

Выбор потенциальных полигонов для внешней калибровки российского сканера/зондировщика МТВЗА-ГЯ

И. Н. Садовский, Д. С. Сазонов

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия

E-mail: Ilya_Nik_Sad@mail.ru

Представлено описание подхода к выявлению зон на поверхности суши, пригодных для выполнения операции внешней калибровки частотных каналов российского сканера/зондировщика МТВЗА-ГЯ (Модуль температурно-влажностного зондирования атмосферы, ГЯ — в память о Геннадии Яковлевиче Гуськове (1918–2002)). Метод основан на оценке статистических характеристик эффективного коэффициента излучения системы «подстилающая поверхность — атмосфера». Для расчёта мгновенных значений данного параметра были использованы результаты измерений МТВЗА-ГЯ, полученные прибором за 2020 г., а также данные о температуре поверхности, заимствованные из базы данных реанализа MERRA-2 (*англ.* Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications version 2). Дальнейшая оценка среднеквадратичного отклонения эффективного коэффициента излучения для каждого элемента регулярной сетки с шагом $0,25^\circ$ позволяет судить о вариативности параметров суши и приземного слоя атмосферы в его пределах. Выделение участков с наименьшими значениями оцениваемого параметра позволяет выявлять области, наиболее предпочтительные для выполнения внешней калибровки отдельных частотных каналов МТВЗА-ГЯ. Объединение этих зон, индивидуальных для каждой частоты и оформленных в виде масок, выполняется на основе построения соответствующих обобщённых глобальных полей, наглядно отражающих расположение полигонов, оптимальных для калибровки. В работе представлено описание основных этапов предлагаемого подхода, рассмотрены проблемы, возникающие при их реализации, намечены основные пути её дальнейшего совершенствования. Также приведены первичные результаты поиска соответствующих полигонов для калибровки на территории Российской Федерации.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, СВЧ-радиометрия, микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ГЯ, спутник, данные реанализа, внешняя калибровка

Одобрена к печати: 28.12.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-26-39

Введение

Калибровка радиометрических приёмников ставит своей целью нахождение связи между амплитудой выходного сигнала радиометрического приёмника U и антенной температурой, которая поступает на его вход, T_A . Принципиально, между T_A и U (напряжение, коды аналого-цифрового преобразователя и пр.) должна существовать линейная зависимость типа

$$U = aT_A + b,$$

где a и b — мгновенные значения крутизны и начальной шкалы калибровочной функции (калибровочные коэффициенты).

Исходя из линейной зависимости между U и T_A , для калибровки радиометрической шкалы достаточно к входу радиометрического приёмника периодически подключать два излучателя с точно известными величинами яркостной температуры T_{Br_1} и T_{Br_2} (которые в данной постановке совпадают со значениями антенной температуры T_{A_1} и T_{A_2}) и фиксировать соответствующие выходные сигналы U_1 и U_2 . При условии, что при такой калибровке сигналы проходят через весь тракт от самого его входа и до выхода, значения коэффициентов a и b могут быть легко найдены в виде:

$$a = \frac{U_1 - U_2}{T_{A_1} - T_{A_2}} \text{ и } b = \frac{T_{A_1} U_2 - T_{A_2} U_1}{T_{A_1} - T_{A_2}}. \quad (1)$$

На практике применение указанного метода калибровки, достаточно простого на первый взгляд, сопряжено с серьёзными техническими проблемами. Одной из них становится сложность создания двух прецизионных эталонов антенной температуры. Используемые для этих целей модели абсолютно чёрных тел, во-первых, довольно сложны в изготовлении (форма, химический состав и однородность структуры, определяющие степень их черноты χ), а, во-вторых, самостоятельной задачей представляется измерение их физической температуры T_0 в пределах эффективной глубины формирования излучения на выделенной частоте. Помимо этого, точность расчёта по соотношению (1) тем выше, чем больше разница антенной температуры T_{A_1} и T_{A_2} . В связи с этим (имея в виду, что $T_A = \chi T_0$) одно из абсолютно чёрных тел обычно охлаждают до температуры жидкого азота. Вторая проблема обусловлена температурным дрейфом составляющих радиоэлектронных компонент и СВЧ-трактов (определяющих не только уровень собственных шумов радиометра, но и вариации коэффициентов a и b), что требует проведения калибровки с достаточно высокой периодичностью (помимо обязательного условия максимальной термостабилизации прибора).

Ситуация усложняется ещё больше при включении в схему измерений антенной системы для пространственной селекции источников излучения, что обязательно при решении задач дистанционного зондирования. Даже калибровка в терминах антенной температуры уже ужесточает требования к моделям абсолютно чёрных тел — увеличение их линейных размеров, обеспечение равномерности температуры, угловая анизотропия степени черноты и пр. При необходимости выполнения калибровки в терминах яркостной температуры зондируемого объекта T_{Br} , оказывающегося включённым в T_A посредством свёртки излучения, приходящего с разных направлений, с диаграммой направленности антенной системы, зачастую требуется привлечение сложных моделей формирования и переноса излучения окружающего пространства/объектов (т.е. зависит от схемы измерений и конкретного места их реализации).

При калибровке радиометров спутникового базирования требуется учитывать ограничения по энергоёмкости систем термостабилизации, снижение эффективности отвода тепла и т.д. на фоне постоянно меняющихся режимов освещённости и температуры (в существенно больших пределах по сравнению с земными условиями). Также следует принимать во внимание расположение приёмника на носителе (с учётом возможного переотражения солнечного излучения элементами конструкции на разных участках орбиты) и проводить оценки влияния со стороны других приборов, составляющих полезную нагрузку аппарата.

Всё вышесказанное свидетельствует о том, что качественная калибровка спутниковых радиометрических инструментов представляет собой технически и методологически сложную операцию, являясь при этом одним из ключевых этапов обработки результатов измерений (Митник, Митник, 2016). Точность калибровки, в свою очередь, напрямую влияет на качество продуктов, построенных на их основе.

Описанию процедуры калибровки российских сканеров/зондировщиков серии МТВЗА-ГЯ (Модуль температурно-влажностного зондирования атмосферы, ГЯ — в память о Геннадии Яковлевиче Гуськове (1918–2002)) в научно-периодической литературе посвящено ограниченное количество работ. К наиболее содержательным из них следует отнести (Успенский и др., 2017; Чернявский и др., 2018). На фоне детального описания технологии калибровки и привлекаемых модельных соотношений вопрос выбора тестовых наземных полигонов рассмотрен в них недостаточно полно. Даны общие рекомендации по их выбору на основе обобщения опыта калибровки зарубежных инструментов-аналогов и указано примерное расположение этих областей (дождевые широколиственные леса Амазонки; безветренные области в тропических, умеренных и высоких широтах Атлантического океана). Приборы серии МТВЗА-ГЯ имеют отличающиеся углы встречи с Землёй и свой частотно-поляризационный план. Соответственно, логичным выступает вопрос об оптимальности использования этих регионов для калибровки российского инструмента. Помимо этого, имеющиеся технические ограничения (возможность проведения измерений лишь в областях прямой видимости станций приёма) для прибора, установленного на космическом аппарате (КА) «Метеор-М» № 2-3, диктуют необходимость поиска соответствующих областей для

калибровки на территории (и находящихся в непосредственной близости к ней) Российской Федерации.

