

Гидрометеорология и экология. 2026. № 83. С. 207—230.
Hydrometeorology and Ecology. 2026;(83):207—230.

ГЕОФИЗИКА. ОБЗОР

Обзорная статья
УДК: 551.508.826
doi: 10.33933/2713-3001-2026-83-207-230

Российский спутниковый радиометр МТВЗА-ГЯ: история измерений и перспективы их использования в задачах гидрометеорологии

***Елизавета Валериановна Заболотских,
Екатерина Владимировна Львова***

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург,
Россия, liza@rshu.ru

Аннотация. В статье представлен обзор исследований, связанных с использованием данных измерений российского спутникового многоканального сканирующего микроволнового радиометра модуль температурного и влажностного зондирования атмосферы (МТВЗА-ГЯ). Описаны проблемы географической привязки и калибровки измерений и подходы, используемые для их решения. Проанализированы работы, направленные на разработку методов и алгоритмов восстановления геофизических параметров по данным МТВЗА-ГЯ. Подчёркнута необходимость обеспечения оперативного доступа к данным МТВЗА-ГЯ для широкого круга исследователей.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, спутниковые микроволновые радиометры, МТВЗА-ГЯ, методы восстановления геофизических параметров, географическая привязка, калибровка.

Благодарности: Обзор выполнен в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ No. FSZU—2025—0005 «Система «морской лед—океан—атмосфера» Арктики: развитие спутниковых методов и моделей». Авторы благодарят также сотрудников НИЦ «Планета» Успенского А. Б. и Голомолзина В. В., а также сотрудника АО «Российские космические системы» Барсукова И. А. за предоставленные данные МТВЗА-ГЯ.

Для цитирования: Заболотских Е. В., Львова Е. В. Российский спутниковый радиометр МТВЗА-ГЯ: история измерений и перспективы их использования в задачах гидрометеорологии // Гидрометеорология и экология. 2026. № 83. С. 207—230. doi: 10.33933/2713-3001-2026-83-207-230.

Review article (проверить правильность перевода!)

Russian satellite radiometer MTVZA-GYa: history of measurements and potential of data exploration in hydrometeorology

Elizaveta V. Zabolotskikh, Ekaterina V. Lvova

Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia, liza@rshu.ru

Summary. The manuscript presents an overview of research studies associated with the use of the measurement data from the Russian satellite multichannel scanning microwave radiometer Modul temperaturunogo i vlazhnostnogo zondirovaniya atmosfery (MTVZA-GYa) onboard Russian satellites “Meteor-M”. The uniqueness of the radiometer, combining capabilities of both scanner and sounder, thus providing measures to estimate simultaneously a lot of geophysical parameters, is emphasized. The challenges of the MTVZA-GYa data georeferencing and calibration — both instrumental and external are described. A few published research studies, aimed at the development of the geophysical parameter retrieval algorithms, are reviewed. These are the algorithms, exploring sounder frequency channels for the atmospheric temperature and humidity profile retrievals, and the algorithms using scanner frequency channels for the retrieval of such parameters as total atmospheric water vapor column, rain rate, sea surface wind speed and sea ice concentration. The special aspects of the MTVZA-GYa measurement scheme, associated with the unconventional observation angle, are discussed. This unconventional angle prevents using well developed geophysical model functions (GMF) to model ocean microwave emission under windy conditions and requires new GMF, based on MTVZA-GYa observations. It is postulated that only few Russian scientific groups are engaged in the development of the methods, aimed at the MTVZA-GYa data usage. All these groups have access to the data, and thus, the ability for such research. Many methods for geophysical parameter retrievals are created in the Satellite Oceanography Laboratory SOLab of the Russian State Hydrometeorological University (SOLab). All of them are based on physical modeling of the brightness temperature of the system underlying surface — atmosphere for the MTVZA-GYa channel characteristics, starting from the GMF for the MTVZA-GYa measurement angle. The need to ensure full and easy access to MTVZA-GYa data for a wide range of researchers for the following developments is underlined.

Keywords: remote sensing, satellite microwave radiometers, MTVZA-GYa, geophysical parameter retrieval methods, georeferencing, calibration.

Acknowledgments: This review was conducted within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. FSZU—2025—0005 “The Arctic Sea Ice—Ocean—Atmosphere System: Development of Satellite—Based Methods and Models.” The authors also thank A. B. Uspensky and V. V. Golomolzin of the Planeta Research Center, as well as I. A. Barsukov of JSC Russian Space Systems for providing the MTVZA-GYa data.

For citation: Zabolotskikh E. V., Lvova E. V. Russian satellite radiometer MTVZA-GYa: history of measurements and potential of data exploration in hydrometeorology *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2026;(83):(207—230). doi: 10.33933/2713-3001-2026-83-207-230. (In Russ.).

Введение

С развитием спутниковых систем, позволяющих получать и накапливать глобальные массивы данных измерений, одной из центральных проблем дистанционного зондирования стало развитие алгоритмов восстановления геофизических

параметров по этим данным. Измерения спутниковых микроволновых радиометров используются как для наблюдения за поверхностью Земли, так и для зондирования атмосферы, позволяя получать информацию о большом количестве геофизических параметров. Спутниковые микроволновые радиометрические измерения характеризуются возможностью получения регулярной глобальной оперативной информации об атмосфере и подстилающей поверхности. Особенную значимость эти измерения приобретают над обширными районами океанов, где традиционные измерения либо недостаточны, либо вообще отсутствуют [1]. Кроме того, данные микроволновых радиометров представляют особую ценность в экстремальных условиях погоды, сопровождающихся штормовыми ветрами, высокими волнами, ливневыми осадками. В таких условиях большинство измерений других спутниковых приборов либо целиком теряют информативность, либо интерпретация измерений сопровождается существенными ошибками. При этом данные измерений спутниковых микроволновых радиометров не теряют информативности [2].

Запуск спутников с радиометрической аппаратурой на борту (Космос-243 в нашей стране и Nimbus-5 за рубежом) послужил началом спутниковых пассивных микроволновых наблюдений земной атмосферы и океанов и быстрого прогресса в области разработки методов восстановления геофизических параметров по данным наблюдений [3]. С запуском спутникового радиометра Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) в 1987 г. началась новая эра в развитии спутниковых пассивных микроволновых методов, обусловленная усовершенствованием калибровки радиометрических измерений [4]. На сегодняшний день измерения спутниковых микроволновых радиометров принимают, обрабатывают и распространяют несколько крупных международных центров обработки и хранения спутниковой информации:

- американский центр Remote Sensing Systems (RSS — <http://remss.com>);
- американский центр по снегу и льду National Snow and Ice Data Center (NSIDC — <http://nsidc.org>);
- центр данных японского аэрокосмического агентства Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) (<https://gportal.jaxa.jp/>);
- китайский национальный метеорологический центр данных National Satellite Meteorological Center (<https://www.nsmc.org.cn/>).

Все эти центры при помощи современных методов обрабатывают данные спутниковых радиометров, занимаются калибровкой измерений и создают спутниковые продукты не только первого (Level 1, калиброванные радиояркие температуры микроволнового излучения), но и второго уровня (Level 2, геофизические параметры). Ежедневно выкладываются в свободном доступе данные обработки измерений таких радиометров как Special Sensor Microwave — Imager/Sounder (SSMIS) со спутников серий Defense Meteorological Satellite Program (DMSP), Advanced Microwave Scanning Radiometer — 2 (AMSR2) со спутника Global Change Observation Mission for Water (GCOM-W), Global Precipitation Mission (GPM) Microwave Instrument (GMI), Soil Moisture Active-Passive (SMAP). Сравнительно недавно появились в доступе данные китайских микроволновых

радиометров серий Micro-Wave Radiation Imager (MWRI) со спутников серий Feng-Yun 3 (FY-3) и Hai Yang 2 (HY-2).

Данные по параметрам атмосферы, океана и морского льда, накапливаемые и выкладываемые на оперативной основе, широко используются мировой научной общественностью, и их значимость трудно переоценить. Количественная информация о влагозапасе атмосферы и водозапасе облаков нужна для прогноза осадков [5] и используется в климатических моделях [6]. Карты влагозапаса с высоким временным разрешением позволяют судить о положении атмосферных фронтов и движении воздушных масс, диагностировать на этапе зарождения полярные и внетропические циклоны [7, 8] и могут быть использованы для улучшения качества прогноза их эволюции. Кроме того, водяной пар является важнейшим парниковым газом в атмосфере Земли, поэтому точная количественная оценка его пространственно-временной изменчивости представляет исключительную важность при изучении изменений климата и климатологических циклов [9].

Регулярные данные о приводном ветре необходимы для уточнения прогнозов погоды, выявления зарождающихся ураганов, циклонов различного масштаба, прослеживания путей их следования, расчёта интенсивности штормов на море [10]. Картирование приводного ветра необходимо для обеспечения безопасности транспортных и промысловых операций, строительства и эксплуатации нефтяных платформ, уменьшения рисков, связанных с экстремальными явлениями погоды. Оперативные данные по ледяному покрову требуются как для моделей прогноза, так и для проводки судов и обеспечения безопасности народнохозяйственной деятельности в морях Арктики.

