

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

КОРРЕКТИРОВКА ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ПРИВЯЗКИ ДАННЫХ МТВЗА-ГЯ

© 2023 г. И. Н. Садовский^a, *, Д. С. Сазонов^a

^aИнститут космических исследований РАН, Москва, Россия

*E-mail: ilya_nik_sad@mail.ru

Поступила в редакцию 10.05.2023 г.

Представлено описание подхода, позволяющего контролировать качество географической привязки прибора МТВЗА-ГЯ и определять оптимальные значения корректирующих параметров. Проведенный анализ данных этого инструмента показал, что основной вклад в ошибки географической привязки вносят углы крена, тангажа и рыскания, определяющие несовпадение приборной системы координат с системой координат космического аппарата. В связи с этим был предложен итерационный алгоритм подбора этих углов, где в качестве минимизируемой функции использовалась разница измерений на восходящих и нисходящих полувитах МТВЗА-ГЯ. В результате применения данного алгоритма к результатам измерений МТВЗА-ГЯ за 2020 г. был проведен расчет средних значений корректирующих углов крена, тангажа и рыскания этого прибора. Найденные величины составили: $(-0.84 \pm 0.15)^\circ$ для угла рыскания, $(-0.44 \pm 0.14)^\circ$ для угла крена и $(+1.13 \pm 0.05)^\circ$ для угла тангажа. Было показано, что введение указанных углов в процедуру географической привязки МТВЗА-ГЯ позволяет существенно снизить ее ошибки. Так, среднее расхождение береговых линий, заимствованных из высокоточных географических баз данных и восстановленных по радиометрическим портретам, при выполнении корректировки географической привязки составляет 4.5 км.

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

DOI: 10.31857/S0205961423060076, **EDN:** DGFCJX

ВВЕДЕНИЕ

Микроволновый сканер-зондировщик МТВЗА-ГЯ (модуль температурно-влажностного зондирования атмосферы) в настоящее время представляется единственным российским радиометрическим инструментом, функционирующим на орбите (Барсуков и др., 2021). Прибор имеет характеристики, соответствующие действующим зарубежным аналогам и потенциально способен решать широкий спектр научных и прикладных задач дистанционного зондирования атмосферы, поверхности океана и суши (Ермаков и др., 2021).

Данные измерений МТВЗА-ГЯ поступают в центры приема ФБГУ “НИЦ Планета” (<http://planet.iitr.ru/>) 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”. Здесь результаты измерений проходят первичную обработку до уровня L1B (с использованием программного комплекса предварительной обработки измерений МТВЗА-ГЯ, созданного разработчиками аппаратуры), включающую распаковку, фильтрацию, геопривязку и калибровку, после чего сохраняются в архивах и могут быть предоставлены потребителям.

Анализ этих данных показывает, что один из основных этапов первичной обработки — географическая привязка, работает некорректно, что приводит к смещению радиотеплового портрета, формируемого МТВЗА-ГЯ, относительно реальной географической карты поверхности Земли. Наиболее четко это смещение наблюдается вблизи береговых линий, где соответствующий перепад между значениями радиояркостной температуры воды и суши может составлять более 100 К. Часть экспериментальных точек, излучение которых явно относится к поверхности суши, оказываются расположенными в океане, и наоборот. При этом, исходя из заявленных размеров пространственного элемента квантования сигнала (для всех радиометрических каналов) МТВЗА-ГЯ — 16 км, оценочная ошибка географической привязки составляет в некоторых случаях более 70 км (4–5 элементов разрешения).

Среди основных причин возникновения ошибок подобного характера выделяют: смещение спутниковых часов, представляющее собой разницу между показаниями спутниковых часов и всемирным координированным временем (*англ.* Coordinated Universal Time — UTC); систематическая несоосность прибора, когда положение надира не указывает на подспутниковую точку; за-

висящие от времени ошибки ориентации спутника (тангаж, крен и рыскание); неточность эфемеридных данных, используемых для прогнозирования положения спутника; ошибки моделирования программы сканирования прибора, такие как угол шага и т.п.

Подобные ошибки возникают при работе любых радиометрических сканеров, функционирующих на орбите. В ходе эксплуатации происходит их планомерное выявление, корректировка и последующий пересчет всего набора полученной информации, включая и готовые продукты. К сожалению, описание такого рода работ, относящихся к МТВЗА-ГЯ, в открытой литературе отсутствуют. А наличие ошибок геопривязки в данных уровня L1B свидетельствует, что они и не проводятся.

В связи с этим коллективом сотрудников ИКИ РАН были проведены работы по изучению процедуры геопривязки данных МТВЗА-ГЯ, ее детальному описанию (Садовский, Сазонов, 2022а), а также устранению ошибок, связанных с присутствием углов крена, тангажа и рыскания. Описанию последней задачи и посвящена содержательная часть настоящей публикации.

ВАРИАНТЫ РЕШЕНИЯ ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ

Географическая привязка состоит в совмещении внутренней системы координат сформированного в результате конического сканирования и перемещения вдоль траектории космического аппарата прибором МТВЗА-ГЯ радиометрического изображения с географической системой координат. Другими словами, зная время проведения измерения и направление визирования прибора необходимо определить географическую широту и долготу точки пересечения луча визирования с поверхностью Земли.

Современные компьютерные технологии и средства обмена данными предоставляют возможность технической реализации даже самых сложных и точных алгоритмов географической привязки, учитывающих максимально широкий набор параметров, определяющих параметры движения и ориентации космического аппарата (КА). Несмотря на это всегда существует вероятность возникновения ошибок (часть из которых была приведена выше), снижающих качество геопривязки. Контроль этого процесса, судя по количеству и частоте появления в открытой печати работ на эту тему, ведется постоянно в отношении всех сканирующих радиометров как функционирующих в настоящее время, так и закончивших свою работу на орбите.

Основываясь на анализе работ по этой тематике можно выделить несколько основных подходов к решению данной проблемы.

1. Использование данных звездных датчиков для постоянной оценки текущей ориентации инструмента и в случае отклонения параметров движения от ожидаемых внесение оперативных изменений в алгоритм геопривязки.

2. Итерационные методы подбора корректирующих параметров (углов, временных лагов и т.п.) разной степени сложности (Han et al., 2016; Moradi et al., 2013; Poe et al., 2008; Purdy et al., 2006; Wiebe et al., 2008; Zhou et al., 2019), основанные на сравнении реальных и ожидаемых радиометрических портретов поверхности Земли с последующей минимизацией расхождений между ними. При формировании ожидаемых образов используются как самые общие физические представления, так и сложные модели формирования и переноса излучения, иногда включающие в себя и модели функционирования оборудования. Для оценки близости ожидаемых и формируемых образов также имеется довольно обширный арсенал методов, начиная с простого сравнения средних значений яркостной температуры в выделенном элементе поверхности и заканчивая многопараметрическими алгоритмами выделения береговых линий с последующим привлечением методов анализа динамических изображений.

3. Графические методы корректировки радиометрических изображений, широко применяемые при работе с фотоизображениями и включающие в себя масштабирование, повороты, проекционные трансформации и т.п.