Таким образом, основная задача представленной работы заключается в анализе измерений, выполненных сканером/зондировщиком МТВЗА-ГЯ с борта КА «Метеор-М» № 2-2 (последний инструмент серии, обеспечивший поступление стабильных долгосрочных наблюдений), на предмет поиска наиболее оптимальных областей для реализации операции внешней калибровки на территории суши.

Описание предлагаемого подхода

Для пояснения предлагаемого подхода к выбору тестовых полигонов для калибровки спутникового радиометра МТВЗА-ГЯ следует рассмотреть общее модельное соотношение формирования и переноса излучения в системе «подстилающая поверхность – атмосфера». Воспользуемся для этих целей материалами работы (Чернявский и др., 2018):

$$T_{Br}^{V,H}(\nu, \theta) = \chi^{V,H}(\nu, \theta) T_0 e^{-\tau(\nu) \sec \theta} + T_{Br}^{\uparrow}(\nu, \theta) + T_{Br}^{\downarrow}(\nu, \theta) [1 - \chi^{V,H}(\nu, \theta)] e^{-\tau(\nu) \sec \theta} + T_{cold} [1 - \chi^{V,H}(\nu, \theta)] e^{-2\tau(\nu) \sec \theta}, \quad (2)$$

где $T_{Br}^{V,H}(\nu, \theta)$ — яркостная температура системы подстилающая поверхность – атмосфера на вертикальной (V, *англ.* vertical) или горизонтальной (H, *англ.* horizontal) поляризации принимаемого излучения с частотой ν и углом встречи с Землёй θ , регистрируемая прибором на орбите; $\chi^{V,H}(\nu, \theta)$ — коэффициент излучения подстилающей поверхности; T_0 — термодинамическая температура поверхности в градусах Кельвина; $\tau(\nu)$ — интегральное поглощение в атмосфере; $T_{Br}^{\uparrow}(\nu, \theta)$ и $T_{Br}^{\downarrow}(\nu, \theta)$ — яркостная температура восходящего и нисходящего излучения атмосферы соответственно; T_{cold} — яркостная температура космического излучения.

Представленная модель переноса излучения (МПИ) используется для калибровки радиометрических каналов МТВЗА-ГЯ путём сопоставления результатов измерений $U^{V,H}(\nu, \theta)$ с расчётными значениями $T_{Br}^{V,H}(\nu, \theta)$. При этом для выполнения модельных оценок влияния атмосферы при расчёте $\tau(\nu)$, $T_{Br}^{\uparrow}(\nu, \theta)$ и $T_{Br}^{\downarrow}(\nu, \theta)$ необходимо знать вертикальные профили давления, температуры и влажности атмосферы (что позволяет учесть влияние полос поглощения основных составляющих атмосферы), водности облаков и интенсивности осадков для каждого элемента наблюдения прибора. Расчёт $\chi^{V,H}(\nu, \theta)$ для участков поверхности океана требует априорного знания температуры поверхности, солёности водной среды, интенсивности волнения (в том числе через скорость и направление приводного ветра). Для участков суши, помимо температуры поверхности, важно знать тип почвы/растительности, их влажность, засоленность, структуру/геометрию поверхности и т.д. Указанные характеристики могут быть заимствованы из результатов сторонних измерений, рассчитаны по специализированным моделям на базе ещё более широкого набора параметров, определены по справочникам распределения соответствующих геофизических величин.

Перечисленное многообразие входных параметров МПИ, с учётом возможности их аддитивного влияния на величину ошибки моделирования, диктует необходимость снижения как самого их числа, так и вариативности их значений. Применительно к калибровке радиометрических инструментов, первое условие выполняется, например, за счёт работы только в районах Мирового океана с низкими значениями приводного ветра (менее 2–3 м/с) и только для условий безоблачной атмосферы (с интегральным паросодержанием ниже установленного предела). Соблюдение второго условия обеспечивается путём выбора калибровочных полигонов в экваториальной зоне, с вечнозелёными лесами и относительным постоянством температурно-влажностного режима приземного слоя атмосферы.

Предлагаемый авторами настоящей публикации подход основан на оценке общей («интегральной») стабильности всех компонент соотношения (2). В качестве первого приближения к решению поставленной задачи можно заменить МПИ его самой простой формой:

$$T_{Br}^{V,H}(\nu, \theta) = \chi_{eff}^{V,H}(\nu, \theta) T_0, \quad (3)$$

где T_0 — термодинамическая температура поверхности (и, с некоторыми допущениями, приповерхностного слоя атмосферы); $\chi_{eff}^{V,H}(v, \theta)$ — некий «эффективный» коэффициент излучения поверхности. Температуру поверхности/приповерхностного слоя атмосферы можно считать известной для любой точки нашей планеты. Этому способствует как разветвлённая сеть метеорологических станций, для которых измерение этого параметра является одной из базовых функций, так и развитие спутниковых средств дистанционного зондирования, в том числе относительно просто интерпретируемых измерений в ИК-диапазоне. Объединение всех доступных измерений выполняется при формировании баз данных реанализа, а привлекаемые для этих целей прогностические модели и относительная инерционность рассматриваемого параметра обеспечивают высокую точность предоставляемых данных.

В качестве $T_{Br}^{V,H}(v, \theta)$ необходимо использовать реальные данные измерений прибора, для которого планируется выполнять калибровку. Это — принципиальный момент, поскольку регистрируемое излучение формируется с учётом технических особенностей реализации прибора и схемы его сканирования/установки на носителе (т.е. считается сугубо индивидуальной величиной для любого прибора), а значит, скажется впоследствии на проводимых оценках стабильности. Причём не имеет принципиального значения, используются ли отчёты $U^{V,H}(v, \theta)$, результаты внутренней калибровки $T_A^{V,H}(v, \theta)$ или уже прошедшие первичную внешнюю калибровку значения яркостной температуры $T_{Br}^{V,H}(v, \theta)$. При оценке статистических характеристик $\chi_{eff}^{V,H}(v, \theta)$ это выразится лишь в изменении соответствующего нормировочного коэффициента.

