для восходящих полувитков оказывается сдвинутой в область более южных широт. В таком виде данные измерений пригодны для анализа процессов, имеющих место на территории РФ, однако ни о каком глобальном покрытии речи не идет. Тот факт, что результаты измерений, передаваемые на Землю, практически не содержат областей перехода “водная поверхность – суша”, делает невозможной периодическую оценку качества географической привязки данных МТВЗА-ГЯ (береговая линия вдоль северного побережья РФ большую часть года покрыта льдом и имеет сильную изрезанность) в соответствии с методиками, традиционно применяемыми для этих целей.

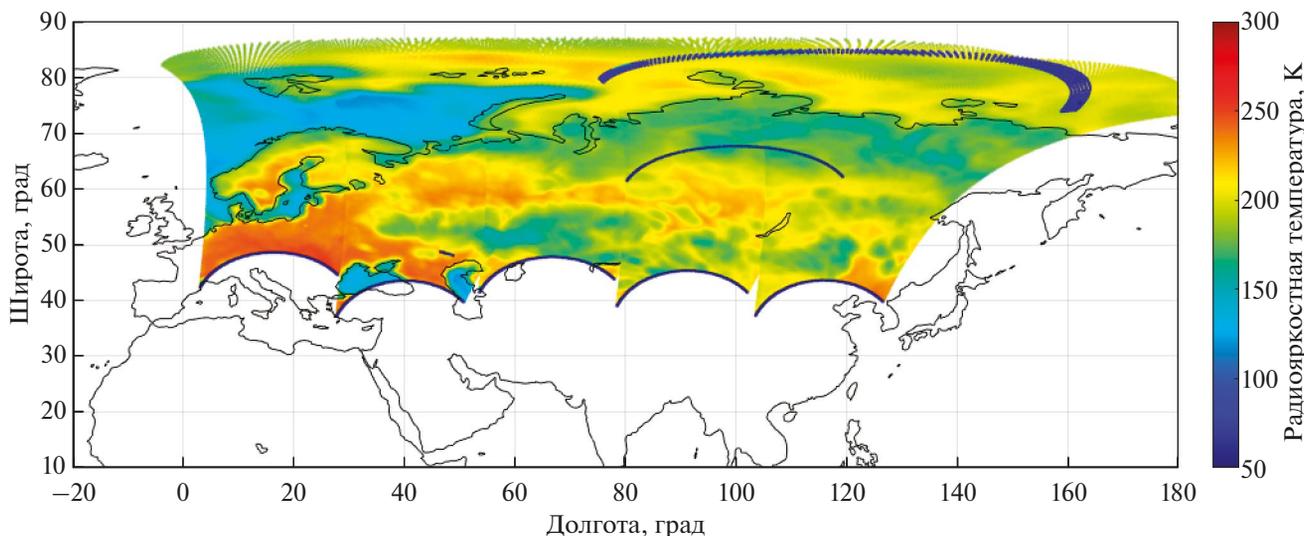


Рис. 1. Суточный композит результатов измерений МТВЗА-ГЯ за 5 марта 2024 года. Нисходящие полувитки. Частотный канал 36.7 ГГц.

Второй проблемой является необходимость снижения количества информации, передаваемой на землю через функционирующие каналы. По разъяснениям разработчиков аппаратуры это достигается путем усреднения результатов измерений, получаемых каждые четыре отсчета одного скана для частотных каналов 10.6 – 23.8 ГГц, без сжатия – для канала 91.65 ГГц, и каждые 2 отсчета – для всех остальных частот. В свою очередь, прямое выполнение географической привязки таких данных, с учетом изменения положения спутника по орбите, приводит к невозможности визуальной оценки ее качества (за счет “полосатости” формируемых изображений), а применение автоматизированных методов не может быть выполнено с точностью, менее пространственного элемента сжатия. Нетрудно посчитать, что при линейном расстоянии между соседними элементами разрешения на поверхности в 16 км, эта величина не может быть лучше 64 км для частотных каналов ниже 23.8 ГГц и 32 км для более высоких частот. Следует отметить, что технические возможности Европейского спутникового центра ФГБУ «НИЦ “Планета”» позволяют осуществлять прием данных МТВЗА-ГЯ без сжатия, поэтому информация, проходящая через него, не подвержена указанному недостатку.

Несмотря на перечисленные ограничения, сам прибор МТВЗА-ГЯ функционирует в штатном режиме, а качество конечных продуктов, построенных на основе поступающей с него информации, зависит, в том числе, и от точности реализации процедуры их географической привязки. В связи с этим, коллективом авторов (на основе массива измерений, ограниченного периодом штатного функционирования линий передачи данных КА “Метеор-М” №2-3) была проведена работа по поиску корректирующих углов крена, тангажа и рыскания для зондирующего, установленного на этом носителе, их применению в процедуре географической привязки и последующей оценки ее точности для различных групп частотных каналов.