Работы авторов настоящей публикации в направлении оценки точности геопривязки данных МТВЗА-ГЯ и ее последующей корректировки были начаты с рассмотрения вопроса возможности привлечения для этих целей информации, поступающей со звездных датчиков, установленных на борту спутника-носителя. КА оснащен тремя звездными датчиками, два из которых функционируют постоянно. Эта информация считается служебной и не включается в состав HDF-файлов (*англ.* Hierarchical Data Format) с результатами измерений МТВЗА-ГЯ, но может быть предоставлена по запросу. Работа с этими данными представляет собой самостоятельную задачу и встречает ряд затруднений, требующих отдельного обсуждения, выходящего за рамки настоящей публикации. Главной же причиной невозможности привлечения звездных датчиков для корректировки геопривязки МТВЗА-ГЯ представляется отсутствие данных о взаимном расположении систем координат прибора и космического аппарата (в данном контексте “отсутствие” означает невозможность нахождения данной информации в свободном доступе, в сети Интернет или в публи-

кациях, посвященных описанию прибора). В отсутствие соответствующей матрицы, обеспечивающей прямой и обратный переход между этими системами координат (систем координат спутника-носителя и прибора), данные об ориентации КА попросту бесполезны с точки зрения поставленной задачи. Таким образом, использование первого подхода при корректировке геопривязки данных МТВЗА-ГЯ оказалось невозможным.

Третий подход в силу значительного прогресса в области обработки изображений позволяет выполнить точное совпадение истинной географической карты с радиометрическим изображением поверхности Земли, однако не содержит информации о корректирующих углах ориентации инструмента в пространстве, что не позволяет выполнить расчет параметров (углы встречи с Землей, углы засветки Солнцем, кроссполяризационные эффекты и т.п.), критически важных для последующего решения актуальных задач пассивной радиополяриметрии.

В связи с вышесказанным, усилия сотрудников ИКИ РАН были сосредоточены на применении подходов из второй, “радиометрической” группы (поскольку выбор минимизируемой функции, в основном, строится на известных радиофизических соотношениях). Следует отметить, что в литературе отсутствуют любые описания корректировки геопривязки МТВЗА-ГЯ. При этом данный инструмент имеет отличные от зарубежных аналогов параметры сканирования (угол встречи с Землей в районе 65°), а также неописанную в литературе технологию аппаратного совмещения результатов измерений, относящихся к различным частотным каналам (лучей визирования). Соответственно, заранее было неизвестно — возможно ли в данной ситуации применение хорошо зарекомендовавших себя методов корректировки геопривязки зарубежных аналогов МТВЗА-ГЯ. Кроме этого, наиболее современные методы корректировки географической привязки, применяемые при анализе данных таких инструментов, как AMSR (*англ.* Advanced Microwave Scanning Radiometer) и SSMIS (*англ.* Special Sensor Microwave Imager/Sounder), требуют привлечения значительных вычислительных мощностей, которыми группа авторов не располагает.

Поэтому коллективом авторов были опробованы три наиболее простых метода поиска корректирующих углов для выполнения геопривязки МТВЗА-ГЯ. Здесь под словом “метод” подразумевается выбор минимизируемой функции, а именно: минимизация разности средних значений яркости водной поверхности и поверхности суши в прибрежной зоне (Садовский, 2021); минимизация числа элементов разрешения на поверхности, где расхождения между измерениями, полученными на смежных восходящих и нисхо-

дящих полувитках, превышает некоторый пороговый уровень (Садовский, Сазонов, 2022б); а также минимизация средних отклонений истинной береговой линии от восстановленной по максимальному контрасту на радиометрических портретах (Садовский, Сазонов, 2022б).

Следует отметить, что в рамках первого метода достичь удовлетворительных стабильных показателей точности геопривязки не удалось в силу отсутствия ярко выраженных глобальных минимумов минимизируемой функции. При этом получаемое облако решений в пространстве определяемых углов крена, тангажа и рыскания имело характерные размеры, превышающие значение 1° , что, очевидно, не могло обеспечить требуемую точность решения задачи. Третий метод показал наиболее качественные результаты, однако значительные затраты машинного времени и сложность процесса автоматизации выделения тестовых полигонов представляют существенную проблему при обработке длинных рядов данных. Поэтому данный метод был выделен в качестве проверочного для итоговой оценки качества геопривязки (см. разд. “Оценка качества геопривязки МТВЗА-ГЯ”). Оптимальным с точки зрения соотношения временные затраты/точность был выделен метод минимизации расхождений между измерениями, выполненными на восходящих и нисходящих витках. Его физическое обоснование, а также описание ключевых этапов реализации приведено ниже.

МИНИМИЗАЦИЯ РАСХОЖДЕНИЙ В ИЗМЕРЕНИЯХ НА ВОСХОДЯЩИХ И НИСХОДЯЩИХ ПОЛУВИТКАХ

Данный подход применяется для оперативной корректировки углов наблюдения многих систем пассивного дистанционного зондирования, например инструмента AMSU (*англ.* Advance Microwave Sounding Unit) (Moradi et al., 2013).

Физической основой метода служат следующие рассуждения. Модель формирования и переноса микроволнового излучения в системе “подстилающая поверхность — атмосфера” содержит несколько принципиальных компонент. А именно: излучение холодного космоса, дважды проходящее атмосферу и переотражающееся от поверхности; нисходящее излучение атмосферы, отраженное от поверхности и проходящее путь от поверхности до спутника; восходящее излучение атмосферы и, наконец, собственное излучение поверхности, проходящее путь через атмосферу от поверхности до спутника.

Если рассматривать условия безоблачной атмосферы, а также лишь те частотные каналы, которые работают в ее окнах прозрачности, то в сравнении с последней компонентой (излучени-

ем непосредственно самой поверхности) всеми остальными (вкладом излучения атмосферы, ее влиянием на распространение, излучением холодного космоса) можно пренебречь. Это позволяет выделить в качестве основных параметров, влияющих на результаты измерений яркостной температуры T_b , излучательную способность поверхности ϵ_s и ее физическую температуру T_S : $T_b = \epsilon_s T_S$.

В микроволновом диапазоне разница между излучательной способностью водной поверхности ϵ_{sea} и суши ϵ_{land} отличается почти в два раза. Естественно, этот параметр является функцией большого числа переменных — частоты, поляризации, диэлектрических свойств, геометрии и т.д. Для наглядности приводимых рассуждений ограничимся лишь “крайними” его значениями — среднее значение ϵ_{sea} составляет 0.5, а соответствующее значение для суши $\epsilon_{land} = 0.9$. Это обеспечивает существенные различия в регистрируемых сигналах при наблюдении участков водной поверхности и земли. Так, зафиксировав физическую температуру двух сред на уровне 270 К, мы получим 243 К для наблюдений суши и всего 135 К для воды.

Если географическая привязка выполнена корректно, то расхождения между измерениями, полученными на восходящих и нисходящих полувитках для одного и того же элемента поверхности будут незначительными (естественно, в сравнении с разницей яркостной температурой воды и суши) и обусловлены суточными вариациями физической температуры, излучательной способности и условий проведения измерений. В среднем это значение редко превышает 20 К (для любых частотных каналов и поляризаций при угле встречи с землей 50...65°).

При возникновении ошибок в геопривязке (по любой из причин, описанных во Введении) происходит сдвиг формируемых радиометрических изображений относительно реальной географической карты. При этом измерения, относимые к поверхности суши, в реальности соответствуют водной поверхности, и наоборот. Величина ошибки в измеряемой яркости при этом превышает 100 К, что существенно выше вариаций радиояркостности из-за изменения любых физических параметров системы и в связи с этим может служить надежным индикатором качества геопривязки. Следует отметить, что это имеет зеркальный эффект для восходящих и нисходящих полувитков, а при расчете карты распределения параметра $\Delta T_b = T_{b_asc} - T_{b_disc}$ (T_{b_asc} и T_{b_disc} — результаты измерений на восходящих и нисходящих полувитках, соответственно) ошибка складывается и достигает 200 К. Естественно, что данный эффект проявляется в точках перехода “вода—суша”, т.е. вблизи береговых линий.