Наличие реальных измерений $T_A^{V,H}(v, \theta)$ и знание термодинамической температуры, актуальной на момент их проведения, позволяет рассчитать эффективный коэффициент излучения для каждого элемента разрешения прибора на поверхности. При этом в рамках поставленной задачи интерес представляет не мгновенное значение данного параметра и не его математическое ожидание при долгосрочном накоплении, а величина второго центрального момента (дисперсия). Согласно введённому упрощению (3), эта величина будет содержать в себе информацию об изменчивости всех (за исключением термодинамической температуры) параметров подстилающей поверхности и атмосферы, входящих в правую часть МПИ (2). Очевидно, что, выбирая полигон для калибровки с минимальными значениями этого параметра, при сохранении точности наших знаний обо всех переменных правой части соотношения (2), это обеспечит минимальные расхождения реальной и модельной $T_A^{V,H}(v, \theta)$ и, соответственно, будет способствовать повышению точности внешней калибровки системы.

Порядок выполнения расчётов

Для проведения оценок дисперсии эффективного коэффициента излучения (3) были использованы результаты измерений антенной температуры $T_A^{V,H}(v, \theta)$, полученных инструментом МТВЗА-ГЯ (КА «Метеор-М» № 2-2) за 2020 г. и прошедших первичную обработку программным комплексом предварительной обработки данных этого прибора. Дополнительно выполнялась корректировка первичной географической привязки данных с использованием углов, рекомендованных в работах (Садовский, Сазонов, 2023; Сазонов, Садовский, 2024). В анализ были включены частотные каналы 10,6(V, H), 18,7(V, H), 23,8(V, H), 31,5(V, H), 36,7(V, H) и 91,6(V) ГГц. Выбор был сделан исходя из условия относительно более высокой чувствительности к вариациям именно подстилающей поверхности, нежели к параметрам атмосферы. Результаты суточных измерений накладывались на регулярную сетку с шагом $0,25^\circ$, отдельно для восходящих и нисходящих полувитков.

Соответствующие карты распределения температуры поверхности (для участков, покрытых микроволновыми измерениями) формировались на основе базы данных реанализа MERRA-2 (*англ.* Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications version 2) (<https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2>). Значение в каждом элементе сетки выбранного масштаба выбиралось исходя из условия минимального временного сдвига относительно данных измерений МТВЗА-ГЯ, участвующих в его формировании. Этим обеспечивалось

пространственно-временное совмещение регистрируемых уровней собственного излучения элементов поверхности с измерениями их физической температуры поверхности (с максимальной временной разбежкой в 30 мин, определяемой частотой обновления данных реанализа).

Наличие двух описанных типов глобальных карт распределения T_A и T_0 позволило выполнить расчёт параметра χ_{eff} (в соответствии с выражением (3)) для всех областей, покрытых измерениями МТВЗА-ГЯ, за каждые сутки 2020 г. Далее осуществлялась операция усреднения полученных за год значений для каждого элемента на поверхности с размерами $0,25 \times 0,25^\circ$ и производилась оценка его среднеквадратичного отклонения (СКО). В качестве примера на *рис. 1* приведены результаты оценки среднегодовых значений χ_{eff} для частотного канала 10,6(Н) ГГц. С точки зрения проводимого анализа эти данные представляют второстепенный интерес, однако могут быть использованы для выделения областей с максимальными/минимальными показателями средних значений χ_{eff} (для обеспечения максимального разнесения «горячих»/«холодных» калибровочных полигонов).

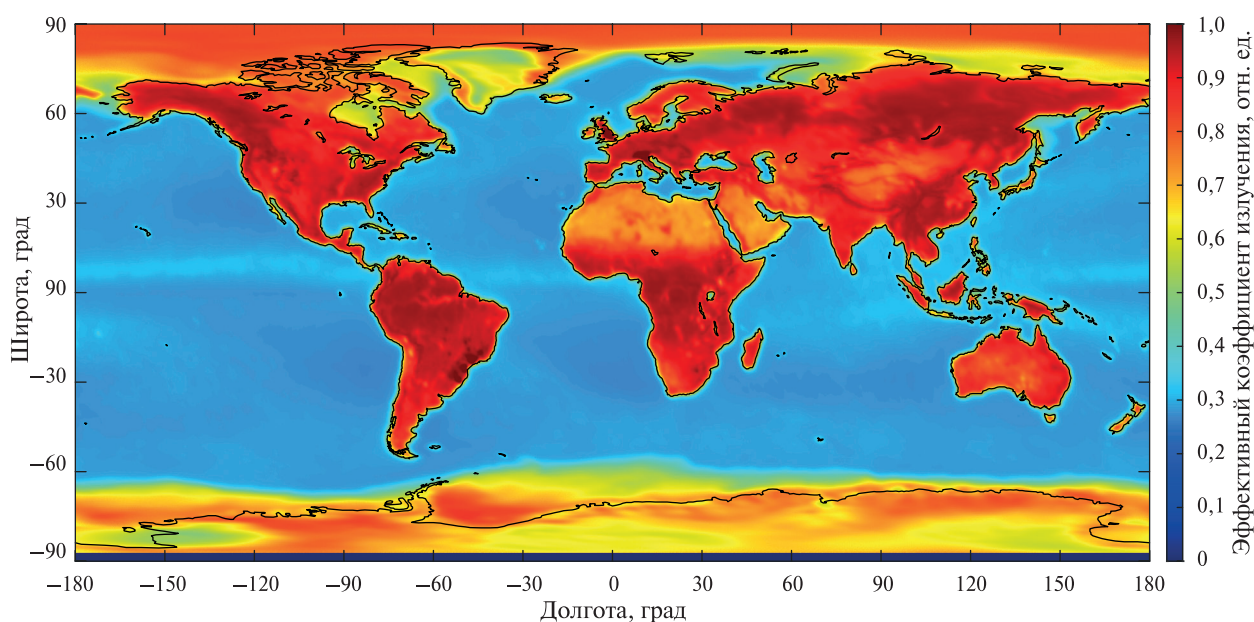


Рис. 1. Распределение среднегодовых значений эффективного коэффициента излучения подстилающей поверхности для частотного канала 10,6(Н) ГГц

Гораздо более информативным оказывается анализ среднегодовых значений СКО, подобных представленным на *рис. 2* (см. с. 31). На приведённых изображениях устранены области водной поверхности (поскольку их анализ не является целью работы), а также области, в которых соответствующие значения превышают уровень 0,05. Данное значение следует считать условным, поскольку оно введено для изменения цветового диапазона используемой шкалы, что делает более наглядным представление результатов и их визуальный анализ над всей поверхностью суши. Если бы не ограничение, то области, относящиеся к зонам сезонного образования/таяния льда (где СКО для χ_{eff} превышает уровень 0,3), приводили бы к равномерной окраске всех остальных территорий за их пределами.

Тёмно-синим областям на изображениях, согласно использованной методике, соответствуют участки, где годовые вариации параметров подстилающей поверхности и атмосферы над ней имеют минимальные значения. Наиболее обширные площади этих зон расположены в Южной Америке и Африке, в диапазоне от 5° с.ш. до 15° ю.ш. По минимальным значениям СКО также выделяются регионы северной Африки, запада Австралии, южной части Аравийского п-ова, о. Калимантан, о. Новая Гвинея, п-ов Индокитай, часть южных территорий Северной Америки.