Вся эта информация используется центрами атмосферных и морских прогнозов, научными и производственными организациями, нефтяными и транспортными компаниями, и другими заинтересованными предприятиями. Возможность ее эффективного использования зависит от точности и области применения методов обработки и удобства системы распространения готовых спутниковых продуктов. На сегодняшний день действующие зарубежные спутниковые микроволновые радиометры представлены американскими (SSMIS и GPM), японскими (AMSR2 и недавно запущенный AMSR3) и китайскими (MWRI) инструментами. И все спутниковые продукты создаются с использованием американских, японских и китайских данных. Несмотря на абсолютную (без ограничений) и полную (оперативную и ретроспективную) доступность сторонних данных, европейское космическое агентство European Space Agency (ESA) анонсировало создание своего собственного микроволнового радиометра Micro-Wave Imager (MWI) на серии спутников Meteorological operational satellite Second Generation B (Metop-SG-B). Первый такой спутник (Metop-SG-B1) планируется к запуску уже в текущем 2026 г. Решение о создании собственного спутникового микроволнового радиометра было принято несмотря на огромные вложения как в техническое (у ESA нет ни опыта, ни инфраструктуры создания микроволновых радиометров конечного типа сканирования, работающих на частотах выше С-диапазона), так и в научное обеспечение (калибровка, алгоритмы восстановления параметров). Это связано с пониманием важности наличия

собственного источника оперативной информации о важнейших геофизических параметрах.

Российская наука, центры прогнозов погоды, а также все предприятия и организации, пользующиеся данными спутниковых микроволновых радиометров, при изменении политики международных центров распространения данных окажутся в тяжелом положении. В настоящий момент при функционировании собственного многочастотного сканирующего микроволнового радиометра — модуля температурного и влажностного зондирования атмосферы (МТВЗА-ГЯ, ГЯ — в память о конструкторе Геннадии Яковлевиче Гуськове) — отсутствует необходимая инфраструктура, позволяющая свободно пользоваться данными его измерений, развивать и совершенствовать алгоритмы восстановления параметров. Тем не менее, даже в таких условиях научные коллективы страны за последние десятилетия накопили значительный опыт в использовании данных измерений МТВЗА-ГЯ — от калибровки и геопривязки до создания методов оценки геофизических параметров. Целью данного обзора является необходимость изучения данного опыта.

Модуль

температурного и влажностного зондирования атмосферы (МТВЗА-ГЯ).

Калибровка и геопривязка данных измерений

Россия в составе своей орбитальной группировки имеет спутник «Метеор-М» № 2, который был запущен 8 июля 2014 г. и заменил на орбите «Метеор-М» № 1 (2009—2014 гг.). В настоящее время на орбите находятся 2 спутника «Метеор-М» № 2: № 2—3 и № 2—4. К запуску в 2027—2035 гг. планируются еще 4 спутника серии «Метеор-М» № 2. В состав аппаратного комплекса спутников серии «Метеор-М» № 2 входят, помимо МТВЗА-ГЯ, комплекс многозональной спутниковой съемки (КМСС-2), многозональное сканирующее устройство (МСУ-МР), бортовой радиолокационный комплекс и гелиогеофизические инструменты [11, 12].

МТВЗА-ГЯ принимает излучение Земли на частотах сканера (10—50, 92 ГГц) и зондировщика в полосе поглощения молекулярного кислорода 52—58 ГГц и в области сильной линии поглощения водяного пара на 183,31 ГГц. Радиометр предназначен для определения параметров атмосферы и подстилающей поверхности. К несомненным достоинствам МТВЗА-ГЯ следует отнести комбинацию в одном приборе каналов сканера и зондировщика, что открывает дополнительные возможности для оценки гидрометеорологических параметров [13].

Прибор принимает уходящее излучение Земли под углом 65° к нормали к поверхности с пространственным разрешением 16—112 км в зависимости от частотного канала. Ширина полосы обзора составляет 1500 км. Детальные технические характеристики прибора представлены, например, в [14, 15], а на рис. 1 приводится его изображение [15].

Для восстановления по данным измерений МТВЗА-ГЯ гидрометеорологической информации нужны калиброванные радиояркостные температуры (Тя) микроволнового излучения. Обычно калибровка Тя предваряет любые методы

оценки геофизических параметров. В зарубежных спутниковых центрах вопросам калибровки уделяется не меньшее внимание, чем методам и алгоритмам восстановления геофизических параметров, причем не только во время подготовки запуска прибора, но и на протяжении всего периода его работы [16]. Помимо внутренней и внешней инструментальной калибровки, для обеспечения согласованности в интерпретации спутниковых измерений, часто применяется подход, основанный на так называемой модельной калибровке, когда измерения сопоставляются с расчетными значениями сигнала для известных параметров океана и атмосферы, и на основании этого сопоставления вычисляются значения калибровочных поправок к измерениям [17—19]. Наличие собственных методов калибровки, ориентированных на измерения МТВЗА-ГЯ, позволяет использовать свои алгоритмы восстановления параметров и избежать зависимости от неточностей данных, получаемых из зарубежных источников. Внутренняя калибровка инструмента используется для представления регистрируемых сигналов в виде антенных температур (T_a). Бортовая калибровка МТВЗА-ГЯ корректируется при каждом сканировании за счёт непрерывных измерений интенсивности излучения двух со-

гласованных нагрузок с известными радиояркими температурами — «горячей» и «холодной». В качестве «горячей» нагрузки используется бортовой имитатор абсолютно черного тела с температурой 250—300 К. В качестве «холодной» нагрузки используется калибровочная антенна, ориентированная в космическое пространство и принимающая фоновое реликтовое излучение с $T_\gamma = 2,73$ К [20].

Из-за различных погрешностей внутренней калибровки [21] для перевода значений T_a в T_γ необходима внешняя калибровка данных измерений, т. е. определение функций $T_\gamma = T_\gamma(T_a)$ [22]. Чаще всего при выполнении внешней калибровки предполагается, что зависимости $T_\gamma = T_\gamma(T_a)$ могут быть аппроксимированы линейными функциями [23]. При внешней калибровке эти зависимости определяются на основе сопутствующих данных по T_a и T_γ . При этом, в качестве T_γ могут быть использованы как результаты модельных расчетов при заданных параметрах атмосферы и подстилающей поверхности [24], так уже откалиброванные измерения других спутниковых радиометров с аналогичными характеристиками [25—28].



Рис. 1. Российский спутниковый радиометр МТВЗА-ГЯ [15].

Fig. 1. Russian satellite radiometer MTVZA-Gya [15].

Абсолютная калибровка измерений МТВЗА-ГЯ выполнялась несколькими коллективами исследователей. Авторы [22] калибровали измерения МТВЗА-ГЯ с КА «Метеор-М» № 2 в каналах температурного (52—57 ГГц) и влажностного (183,3 ГГц) зондирования на основе использования результатов модельных расчетов Тя для данных численных прогнозов погоды. Такой подход не годится для калибровки каналов в окнах прозрачности атмосферы, поскольку неопределенность в задании значений излучательной способности подстилающей поверхности может служить существенным источником ошибок [29]. Авторы [16] проводили внешнюю калибровку Тя МТВЗА-ГЯ со спутника «Метеор-М» № 2 в каналах сканера с использованием измерений над бассейном реки Амазонки и над холодными районами океана. В работе [24] авторы провели калибровку Тя МТВЗА-ГЯ на спутнике «Метеор-М» №2—2 в каналах сканера с использованием данных сопутствующих измерений AMSR2 со спутника GCOM—W1. Калибровка основана на применении метода «double-difference technique» [25, 30], при котором проводится регрессия значений Тя МТВЗА-ГЯ на референсные значения Тя AMSR2 для «холодных» и «горячих» областей на основании модельных расчетов [31]. Измерения AMSR2 над областями арктического океана со слабым ветром использовались в качестве опорных «холодных» измерений, а измерения над морским льдом — в качестве опорных «горячих» измерений. Безусловным преимуществом данных AMSR2 в качестве калибровочных являются близкие параметры спутникового сканирования, позволяющие отобразить большое количество сопутствующих данных в полярных областях, разница во времени измерений которых не превышает 10 минут.

В работе [32] авторы обсуждают выбор полигонов на суше для внешней калибровки МТВЗА-ГЯ, акцентируя внимание на том, что использование опыта калибровки зарубежных инструментов-аналогов не всегда оптимально для российского инструмента из-за отличающегося угла встречи с Землей. Авторы предлагают в качестве «горячих» областей использовать полигоны с наименьшими значениями изменчивости эффективного коэффициента излучения, которые, в свою очередь, определяются по данным измерений МТВЗА-ГЯ и реанализа MERRA-2. Подход, при котором авторы при моделировании Тя используют приближение отсутствующей (оказывающей незначительное влияние) атмосферы, вызывает вопросы, поскольку речь идет о каналах на частотах от 10 до 91 ГГц. Однако в заключении к работе авторы указывают на необходимость использования более точных моделей переноса излучения при проведении самой калибровки.

Одной из серьезных проблем при использовании данных измерений МТВЗА-ГЯ является географическая привязка данных — точное позиционирование элементов разрешения на поверхности Земли. Ошибки географической привязки, наблюдаемые при анализе данных измерений МТВЗА-ГЯ, достигают в некоторых случаях 40—70 км [33]. Для потребителей данных отсутствует детальное техническое описание процедуры географической привязки, поэтому нет возможности контролировать этапы действующего алгоритма геопривязки.