Следует обратить внимание, что по внешнему виду распределения функции ΔT_b у береговых линий можно, не проводя дополнительных расчетов, определить потенциальный источник возникающих ошибок в геопривязке. Так, вариации углов тангажа и появление ошибок установки временных меток приводят к существенному росту ΔT_b на северных и южных береговых линиях островов и континентов, пересекаемых условной траекторией движения спутника перпендикулярно. При этом знак функции ΔT_b указывает на положительный/отрицательный угол тангажа или запаздывание/опережение временных меток. Аналогичные выводы можно сделать в ходе анализа характера ΔT_b у восточных/западных береговых линий (пересекаемых перпендикулярно лучом сканирования), учитывая, что они идентифицируют появление углов рыскания и крена.

АЛГОРИТМ ПОИСКА КОРРЕКТИРУЮЩИХ УГЛОВ

Предложенный в настоящей работе алгоритм поиска корректирующих углов крена, тангажа и рыскания схож с описанным в публикации (Moradi et al., 2013). Среди основных отличий следует указать два, и оба обусловлены различием в схемах сканирования. Так, инструмент AMSU имеет поперечное сканирование, а прибор МТВЗА-ГЯ — коническое. Это, с одной стороны, позволяет при работе с данными измерений МТВЗА-ГЯ избежать вариаций яркости подстилающей поверхности за счет изменения угла встречи с землей, а значит, выбор пороговой разницы функции ΔT_b упрощается ввиду ее большей стабильности. С другой стороны, при поперечном сканировании существенно упрощаются функциональные зависимости ΔT_b от искомым углов крена, тангажа и рыскания системы. В свою очередь, это приводит к отсутствию ярко выраженных локальных минимумов минимизируемой функции и позволяет осуществлять независимый последовательный подбор интересующих углов. За счет более сложной геометрии сканирования у МТВЗА-ГЯ (естественно, речь идет о сложности связи получаемых распределений ΔT_b вблизи береговых линий при изменении каждого из корректирующих углов) последовательный подбор углов оказывается невозможным ввиду постоянного “сваливания” решений в локальные минимумы и существенным ошибкам получаемых решений. Наиболее простым выходом из данной ситуации видится одновременная генерация и смена всех трех корректирующих углов на каждой итерации.

Общая схема алгоритма представлена на рис. 1.

На первом этапе реализации алгоритма происходит установка параметров поиска и начальных

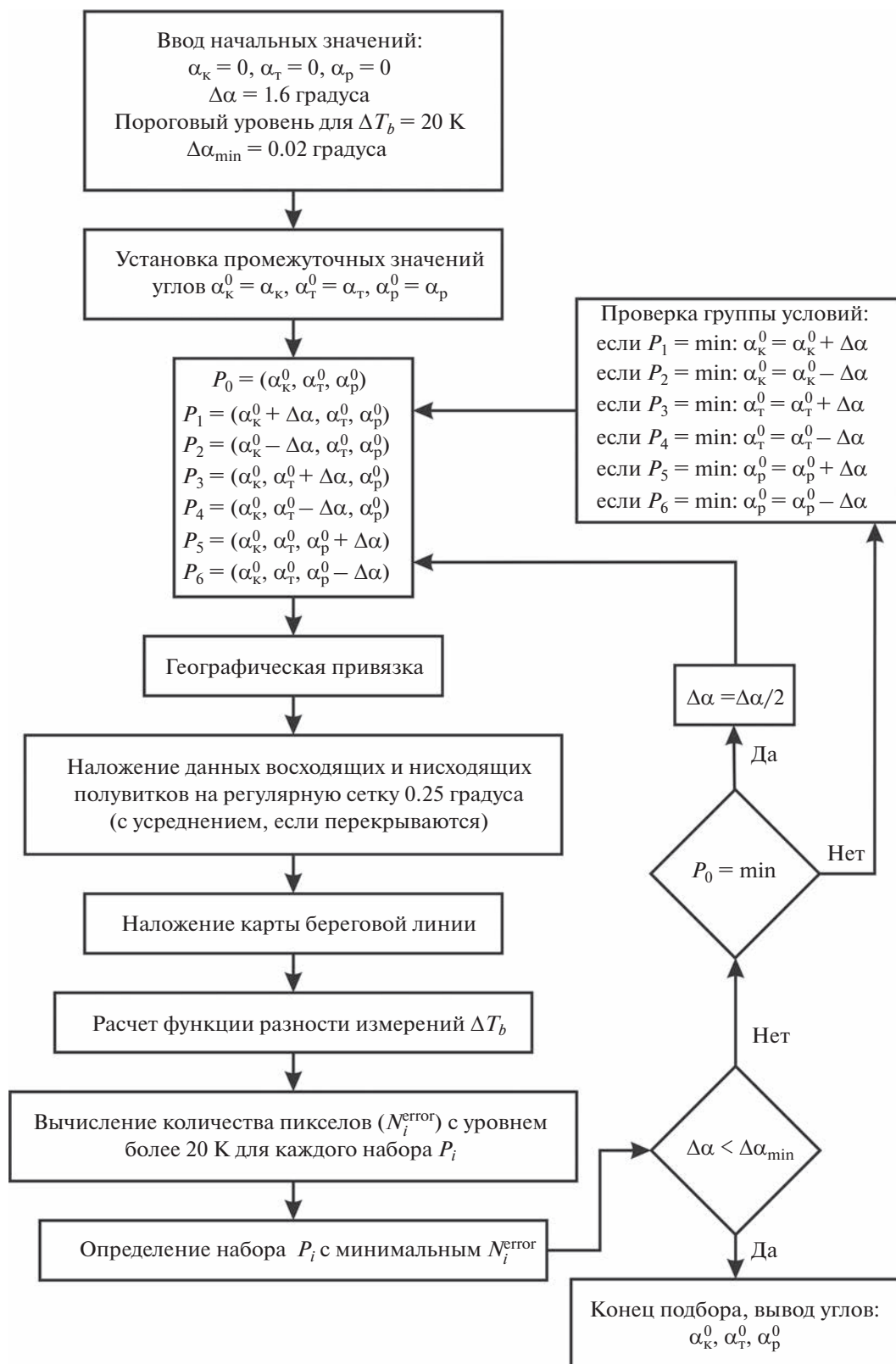


Рис. 1. Общая схема алгоритма поиска корректирующих углов крена, тангажа и рыскания для МТВЗА-ГЯ.

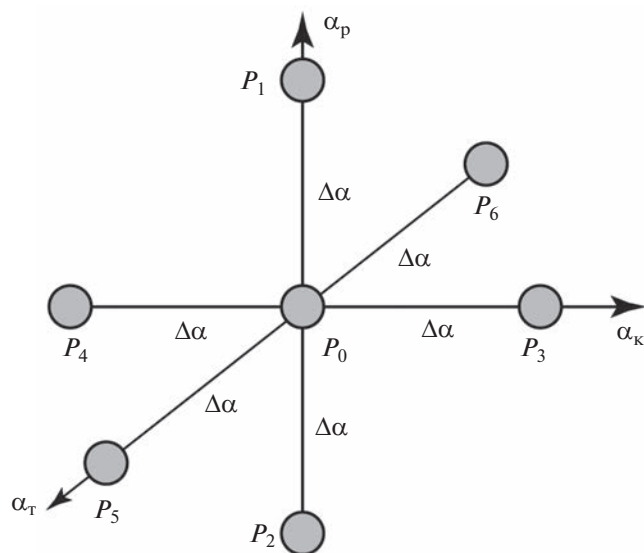


Рис. 2. Расположение сформированных наборов углов в пространстве углов крена, тангажа и рыскания.