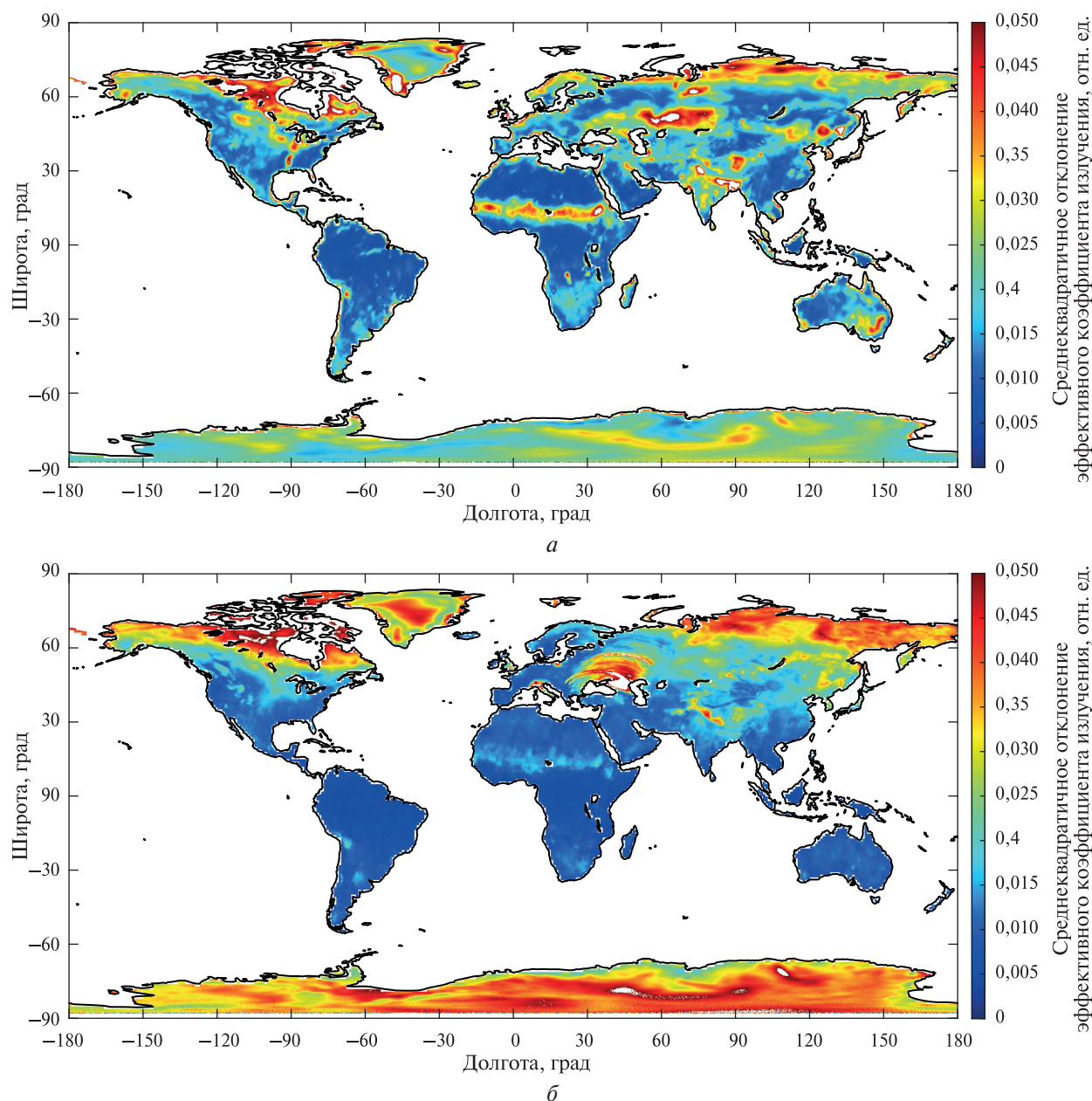


Рис. 2. Результаты оценок СКО эффективного коэффициента излучения. Частота 10,6 ГГц, случаи горизонтальной (а) и вертикальной (б) поляризации

На территории Российской Федерации также имеются локальные зоны с низкими показателями СКО эффективного коэффициента излучения. В первую очередь сюда относятся части Архангельской, Тверской, Вологодской, Новгородской, Ярославской областей и Республики Коми. Также перспективными с точки зрения рассматриваемой задачи выглядят окрестности озера Байкал — части Красноярского края, Иркутской обл. и Республики Якутия. При этом, однако, следует обратить внимание на гораздо более сильную поляризационную зависимость результатов оценок (по сравнению, например, с лесами Амазонки), а также необходимость контроля качества данных самих измерений, приводящих к искажению статистики. Так, на рис. 2б в районе северо-восточнее Чёрного моря отчётливо выделяется зона повышенных значений СКО. При этом её очертания соответствуют стандартной геометрии обзора МТВЗА-ГЯ. Скорее всего, данный эффект обусловлен сбоем в работе оборудования во время одного (или нескольких) из пролётов, вошедших в анализ, или наличием наземного источника помехового сигнала. Соответственно, исходные данные измерений должны проходить дополнительный отбор по этому показателю.

С учётом очевидной частотной и продемонстрированной поляризационной зависимости характера полей распределения выбор областей для калибровки на основе анализа последовательности изображений, даже для ограниченного набора частот, как в данной работе, является достаточно сложной задачей. Помимо этого следует учитывать и существенные размеры пятен разрешения на поверхности длинноволновых каналов МТВЗА-ГЯ, накладывающие ограничение на линейные размеры калибровочного полигона. В связи с этим полученные глобальные карты СКО были пересчитаны и объединены в соответствии со следующим алгоритмом. Во-первых, изображение для каждой частоты было использовано для составления масок участков поверхности, пригодных для калибровки. С этой целью для каждой ячейки глобальной карты выделялась округлая область (с диаметром, составляющим семь ячеек). Далее, в каждом из выделенных элементов i выполнялась проверка на соответствие условию: $\sigma_i^{v,pol} \leq \sigma_{max}^{v,pol}$, где $\sigma_{max}^{v,pol}$ (σ — дисперсии эффективного коэффициента излучения) задавалось на основе анализа карт распределения СКО для всего набора частот ν и поляризации pol . В случае если все элементы области удовлетворяли данному критерию, её центральной точке присваивалось значение 1, в противном — 0. Пример маски, полученной таким образом для частотного канала 10,6(Н) ГГц с порогом $\sigma_{max} = 0,01$, приведён на *рис. 3*. Результат следует трактовать следующим образом — если оптическая ось визирования данного частотного канала пересекает поверхность Земли в любой из точек, выделенных чёрным цветом, то гарантированно в пределах пятна разрешения самого длинноволнового канала МТВЗА-ГЯ (89×198 км) будет выполняться условие стабильности параметров подстилающей поверхности и атмосферы над ней.