#### ПОИСК КОРРЕКТИРУЮЩИХ ГЕОПРИВЯЗКУ УГЛОВ КРЕНА, ТАНГАЖА И РЫСКАНИЯ ПРИБОРА

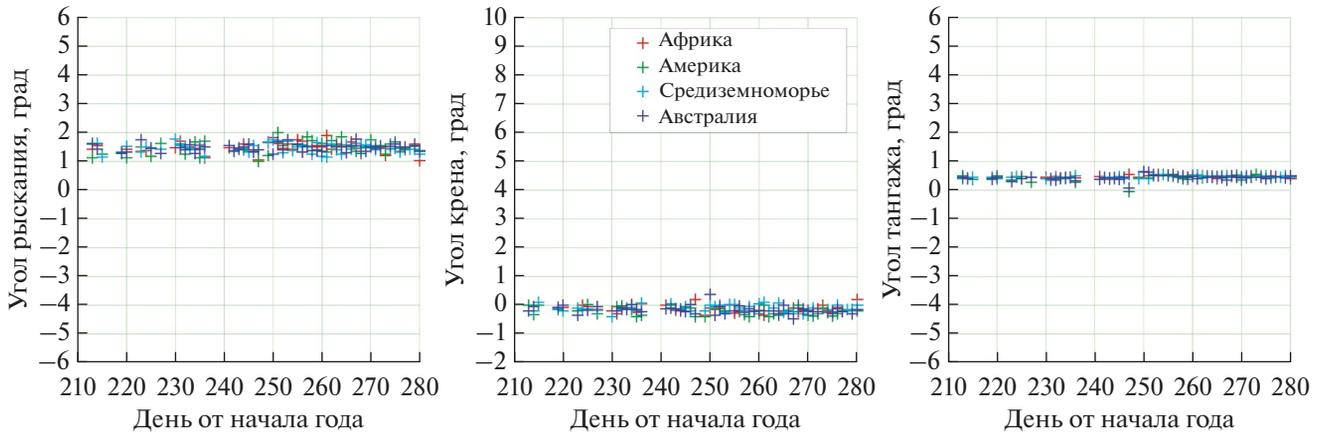
Как уже было сказано ранее – результаты глобальных измерений МТВЗА-ГЯ, установленного на борту КА “Метеор-М” №2-3, доступны лишь для периода с 1 августа по 7 октября 2023. Эти данные были предоставлены авторам сотрудниками АО “Российские космические системы” для выполнения работ по корректировке их географической привязки в виде набора файлов формата .hdf (англ. Hierarchical Data Format), прошедших первичную обработку с использованием программного

комплекса предварительной обработки измерений МТВЗА-ГЯ (созданного разработчиками аппаратуры). Каждый файл содержит результаты измерений (с применением процедур фильтрации, первичной геопривязки и калибровки до значений антенных температур) на всех частотных каналах прибора, полученных в пределах одного полувитка КА.

Визуальный анализ суточных композитных изображений, построенных на основе предоставленных данных для всех частотных каналов, показал, что для большинства из них характерно явное смещение радиотеплового портрета относительно географических береговых линий. При этом максимальные отклонения соответствуют частотным каналам из группы 52 – 91 ГГц, чуть лучше – для группы каналов 31.5 – 48 ГГц, а смещения для частот 10.6 – 23.8 ГГц почти не идентифицируются глазом. Отмеченные особенности свидетельствуют о необходимости корректировки географической привязки данных измерений, а также о проведении этой операции дифференцированно для каждой частотной группы.

Для решения поставленной задачи использовался подход, детально описанный в (Садовский и Сазонов, 2023). Следует напомнить, что в нем используется предположение об отсутствии отклонений орбитальной системы координат от системы координат космического аппарата, а любые смещения точек визирования на поверхности относительно реперных географических объектов объясняются последовательным поворотом приборной системы координат относительно носителя на углы: крена, тангажа и рыскания. Результаты суточных измерений на горизонтальной поляризации для каждой частоты проходят процедуру независимой геопривязки (Садовский и Сазонов, 2022) и накладываются на регулярную сетку. После этого находится разность двух суточных композитов, отдельно сформированных для восходящих и нисходящих витков. Если геопривязка выполнена корректно, то карта их разности не будет содержать пикселей, где разница антенных температур превышает ее суточные изменения (не более 30 К для поверхности суши в отсутствии зон активных осадков). В противном случае, особенно вблизи береговых линий, будут появляться области с сильно завышенными значениями разности, по характеру которых надежно идентифицируются вызывающие эти изменения углы. Автоматизация указанной процедуры позволяет последовательно подобрать такие значения корректирующих углов крена, тангажа и рыскания каждого частотного канала, которые минимизируют количество несовпадающих пикселей в геопривязанных композитах на восходящих и нисходящих полувитках.