значений искомых углов: начальные углы крена α_k^0 , тангажа α_t^0 и рыскания α_p^0 имеют нулевые значения; шаг изменения угла для текущей итерации $\Delta\alpha = 1.6^\circ$ (одинаковый для всех трех углов); уровень функции ΔT_b , при превышении которого будет принято решение об ошибочной географической привязке пикселя, равен 20 К; минимально допустимый шаг по углу, при котором принимается решение о завершении поиска $\Delta\alpha_{\min}$, составляет 0.02° .

Далее, на основании входных данных, выполняется формирование семи наборов (P_i) корректирующих углов по следующему алгоритму (графическое представление наборов в пространстве этих углов приведено на рис. 2):

$$\begin{aligned} P_0 &= (\alpha_t^0, \alpha_k^0, \alpha_p^0), \\ P_1 &= (\alpha_t^0 + \Delta\alpha, \alpha_k^0, \alpha_p^0), \\ P_2 &= (\alpha_t^0 - \Delta\alpha, \alpha_k^0, \alpha_p^0), \\ P_3 &= (\alpha_t^0, \alpha_k^0 + \Delta\alpha, \alpha_p^0), \\ P_4 &= (\alpha_t^0, \alpha_k^0 - \Delta\alpha, \alpha_p^0), \\ P_5 &= (\alpha_t^0, \alpha_k^0, \alpha_p^0 + \Delta\alpha), \\ P_6 &= (\alpha_t^0, \alpha_k^0, \alpha_p^0 - \Delta\alpha). \end{aligned}$$

Для каждого из сформированных наборов, на основе суточных измерений МТВЗА-ГЯ (включающих 14 восходящих и 14 нисходящих полувитков) выполняется операция географической при-

вязки в соответствии с методикой, разработанной авторами настоящей публикации и подробно описанной в работе (Садовский, Сазонов, 2022а). В результате этой операции каждому измерению МТВЗА-ГЯ ставятся в соответствие географические координаты на поверхности Земли. Результаты географической привязки накладываются на регулярную сетку с шагом 0.25° отдельно для восходящих и нисходящих полувитков. Далее рассчитываются функции разности измерений ΔT_b для тех областей, где имеются пересечения полос обзора. Следует отметить, что несмотря на то, что однократное выполнение перечисленных операций требует малых затрат машинного времени, их повторение при дальнейших итерациях становится заметным. В связи с этим в целях ускорения вычислений, во-первых, анализируются лишь прибрежные зоны (полосы шириной 400 км, ± 200 км от истинной береговой линии), и, во-вторых, не по всей поверхности Земли, а только в выделенных тестовых полигонах (их описание будет дано в следующем разделе). В результате выполненной операции формируются изображения (карты распределения ΔT_b), аналогичные представленным на рис. 3. На них выделяются пиксели, в которых величина ΔT_b превышает заданный пороговый уровень (20 К) (см. рис. 3) и производится подсчет их количества N_i^{error} . Индекс “i” соответствует каждому из семи наборов углов P_i .

Сравнивая между собой полученные значения N_i^{error} можно выделить набор углов, для которых N_i^{error} имеет минимальное значение. В случае если оно соответствует “центральному” набору P_0 , то на следующей итерации он останется неизменным, но проводится уменьшение шага по углу $\Delta\alpha$ вдвое, и все перечисленные операции алгоритма повторяются для вновь сформированных наборов P_i . Если же минимальное число пикселей соответствует другому набору углов (не P_0), то именно он становится “центральным” (P_0) на следующей итерации и, как и в первом случае, все операции алгоритма повторяются (с сохранением прежнего шага $\Delta\alpha$).

Критерием нахождения оптимального сочетания корректирующих углов крена, тангажа и рыскания или, другими словами, критерием завершения итерационного цикла описанных операций становится достижение шага $\Delta\alpha$ заданного значения $\Delta\alpha_{\min}$ (в нашем случае 0.02°). Для геометрии сканирования МТВЗА-ГЯ подобная точность подбора корректирующих углов геопривязки соответствует смещению по поверхности Земли на величину ~ 0.8 км, что более чем достаточно с учетом размера элемента разрешения МТВЗА-ГЯ (16 км).

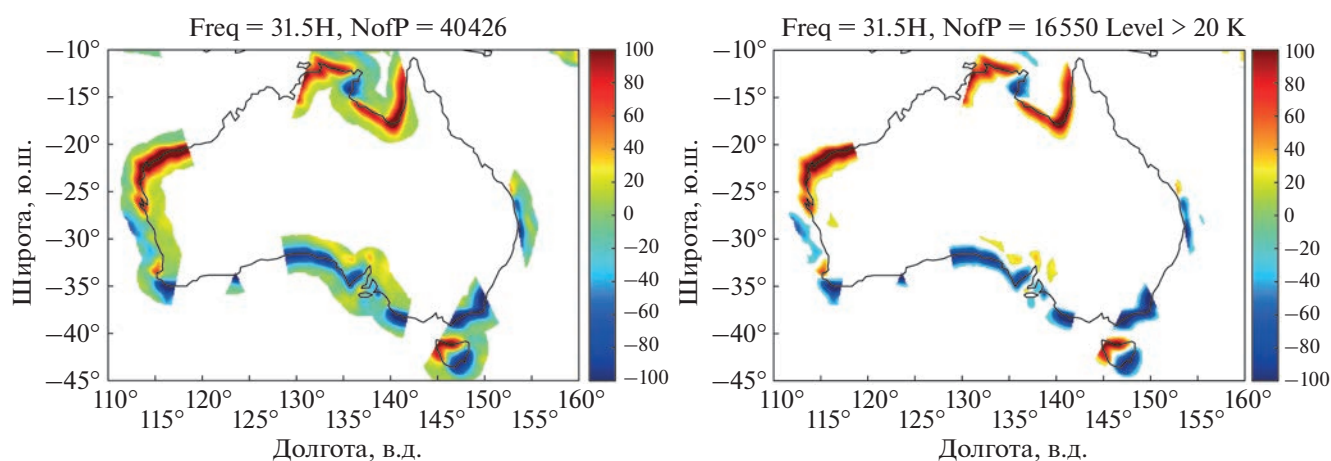


Рис. 3. Демонстрация результатов расчета функции ΔT_b в прибрежной зоне (слева) и выделения пикселей в соответствии с заданным критерием (справа).

В рамках выполненных исследований были рассмотрены следующие вопросы: использование в рамках алгоритма разных пороговых уровней функции ΔT_b ; изменение ширины прибрежной полосы, где проводится анализ; возможность работы с изображениями, синтезированными за три и семь дней измерений. Не вдаваясь в детали можно утверждать, что отклонение от описанных выше настроек алгоритма приводило к снижению точности решения задачи либо за счет резкого уменьшения объема выборки, либо за счет существенного сглаживания глобального минимума функции $N^{error}(\alpha_t, \alpha_k, \alpha_p)$. Оптимизация данных параметров алгоритма не была целью настоящей работы, и этот вопрос будет рассмотрен в будущем.

ПОИСК КОРРЕКТИРУЮЩИХ УГЛОВ ДЛЯ МТВЗА-ГЯ

Описанный выше алгоритм поиска корректирующих углов крена, тангажа и рыскания применялся для полного набора данных измерений МТВЗА-ГЯ, полученных с этого прибора за 2020 г. Данные измерений, прошедшие первичную обработку до уровня L1B (с использованием программного комплекса предварительной обработки измерений МТВЗА-ГЯ) были предоставлены для анализа сотрудниками АО «Российские космические системы». После сортировки (включающей выбраковывание ошибочных и неполных данных), выполняемой в автоматическом режиме комплексом предварительной обработки, набор данных составил 281 сутки измерений.