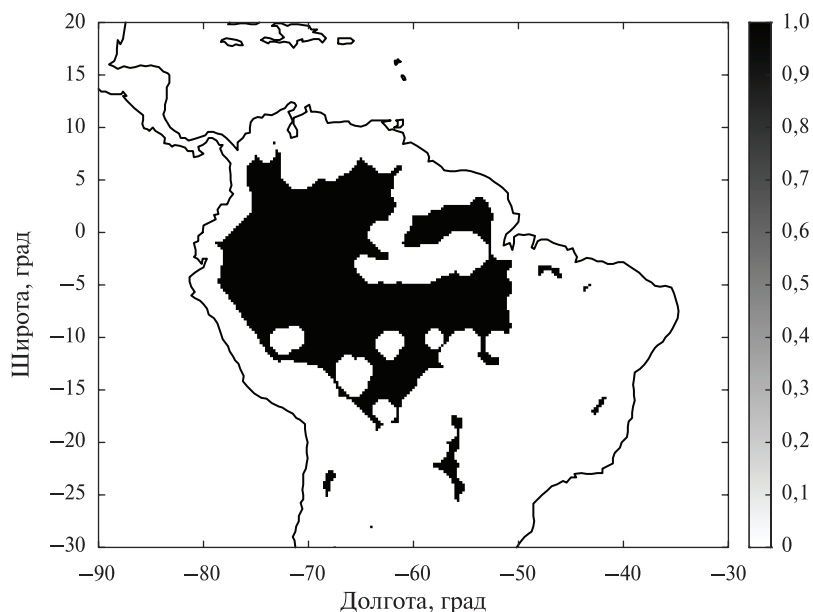


Рис. 3. Маска потенциально пригодных областей (чёрный цвет) для калибровки частотного канала 10,6(Н) ГГц МТВЗА-ГЯ

Указанная процедура выполнялась для всех частотных каналов, вошедших в анализ (11 шт). При этом ожидаемо, что снижение значения $\sigma_{max}^{v,pol}$ приводит к уменьшению размеров областей, которые могут быть использованы для калибровки выделенного частотного канала с установленной точностью, а при достижении некоторого предела — их полному исчезновению. Таким образом, суть задачи выделения калибровочного полигона состоит не только в выборе наиболее стабильного (обеспечивающего минимум СКО) участка для каждого частотного канала в отдельности (хотя такой подход также возможен), но и в необходимости пожертвовать потенциальной точностью калибровки в пользу совмещения этих участков в рамках единой области. В глобальном масштабе (по всей поверхности планеты)

решить данную итерационную задачу достаточно сложно (требуются существенные вычислительные ресурсы). Соответственно, она должна быть локализована для заранее выделенных областей, описанию методики поиска которых и посвящена данная публикация. Для демонстрации предлагаемого подхода на первом шаге был установлен общий уровень предела $\sigma_{\max} = 0,03$ для всех частотных каналов. Полученные маски, аналогичные приведённой на рис. 3, складывались. Таким образом, при их частичном/полном совпадении для всех частотных каналов МТВЗА-ГЯ итоговое значение в ячейке регулярной сетки варьировалось от 0 (ни один канал не может калиброваться по данному участку) до 11 (с установленной точностью могут калиброваться все каналы). В графическом виде результат данной операции приведён на рис. 4.

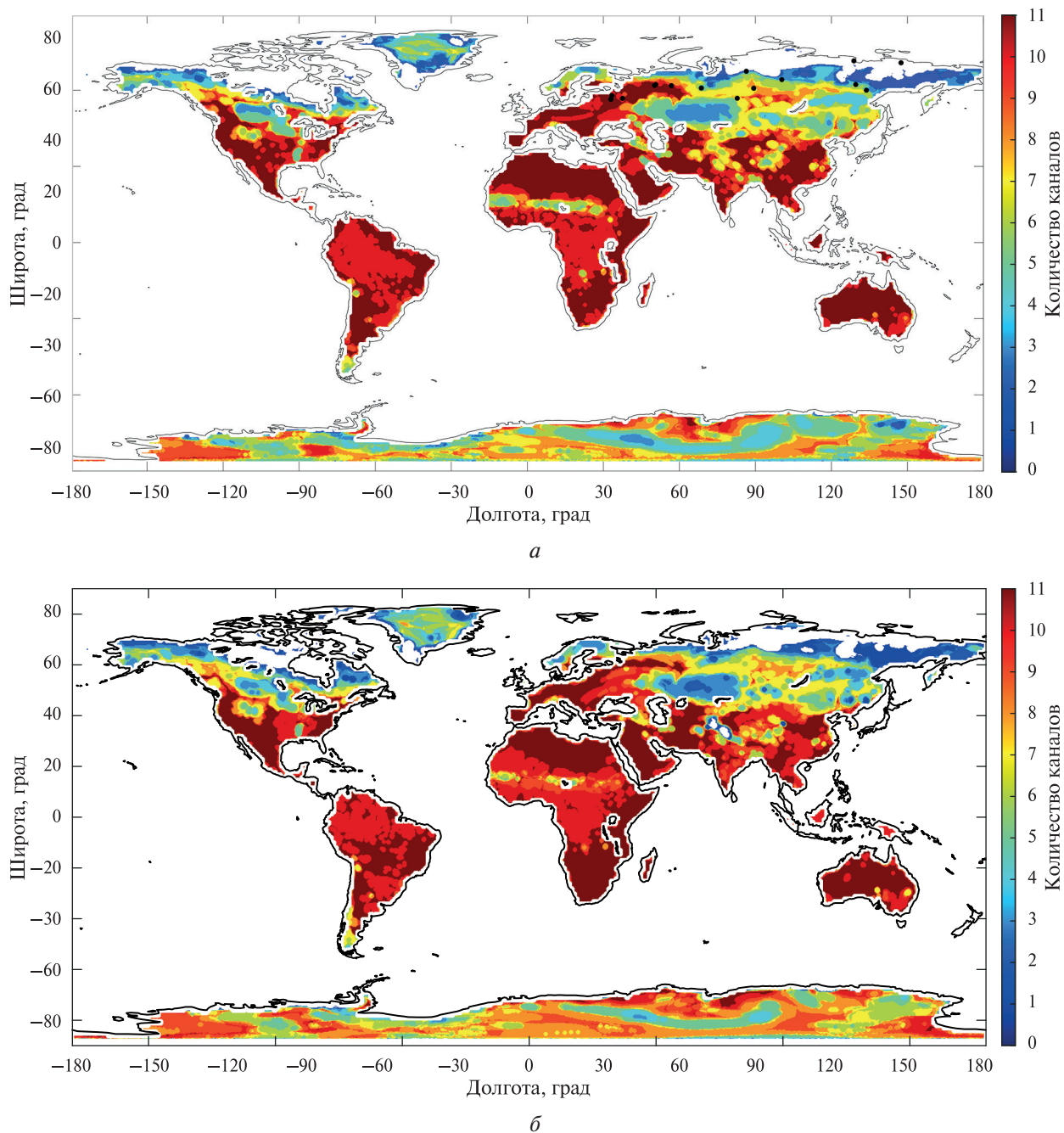


Рис. 4. Обобщённые карты поиска областей, оптимальных для калибровки частотных каналов МТВЗА-ГЯ на восходящих (а) и нисходящих (б) полулитках. Чёрными точками показано расположение эколого-климатических станций России, функционирующих в настоящее время