Для всего объема имеющихся в распоряжении авторов данных, эта процедура была проведена



**Рис. 2.** Результаты работы алгоритма поиска корректирующих геопривязку углов при анализе данных измерений на частоте 31.5 (Н) ГГц. Каждая точка соответствует значениям, полученным в рамках обработки одного суточного композита.

для частотных каналов 10.6 (Н), 18.7 (Н), 23.8 (Н), 31.5 (Н), 36.7 (Н) и 91.65 (Н) ГГц. С учетом частичной потери исходных данных, среднее количество полученных значений троек корректирующих углов составило порядка 50 штук на каждый канал. Пример выполнения указанной операции для частотного канала 31.5 (Н) ГГц приведен на рис. 2.

Как и в случае анализа данных прибора, функционировавшего на борту КА “Метеор-М” №2-2, получаемые значения не проявляют каких-либо временных трендов, достаточно хорошо сгруппированы. Данные, полученные для областей анализа “Австралия”, “Африка”, “Южная Америка” и “Средиземноморье” (на рис. 2 они обозначены различными цветами; конкретные географические границы этих регионов приведены в (Садовский и Сазонов, 2023)), также практически повторяют друг друга. При этом, более слабая функциональная зависимость целевой функции от угла рыскания, как и в указанной выше работе, приводит к наибольшей дисперсии оценок этого угла. Далее следует угол крена, имеющий схожее влияние на результаты геопривязки данных. Наименьший разброс демонстрируют восстановленные углы тангажа.

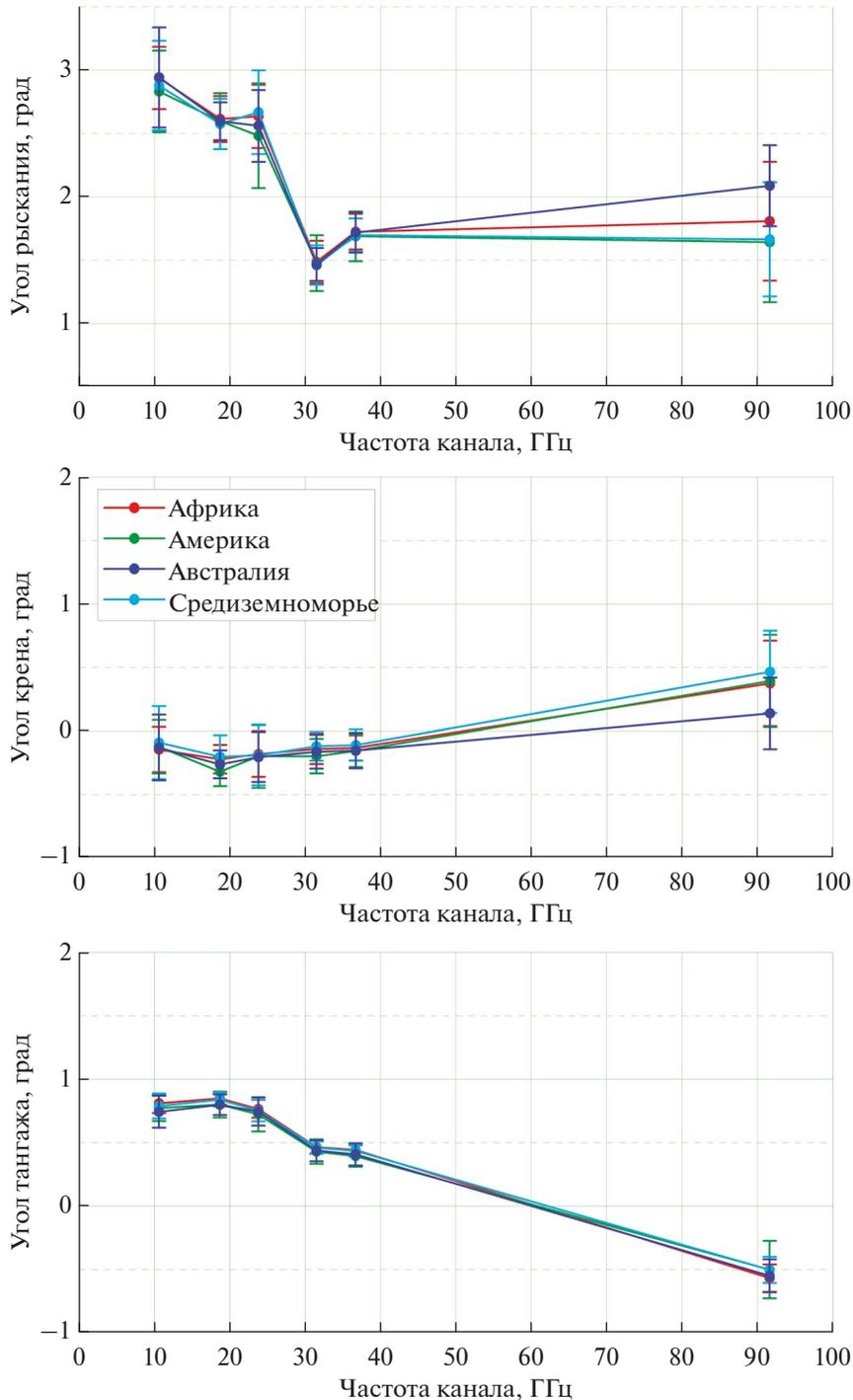
Полученные за двухмесячный период значения корректирующих углов усреднялись с последующим расчетом дисперсии каждого из них. На рис. 3 приведены результаты выполненных оценок по всем частотным каналам в графическом виде. Каждая точка на рис. 3 соответствует усредненному значению оцениваемого параметра, разброс соответствует полному значению дисперсии.