Для каждого дня измерений выполнялся поиск оптимальных корректирующих углов в соответствии с алгоритмом, описанным выше. Независимо анализировались данные на частотах МТВЗА-ГЯ, слабо

(или относительно слабо) подверженных влиянию атмосферных процессов. К ним были отнесены частотные каналы 10.5, 18.7, 23.8, 31.5 и 36.7 ГГц. Для всех частотных каналов использовались результаты измерений, полученные только на горизонтальной поляризации, учитывая, что на угле встречи с Землей, соответствующей геометрии сканирования МТВЗА-ГЯ, именно горизонтальной поляризации соответствует максимальная разность в излучении суши и водной поверхности.

Выделение прибрежных зон, в пределах которых проводилась минимизация функции ΔT_b , выполнялось для каждой из четырех тестовых зон, выбранных для анализа: «Австралия», «Африка», «Южная Америка» и «Средиземноморье» (рис. 4). В случае если для какой-либо из зон отсутствовали данные измерений (нисходящих, восходящих или обоих типов), она исключалась из анализа.

Таким образом, задача поиска оптимальных корректирующих углов крена, тангажа и рыскания МТВЗА-ГЯ была решена более 5.5 тыс. раз (281 день, 4 тестовые зоны, 5 частот), на что потребовалось (с учетом распараллеливания вычислительных процессов) более 15 суток машинного времени. Результаты вычислений группировались по частотам и тестовым зонам. В качестве примера на рис. 5 приведены результаты определения углов крена, тангажа и рыскания для региона «Африка», полученные при работе с частотой 37.5 ГГц.

Анализ представленных данных позволяет сделать следующие выводы: найденные значения корректирующих углов имеют ярко выраженные средние значения, обладающие малой дисперсией и практически во всех из них (об этом будет сказано ниже) отсутствуют сезонные тренды. Максимальный разброс в абсолютных величинах наблюдается для угла рыскания, далее следуют углы крена и

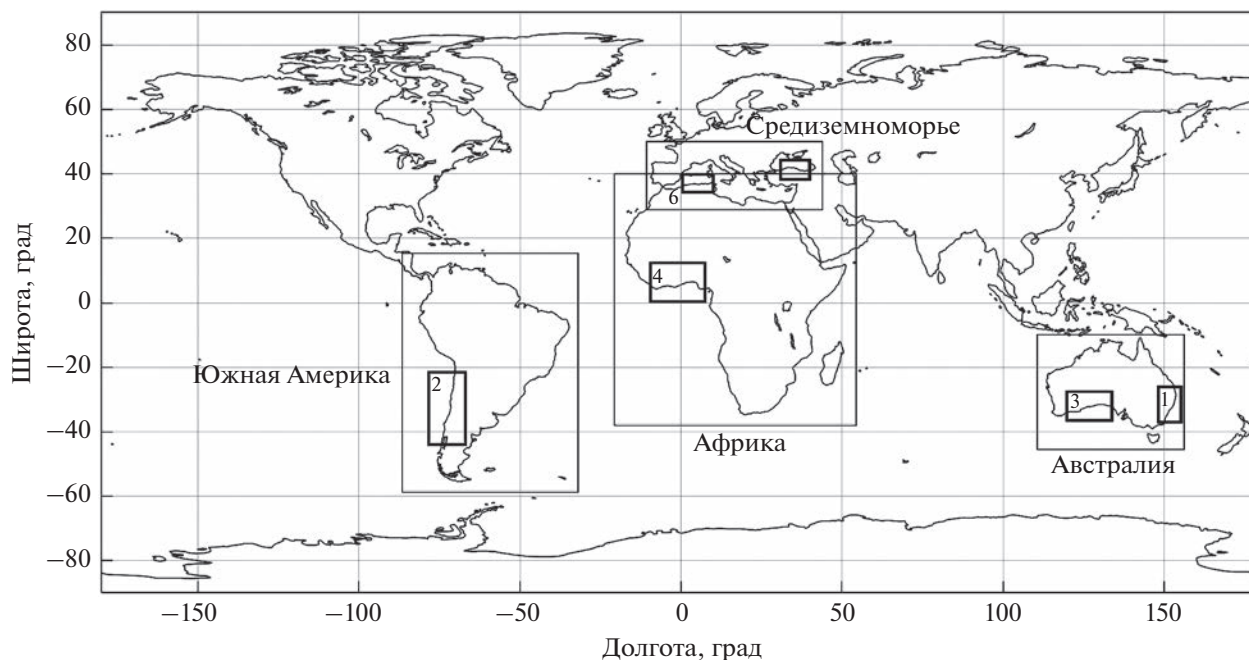


Рис. 4. Расположение тестовых зон, использованных в алгоритме (тонкие сплошные линии), а также тестовых участков с указанием номеров, для которых проводилась итоговая оценка качества геопривязки (толстые сплошные линии).

тангажа. При этом решения, получаемые для углов рыскания и крена, находятся в противофазе, что легко объясняется с учетом их влияния на поведение пятна диаграммы направленности антенны на поверхности (Садовский, Сазонов, 2022а).

Результаты обработки, полученные для каждой тестовой зоны и всех анализируемых частот (аналогичные представленным на рис. 5), усреднились с нахождением величины среднеквадратического отклонения σ . На рис. 6 приведены обобщенные зависимости среднегодовых значений α_k , α_t и α_p от частоты канала. Границы доверительных интервалов установлены на уровне $\pm\sigma$. Разные цвета соответствуют каждой из четырех тестовых зон. Анализ представленных зависимостей позволяет сделать следующие выводы: значения, полученные для разных регионов, изменяются синхронно с частотой анализируемого канала; значения, полученные для “Южной Америки” и “Австралии” практически совпадают; аналогичное замечание касается “Африки” и “Средиземноморья”; значения, полученные на частотах 18.7, 31.5 и 36.7 ГГц, отличаются на величину, меньшую среднеквадратического отклонения.

Вопрос об особенностях поведения корректирующих углов на частотах 10.5 и 23.8 ГГц рассматривался отдельно. Так, на примере модельной задачи было показано, что сильная асимметрия пятна диаграммы направленности антенны на поверхности существенно изменяет радиотепло-

вой портрет береговой зоны, становящийся, по сути, функцией угла взаимной ориентации береговой линии и траекторией полета спутника-носителя. Данный вывод хорошо согласуется с результатами, полученными для частоты 10.5 ГГц, для которого, с учетом геометрии сканирования МТВЗА-ГЯ и размеров апертуры его антенной системы, пятно диаграммы направленности имеет форму эллипса с размерами порядка 198×89 км. В связи с наличием такой особенности результаты, полученные на этом частотном канале, были исключены из дальнейшего анализа.

Также были исключены и результаты, полученные на частоте 23.8 ГГц в связи с их высокой чувствительностью к концентрации водяного пара в атмосфере. На примере тестовой зоны “Австралия” было показано, что сильное расширение экваториальной зоны повышенной влажности в зимний период приводит к тому, что разность значений среднесуточной измеряемой яркостной температуры суши и океана (с учетом атмосферы) падает до величин, не позволяющих корректно реализовать предложенный алгоритм для северного побережья “Австралии” (как и для других, близких к экватору областей). Это, в свою очередь, приводит к возникновению ошибок сезонного характера, не обнаруживаемых на других частотных каналах.