В представленном виде оказывается достаточно просто проводить первичный анализ получаемой информации. На картах отчётливо видны как сами очертания областей, где для всех частотных каналов выполняются заданные требования по стабильности параметров, их разреженность/сплочённость в интересующих регионах, так и присутствует первичная информация о количестве каналов, выпадающих из рассмотрения. Очевидным недостатком такого представления является отсутствие данных о том, какие именно каналы не прошли проверку в данном регионе. Для этого авторами предлагается выполнять локальный анализ данных в виде специальных диаграмм и временных зависимостей. Этот вопрос обсуждается в следующем разделе.

Также следует отметить, что в силу особенностей построения обобщённые карты, аналогичные представленным на *рис. 4*, могут быть сразу интегрированы в программные комплексы предварительной обработки данных МТВЗА-ГЯ для выполнения автоматизированной процедуры внешней калибровки. Помимо этого, данная методика может быть распространена на выбор холодных участков для калибровки на поверхности океана, что будет сделано в дальнейшем.

Проведение точечных оценок

Представленные ранее результаты имеют демонстративный характер, поскольку получены для единого порога σ_{\max} для всех частотных каналов. Очевидно, что следующим шагом развития описанного подхода становится расширение набора частотных каналов, входящих в анализ, а также максимально возможное снижение задаваемых порогов $\sigma_{\max}^{v.pol}$ при сохранении условия их пространственного объединения и целостности. Для решения второго из озвученных вопросов предлагается использовать диаграммы $\sigma_i^{v.pol}$, полученные для заранее выделенных географических координат, внешний вид которых представлен на *рис. 5*.

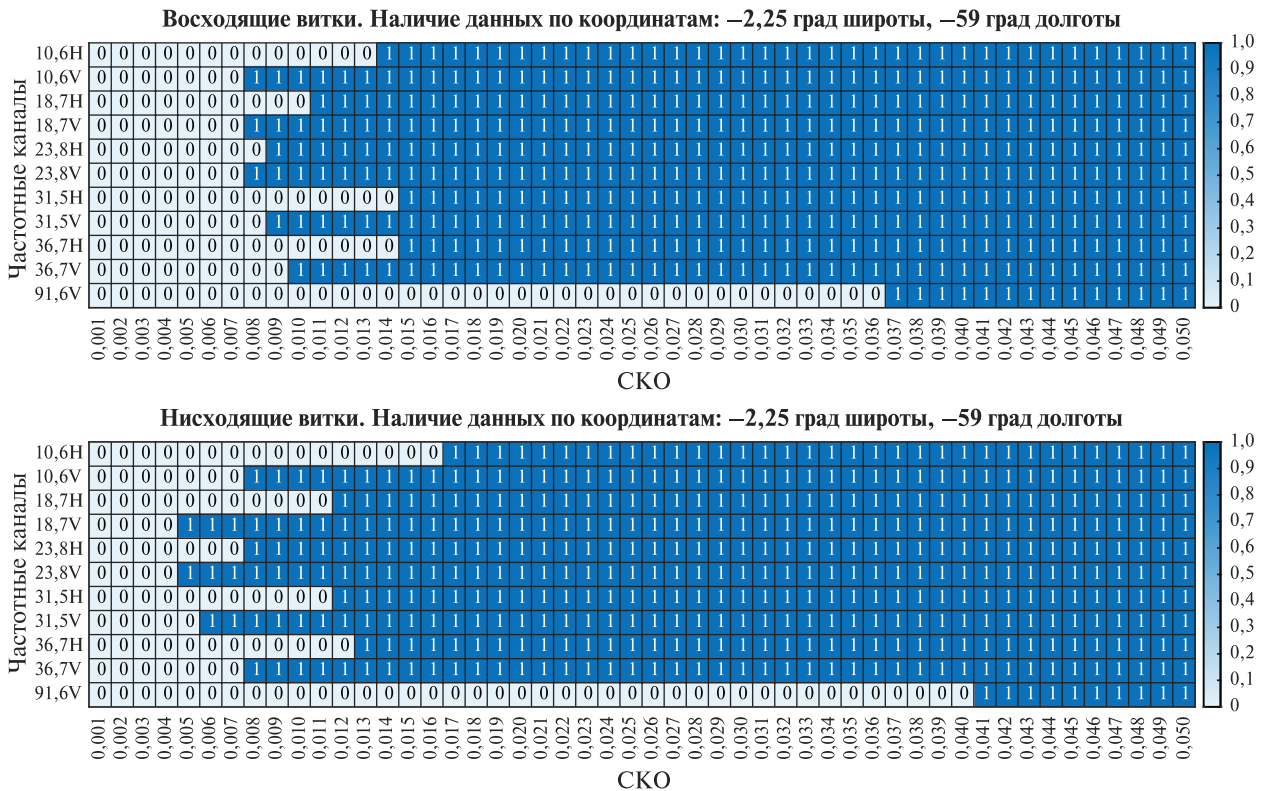


Рис. 5. Диаграммы частотного распределения $\sigma_i^{v.pol}$ для области расположения Amazon Tall Tower Observatory

Диаграммы отражают СКО среднегодовых значений χ_{eff} для заданного элемента регулярной координатной сетки размером в четверть градуса. Они позволяют быстро ответить на вопрос — почему данный участок поверхности не был отнесён к оптимальному для всего набора частотных каналов (см. рис. 4). Помимо этого — дают представление как о соотношении $\sigma_i^{y,pol}$ между собой, так и о пороговой точности будущей калибровки в случае, если все частотные каналы будут использовать данный полигон в качестве «горячей» нагрузки.

Представленная на рис. 5 диаграмма соответствует координатам расположения высотной башни в бассейне р. Амазонки АТТО (англ. Amazon Tall Tower Observatory), построенной в научных целях бразильским Национальным научно-исследовательским институтом Амазонии (англ. National Institute of Amazonian Research) и немецкими институтами химии (нем. Max-Planck-Institut für Chemie) и биогеохимии (нем. Max-Planck-Institut für Biogeochemie) Общества научных исследований имени Макса Планка (нем. Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V.). Данные разнообразных метеорологических измерений, поступающих с этого объекта, традиционно используются для калибровки спутниковых микроволновых радиометров. Анализ представленной диаграммы показывает, что область вокруг данной станции не подходит для всего набора выделенных частотных каналов МТВЗА-ГЯ. Несмотря на то, что каналам из диапазона 10,6–36,7 ГГц характерна высокая стабильность параметров системы подстилающая поверхность — атмосфера (среднее СКО для них находится на уровне 0,01), измерениям на частоте 91,6 ГГц соответствует высокая вариативность излучения.