Антенные системы приборов серии МТВЗА-ГЯ реализуются в виде однозеркальных параболических антенн с боковым облучением рефлектора [34]. Широкий

диапазон частот требует несколько физически разделённых облучателей, что приводит к ситуации, когда лучи визирования разных частотных каналов ориентированы по-разному [35]. При соблюдении требований к сборке оптической схемы антенны подобная реализация должна характеризоваться одинаковым углом конуса сканирования, с угловым смещением лишь в азимутальной плоскости, для устранения которого предусмотрена операция аппаратного смещения лучей визирования. Однако в реальных условиях обеспечить сонаправленность лучей визирования многоканальных радиометров не удаётся никогда ни для МТВЗА-ГЯ, ни для его зарубежных аналогов. Проблема получения синхронных данных Тя одного и того же элемента поверхности на разных частотах решается за счёт введения разработчиками в процедуру геопривязки корректирующих углов крена, тангажа и рыскания прибора/носителя [33]. Авторы работы [33] предложили независимую схему реализации географической привязки измерений, алгоритм поиска корректирующих углов для разных групп частотных каналов [36]. Проведённые оценки показали, что средняя точность географической привязки с использованием данного алгоритма в два раза превышает точность встроенной геопривязки. Остается неясным, почему предложенный алгоритм не реализован в инфраструктуре создания спутникового продукта по Тя МТВЗА-ГЯ. В настоящий момент данные записываются в неуточненной геопривязке, что затрудняет их использование.

В работе [37] авторы анонсируют потоковую обработку данных МТВЗА-ГЯ в ЦКП (Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа данных спутниковых наблюдений Института космических исследований РАН (ИКИ РАН) «ИКИ-Мониторинг»). Обработка включает распаковку и фильтрацию данных, их геопривязку с использованием прогностической модели движения и параметров космического аппарата, а также радиометрическую калибровку по усреднённым измерениям излучения космоса и чёрного тела и показаниям датчиков температуры.

Существуют подходы автоматического контроля точности геодезической привязки спутниковых изображений, включающие создание опорных банков данных и использование механизмов идентификации одноименных объектов в анализируемых данных и на опорных изображениях (как правило, более высокого разрешения) [38]. Для уточнения геопривязки измерений МТВЗА-ГЯ можно попробовать применить подобный подход, используя актуальную информацию о состоянии различных наблюдаемых объектов, полученную по данным измерений AMSR2. Однако при практической реализации данного подхода ожидается ряд серьёзных затруднений. Во-первых, различия геометрии наблюдений приводят к сильным отличиям спектральных зависимостей и поляризационных контрастов наблюдаемых объектов, что усложняет их отождествление перед проведением процедуры точной географической привязки. Во-вторых, корректное геометрическое преобразование, направленное на оптимальное совмещение наблюдений двумя приборами, окажется как минимум не проще, чем привязка по статической береговой линии, а упрощённые модели не обеспечат необходимой точности фактических углов встречи луча зрения с поверхностью, что критически важно для многих приложений.

Методы восстановления геофизических параметров по данным МТВЗА-ГЯ

Методы восстановления геофизических параметров, основанные на использовании измерений спутниковых сканирующих многоканальных микроволновых радиометров, начали интенсивно развиваться после запуска первого хорошо калиброванного радиометра SSM/I [39]. Дальнейшее развитие алгоритмы получили после запуска японских радиометров серии AMSR в 2002 г. [40]. Поскольку измерения многоканальных сканирующих радиометров проводятся, в том числе на частотах, на которых атмосфера либо прозрачна, либо частично прозрачна, при их использовании возможно восстанавливать как параметры атмосферы, так и параметры подстилающей поверхности. У радиометра МТВЗА-ГЯ измерения в каналах зондировщика (в полосе поглощения кислорода 52—58 ГГц и в области сильной линии поглощения водяного пара на 183,31 ГГц), как и у его аналога SSMIS, позволяют восстанавливать профили температуры и влажности атмосферы. Эти данные дополняют данные наземной наблюдательной сети и приобретают все большую роль в информационном обеспечении численного прогноза погоды. Согласно оценкам ведущих прогностических центров, наибольший вклад в повышение достоверности краткосрочного численного прогноза дает именно усвоение данных микроволновых зондировщиков [41].

В связи с установленной радиометрической стабильностью приборов МТВЗА-ГЯ и сложностью выполнения абсолютной калибровки исходной информации коллективами исследователей независимо развиваются подходы к восстановлению различных параметров природных сред непосредственно на основе регистрируемых антенных температур без перехода к температурам радиояркостным. Практическая эффективность таких подходов подтверждена соответствующими публикациями [22, 42]. Однако их применение приводит к невозможности разделить ошибки калибровки и радиофизического моделирования, что затрудняет развитие и сопоставление различных радиофизических моделей наблюдаемых природных сред.

Методические вопросы микроволнового температурно-влажностного зондирования атмосферы с помощью измерений МТВЗА-ГЯ неоднократно освещались в докладах на всероссийских и зарубежных конференциях с начала 2000-х гг. В. М. Пегасовым и А. Б. Успенским (НИЦ) «Планета». В 2021 г. была опубликована работа [42], в которой авторы представили в деталях метод искусственных нейронных сетей (НС) для восстановления вертикальных профилей температуры и влажности атмосферы по данным МТВЗА-ГЯ со спутника Метеор-М № 2—2. В качестве входных данных использовались антенные температуры, измеренные в каналах МТВЗА-ГЯ.

В качестве обучающего набора вертикальных профилей температуры и влажности атмосферы вместо данных аэрологического радиозондирования (р/з) использовались продукты глобального численного прогноза погоды (ЧПП). Такой подход к составлению обучающей выборки позволил получить глобальное покрытие и высокую дискретность по времени. Поскольку численные эксперименты

выявили существенные погрешности восстанавливаемых профилей вблизи границ между разными типами подстилающей поверхности, для обучения НС формировалась единая глобальная выборка без разбиения на подвыборки по типам подстилающей поверхности. Для верификации метода спутниковые оценки профилей температуры и влажности сравнивались с данными радиозондирования и продукцией прогностических моделей.

Разработкой алгоритмов восстановления профилей температуры и влажности атмосферы по данным МТВЗА-ГЯ Метеор-М №2—2 занимаются также Е. В. Пашинов, Д. М. Ермаков, А. В. Кузьмин и В. В. Стерлядкин из ИКИ РАН. С 2020 г. в институте ведётся работа по внедрению данных МТВЗА-ГЯ в информационный сервис «ВЕГА-Science» — уникальную научную установку, входящую в состав ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Результаты разработки алгоритмов представлялись на девятнадцатой международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» в 2021 г., а результаты внедрения алгоритмов в «ВЕГА-Science» авторизованные пользователи могут посмотреть на сайте <http://sci-vega.ru/maps/leaflet.shtml>.

С момента запуска первого инструмента физическим моделированием радиоярких температур микроволнового излучения для характеристик каналов измерений МТВЗА-ГЯ занимаются в нашей стране исследователи из Тихоокеанского океанологического института им. В. И. Ильичева ДВО РАН Л. М. Митник, М. Л. Митник и В. П. Кулешов [20]. В указанной работе обобщены результаты многолетних исследований авторов по анализу как модельных значений T_y в каналах сканера, так и полей измерений МТВЗА-ГЯ. Подчёркивается, что измерения российского радиометра могут использоваться для восстановления температуры поверхности океана, скорости приводного ветра, интегрального содержания водяного пара в атмосфере, водозапаса облаков, параметров осадков. Полученные поля геофизических параметров позволяют изучать характеристики циклонов, фронтов и атмосферных рек над океаном, распределение морских льдов и свойства ледяных щитов Антарктиды и Гренландии [43, 44]. Подчёркивается необходимость усовершенствования моделей T_y , разработки алгоритмов восстановления параметров, проведения калибровки радиометров и валидации продуктов.

Для восстановления параметров подстилающей поверхности (сплоченность и тип ледяного покрова, водозапас снежного покрова, скорость приводного ветра) и интегральных параметров влагосодержания атмосферы (влагозапас атмосферы (WVC, от англ. Water Vapor Column), водозапас облаков (LWP, от англ. Liquid Water Path), интенсивность осадков) используются каналы сканера на частотах 10—91 ГГц.

Интегральные параметры влагосодержания атмосферы относятся к важнейшим метеорологическим параметрам, изучение которых необходимо для понимания климата Земли [45]. Сведения о WVC и LWP и их временной изменчивости представляют исключительную важность для решения различных метеорологических и климатических задач. Большинство методов восстановления WVC, по данным спутниковых микроволновых радиометров, применимо над морскими

поверхностями, однако есть и работы, демонстрирующие возможность восстановления WVC над другими типами подстилающих поверхностей [46, 47].

Несмотря на то, что разработкой алгоритмов восстановления интегральных параметров влагосодержания атмосферы и параметров подстилающей поверхности по данным МТВЗА-ГЯ научные коллективы НИЦ «Планета», ТОИ ДВО РАН, ИКИ РАН занимаются с момента первого запуска прибора, публикации, описывающие особенности алгоритмов и их применения для изучения окружающей среды, появились сравнительно недавно.

В работе [48] описан метод восстановления влагозапаса безоблачной атмосферы над морскими поверхностями по измерениям МТВЗА-ГЯ. Метод основан на использовании регрессии, предикторами которой являются измеренные T_a в выбранных каналах радиометра. Оптимальный набор каналов для разных районов земного шара проводится в зависимости от климатической зоны, а критерием выбора каналов и вида регрессии является минимальная среднеквадратичная невязка получаемых оценок влагозапаса атмосферы с контрольными значениями по данным реанализа National Center for Environmental Prediction (NCEP) и атмосферных моделей European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF).