К настоящему моменту так и не решен вопрос о причинах существенных отличий результатов для тестовой зоны “Средиземноморье”. Как вид-

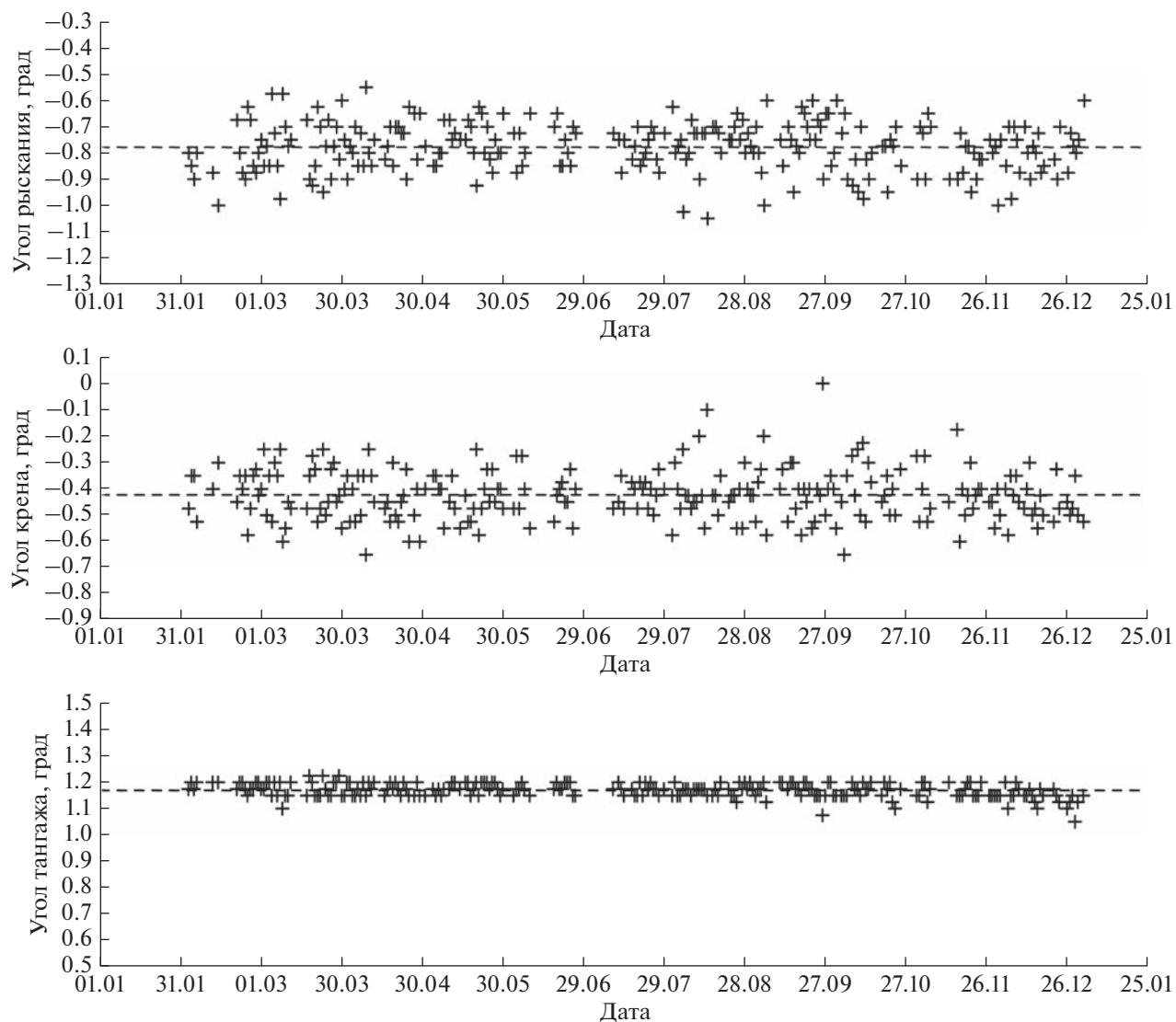


Рис. 5. Результаты определения корректирующих углов крена, тангажа и рыскания по данным измерений МТВЗА-ГЯ за 2020 год. Каждая точка — результат обработки данных за одни сутки. Частота — 37.5 ГГц. Горизонтальная поляризация. Тестовый регион — “Африка”.

но из представленных зависимостей, отличающиеся результаты получены для всех оставшихся каналов: 18.7, 31.5 и 36.7 ГГц. По предположению авторов это представляется следствием достаточно сложной формы береговой линии, не свойственной другим тестовым зонам. В силу того, что объективных причин для исключения этой тестовой зоны у авторов не было, результаты данного региона вошли в итоговую статистику решений.

Усреднение полученных решений по всем частотным каналам и тестовым зонам позволило получить итоговые значения углов крена, тангажа и рыскания для корректировки географической привязки данных МТВЗА-ГЯ: $\alpha_p = (-0.84 \pm 0.15)^\circ$, $\alpha_k = (-0.44 \pm 0.14)^\circ$ и $\alpha_t = (+1.13 \pm 0.05)^\circ$.

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ГЕОПРИВЯЗКИ МТВЗА-ГЯ

Как уже было отмечено ранее, один из подходов в поиске корректирующих углов крена, тангажа и рыскания — минимизация расхождений истинной береговой линии и восстановленной по радиометрическим изображениям. Его реализация требует существенных вычислительных мощностей, что вызывает серьезные проблемы при обработке больших массивов данных (результаты измерений за год, работа с полными радиометрическими портретами Земли). С учетом этого факта, а также высокой точности данного подхода метод был использован авторами в качестве независимой оценки качества географической привязки данных МТВЗА-ГЯ.

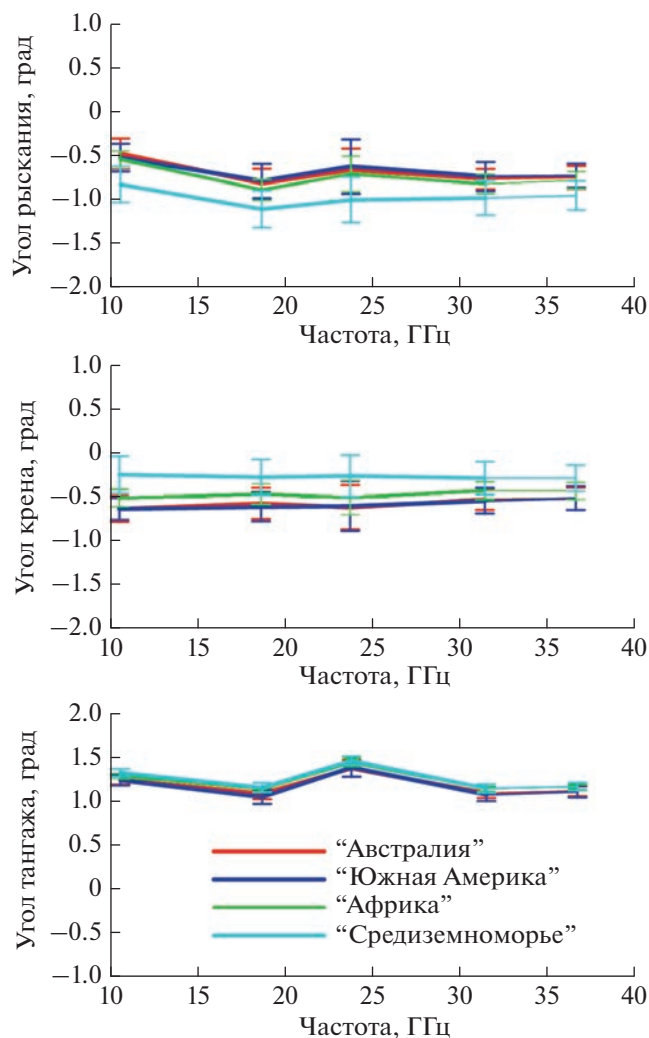


Рис. 6. Усредненные за год значения корректирующих углов крена, тангажа и рыскания. Комментарии приведены в тексте.