Интересно, что для всех проанализированных диаграмм, относящихся к сильно разнесённым географически локациям, проявляются две закономерности: во-первых, связь вариаций регистрируемого излучения с температурой подстилающей поверхности на нисходящих полувитках всегда выше, чем на восходящих; во-вторых, эта связь сильнее на вертикальной поляризации принимаемого излучения. Выявление причин подобных закономерностей не является целью настоящей работы, однако может быть рассмотрено в дальнейшем — является ли это особенностями формирования излучения системы подстилающая поверхность — атмосфера или индивидуальными характеристиками каналов МТВЗА-ГЯ.

С точки зрения выбора полигонов на территории России (как уже было ранее отмечено, технические ограничения МТВЗА-ГЯ, функционирующего на КА «Метеор-М» № 2-3, не позволяют выполнять калибровку на других территориях) интерес представляют Новгородская и Тверская области, а также Республика Коми (и часть прилегающих к ним районов). Помимо того, что эти регионы уже были выделены в начале настоящей статьи во время анализа стабильности эффективного коэффициента отражения на частоте 10,6 ГГц (см. рис. 2), результаты комплексного сопоставления, приведённые на рис. 4, также способствуют их особому рассмотрению. При этом крайне важно, что на указанных территориях находятся 9 из 21 эколого-климатических станций России (Курбатова и др., 2023), функционирующих в настоящее время (чёрные точки на рис. 4а). Из этих 9 станций, 6 оборудованы вышками высотой от 22 до 44 м, позволяющими проводить измерения метеопараметров не только у поверхности земли, но и над кронами деревьев.

Для сравнения на рис. 6 (см. с. 36) представлены сводные данные по оценке СКО, полученные для района расположения климатических станций TV-Fy0 (Фёдоровское, ельник заболоченный), TV-Fy2 (Фёдоровское, ельник неморальный), TV-Fy3 (Фёдоровское, вырубка) и TV-Fy4 (Фёдоровское, болото) (сохранены обозначения и названия из публикации (Курбатова и др., 2023)). Ввиду их близкого расположения на первом этапе анализа эта диаграмма является общей для всех перечисленных станций. Очевидно, что для нисходящих полувитков данные показатели по отдельным частотам оказываются почти в два раза хуже аналогичных результатов полигона станции АТТО. При этом для восходящих — эти различия практически незаметны. Следует иметь в виду, что для корректного сравнения показателей требуется более детальный анализ территорий России, поскольку на фоне однородного состава лесов Амазонки указанные области характеризуются богатым разнообразием экосистем южной тайги (ельник с примесью берёзы сфагново-черничный; ельник с примесью клёна, осины, вяза и берёзы кислично-щитовниковый; зарастающая разнотрав-

Ранее уже отмечалось, что при обзоре рассматриваемого региона имеют место единичные сбои в работе аппаратуры или воздействие сторонних источников сигнала (провал показателя для 10,6(V) ГГц). Автоматизация процесса исключения подобных измерений при обработке годового объёма данных также может способствовать улучшению получаемых оценок.

Потенциальная точность калибровки (оцениваемая на основе диаграмм, подобных рис. 5 и б) по выбранному району может быть повышена и за счёт учёта сезонных трендов в поведении χ_{eff} . На рис. 7 (см. с. 36) представлены результаты оценки этого параметра на основе измерений МТВЗА-ГЯ для рассмотренного ранее района в Тверской обл. Видно, что годовые вариации χ_{eff} в настоящий момент входящие в расчёт СКО, имеют явно выраженный характер, обусловленный, скорее всего, сменой базовых состояний поверхности, листовенного покрова и пр., требующих учёта в рамках моделей переноса излучения. Исключение этих изменений при реализации описываемого алгоритма выбора калибровочных полигонов, очевидно, приведёт к снижению (улучшению) соответствующих значений в диаграммах, основными составляющими которых останутся лишь краткосрочные/локальные вариации параметров (в большей степени определяемые метеорологическими условиями) системы подстилающая поверхность – атмосфера, в обязательном порядке входящие в МПИ.

Заключение

Представленная к рассмотрению методика выбора тестовых полигонов для выполнения процедуры внешней калибровки инструментов серии МТВЗА-ГЯ основывается на двух базовых утверждениях. Первое — для областей, в пределах которых наблюдается минимальный разброс характеристик подстилающая поверхность – атмосфера и, как следствие, вариаций регистрируемого уровня излучения, в соответствии с МПИ могут быть получены более точные оценки, при той же точности определения входных параметров модели. Второе — уровень регистрируемого приёмником сигнала является индивидуальной характеристикой как самого прибора (сюда относим техническую реализацию, пространственную селекцию, расположение на носителе и пр.), так и особенностей формирования уходящего излучения зондируемого объекта на соответствующих частотах, углах визирования, поляризациях и т.д. при различных метеорологических условиях. В этой связи принципиальным моментом является привлечение к анализу реальных измерений МТВЗА-ГЯ, уже содержащих в себе эту информацию.

В соответствии с введёнными обозначениями использование в качестве интегральной меры стабильности эффективного коэффициента излучения выглядит обоснованным с точки зрения обоих утверждений. Привлекаемые дополнительно данные реанализа о физической температуре поверхности, с учётом относительной инерционности этой физической величины и постоянного роста точности соответствующих баз данных, по мнению авторов, не могут оказывать существенного влияния на качество проводимых оценок.

Особо стоит отметить, что использование термина «эффективный коэффициент излучения» не предполагается непосредственно в операции внешней калибровки. Обязательность привлечения соответствующей МПИ (как, например, в исследовании (Митник и др., 2016)) неоспорима. Однако получаемые в рамках методики значения могут быть использованы при оценке наихудшей точности калибровки по конкретному полигону.

Также авторы обращают внимание на необходимость проведения аналогичных исследований в части выделения областей холодных тестовых полигонов (как правило, выбираемых на поверхности океана), не вошедших в данный анализ.

Описанный подход в целом, как и отдельные этапы его реализации, следует рассматривать как первый шаг исследования в данном направлении. Часть результатов получена с заведомо заниженными параметрами в угоду наглядности проводимых работ. В тексте публикации авторы постарались выделить основные области будущих исследований, направленных на решение задачи выделения конкретных полигонов для внешней калибровки приборов МТВЗА-ГЯ. Данная задача приобретает особую актуальность для случаев, когда традиционно

используемые для этих целей участки суши/поверхности океана недоступны (как для прибора, функционирующего на КА «Метеор-М» № 2-3).

Работа выполнена при поддержке темы «Мониторинг» (госрегистрация № 122042500031-8).

Авторы выражают благодарность: Н. Ю. Комаровой (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.