Автор работы [49] разработал методику восстановления WVC по данным измерениям МТВЗА-ГЯ разности радиометрических сигналов на вертикальной (V) и горизонтальной (H) поляризациях на частотах 18,7 и 23,8 ГГц, адаптировав подход, описанный в [46]. Особенностью подхода является уход от существенной зависимости используемых разностей от свойств подстилающей поверхности, позволяющий восстанавливать WVC не только над морскими поверхностями, но и над сушей. Автор [49], однако, для подбора регрессионных коэффициентов в алгоритме, использовал данные радиозондирования с малых островов Тихого и Атлантического океанов, оставив разработку алгоритма для суши на будущее. Таким образом, представленный метод позволяет рассчитывать WVC над районами океанов и, несмотря на низкую точность (среднеквадратичная погрешность оценки составляет 4,8 кг/м²), неплохо коррелирует с сопутствующими измерениями WVC зарубежными аналогами.

Сотрудник ИКИ РАН Д. С. Сазонов в составе коллектива исследователей из ИКИ РАН, давно занимающийся повышением возможностей использования данных измерений МТВЗА-ГЯ, в том числе путём работы над геопривязкой измерений, исследовал возможность восстановления интенсивности осадков (R) [50]. Для оценки R использовалась регрессионная модель [51] и индекс рассеяния, для расчёта которого используются вертикально поляризованные измерения на частоте 91,65 ГГц и все измерения на частотах 10,6, 18,7 23,8 и 36,7 ГГц. Полученные результаты сравнения оценок R со спутниковым продуктом по данным GPM (микроволновый радиометр на спутнике Global Precipitation Measurement) продемонстрировали неудовлетворительную точность, но обозначили фронт исследований, главное направление которых автор связывает с усовершенствованием географической привязки и приведением пространственного разрешения разных каналов к единому масштабу.

Лаборатория спутниковой океанографии Российского государственного гидрометеорологического университета (РГГМУ) за последние годы внесла существенный вклад в развитие методов и алгоритмов восстановления параметров атмосферы и океана по данным AMSR2, признанный зарубежными специалистами [47, 52—54]. Для условий Арктики, по данным радиометра AMSR2, в ЛСО были разработаны несколько уникальных методов, позволяющих с высокой точностью восстанавливать интегральные параметры влагосодержания атмосферы [47, 52] и параметры атмосферного излучения [54] над морским льдом. Получив в своё распоряжение большой архив данных МТВЗА-ГЯ за целый год измерений, сотрудники лаборатории использовали наработанный опыт для создания алгоритмов восстановления геофизических параметров по данным измерений МТВЗА-ГЯ в каналах сканера.

Методологические основы создания алгоритмов для МТВЗА-ГЯ такие же, как и для AMSR2. Физическое моделирование Т_я уходящего излучения системы подстилающая поверхность — атмосфера позволяет рассчитывать модельные значения Т_я для большого количества геофизических параметров, в качестве которых в последние годы используются данные реанализов. Обратная задача традиционно решается с использованием нейронных сетей (НС), входными параметрами для которых служат Т_я в тех каналах, в которых они наиболее чувствительны к тем или иным параметрам. Верификация алгоритмов проводится путем их применения к данным спутниковых измерений и сравнения результатов с данными независимых измерений параметров — либо контактных, либо спутниковых.

Алгоритм восстановления влагозапаса атмосферы WVC над районами океанов был представлен на международном симпозиуме IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) и опубликован в статье [55]. Алгоритм включает глобальную НС (НС1) и тропическую НС (НС2) — настроенную специально для условий тропических циклонов (ТЦ). Глобальная НС использует измерения МТВЗА-ГЯ на всех частотах, кроме 91,65 ГГц, тропическая — только измерения на частотах 18,7 и 36,7 ГГц. Несмотря на то, что модельная точность НС2, рассчитанная для всего массива данных, была существенно ниже, чем точность НС1, в условиях ТЦ именно тропическая НС продемонстрировала возможность восстановления физических значений WVC во всей области ТЦ, включая области интенсивных осадков. Это связано с тем, что микроволновое излучение на используемых в НС2 частотах не рассеивается на дождевых каплях и далеко от насыщения, что позволяет использовать НС2 при изучении ТЦ. Верификация алгоритма проводилась с помощью спутниковых оценок WVC по данным AMSR2, выполненных с помощью разработанного ранее метода [2].

Для параметров подстилающей поверхности для радиометра МТВЗА-ГЯ ЛСО разработала два алгоритма — алгоритм восстановления скорости приводного ветра (SWS, от англ. Surface Wind Speed) [56], основанный на использовании при моделировании геофизической модельной функции (ГМФ), настроенной на экспериментальных данных по ветровым поправкам к коэффициентам излучения, полученным на основании измерений AMSR2; и алгоритм восстановления сплоченности ледяного покрова, основанный на поляризационных измерениях X-диапазона [57].

Самая большая проблема при восстановлении SWS по данным МТВЗА-ГЯ — нестандартный (65°) угол измерений. Влияние ветра на эффективный коэффициент излучения океана очень сильно зависит от угла наблюдений [58]. Существующие ГМФ, разработанные для зарубежных инструментов SSM/I, AMSR2, WindSat с углом зондирования $53\text{—}55^\circ$, основаны на огромном количестве экспериментальных данных, собранных в том числе в рамках специальных подспутниковых экспериментов. Соответственно, все модели зависимости излучения от скорости ветра, созданные на сегодняшний день, как экспериментальные, так и теоретические, неприменимы для моделирования измерений МТВЗА-ГЯ. Создание согласованной физической модели излучения и рассеяния океана, способной описать микроволновые наблюдения взволнованной морской поверхности при разных углах и частотах в широком диапазоне скоростей ветра, является до сих пор нерешенной задачей. В частности, в работе [59] показано, что предложенная теоретическая ГМФ, хорошо согласующаяся с данными измерений AMSR2 под углом 55° , не согласуется с измерениями МТВЗА-ГЯ под углом 65° без существенных эмпирических настроек. Основными факторами формирования избыточного микроволнового излучения океана являются шероховатость морской поверхности и обрушения ветровых волн. Вызываемые ими контрасты T_a увеличиваются с ростом скорости ветра вплоть до 70 м/с и более, что позволяет восстанавливать поля скорости ветра, в том числе в ураганах [60].

В работе [56] представлен НС-алгоритм восстановления SWS по данным МТВЗА-ГЯ. Алгоритм основан на теоретической ГМФ, описанной в [59] и использованной для моделирования измерений МТВЗА-ГЯ на каналах $10,6$ и $18,7$ ГГц на горизонтальной и вертикальной поляризации. Следует отметить, что модель [59] была протестирована только для частоты $10,6$ ГГц, а для частоты $18,7$ ГГц была использована «как есть», без проверки на соответствие данным наблюдений. Тем не менее, созданный НС-алгоритм, протестированный на основании сравнения с сопутствующими измерениями ветра радиометром AMSR2, продемонстрировал высокую точность восстановления во всём диапазоне скоростей ветра. Более того, НС-алгоритм был применен к измерениям МТВЗА-ГЯ над несколькими тропическими циклонами. Восстановленные максимальные значения SWS в ТЦ оказались близки к SWS по данным AMSR2, что подтверждает возможность применения алгоритма для изучения ТЦ.

Возможности использования алгоритма для изучения полей ветра во внетропических циклонах (ВТЦ) северной Атлантики детально проанализированы в работе [61]. В ней было проведено сравнение полей SWS, по данным квазисинхронных измерений МТВЗА-ГЯ и AMSR2 для 67 ВТЦ за период с 1 апреля 2021 г. по 31 марта 2022 г., и оценены систематические смещения и среднеквадратичные ошибки восстановления для разных диапазонов значений SWS, включая сильные ($> 15\text{ м/с}$) и штормовые ($> 25\text{ м/с}$) ветра. Показано, что максимальные скорости ветра в ВТЦ, по данным AMSR2, превышают максимальные скорости ветра, по данным МТВЗА-ГЯ, в среднем на 10 %. Частично результирующее занижение высоких SWS, по данным МТВЗА, обусловлено разницей в пространственном разрешении каналов измерений МТВЗА-ГЯ и AMSR2. Но основная причина, скорее

всего, лежит в неточной модели ГМФ в области высоких ветров, лежащей в основе алгоритма.

Спутниковые микроволновые радиометры являются единственными инструментами, позволяющими проводить регулярный глобальный мониторинг параметров ледяного покрова в Арктике и количественно оценивать его параметры. Зарубежные радиометрические измерения, начиная с 1978 г., обеспечили получение непрерывных данных, позволивших строить длинные временные ряды таких параметров, как: площадь, границы и тип ледяного покрова (однолетний/многолетний); оценивать климатические тенденции и тренды за последние десятилетия [62]. Параметры измерений МТВЗА-ГЯ позволяют включить российский инструмент в систему наблюдений за арктическим морским льдом при условии корректной геопривязки и калибровки измерений, а также при наличии точных алгоритмов восстановления параметров морского льда. Измерения спутниковых микроволновых радиометров на частотах вблизи 90 ГГц позволяют получать поля сплочённости морского льда (SIC, от англ. Sea Ice Concentration) с максимально высоким пространственным разрешением (3—5 км) [63].

Алгоритмы восстановления SIC, позволяющие строить карты морского льда с максимальным пространственным разрешением, основаны на использовании поляризационных измерений (PD, от англ. Polarization Difference) на частотах вблизи 90 ГГц. Но поскольку для МТВЗА-ГЯ на спутнике «Метеор-М» № 2 не удалось добиться функционирования одного из каналов измерений на частоте 91,65 ГГц, для восстановления SIC в работе [57] была проанализирована возможность использования PD измерений на каналах, работающих на частотах 10,6 и 36,7 ГГц, и предложены формулы для расчета SIC. При оценке работоспособности предложенных формул было проведено их сравнение со значениями SIC, восстановленными по данным AMSR2, а также проведен анализ ледовых карт Арктического и Антарктического научно-исследовательского института (АНИИ), подтвердивший адекватность восстановленных полей SIC, а для некоторых областей о повышении точности оценок SIC по данным МТВЗА-ГЯ. Таким образом, несмотря на низкое, по сравнению с зарубежными аналогами, пространственное разрешение, поля SIC с успехом могут заменить эти аналоги, например, в климатических исследованиях. Радиометр МТВЗА-ГЯ на последнем из запущенных спутников серии «Метеор-М» № 2 (№ 2—4) имеет оба работающих канала на частоте 91,65 ГГц, что открывает возможности для разработки новых алгоритмов восстановления SIC, позволяющих строить карты ледяного покрова с разрешением 14×30 км.