Физической основой подхода служит наличие как сильной разницы в излучении суши и океана, так и эффекта свертки наблюдаемой истинной картины уходящего излучения поверхности с диаграммой направленности антенны радиометрического приемника. Исходная картина излучения имеет резкие (в масштабах геометрии спутниковых измерений) границы в интенсивности излучения при переходе “вода—суша” (в случае горизонтальной поляризации, скачок составляет более 100 K). Антенная система приемника, двигаясь вдоль линии сканирования, пересекающей береговую линию, сглаживает этот переход. Таким образом, задача определения точки пересечения линии визирования радиометра с реальной береговой линией сводится к определению положения максимума производной яркостной тем-

пературы, как функции координат элемента разрешения на поверхности.

Исследованию особенностей поиска координат береговой линии по радиометрическим изображениям посвящено достаточно большое количество работ. Основные сложности представляют сильно изрезанные береговые линии, когда их радиус кривизны оказывается меньше характерных размеров элемента разрешения антенной системы радиометра. Дополнительные сложности вызывают атмосферные явления на частотах, чувствительных к вариациям температуры и влажности нижних слоев тропосферы. Помимо этого, усложнение задачи происходит в случае, если траектория сканирования отличается от прямой линии (как в случае систем с поперечным сканированием) и представляет собой сектор винтовой линии, вытянутой вдоль траектории подспутниковой точки (как в случае систем с коническим сканированием, к которым относится МТВЗА-ГЯ).

В качестве первой самостоятельной реализации указанного подхода к данным МТВЗА-ГЯ коллективом авторов была выполнена следующая процедура. На первом шаге результаты измерений накладывались на регулярную сетку размером 0.25° . Далее были отобраны несколько тестовых полигонов, включающих протяженные участки береговых линий (см. рис. 4). При этом соблюдалось выполнение трех основных требований — максимальная гладкость, меридиональная или параллельная ориентация, наличие “зеркальных” пар тестовых участков (например, тестовый участок с меридиональным расположением береговой линии и восточным расположением суши дополнялся меридиональным полигоном с восточным расположением морской поверхности). Далее, в соответствии с описанным выше подходом, определялось положение береговой линии на радиометрических изображениях (рис. 7, красная сплошная линия на левом изображении). При этом анализировались зависимости яркостной температуры не вдоль истинных траекторий сканирования на поверхности, а вдоль фиксированных меридианов и параллелей. На следующем шаге определялось расстояние между истинной береговой линией (см. рис. 7, черная сплошная линия на левом изображении) и восстановленной (красная сплошная линия). Здесь также вычислялось расстояние между кривыми вдоль одной широты (среднее изображение на рис. 7). На последнем этапе оценивались статистические параметры полученных расхождений для каждого из тестовых участков (правое изображение на рис. 7).

Применение описанного подхода при анализе качества географической привязки данных МТВЗА-ГЯ позволило получить следующие результаты:

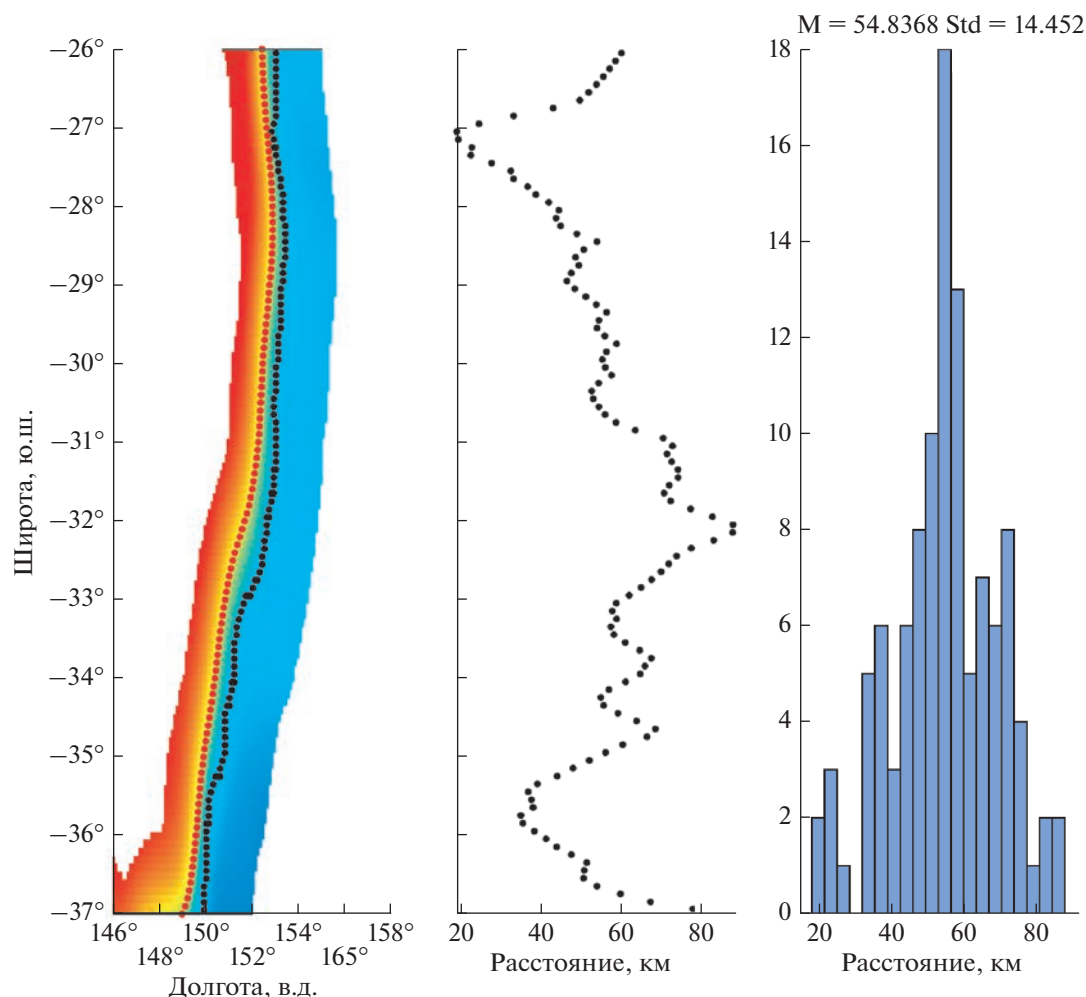


Рис. 7. К вопросу определения точности географической привязки по расположению истинной и восстановленной береговой линии. Оценка качества геопривязки МТВЗА-ГЯ без использования корректирующих коэффициентов. Тестовый участок № 1 на восточном побережье Австралии. Пояснения даны в тексте.

1. Если при географической привязке МТВЗА-ГЯ не используются корректирующие углы крена, тангажа и рыскания, то средние значения смещения истинной и восстановленной береговых линий (для шести тестовых полигонов) составляют 53.70 ± 13.61 км.

2. В настоящее время при использовании корректирующих углов (информация, что углы используются, получена из личного обсуждения с разработчиками аппаратуры, но их точные значения неизвестны), комплекс предварительной оперативной обработки данных МТВЗА-ГЯ обеспечивает точность геопривязки в диапазоне 20.03 ± 6.77 км.