Представленные результаты наглядно демонстрируют существенные отличия в ориентации оптических осей визирования разных групп частотных каналов инструмента МТВЗА-ГЯ, установ-

ленного на КА “Метеор-М” №2–3. В азимутальной плоскости (угол рыскания), наибольшие расхождения наблюдаются в угле визирования каналов 10.6–23.8 ГГц и всех остальных, и составляют порядка  $1^\circ$ . В вертикальной плоскости (угол тангажа) ориентация группы каналов 52–91 ГГц отличается от каналов группы 31.5–48 ГГц также на  $1^\circ$ , а вот от каналов группы 10.6–23.8 ГГц – уже почти на  $1.5^\circ$ .

Следует отметить следующие особенности полученных результатов. Во-первых, операция определения корректирующих углов по описанной методике для канала с частотой 91.65 (Н) ГГц выполнялась авторами впервые. Примененный в работе (Сазонов и Садовский, 2024) подход имел более сложную реализацию и был вызван отсутствием результатов измерений на горизонтальной поляризации этой частоты. Его использование для анализа данных описываемого прибора оказалось невозможным по причине малого объема имеющихся данных. По этой же причине авторам не удалось провести детальный анализ получаемых результатов на этой частоте и в рамках настоящей работы, в отличие от хорошо обоснованных данных, описанных в работе (Сазонов и Садовский, 2023). В связи с этим, значения корректирующих углов для данной группы частот авторы позиционируют как ориентировочные.

Несмотря на то, что результаты поиска корректирующих углов для частотных каналов 10.6, 18.7 и 23.8 ГГц оказались близкими, авторы, на основе выводов работы (Сазонов и Садовский, 2023), исключили из дальнейшего рассмотрения частоты 10.6 и 23.8 ГГц. Напомним, что для 10.6 ГГц существенное влияние на выполнение указанной операции оказывает значительный размер пятна разрешения на поверхности (его ориентация относительно береговой линии), а для 23.8 ГГц – значимая зависимость от состояния атмосферы (наличия водяного



**Рис. 3.** Результаты усреднения корректирующих геопривязку углов, полученных за весь анализируемый период. Пояснения даны в тексте.

пара). Поэтому совпадение углов для группы частотных каналов 10.6 – 23.8 ГГц, демонстрируемое на рис. 3, авторы считают в некотором роде случайным, вызванным характеристиками имеющейся ограниченной выборки, а итоговые корректирующие углы этой группы предлагают определять на основе результатов, полученных лишь для канала 18.7 ГГц.

Итоговые значения корректирующих углов, полученные с учетом оговоренных особенностей и в результате усреднения результатов внутри каждого частотного диапазона по всем тестовым регионам, представлены в таблице 1. Следует отметить, что приведенные значения получены для ориентации систем координат, описанной в (Сазонов и Са-

**Таблица 1.** Рекомендуемые значения корректирующих углов для реализации геопривязки данных МТВЗА-ГЯ, установленного на КА “Метеор-М” № 2-3

Частоты	Рыскание	Крен	Тангаж
10.6–23.8 ГГц	$(+2.60 \pm 0.19)^\circ$	$(-0.25 \pm 0.13)^\circ$	$(+0.82 \pm 0.07)^\circ$
31.5–48.0 ГГц	$(+1.59 \pm 0.16)^\circ$	$(-0.15 \pm 0.12)^\circ$	$(+0.43 \pm 0.07)^\circ$
52–91.65 ГГц	$(+1.80 \pm 0.42)^\circ$	$(+0.34 \pm 0.33)^\circ$	$(-0.52 \pm 0.14)^\circ$

довский, 2023). Их использование в программном комплексе предварительной обработки измерений МТВЗА-ГЯ, как и прежде, требует дополнительного согласования с разработчиками аппаратуры (с учетом разных ориентаций осей в используемых системах координат и положительных направлений изменения корректирующих углов).

### ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ГЕОПРИВЯЗКИ С УЧЕТОМ КОРРЕКТИРУЮЩИХ УГЛОВ

Оценка результатов использования найденных корректирующих углов в процедуре географической привязки данных МТВЗА-ГЯ также выполнялись по технологии, подробно описанной в (Садовский и Сазонов, 2023). Для произвольно выбранного временного интервала (суточного) выполнялась процедура геопривязки и наложения на регулярную сетку с шагом  $0.25^\circ$ . Далее, в пределах тестовых регионов, по радиометрическим изображениям находилось положение предполагаемой береговой линии в приближении, что она располагается в точке максимального значения производной яркости, как функции координат. В пределах суточного композита выделялось 6 тестовых зон с протяженными участками гладких береговых линий, ориентированных вдоль и поперек траектории смещения подспутниковой точки. Далее, для каждого тестового участка выполнялась оценка среднего расстояния между истинной географической береговой линией и восстановленной по радиотепловому портрету. Эта операция повторялась независимо для трех частотных каналов – 18.7, 31.5 и 91.65 ГГц (случай горизонтальной поляризации) и отдельно для восходящих и нисходящих полувитков. Таким образом, за трое суток, для каждого из указанных каналов было получено в общей сложности порядка 36 оценок. Эти значения подвергались критическому анализу путем просмотра соответствующих радиометрических изображений. Необходимость подобной операции продиктована тем фактом, что при автоматизации расчетов возникают ситуации, когда тестовая область покрыта измерениями лишь частично, что приводит к срыву работы алгоритма оценки расстояний с их последующим завышением. Помимо этого, в автоматическом режиме невозможно забраковать отдельные результаты, соответствующие смещению радиотеплового изображения по причи-

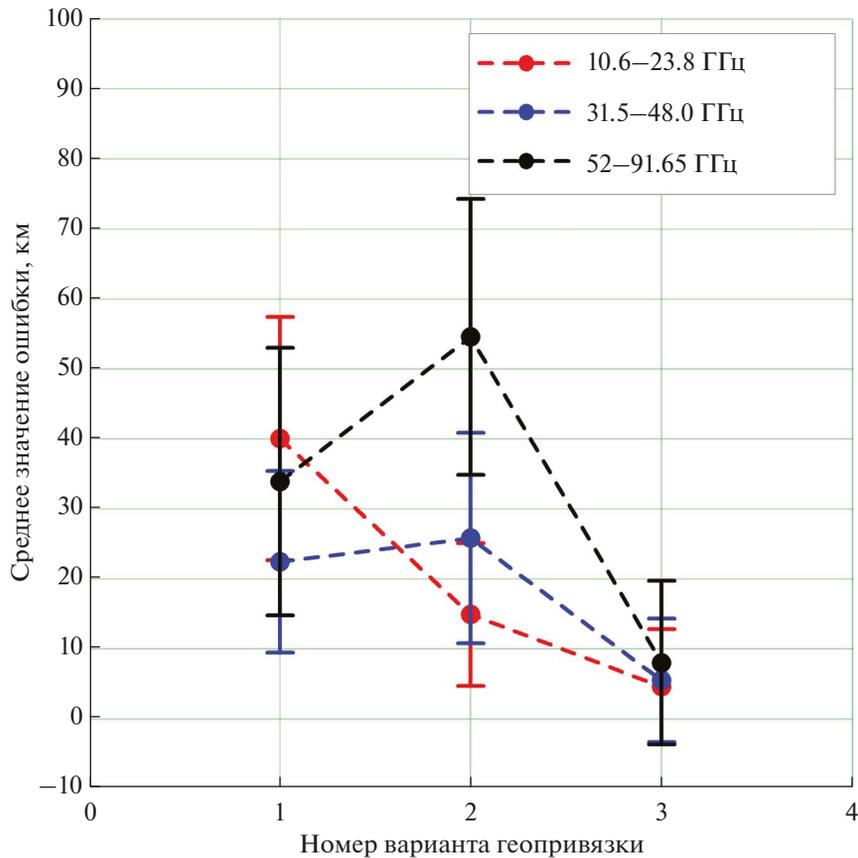
нам, не имеющим отношения к качеству процедуры геопривязки. Сюда можно отнести маневры КА или временное изменение параметров сканирования аппаратуры, приводящие к существенным, но еще не критичным, изменениям распределения яркостных температур. В частности, такие проявления были обнаружены в данных МТВЗА-ГЯ за 4–5 сентября 2023 года. Соответствующие подтверждения (изображения) у авторов имеются, однако не приводятся в тексте с целью экономии места.