Доступность данных МТВЗА-ГЯ

На текущий момент данные измерений МТВЗА-ГЯ поступают в центры приема ФБГУ НИЦ «Планета» (<http://planet.iitp.ru/>) дважды в сутки и оттуда, по запросу, в ЦКП «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 [37]. ЦКП «ИКИ-Мониторинг» анонсирует возможность работы с архивными данными МТВЗА-ГЯ, но фактически коллективу ЛСО РГГМУ, в том числе авторам данного обзора, на протяжении последнего десятилетия удавалось получать данные для проведения исследований только благодаря личным контактам с разработчиками (АО «Российские космические системы») и сотрудниками НИЦ «Планета».

Заключение

В статье представлен обзор исследований, связанных с использованием данных измерений российского спутникового сканирующего многоканального радиометра МТВЗА-ГЯ со спутников серии «Метеор-М». Основные направления исследований включают разработку методов восстановления геофизических параметров атмосферы и подстилающей поверхности, а также решение проблем с географической привязкой данных и их калибровкой.

МТВЗА-ГЯ представляет собой один из уникальных микроволновых инструментов в мире (единственный аналог — американский радиометр SSMIS на спутниках серии DMSP), сочетающий в себе функционал зондировщика и сканера с широкими возможностями оперативного получения обширной гидрометеорологической информации, которую можно использовать как для ретроспективных исследований, так и для улучшения точности прогнозов различной заблаговременности. На сегодняшний день, по данным МТВЗА-ГЯ, опубликованы работы по восстановлению профилей температуры и влажности атмосферы, влагозапаса атмосферы, интенсивности осадков, скорости приводного ветра и сплочённости ледяного покрова.

Несмотря на то, что первый инструмент был запущен 17 лет назад (на спутнике «Метеор-М» №1), количество работ, связанных с использованием данных МТВЗА-ГЯ, невелико, особенно по сравнению с работами, ориентированными на зарубежные данные. Ключевой проблемой, сдерживающей развитие и совершенствование методов, позволяющих грамотно и эффективно распорядиться этой бесценной информацией, является отсутствие данных в широком доступе. Научные публикации на основе данных МТВЗА-ГЯ выпускаются почти исключительно коллективами российских ученых, причем число таких коллективов невелико: исключая разработчиков (АО «Российские космические системы»), это коллективы НИЦ «Планета», ИКИ РАН, ТОИ ДВО РАН и ЛСО РГГМУ. Попытка проанализировать доступную информацию МТВЗА-ГЯ иностранными коллегами представлена в [64], но сама работа содержит грубые ошибки интерпретации данных, что подчеркивает слабое знакомство мирового научного сообщества с особенностями функционирования российского прибора.

С марта 2016 г. некоторое время данные уровня Level 1В передавались Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) в зарубежный центр распространения спутниковых данных EUMETSAT, главной миссией которого является хранение и распространение

готовых спутниковых продуктов, предоставляемых гидрометеорологическими организациями со всего мира. Однако данные МТВЗА-ГЯ в EUMETSAT не архивировались, поэтому получить их можно было только в режиме реального времени через сервис EUMETCast, требующий для использования лицензии и специального оборудования. В настоящий момент данные МТВЗА-ГЯ в EUMETSAT не передаются.

Мы уверены, что обеспечение полного оперативного доступа к данным измерений единственного российского микроволнового многоканального сканирующего радиометра позволит дать новый старт как работам по геопривязке и внешней калибровке данных, так и разработкам в области развития методов восстановления геофизических параметров по данным МТВЗА-ГЯ.

Список литературы

1. Заболотских Е. В. Спутниковые пассивные микроволновые методы зондирования системы «Океан-Атмосфера» для изучения экстремальных погодных явлений // Ученые Записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2016. № 45. С. 64—80.
2. Zabolotskikh E. V., Mitnik L. M., Chapron B. New approach for severe marine weather study using satellite passive microwave sensing // Geophysics Research Letters. 2013. V. 40. No 13. P. 3347—3350.
3. Кондратьев К. Я. Термическое зондирование атмосферы со спутников. Гидрометеиздат, 1970. 409 с.
4. Wentz F. J. SSM/I Version-7 Calibration Report, report number 011012 // Remote Sensing Systems. St. Rosa CA. 2013. 46 p.
5. Rocken C., Van Hove V., Ware R. Near real-time GPS sensing of atmospheric water vapor // Geophysical Research Letter. 1997. V. 24. No 24. P. 3221—3224. doi: 10.1029/97GL03312.
6. Andersson E., Hólm E., Bauer P. et al. Analysis and forecast impact of the main humidity observing systems // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2007. V. 133. No. 627. P. 1473—1485. doi: <https://doi.org/10.1002/qj.112>.
7. Bobylev L. P., Zabolotskikh E. V., Mitnik L. M., Mitnik M. L. Arctic Polar Low Detection and Monitoring Using Atmospheric Water Vapor Retrievals from Satellite Passive Microwave Data // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2011. V. 49. No 9. P. 3302—3310. doi: 10.1109/TGRS.2011.2143720.
8. Vasilyeva P. V., Zabolotskikh E. V., Chapron B. Comparative analysis of the North Atlantic and North Pacific extratropical cyclone characteristics retrieved from ERA-Interim reanalysis and AMSR-E data // Sovremennye Problemy Distancionnogo Zondirovaniya Zemli Iz Kosmosa. 2018. V. 15. No 4. P. 236—248. doi: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-236-248.
9. Trenberth K. E., Zhang Y., Fasullo J. V., Taguchi, S. Climate variability and relationships between top-of-atmosphere radiation and temperatures on Earth // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2015. V. 120. No 9. P. 3642—3659. doi: 10.1002/2014JD022887.
10. Reul N., Tenerelli J., Chapron B. et al. SMOS satellite L-band radiometer: A new capability for ocean surface remote sensing in hurricanes // Journal of Geophysical Research: Oceans 1978—2012. 2012. V. 117. No. C2. doi: 10.1029/2011JC007474.
11. Асмус В. В., Загребяев В. А., Макриденко Л. А. и др. Система полярно-орбитальных метеорологических спутников серии «Метеор-М» // Метеорология и Гидрология. 2014. № 12. С. 5—16. doi: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-48-63.
12. Болдырев В. В., Горобец Н. Н., Ильгасов П. А. и др. Спутниковый микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ГЯ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 5. № 1. С. 243—248.
13. Барсуков И. А., Болдырев В. В., Гаврилов М. И. и др. Спутниковая СВЧ-радиометрия для решения задач дистанционного зондирования Земли // Радиотехника. 2021. Т. 8. № 1. С. 11—23.

14. Барсуков И. А., Никитин О. В., Стрельцов А. М., Черный И. В. Калибровка Свч-Радиометра МТВЗА-ГЯ // *Космонавтика и ракетостроение*. 2010. № 1 (58).
15. 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.
16. 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.
17. Gentemann C. L., Wentz F. J., Brewer M. et al. Passive microwave remote sensing of the ocean: An overview // *Oceanography from Space*. Springer, 2010. P. 13—33. doi: 10.1007/978-90-481-8681-5_2.
18. Wentz F. J., Meissner V. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD), Version 2, AMSR Ocean Algorithm, RSS Tech. Proposal 121599A-1, Remote Sensing Systems // Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD), Version 2, AMSR Ocean Algorithm. 121599A-1 Remote Sens. Syst. 2000.
19. Zabolotskikh E. V., Mitnik L. M., Chapron B. An Updated Geophysical Model for AMSR-E and SSMIS Brightness Temperature Simulations over Oceans // *Remote Sensing*. 2014. V. 6. No 3. P. 2317—2342.
20. Чернявский Г. М., Митник Л. М., Кулешов В. П. и др. Моделирование яркостной температуры и первые результаты, полученные микроволновым радиометром МТВЗА-ГЯ со спутника «Метеор-М» № 2-2 // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2020. Т. 17. № 3. С. 51—65.
21. Weng F., Zou X., Sun N. et al. Calibration of Suomi national polar-orbiting partnership advanced technology microwave sounder // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2013. V. 118. No. 19. P. 11—187. doi: 10.1002/jgrd.50840.
22. Успенский А. Б., Асмус В. В., Крамчанинова Е. К. и др. Абсолютная калибровка каналов атмосферного зондирования спутникового микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ // *Исследование Земли из космоса*. 2016. № 5. С. 57—70. doi: 10.7868/S0205961416050079.
23. 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.
24. Заболотских Е. В., Балашова Е. А. Внешняя калибровка измерений российского спутникового микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ в каналах сканера. Часть 2. Эксперимент // *Метеорология и гидрология*. 2021. № 11. С. 47—55. doi: 10.52002/0130-2906-2021-11-47-55.
25. Biswas S. K., Farrar S., Gopalan K. et al. Intercalibration of microwave radiometer brightness temperatures for the global precipitation measurement mission // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2012. V. 51. No 3. P. 1465—1477. doi: 10.1109/TGRS.2012.2217148.
26. Colton M. C., Poe G. A. Intersensor calibration of DMSP SSM/I's: F-8 to F-14, 1987-1997 // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1999. V. 37. No 1. P. 418—439. doi: 10.1109/36.739079.
27. Das N. N., Colliander A., Chan S. K. et al. Intercomparisons of brightness temperature observations over land from AMSR-E and WindSat // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2013. V. 52. No. 1. P. 452—464. doi: 10.1109/TGRS.2013.2241445.
28. Yan B., Weng F. Intercalibration Between Special Sensor Microwave Imager/Sounder and Special Sensor Microwave Imager // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2008. V. 46. No. 4. P. 984—995.
29. Wentz F. J., Gentemann C. L., Ashcroft P. D. On-orbit calibration of AMSR-E and the retrieval of ocean products, paper presented at the 12th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography // 36th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology. 2003. P. 10—13.
30. Berg W., Bilanow S., Chen R. et al. Intercalibration of the GPM Microwave Radiometer Constellation // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2016. V. 33. No. 12. P. 2639—2654. doi: 10.1175/JTECH-D-16-0100.1