Литература

1. Курбатова Ю. А., Куричева О. А., Авилов В. К., Варлагин А. В., Гитарский М. Л., Дмитриченко А. А., Дюкарев Е. А., Загирова С. В., Замолотчиков Д. Г., Зырянов В. И., Карелин Д. В., Карсанаев С. В., Курганова И. Н., Лапина Е. Д., Максимов А. П., Максимов Т. Х., Мамкин В. В., Марунич А. С., Мигловец М. Н., Михайлов О. А., Панов А. В., Петров Р. Е., Прокушкин А. С., Репина И. А., Сиденко Н. В., Сидорова О. Р., Шилкин А. В. Каталог эколого-климатических станций России. Версия 1, по состоянию на 30.06.2023 / под ред. Ю. А. Курбатовой, О. А. Куричевой. М., 2023. 26 с.
2. Митник Л. М., Митник М. Л. Калибровка и валидация — необходимые составляющие микроволновых радиометрических измерений со спутников серии «Метеор-М» № 2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 1. С. 95–104. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-95-104.
3. Митник Л. М., Кулешов В. П., Митник М. Л., Спиричев Д. Л., Черный И. В., Яковлев В. В. Внешняя калибровка каналов радиометра МТВЗА-ГЯ на метеорологическом спутнике «Метеор-М» № 2 // Радиофиз. методы в дистанционном зондировании сред: материалы 7-й Всероссийской науч. конф., Муром, 31 мая–5 июня 2016 г., Муромский ин-т (филиал) ВлГУ. Муром: Изд.-полигр. центр МИ ВлГУ, 2016. С. 407–412.
4. Садовский И. Н., Сазонов Д. С. Корректировка географической привязки данных МТВЗА-ГЯ // Исслед. Земли из космоса. 2023. № 6. С. 73–85. DOI: 10.31857/S0205961423060076.
5. Сазонов Д. С., Садовский И. Н. Корректировка географической привязки частотных каналов 52–91 ГГц спутникового микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ // Исслед. Земли из космоса. 2024. № 2. С. 88–100. DOI: 10.31857/S0205961424020082.
6. Успенский А. Б., Крамчанинова Е. К., Косцов В. С. и др. Развитие системы внешней калибровки и валидации данных измерений микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ КА «Метеор-М» № 2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 4. С. 27–35. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-27-35.
7. Чернявский Г. М., Митник Л. М., Кулешов В. П. и др. Микроволновое зондирование океана, атмосферы и земных покровов по данным спутника «Метеор-М» № 2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 78–100. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-78-100.

Selection of potential polygons for absolute calibration of the Russian scanner/sounder MTVZA-GYa

I. N. Sadovsky, D. S. Sazonov

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

E-mail: Ilya_Nik_Sad@mail.ru

This paper presents a description of an approach to allocation of land surface zones suitable for performing absolute calibration of frequency channels of the Russian scanner/sounder named MTVZA-GYa (Microwave Atmospheric Temperature and Humidity Sounding Module, GYa — in memory of G. Ya. Gus'kov (1918–2002)). The method is based on the assessment of statistical char-

acteristics of effective emissivity of the underlying surface – atmosphere system. To calculate instantaneous values of this parameter, the results of MTVZA-GYa measurements for 2020 were used, as well as surface temperature data taken from the MERRA-2 (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications version 2) reanalysis database. Further evaluation of the standard deviation of effective emissivity for each element of a regular grid with a step of 0.25° allows assessing the variability of parameters of land and surface layer of the atmosphere within its limits. Identification of areas with the lowest values of the estimated parameter allows selecting areas that are most preferable for absolute calibration of individual frequency channels of MTVZA-GYa. The unification of these zones, individual for each frequency and designed as masks, is performed on the basis of constructing the corresponding generalized global fields, clearly displaying the location of the optimal polygons for calibration. The paper presents a description of the main stages of the proposed approach, examines problems that arise during their implementation, and outlines the main ways of further improvement. The first results of the search for relevant calibration areas on the territory of the Russian Federation are also presented.

Keywords: remote sensing, microwave radiometry, microwave scanner/sounder MTVZA-GYa, satellite, reanalysis data, absolute calibration

Accepted: 28.12.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-26-39

References

1. Kurbatova Yu. A., Kuricheva O. A., Avilov V. K., Varlagin A. V., Gitarskii M. L., Dmitrichenko A. A., Dyukarev E. A., Zagirova S. V., Zamolodchikov D. G., Zyryanov V. I., Karelin D. V., Karsanaev S. V., Kurganova I. N., Lapshina E. D., Maksimov A. P., Maksimov T. Kh., Mamkin V. V., Marunich A. S., Miglovets M. N., Mikhailov O. A., Panov A. V., Petrov R. E., Prokushkin A. S., Repina I. A., Sidenko N. V., Sidorova O. R., Shilkin A. V., *Katalog ehkologo-klimaticheskikh stantsii Rossii. Versiya 1, po sostoyaniyu na 30.06.2023* (Catalog of ecological and climatic stations of Russia. Version 1, as of 30.06.2023), Yu. A. Kurbatova, O. A. Kuricheva (eds.), Moscow, 2023, 26 p. (in Russian).
2. Mitnik L. M., Mitnik M. L., Calibration and validation as prerequisite components of satellite microwave radiometer measurements from Meteor-M No. 2 series satellites, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, V. 13, No. 1, pp. 95–104 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-95-104.
3. Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Mitnik M. L., Spirichev D. L., Chernyi I. V., Yakovlev V. V., On-orbit calibration of the MTVZA-GYa radiometer channels on the meteorological satellite “Meteor-M” No. 2, *Radiofizicheskie metody v distantsionnom zondirovanii sred: materialy 7-i Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii, Murom, 31 maya – 5 iyunya 2016 goda, Muromskii institut (filial) VLGU* (Radiophysical methods in remote sensing of environments: Proc. of the 7th All-Russia scientific conf., Murom, May 31–June 5, 2016, Murom Institute (branch) of VLSU), Murom: Izd.-poligraficheskii tsentr MI VLGU, 2016, pp. 407–412 (in Russian).
4. Sadovsky I. N., Sazonov D. S., Correction procedure for MTVZA-GYa georeference, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2023, No. 6, pp. 73–85 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205961423060076.
5. Sazonov D. S., Sadovskii I. N., Geographical reference adjustment of MTVZA-GYa satellite microwave radiometer frequency channels 52–91 GHz, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2024, No. 2, pp. 88–100 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205961424020082.
6. Uspenskii A. B., Kramchaninova E. K., Kostsov V. S. et al., Development of the calibration/validation system for microwave radiometer MTVZA-GYa observations from Meteor-M No. 2 satellite, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, V. 14, No. 4, pp. 27–35 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-27-35.
7. Chernyavskii G. M., Mitnik L. M., Kuleshov V. P. et al., Microwave sensing of the ocean, atmosphere and land surface from Meteor-M No. 2 data, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, V. 15, No. 4, pp. 78–100 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-78-100.