Косвенным признаком правильности выполняемых оценок (как и самой геопривязки) служит их сравнение для восходящих и нисходящих полувитков. Так, например, усредненные значения расхождения береговых линий, расположенных поперек траектории движения спутника, при наличии ошибки в угле тангажа должны иметь величины, схожие по модулю, но иметь разный знак. Аналогичное утверждение сохраняется при наличии ошибки в угле рыскания, когда береговая линия расположена вдоль траектории перемещения спутника. При достижении потенциального предела качества геопривязки модуль среднего значения должен быть меньше соответствующих значений дисперсии. Для предложенных в Таблице 1 значений углов крена, тангажа и рыскания указанные условия были выполнены.

Результаты усреднения оценок качества геопривязки для различных групп частотных каналов приведены на рис. 4. Номера вариантов соответствуют следующим случаям: 1 – географическая привязка данных выполняется без корректировки, только с учетом траектории движения КА “Метеор-М” №2-3 и схемы сканирования МТВЗА-ГЯ; 2 – анализируются результаты первичной геопривязки, выполненной программным комплексом предварительной обработки измерений МТВЗА-ГЯ (содержаться в файлах, предоставленных сотрудниками АО “Российские космические системы”); 3 – географическая привязка данных с учетом рекомендуемых углов (Таблица 1).

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Конструктивное исполнение прибора МТВЗА-ГЯ, установленного на борту КА “Метеор-М” №2-3, имеет различную ориентацию оптических осей групп частотных каналов 10.6 – 23.8,



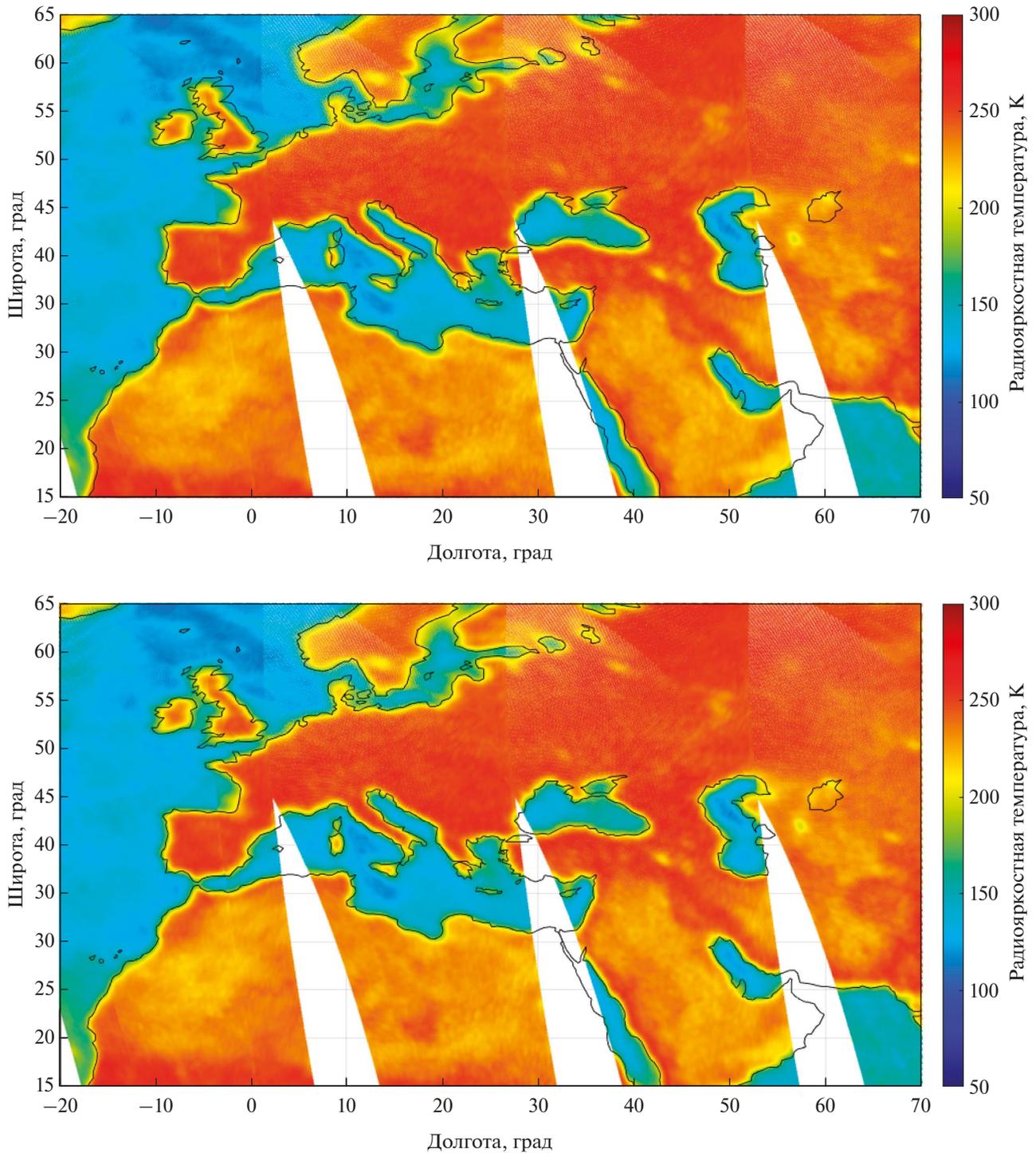
**Рис. 4.** Результаты сравнения качества географической привязки данных МТВЗА-ГЯ, выполненной для различных вариантов ее реализации. Пояснения даны в тексте.