31. Заболотских Е. В. Внешняя калибровка измерений российского спутникового микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ в каналах сканера. Часть 1. Моделирование // *Метеорология и гидрология*. 2021. № 10. С. 57—65. doi: 10.52002/0130-2906-2021-10-57-65.
32. Садовский И. Н., Сазонов Д. С. Выбор потенциальных полигонов для внешней калибровки российского сканера/зондировщика МТВЗА-ГЯ // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2025. Т. 22. № 1. С. 26—39. doi: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-26-39.
33. Садовский И. Н., Сазонов Д. С. Географическая привязка данных дистанционных радиометрических измерений МТВЗА-ГЯ // *Исследования Земли Из Космоса*. 2022. № 6. С. 101—112. doi: 10.31857/S0205961422060100.
34. Барсуков И. А., Митник Л. М., Болдырев В. В. Метеорологический спутник «Метеор-М» № 2-3: предварительные результаты микроволнового зондирования Земли // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2025. Т. 22. № 1. С. 315—326. doi: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-315-326.
35. Садовский И. Н., Сазонов Д. С., Клитная А. В. Новый подход к реализации процедуры географической привязки измерений МТВЗА-ГЯ // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2025. Т. 22. № 5. С. 87—95. doi: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-87-95.
36. Садовский И. Н., Сазонов Д. С. Корректировка географической привязки данных МТВЗА-ГЯ // *Исследование Земли из космоса*. 2023. Т. 6. С. 73—85. doi: 10.31857/S0205961423060076.
37. Ермаков Д. М., Кузьмин А. В., Мазуров А. А. и др. 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. doi: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-298-303.
38. Кузнецов А. Е., Пошехонов В. И., Рыжиков А. С. Технология автоматического контроля точности геопривязки спутниковых изображений по опорным снимкам от КА «LANDSAT-8» // *Цифровая Обработка Сигналов*. 2015. № 3. С. 37—42.
39. Wentz F. J. A well-calibrated ocean algorithm for special sensor microwave/imager // *Journal of Geophysical Research*. 1997. V. 102. P. 8703—8718.
40. Kawanishi V., Sezai V., Ito Y. et al. The Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth Observing System (AMSR-E), NASDA's contribution to the EOS for global energy and water cycle studies // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2003. V. 41. No 2. P. 184—194. doi: 10.1109/TGRS.2002.808331.
41. Гайфулин Д. Р., Цырульников М. Д., Успенский А. Б. и др. Использование информации спутникового микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ в системе усвоения данных Гидрометцентра России // *Метеорология и гидрология*. 2017. № 9. С. 36—47. doi: 10.37162/2618-9631-2019-4-112-126.
42. 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 // *Исследование Земли из космоса*. 2021. № 6. С. 83—95. doi: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-27-35.
43. Митник Л. М., Митник М. Л., Гурвич И. А. и др. Исследование эволюции тропических циклонов в северо-западной части Тихого океана по данным СВЧ-радиометров МТВЗА-ГЯ со спутника Метеор-М №1 и AMSR-E со спутника Aqua // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2012. Т. 9. № 4. С. 121—128.
44. Митник Л. М., Митник М. Л., Чернявский Г. М. и др. Приводный ветер и морской лед в Баренцевом море по данным микроволновых измерений со спутников «Метеор-м» № 1 и GCOM-W1 в январе-марте 2013 г. // *Исследование Земли из космоса*. 2015. № 6. С. 36. doi: 10.7868/S0205961415040077.
45. Малинин В. Н., Гордеева С. М., Наумов Л. М. Влагосодержание атмосферы как климатообразующий фактор // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15. № 3. С. 243—251. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-243-251.
46. Deeter M. N. A new satellite retrieval method for precipitable water vapor over land and ocean // *Geophysical Research Letter*. 2007. V. 34. No 2. P. L02815. doi: 10.1029/2006GL028019.
47. Zabolotskikh E. V., Khvorostovsky K. S., Chapron B. An Advanced Algorithm to Retrieve Total Atmospheric Water Vapor Content From the Advanced Microwave Scanning Radiometer Data Over Sea

- Ice and Sea Water Surfaces in the Arctic // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2020. V. 58. No 5. P. 3123—3135. doi: 10.1109/TGRS.2019.2948289.
48. Косторная А. А., Рублев А. Н., Голомолзин В. В. Определение влагосодержания в безоблачной атмосфере над океаном по измерениям микроволнового радиометра МТВ3А-ГЯ // *Вычислительные технологии*. 2020. Т. 25. № 4. С. 83—98. doi: 10.25743/ICT.2020.25.4.008.
 49. Пашинов Е. В. Восстановление интегрального паросодержания атмосферы по данным прибора МТВ3А-ГЯ («Метеор-М» № 2) над поверхностью океана // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15. № 4. С. 225—235. doi: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-225-235.
 50. Сазонов Д. С. Исследование возможности восстановления интенсивности осадков по измерениям МТВ3А-ГЯ // *Исследование Земли из космоса*. 2023. № 5. С. 23—35. doi: 10.31857/S020596142305007X.
 51. Ferraro R. R. Special sensor microwave imager derived global rainfall estimates for climatological applications // *Journal of Geophysical Research*. 1997. V. 102. No. D14. P. 16715—16735.
 52. Заболотских Е. В. Восстановление значений водозапаса облаков над морским льдом Арктики по данным радиометра AMSR2 // *Метеорология и гидрология*. 2025. № 11. С. 5—11. doi: 10.52002/0130-2906-2025-11-5-11.
 53. Заболотских Е. В., Балашова Е. А., Шапрон Б. Усовершенствованный метод восстановления сплочённости морского льда по данным спутниковых микроволновых измерений вблизи 90 ГГц // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 4. С. 233—246. doi: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-233-243.
 54. Zabolotskikh E. V., Chapron B. Estimation of Atmospheric Microwave Radiation Parameters Over the Arctic Sea Ice From the AMSR2 Data // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2024. V. 62. P. 4104211. doi: 10.1109/TGRS.2024.3392369.
 55. Zabolotskikh E. V., Zhivotovskaia M. A. Atmospheric Water Vapor Column Retrievals from MTVZA—GYa Measurements // *IGARSS 2022-2022 IEEE International Geoscience Remote Sensing Symposium*. 2022. P. 7387—7390. doi: 10.1109/IGARSS46834.2022.9883207.
 56. Заболотских Е. В., Азаров С. М., Животовская М. А. Восстановление скорости приводного ветра по данным МТВ3А-ГЯ // *Метеорология и гидрология*. 2023. № 8. С. 24—34. doi: 10.52002/0130-2906-2023-8-24-34.
 57. Заболотских Е. В., Балашова Е. А., Азаров С. М. Восстановление сплочённости морского льда по данным измерений МТВ3А-ГЯ // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2022. Т. 19. № 1. С. 27—38. doi: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-27-38.
 58. Plant W. J., Irisov V. A. joint active/passive physical model of sea surface microwave signatures // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2017. V. 122. No. 4. P. 3219—3239. doi: 10.1109/IGARSS.2017.8127248.
 59. Заболотских Е. В., Шапрон Б. Моделирование микроволнового излучения морей Арктики в X диапазоне по данным спутниковых наблюдений: учет угла измерений // *Метеорология и гидрология*. 2021. № 4. С. 69—77. doi: 10.52002/0130-2906-2021-4-69-77.
 60. Zabolotskikh E. V. New Possibilities for Geophysical Parameter Retrievals Opened by GCOM-W1 AMSR2 // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2015. V. 8. No 9. P. 4248—4261. doi: 10.1109/MicroRad.2014.6878931.
 61. Заболотских Е. В., Животовская М. А., Ярусов К. И., Азаров С. М. Поля ветра во внетропических циклонах Северной Атлантики по данным спутникового микроволнового радиометра МТВ3А-ГЯ // *Метеорология и гидрология*. 2024. № 10. С. 5—14. doi: 10.52002/0130-2906-2024-10-5-14.
 62. Comiso J. C., Hall D. K. Climate trends in the Arctic as observed from space // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*. 2014. V. 5. No 3. P. 389—409. doi: 10.1002/wcc.277.
 63. Svendsen E., Matzler C., Grenfell V. C. A model for retrieving total sea ice concentration from a spaceborne dual-polarized passive microwave instrument operating near 90 GHz // *International Journal of Remote Sensing*. 1987. V. 8. No. 10. P. 1479—1487. doi: 10.1080/01431168708954790.
 64. Xiao H., Han W., Han Y. et. al. First trial for the assimilation of radiance data from MTVZA-GY on board the new Russian satellite meteor-M N2-2 in the CMA-GFS 4D-Var system // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2024. V. 150 No. 765. P. 5000—5019. doi: 10.1002/qj.4853.