3. Использование приведенных в настоящей работе корректирующих углов позволяет достичь расхождения между истинной и восстановленной береговыми линиями в 4.36 ± 3.54 км.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный в настоящей работе алгоритм позволяет определять смещение системы координат инструмента МТВЗА-ГЯ относительно системы координат спутника-носителя “Метеор-М” № 2-2. Предложенный подход основан на сравнении синтезированных суточных полей разности измерений, поступающих со сканера-зондировщика на восходящих и нисходящих полувитках. В результате применения его к данным измерений МТВЗА-ГЯ, полученным за 2020 г., было показано, что МТВЗА-ГЯ имеет ошибку ориентации относительно строительных осей спутника-носителя, характеризующуюся следующими значениями: угол рыскания составляет $(-0.84 \pm 0.15)^\circ$, угол крена $(-0.44 \pm 0.14)^\circ$, угол тангажа $(+1.13 \pm 0.05)^\circ$. Приведенные значения соответствуют всем частотным каналам, поскольку в МТВЗА-ГЯ реализована функция аппаратного совмещения лучей,

а результаты измерений на всех частотах и поляризациях сопровождаются едиными координатами наблюдаемых элементов поверхности. Использование найденных корректирующих углов при реализации операции географической привязки данных МТВЗА-ГЯ позволило практически в пять раз улучшить ее точность и обеспечить совпадение формируемого радиометрического портрета и географической карты с ошибкой порядка 4.5 км.

Авторы надеются, что наличие детального описания операции географической привязки данных МТВЗА-ГЯ (Садовский и Сазонов, 2022а) и материалов данной публикации обеспечат возможность самостоятельной реализации и корректировки этого процесса заинтересованными пользователями, что будет способствовать повышению востребованности данных МТВЗА-ГЯ при решении практических задач дистанционного зондирования Земли. Также авторы выражают надежду, что проведенные исследования будут полезны при обработке данных последующих приборов этой серии.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

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

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность: Комаровой Н.Ю. (ИКИ РАН) за помощь в оформлении материалов работы; А.М. Стрельцову (АО “Российские космические системы”) за своевременное и оперативное предоставление преобразованных данных измерений МТВЗА-ГЯ, использованных в работе; А.А. Мазурову (ИКИ РАН) за полезное обсуждение получаемых результатов.

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>
- Садовский И.Н. Корректировка географической привязки данных микроволнового сканера-зондировщика МТВЗА-ГЯ // Материалы 19-й Международ. конф. “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН, Москва. 2021. С. 58. <https://doi.org/10.21046/19DZZconf-2021a>.
- Садовский И.Н., Сазонов Д.С. (2022а) 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. (2022б) Повышение точности географической привязки данных измерений МТВЗА-ГЯ // Материалы 20-й Международной конференции “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. 14–18 нояб. 2022, ИКИ РАН, Москва. 2022. С. 63. <https://doi.org/10.21046/20DZZconf-2022a>.
- Han Y., Weng F., Zou X., Yang H., Scott D. Characterization of geolocation accuracy of Suomi NPP Advanced Technology Microwave Sounder measurements // J. Geophysical Research: Atmospheres. 2016. V. 121. P. 4933–4950. <https://doi.org/10.1002/2015JD024278>
- Moradi I., Meng H., Ferraro R.R., Bilanow S. Correcting Geolocation Errors for Microwave Instruments Aboard NOAA Satellites // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2013. V. 51. Iss. 6. P. 3625–2637. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2225840>
- Poe G.A., Uliana E.A., Gardiner B.A., von Rentzell T.E., Kunkel D.B. Geolocation Error Analysis of the Special Sensor Microwave Imager/Sounder // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2008. V. 46. Iss. 4. P. 913–922. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.917981>
- Purdy W.E., Gaiser P.W., Poe G.A., Uliana E.A., Meissner T., Wentz F.J. Geolocation and Pointing Accuracy Analysis for the WindSat Sensor // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2006. V. 44. Iss. 3. P. 496–505. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.858415>
- Wiebe H., Heygste G., Meyer-Lerbs L. Geolocation of AMSR-E data // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2008. V. 46. Iss. 10. P. 3098–3103. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.919272>
- Zhou J., Yang H., Anderson K. SNPP ATMS On-Orbit Geolocation Error Evaluation and Correction Algorithm // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2019. V. 57. Iss. 6. P. 3802–3812. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2887407>

Correction Procedure for MTVZA-GYa Georeference

I. N. Sadovsky¹ and D. S. Sazonov¹

¹Space Research Institute, Moscow, Russia

This paper presents a description of an approach that makes it possible to control the quality of the MTVZA-GYa georeferencing and determine the optimal values of the corrective parameters. The analysis of the data

of this instrument showed that the main contribution to the georeferencing errors are made by the angles of roll, pitch and yaw, which determine the mismatch between the instrumental coordinate system and the spacecraft coordinate system. In this regard, an iterative algorithm for detecting these angles was proposed, where the difference in measurements on the ascending and descending orbit half-passes of the MTVZA-GYa was used as the minimized function. As a result of applying this algorithm to the results of measurements of the MTVZA-GYa for 2020, the average values of the correcting roll, pitch and yaw angles of this instrument were calculated. The following values were found: $(-0.84 \pm 0.15)^\circ$ for yaw angle, $(-0.44 \pm 0.14)^\circ$ for roll angle and $(+1.13 \pm 0.05)^\circ$ for the pitch angle. It was shown that the introduction of these angles into the MTVZA-GYa georeferencing procedure can significantly reduce its errors. Thus, the average discrepancy between coastlines borrowed from high-precision geographic databases and reconstructed from radiometric portraits is 4.5 km when georeferencing is performed using this correction angles.

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 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. priborostroenie 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 sputnikov 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>
- Sadovsky I.N. Korrekcirovka geograficheskoi privyazki dannykh mikrovolnovogo skanera-zondirovshchika MTVZA-GYa [Correction of georeferencing data of the microwave scanner-sounder MTVZA-GYa] // Materialy 19-i Mezhdunarod.konf. "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa". 15–19 Nov. 2021, IKI RAN, Moskva. 2021. P. 58. (In Russian).
<https://doi.org/10.21046/19DZZconf-2021a>
- Sadovsky I.N., Sazonov D.S. (2022a) 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. (2022b) Povyshenie tochnosti geograficheskoi privyazki dannykh izmerenii MTVZA-GYa [Improving the accuracy of georeferencing of MTVZA-GYa measurements data] // Materialy 20-i Mezhdunarodnoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa". 14–18 nov. 2022, IKI RAN, Moskva. 2022. P. 63. (In Russian).
<https://doi.org/10.21046/20DZZconf-2022a>
- Han Y., Weng F., Zou X., Yang H., Scott D. Characterization of geolocation accuracy of Suomi NPP Advanced Technology Microwave Sounder measurements // J. Geophysical Research: Atmospheres. 2016. V. 121. P. 4933–4950.
<https://doi.org/10.1002/2015JD024278>
- Moradi I., Meng H., Ferraro R.R., Bilanow S. Correcting Geolocation Errors for Microwave Instruments Aboard NOAA Satellites // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2013. V. 51. Iss. 6. P. 3625–3637.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2225840>
- Poe G.A., Uliana E.A., Gardiner B.A., von Rentzell T.E., Kunkee D.B. Geolocation Error Analysis of the Special Sensor Microwave Imager/Sounder // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2008.V. 46. Iss. 4. P. 913–922.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.917981>
- Purdy W.E., Gaiser P.W., Poe G.A., Uliana E.A., Meissner T., Wentz F.J. Geolocation and Pointing Accuracy Analysis for the WindSat Sensor // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2006.V. 44. Iss. 3. P. 496–505.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.858415>
- Wiebe H., Heygste G., Meyer-Lerbs L. Geolocation of AMSR-E data // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2008.V. 46. Iss. 10. P. 3098–3103.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.919272>
- Zhou J., Yang H., Anderson K. SNPP ATMS On-Orbit Geolocation Error Evaluation and Correction Algorithm // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2019. V. 57. Iss. 6. P. 3802–3812.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2887407>