31.5–48.0 и 52–91.65 ГГц. В совокупности с особенностями размещения этого инструмента на носителе, без внесения корректирующих геопривязку углов, наилучшую точность позиционирования на поверхности имеют результаты измерений в каналах из частотного диапазона 31.5 – 48.0 ГГц (порядка 23 км). Для измерений на частотах 52–91.65 ГГц этот показатель составляет порядка 35 км. Максимальные отклонения реального луча визирования от ожидаемого соответствуют частотам из диапазона 10.6–23.8 ГГц (смещение по поверхности около 40 км).

2. Корректировка географической привязки, заложенная в программном комплексе предварительной обработки измерений МТВЗА-ГЯ, скорее всего, была выполнена сотрудниками АО “Российские космические системы” на основе анализа радиометрических изображений, полученных на частотах 10.6–23.8 ГГц. Это привело к повышению точности геопривязки до уровня 15 км для этой группы каналов. При этом, однако, в худшую сторону изменилась ситуация для частот из диапазона 31.5–48.0 ГГц (25 км) и существенно упала точность позиционирования направления визирования на частотах 52–91.65 ГГц (до 65 км).

3. При выполнении дифференцированного подхода к геопривязке разных групп частотных каналов с использованием найденных значений корректирующих углов крена, тангажа и рыскания, авторам удалось достичь следующих показателей точности: для группы каналов 10.6–23.8 ГГц –  $(4.59 \pm 8.22)$  км; для группы каналов 31.5–48.0 ГГц –  $(5.51 \pm 8.83)$  км; для группы каналов 52–91.65 ГГц –  $(8.03 \pm 11.69)$  км. При этом обеспеченная точность геопривязки низкочастотных каналов МТВЗА-ГЯ, несмотря на ограниченность выборки данных, доступных для анализа, практически повторяет результаты работы (Садовский и Сазонов, 2023), а включение в анализ результатов измерений на горизонтальной поляризации частоты 91.65 ГГц позволило улучшить показатели работы (Сазонов и Садовский, 2024).

В качестве примера эффективности использования рекомендованных корректирующих углов, на рис. 5 приведены отдельные участки суточных композитов (район Средиземного моря), сформированных по данным измерений МТВЗА-ГЯ на частоте 31.5 (Н) ГГц, при выполнении геопривязки без их учета, и с ним.



**Рис. 5.** Результаты географической привязки измерений МТВЗА-ГЯ за 1 сентября 2023 года. Сверху – без учета корректирующих углов. Снизу – после введения в операцию углов из таблицы 1. Частота 31.5 ГГц, случай горизонтальной поляризации

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Введенный в эксплуатацию на борту КА “Метеор-М” №2–3 прибор МТВЗА-ГЯ является в настоящее время одним из двух российских ска-

нирующих радиометров гидрометеорологического назначения. Несмотря на имеющиеся технические ограничения носителя, данный инструмент позволяет проводить оперативные наблюдения за состоянием подстилающей поверхности и атмосфера для

территории РФ. Анализ поступающей с МТВЗА-ГЯ информации свидетельствует о необходимости корректировки географической привязки проводимых измерений. Выполнение данной операции необходимо и с учетом потенциальной возможности объединения получаемой информации с измерениями введенного в эксплуатацию другого образца МТВЗА-ГЯ – на борту КА “Метеор-М” №2–4.

Проведенные исследования показали, что в отличие от предыдущих версий прибора, установленный на борту КА “Метеор-М” №2–3 инструмент имеет существенные расхождения в ориентации оптических осей отдельных групп частотных каналов. Соответственно, обеспечение приемлемого уровня географической привязки данных измерений на всех частотах требует дифференцированного подхода к реализации данной операции. В частности, геопривязка должна выполняться независимо для групп частотных каналов 10.6 – 23.8, 31.5 – 48.0 и 52 – 91.65 ГГц.

Имеющийся у авторов настоящей публикации опыт работы с данными измерений приборов серии МТВЗА-ГЯ, позволил выполнить поиск корректирующих географическую привязку углов крена, тангажа и рыскания для указанных частотных каналов. Для этого был использован подход, основанный на минимизации расхождений результатов измерений, выполненных прибором на нисходящих и восходящих полувитках (Садовский и Сазонов, 2023). Наличие работающего канала 91.65 (Н) ГГц у рассматриваемого экземпляра МТВЗА-ГЯ позволило использовать этот же алгоритм для уточнения геопривязки на данной частоте, взамен предложенного авторами ранее (Садовский и Сазонов, 2024).