References

1. Zabolotskikh E. V. Satellite-Based Passive Microwave Ocean-Atmosphere Sensing Methods for Studying Extreme Weather Events. *Gidrometeorologiya I ekologiya = Hydrometeorology and ecology*. 2016; (45): (64—80). (In Russ.).
2. Zabolotskikh E. V., Mitnik L. M., Chapron B. New approach for severe marine weather study using satellite passive microwave sensing. *Geophysics Research Letters*. 2013; 40 (13): 3347—3350.
3. Kondratiev K. YA. *Termicheskoe zondirovanie atmosfery so sputnikov = Thermal sounding of the atmosphere from satellites*. Leningrad: Hydrometeoisdat, 1970; 409 p. (In Russ.).
4. Wentz F.J. SSM/I Version-7 Calibration Report, report number 011012. *Remote Sensing Systems*. 2013; 46.
5. Rocken C., Van Hove T., Ware R. Near real-time GPS sensing of atmospheric water vapor. *Geophysical Research Letter*. 1997; 24 (24): 3221—3224. doi: 10.1029/97GL03312.
6. Andersson E., Hölm E., Bauer P. et al. Analysis and forecast impact of the main humidity observing systems. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2007; 133 (627): 1473—1485. doi: 10.1002/qj.112.
7. Bobylev L. P., Zabolotskikh, E. V., Mitnik L. M., Mitnik M. L. Arctic Polar Low Detection and Monitoring Using Atmospheric Water Vapor Retrievals from Satellite Passive Microwave Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2011; 49 (9): 3302—3310. doi: 10.1109/TGRS.2011.2143720.
8. Vasilyeva P. V., Zabolotskikh E. V., Chapron B. Comparative analysis of the North Atlantic and North Pacific extratropical cyclone characteristics retrieved from ERA-Interim reanalysis and AMSR-E data. *Sovremennye Problemy Distancionnogo Zondirovaniya Zemli Iz Kosmosa*. 2018; 15 (4): 236—248. doi: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-236-248.
9. Trenberth K. E., Zhang Y., Fasullo J. T., Taguchi S. Climate variability and relationships between top-of-atmosphere radiation and temperatures on Earth. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2015; 120 (9): 3642—3659. doi: 10.1002/2014JD022887.
10. Reul N., Tenerelli J., Chapron B. et al. SMOS satellite L-band radiometer: A new capability for ocean surface remote sensing in hurricanes. *Journal of Geophysical Research: Oceans, 1978—2012*. 2012; 117 (C2). doi: 10.1029/2011JC007474.
11. Asmus V. V., Zagrebaev V. A., Makridenko L. A. The Meteor-M series of polar-orbiting meteorological satellites. *Meteorologiya I Gidrologiya = Meteorology And Hydrology*. 2014; (12): (5—16). doi: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-48-63. (In Russ.).
12. Boldyrev V. V., Gorobec N. N., Il'gasov P. A. et al. Satellite microwave scanner/sounder MTVZA—GYa. *Sovremennye Problemy Distancionnogo Zondirovaniya Zemli Iz Kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2008; 5 (1): (243—248). (In Russ.).
13. Barsukov I. A., Boldyrev V. V., Gavrilov M. I. et al. Satellite microwave radiometry for solving problems of Earth remote sensing. *Radiotekhnika = Radio engineering*. 2021; 8 (1): (11—23). (In Russ.).
14. Barsukov I. A., Nikitin O. V., Strel'cov A. M., CHernyj I. V. Calibration of the MTVZA—GYa Microwave Radiometer. *Kosmonavtika I Raketostroenie = Cosmonautics and Rocketry*. 2010; 1 (58). (In Russ.).
15. CHernyavskij G. M., Mitnik L. M., Kuleshov I. V. et al. Microwave sounding of the ocean, atmosphere and land cover using data from the Meteor-M No. 2 satellite. *Sovremennye Problemy Distancionnogo Zondirovaniya Zemli Iz Kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2018; 15 (4). (In Russ.).
16. Mitnik L. M., Mitnik M. L. Calibration and validation are essential components of microwave radiometric measurements from the Meteor-M No. 2 series satellites. *Sovremennye Problemy Distancionnogo Zondirovaniya Zemli Iz Kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2016; 13 (1): 95—104. doi: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-95-104. (In Russ.).
17. Gentemann C. L., Wentz F. J., Brewer M., Hilburn K., & Smith D. Passive microwave remote sensing of the ocean: An overview. *Oceanography from Space*. 2010; 13—33. doi: 10.1007/978-90-481-8681-5_2.
18. Wentz F. J., Meissner T. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD), Version 2, AMSR Ocean Algorithm, RSS Tech. Proposal 121599A-1, Remote Sensing Systems. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD), Version 2, AMSR Ocean Algorithm. 121599A-1 Remote Sensing System 2000.

19. Zabolotskikh E. V., Mitnik L. M., Chapron B. An Updated Geophysical Model for AMSR-E and SSMIS Brightness Temperature Simulations over Oceans. *Remote Sensing*. 2014; 6 (3): 2317—2342.
20. CHernyavskij G. M., Mitnik, L.M., Kuleshov, V. P. et al. Modeling of brightness temperature and first results obtained by the microwave radiometer MTVZA—GYa from the Meteor-M No. 2-2 satellite. *Sovremennye Problemy Distancionnogo Zondirovaniya Zemli Iz Kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2020; 17 (3): (51—65). (In Russ.).
21. Weng F., Zou, X., Sun, N. et al. Calibration of Suomi national polar-orbiting partnership advanced technology microwave sounder. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2013; 118 (19): (11—187). doi: 10.1002/jgrd.50840.
22. Uspenskij A. B., Asmus V. V., Kramchaninova E. K. et al. Absolute calibration of atmospheric sounding channels of the satellite microwave radiometer MTVZA—GYa. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016; (5): (57—70). doi: 10.7868/S0205961416050079. (In Russ.).
23. Uspenskij A. B., Kramchaninova E.K., Koscov V. S. et al. Development of a system for external calibration and validation of measurement data for the microwave radiometer MTVZA—GYa of the Meteor-M spacecraft No. 2. *Sovremennye Problemy Distancionnogo Zondirovaniya Zemli Iz Kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2017; 14 (4): (27—35). doi: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-27-35. (In Russ.).
24. Zabolotskikh E. V., Balashova E. A. External calibration of measurements of the Russian satellite microwave radiometer MTVZA—GYa in scanner channels. Part 2. Experiment. *Meteorologiya I Gidrologiya = Meteorology And Hydrology*. 2021; (11): (47—55). doi: 10.52002/0130-2906-2021-11-47-55. (In Russ.).
25. Biswas S. K., Farrar S., Gopalan K. et al. Intercalibration of microwave radiometer brightness temperatures for the global precipitation measurement mission. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2012; 51 (3): 1465—1477. doi: 10.1109/TGRS.2012.2217148.
26. Colton M. C., Poe G. A. Intersensor calibration of DMSP SSM/I's: F-8 to F-14, 1987-1997. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1999; 37 (1): 418—439. doi: 10.1109/36.739079.
27. Das N. N., Colliander A., Chan S. K. et al. Intercomparisons of brightness temperature observations over land from AMSR-E and WindSat. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2013; 52 (1): 452—464. doi: 10.1109/TGRS.2013.2241445.
28. Yan B., Weng F. Intercalibration Between Special Sensor Microwave Imager/Sounder and Special Sensor Microwave Imager. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2008; 46 (4): 984—995.
29. Wentz F. J., Gentemann C. L., Ashcroft P. D. On-orbit calibration of AMSR-E and the retrieval of ocean products, paper presented at the 12th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography. *36th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology*. 2003; 10—13.
30. Berg W., Bilanow S., Chen R. et al. Intercalibration of the GPM Microwave Radiometer Constellation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2016; 33 (12): 2639—2654. doi: 10.1175/JTECH-D-16-0100.1.
31. Zabolotskikh E. V. External Calibration of Measurements of the Russian Satellite Microwave Radiometer MTVZA—GYa in Scanner Channels. Part 1. Modeling. *Meteorologiya I Gidrologiya = Meteorology And Hydrology*. 2021; (10): (57—65). doi: 10.52002/0130-2906-2021-10-57-65. (In Russ.).
32. Sadovskij I. N., Sazonov D. S. Selection of potential sites for external calibration of the Russian scanner/probe MTVZA—GYa. *Sovremennye Problemy Distancionnogo Zondirovaniya Zemli Iz Kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2025; 22 (1): 26—39. doi: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-26-39. (In Russ.).
33. Sadovskij I. N., Sazonov D. S. Georeferencing of remote radiometric measurement data from MTVZA—GYa. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2022; (6): (101—112). doi: 10.31857/S0205961422060100. (In Russ.).
34. Barsukov I. A., Mitnik L. M., Boldyrev V. V. Meteorological satellite “Meteor-M” No. 2-3: preliminary results of microwave sounding of the Earth. *Sovremennye Problemy Distancionnogo Zondirovaniya Zemli Iz Kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2025; 22 (1): 315—326. doi: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-315-326. (In Russ.).
35. Sadovskij I. N., Sazonov D. S., Klitnaya A. V. A new approach to the implementation of the procedure for georeferencing measurements of MTVZA—GYa. *Sovremennye Problemy Distancionnogo*