Решение поставленной задачи потребовало от авторов внесения поправок и в саму процедуру географической привязки данных измерений МТВЗА-ГЯ (Садовский и Сазонов, 2022) для учета смены направления сканирования прибора и изменения расположения рабочих секторов сканирования.

Несмотря на малый объем выборки имеющихся данных измерений, использованных при определении корректирующих углов, выполненные оценки точности геопривязки после их введения в процедуру, позволяют говорить об успешном решении поставленной задачи. Так, ошибки позиционирования элемента наблюдения на поверхности для частот из группы каналов 10.6 – 23.8 ГГц составляют порядка 4.6 км, для частот 31.5 – 48.0 ГГц – 5.6 км, а для высокочастотных каналов 52 – 91.65 ГГц достигнуто значение 8 км. Указанные средние точности географической привязки повторяют результаты аналогичной работы авторов с прибором МТВЗА-ГЯ, функционировавшем на борту КА “Метеор-М” №2–2.

В дальнейшие планы авторов по данному направлению входят следующие задачи: согласование полученных значений корректирующих геопривязку углов с разработчиками аппаратуры и их интеграция в программный комплекс предварительной обработки измерений МТВЗА-ГЯ; выполнение процедур географической привязки данных МТВЗА-ГЯ, начавшем свою работу на КА “Метеор-М” №2–4; проведение работ по совмещению измерений, поступающих с двух, действующих в настоящий момент на орбите, образцов прибора, с последующим анализом возможности уточнения достигнутых показателей точности геопривязки каждого из них.

На основе продемонстрированных отличий в ориентации оптических осей прибора для разных групп частотных каналов, авторы в очередной раз акцентируют внимание на необходимости отказа от аппаратного совмещения лучей визирования в последующих версиях приборов серии МТВЗА. Это позволит не только выполнять независимую геопривязку каждого частотного канала на основе оригинальных измерений, не подверженных процедурам сглаживания, интерполяции, временного совмещения и т.п., но и аккуратно учитывать возникающие кроссполяризационные эффекты, что особенно важно в свете планируемых запусков приборов МТВЗА-МП.

## 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., Балашова Е. А., Азаров С. М.* Восстановление сплошности морского льда по данным измерений МТВЗА-ГЯ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. 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>.

## Correction of Geographical Reference of the Microwave Scanner/Sounder MTVZA-GYa Operating on the Meteor-M Satellite No. 2–3

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

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

This work is focused on georeferencing of the measurements data of the Russian MTVZA-GYa scanner/sounder, installed on board the “Meteor-M” No. 2–3 spacecraft. This instrument was put into operation in August 2023 and continues to operate normally at present. The failure of the spacecraft’s centimeter communication line in October 2023 significantly reduced the coverage area of MTVZA-GYa measurements. Currently, it is limited to direct visibility of the satellite by ground-based receiving stations. The absence of all-season clear boundaries of the “sea/land surface” transition in the observation area makes it impossible to assess the quality and correct the georeference of MTVZA-GYa measurements. In this regard, within the framework of the presented paper, measurement data with global coverage over the globe, carried out by this instrument in August–September 2023, were analyzed. Based on positive experience with previous versions of MTVZA’s instruments, the authors used similar methods for assessing the georeferencing quality and searching for angles that correct it. At the same time, the existing design differences of the sample device under consideration (changed scanning directions, changed observation sectors) required some changes to be made to the algorithm for implementing georeferencing. Research has shown that the optical axes of this instrument, corresponding to individual groups of frequency channels, have different orientations. In this regard, the search for georeferencing-correcting angles was performed for each group separately. During performing a differentiated approach to georeferencing different groups of frequency channels using the found values of corrective roll, pitch and yaw angles, the authors managed to achieve the following accuracy indicators: for a group of channels 10.6–23.8 GHz –  $(4.59 \pm 8.22)$  km; for a group of channels 31.5–48.0 GHz –  $(5.51 \pm 8.83)$  km; for a group of channels 52–91.65 GHz –  $(8.03 \pm 11.69)$  km.

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

### REFERENCES

*Barsukov I. A., Boldyrev V. V., Gavrillov M. I., Evseev G. E., Egorov A. 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. priborostroneniye 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 potokovoj 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 zon-

- dirovaniya 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., Balashova E. A., Azarov S. M.* Vosstanovlenie splochnosti morskogo l'da po dannym izmerenii MTVZA-GYa [Sea ice concentration retrieval from MTVZA GYa measurements]//Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2022. V. 19. № 1. P. 27–38. (In Russian). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-1-27-38>.
- Pashinov E.V.* Vosstanovlenie 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 distantsionnogo 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 distantsionnogo 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>.