- Zondirovaniya Zemli Iz Kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2025; 22 (5): 87—95. doi: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-87-95. (In Russ.).
36. Sadvskij I. N., Sazonov D. S. Correction of georeferencing of MTVZA—GYa data. *Issledovanie Zemli Iz Kosmosa = Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2023; (6): (73—85). doi: 10.31857/S0205961423060076. (In Russ.).
 37. Ermakov D. M., Kuz'min A. V., Mazurov A. A. et al. The concept of stream processing of data from Russian satellite microwave radiometers of the MTVZA series based on the IKI-Monitoring Center of Collective Use. *Sovremennye Problemy Distancionnogo Zondirovaniya Zemli Iz Kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2021; 18 (4): 298—303. doi: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-298-303. (In Russ.).
 38. Kuznecov A. E., Poshekhonov V. I., Ryzhikov A. S. Technology for automatic control of the accuracy of georeferencing of satellite images using reference images from the LANDSAT-8 spacecraft. *Cifrovaya Obrabotka Signalov = Digital Signal Processing*. 2015; (3): (37—42). (In Russ.).
 39. Wentz F. J. A well-calibrated ocean algorithm for special sensor microwave/imager. *Journal of Geophysical Research*. 1997; (102): 8703—8718.
 40. Kawanishi T., Sezai T., Ito Y. et al. The Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth Observing System (AMSR-E), NASDA's contribution to the EOS for global energy and water cycle studies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2003; 41 (2): 184—194. doi: 10.1109/TGRS.2002.808331.
 41. Gajfulin D. R., Cyrul'nikov M. D., Uspenskij A. B. et al. Using information from the satellite microwave radiometer MTVZA—GYa in the data assimilation system of the Hydrometeorological Center of Russia. *Meteorologiya I Gidrologiya = Meteorology And Hydrology*. 2017; (9): (36—47). doi: 10.37162/2618-9631-2019-4-112-126. (In Russ.).
 42. Filej A. A., Andreev A. I., Uspenskij A. B. Using artificial neural networks to reconstruct the temperature and humidity state of the atmosphere based on data from the satellite microwave radiometer MTVZA—GYa KA Meteor-M No. 2-2. *Issledovanie Zemli Iz Kosmosa = Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2021; (6): (83—95). doi: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-27-35. (In Russ.).
 43. Mitnik L. M., Mitnik M. L., Gurvich I. A. et al. A study of the evolution of tropical cyclones in the northwestern Pacific Ocean using data from the MTVZA-GY microwave radiometers on the Meteor-M No. 1 satellite and the AMSR-E on the Aqua satellite. *Sovremennye Problemy Distancionnogo Zondirovaniya Zemli Iz Kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2012; 9 (4): 121—128. (In Russ.).
 44. Mitnik L. M., Mitnik M. L., Chernyavskij G. M. et al. Surface wind and sea ice in the Barents Sea based on microwave measurements from the Meteor—M No. 1 and GCOM-W1 satellites in January–March 2013. *Issledovanie Zemli Iz Kosmosa = Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2015; (6): 36. doi: 10.7868/S0205961415040077. (In Russ.).
 45. Malinin V. N., Gordeeva S. M., Naumov L. M. Total precipitable water of the atmosphere as a climate forcing factor. *Sovremennye Problemy Distancionnogo Zondirovaniya Zemli Iz Kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2018; 15(3): 243—251. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-243-251. (In Russ.).
 46. Deeter M. N. A new satellite retrieval method for precipitable water vapor over land and ocean. *Geophysical Research Letter*. 2007. V. 34 (2): L02815. doi: 10.1029/2006GL028019.
 47. Zabolotskikh E. V., Khvorostovsky K. S., Chapron B. An Advanced Algorithm to Retrieve Total Atmospheric Water Vapor Content from the Advanced Microwave Scanning Radiometer Data Over Sea Ice and Sea Water Surfaces in the Arctic. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2020; 58 (5): 3123—3135. doi: 10.1109/TGRS.2019.2948289
 48. Kostornaya A. A., Rublev A. N., Golomolzin V. V. Determination of moisture content in a cloudless atmosphere over the ocean using measurements of the MTVZA-GY microwave radiometer. *Vychislitel'nye Tekhnologii = Computing Technologies*. 2020; 25 (4): 83—98. doi: 10.25743/ICT.2020.25.4.008. (In Russ.).
 49. Pashinov E. V. Reconstruction of the integral vapor content of the atmosphere based on the data of the MTVZA—GYa instrument (Meteor-M No. 2) over the ocean surface. *Sovremennye Problemy Distancionnogo Zondirovaniya Zemli Iz Kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2018; 15 (4): 225—235. doi: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-225-235. (In Russ.).

50. Sazonov D. S. Study of the possibility of reconstructing precipitation intensity based on MTVZA—GYa measurements. *Issledovanie Zemli Iz Kosmosa = Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2023; (5): 23—35. doi: 10.31857/S020596142305007X (In Russ.).
51. Ferraro R. R. Special sensor microwave imager derived global rainfall estimates for climatological applications. *Journal of Geophysical Research*. 1997; 102 (D14): 16715-16735.
52. Zabolotskikh E. V. Reconstruction of cloud water content values over Arctic sea ice using AMSR2 radiometer data. *Meteorologiya I Gidrologiya = Meteorology And Hydrology*. 2025; (11): (5—11). doi: 10.52002/0130-2906-2025-11-5-11. (In Russ.).
53. Zabolotskikh E. V., Balashova E. A., SHapron B. An improved method for reconstructing sea ice concentration from satellite microwave measurements near 90 GHz. *Sovremennye Problemy Distantsionnogo Zondirovaniya Zemli Iz Kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2019; 16 (4): 233—246. doi: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-233-243. (In Russ.).
54. Zabolotskikh E. V., Chapron B. Estimation of Atmospheric Microwave Radiation Parameters Over the Arctic Sea Ice From the AMSR2 Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2024; 62: 4104211. doi: 10.1109/TGRS.2024.3392369.
55. Zabolotskikh E. V., Zhivotovskaya M. A. Atmospheric Water Vapor Column Retrievals from MTVZA—GYa Measurements. *IGARSS 2022-2022 IEEE International Geoscience Remote Sensing Symposium*. 2022. 7387—7390. doi: 10.1109/IGARSS46834.2022.9883207.
56. Zabolotskikh E. V., Azarov S. M., Zhivotovskaya M. A. Reconstruction of the surface wind speed using MTVZA—GYa data. *Meteorologiya I Gidrologiya = Meteorology And Hydrology*. 2023; (8): 24—34. doi: 10.52002/0130-2906-2023-8-24-34. (In Russ.).
57. Zabolotskikh E. V., Balashova E. A., Azarov S. M. Restoration of sea ice concentration based on MTVZA—GYa measurements. *Sovremennye Problemy Distantsionnogo Zondirovaniya Zemli Iz Kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2022; 19 (1): 27—38. doi: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-27-38. (In Russ.).
58. Plant W. J., Irisov V. A joint active/passive physical model of sea surface microwave signatures. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2017; 122 (4): 3219—3239. doi: 10.1109/IGARSS.2017.8127248.
59. Zabolotskikh E. V., SHapron B. Modeling of Arctic sea microwave radiation in the X-band using satellite observations: taking into account the measurement angle. *Meteorologiya I Gidrologiya = Meteorology And Hydrology*. 2021; 4: 69—77. doi: 10.52002/0130-2906-2021-4-69-77. (In Russ.).
60. Zabolotskikh E. V. New Possibilities for Geophysical Parameter Retrievals Opened by GCOM-W1 AMSR2. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2015; 8 (9): 4248—4261. doi: 10.1109/MicroRad.2014.6878931.
61. Zabolotskikh E. V., Zhivotovskaya M. A., Yarusov K. I., Azarov S. M. Wind fields in extratropical cyclones of the North Atlantic according to the satellite microwave radiometer MTVZA—GYa. *Meteorologiya I Gidrologiya = Meteorology And Hydrology*. 2024; (10): (5—14). doi: 10.52002/0130-2906-2024-10-5-14. (In Russ.).
62. Comiso J. C., Hall D. K. Climate trends in the Arctic as observed from space. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*. 2014; 5 (3): 389—409. doi: 10.1002/wcc.277.
63. Svendsen E., Matzler C., Grenfell T. C. A model for retrieving total sea ice concentration from a spaceborne dual-polarized passive microwave instrument operating near 90 GHz. *International Journal of Remote Sensing*. 1987; 8 (10): 1479—1487. doi: 10.1080/01431168708954790.
64. Xiao H., Han W., Han Y., Hu H., Shi Y., Bai Y., Liu Y. First trial for the assimilation of radiance data from MTVZA—GY on board the new Russian satellite meteor-M N2-2 in the CMA-GFS 4D-Var system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2024; 150 (765), 5000—5019. doi: 10.1002/qj.4853.

Информация об авторах

Заболотских Елизавета Валериановна, доктор физико-математических наук, Российский государственный гидрометеорологический университет, лаборатория спутниковой океанографии, старший научный сотрудник, liza@rshu.ru.

Львова Екатерина Владимировна, аспирант, Российский государственный гидрометеорологический университет, лаборатория спутниковой океанографии, инженер-исследователь, Lvova317@gmail.com.

Information about authors

Zabolotskikh Elizaveta Valerianovna, doctor of Physical and Mathematical Sciences, Russian State Hydrometeorological University, Satellite Oceanography Laboratory, Senior Researcher.

Lyova Ekaterina Vladimirovna, postgraduate Student, Russian State Hydrometeorological University, Satellite Oceanography Laboratory, Research Engineer.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 30.03.2026

Принята в печать 14.05.2026

The article was received on 30.03.2026

The article was accepted on 14.05.2026