

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ  
ИНТЕНСИВНОСТИ ОСАДКОВ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ МТВЗА-ГЯ**

© 2023 г. Д. С. Сазонов\*

*Институт космических исследований (ИКИ РАН), Москва, Россия*

*\*E-mail: sazonov\_33m7@mail.ru*

Поступила в редакцию 20.04.2023 г.

В настоящей работе представлен алгоритм восстановления интенсивности осадков над поверхностью океана по данным отечественного микроволнового сканера-зондировщика МТВЗА-ГЯ. Основной разработанный алгоритм является регрессионная модель ALG'85, в которой для оценки интенсивности осадков используется индекс рассеяния на высокочастотном радиометрическом канале порядка 90 ГГц. В работе проведено моделирование индекса рассеяния на основе данных МТВЗА-ГЯ и его сравнение с данными реанализа GPM IMERG. Для восстановления интенсивности осадков предложено использовать полином четвертой степени. Полученные количественные оценки показывают, что разброс СКО достигает 50%, а коэффициент корреляции не превышает 0.75. Качественное сравнение указывает на существенную разницу между восстановленными осадками и данными GPM IMERG и на наличие смещения области осадков. В результате анализа был сделан вывод, что одной из причин может быть некорректное сведение лучей диаграмм направленности для различных частотных каналов прибора МТВЗА-ГЯ.

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование, радиояркая температура, интенсивность осадков, микроволновое излучение, моделирование, регрессионное соотношение

**DOI:** 10.31857/S020596142305007X, **EDN:** XQPADE

## ВВЕДЕНИЕ

Осадки в виде дождя и снега — одна из главных составляющих глобальной циркуляции воды и энергии, помогающая регулировать климат. Прикладных задач, для которых необходимо знание количества осадков и их распределение в пространстве достаточно много, например: управление водными ресурсами, прогнозирование урожая, наводнений, стихийных бедствий и др. Распределение приборов, способных детектировать и измерять осадки крайне неравномерно по планете. Большая часть таких приборов сосредоточена на суше и коррелирована с плотностью населения, а в океане их практически нет. Таким образом, для измерения осадков в малонаселенных частях суши и над акваторией мирового океана логичным является использование приборов космического базирования.

Спутниковые оценки количества осадков могут быть получены на основе измерений различных приборов. Методы в основном разделены на три главные категории, основанные на типе наблюдений, а именно: методы обработки данных, полученных в видимом, инфракрасном диапазонах; в микроволновом диапазоне излучения; а также методы, основанные на их комбинировании. В настоящей работе будут рассмотрены

только микроволновые методы, а именно радиометрические наблюдения. Радиометрические сканеры/зондировщики, установленные на спутниках, приобрели наибольшую популярность при измерении интенсивности осадков в глобальном масштабе. Их основное преимущество перед локаторами заключается в малом энергопотреблении, что позволяет проводить измерения в течение многих лет. Как пример, наиболее известный прибор TMI (TRMM Microwave Imager) проработал 15 лет.

В настоящее время существует много радиометрических приборов, используемых для оценки интенсивности осадков. Это ATMS (Advanced Technology Microwave Sounder), MWRI-1 (Microwave Radiation Imager-1), SSMIS (Special Sensor Microwave — Imager/Sounder), AMSR-2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer) и система GMI-Core (Global Precipitation Measurement Microwave Imager) в которой собираются все доступные радиометрические наблюдения (Kummerow et al., 2015; Zabolotskikh, Chapron, 2015; Zhang et al., 2018; Surussavadee, Staelin, 2010). Среди отечественных, есть серия приборов МТВЗА (Модуль Температурного и Влажностного Зондирования Атмосферы) которые запускались на КА “Метеор-М” № 1 (2009 г.), “Метеор-М” № 2 (2014 г.)

и “Метеор-М” № 2-2 (2019 г). В докладе (Бухаров и др., 2010) было упомянуто наличие у их авторов некоторых методик оценки интенсивности осадков над водной поверхностью. Однако, отсутствие в открытом доступе каких-либо публикаций по этому вопросу не позволяет судить о возможности их применения к длинным рядам данных МТВЗА-ГЯ (разных серий в том числе) и оценки численных показателей их качества, как, например, в (Ferraro and Marks, 1995). Таким образом, необходимо продолжать исследования и разработку методов восстановления интенсивности осадков по данным МТВЗА-ГЯ, что и является основной целью настоящей работы.

В микроволновой части спектра излучение поверхностью Земли изменяется наличием частиц, размером с дождевые капли. Для определения осадков используется два физических процесса: (1) излучение гидрометеоров, которое приводит к увеличению микроволнового излучения, и (2) рассеяние, что приводит к уменьшению интенсивности излучения. Величина этих эффектов зависит от размера и количества частиц, частоты принимаемого излучения (Kidd et al., 2010). Алгоритмы определения осадков, применительно к пассивным микроволновым наблюдениям, могут быть разделены на основе использования микроволновых каналов или методологически. Выделяют три класса алгоритмов: (1) класс “излучение” – этот тип алгоритмов использует “низкочастотные” каналы для определения увеличения излучения по сравнению с “холодным” излучением поверхности океана (Chang et al., 1999), (2) класс “рассеяние” – этот тип алгоритмов связывает осадки с уменьшением излучения, вызванным рассеянием на частицах (Ferraro and Marks, 1995), и (3) это тип “многоканальной инверсии” – комбинирование первых двух классов (Kummerow et al., 2001). По методологической классификации, алгоритмы могут быть отнесены к одной из двух групп: эмпирические методы – разрабатываются на основе экспериментальных данных и физические методы, которые стараются минимизировать разницу между модельными и экспериментальными данными.

В настоящей работе предложено начать с адаптации простой регрессионной модели восстановления интенсивности осадков над поверхностью океана, модель ALG'85 (Ferraro, 1997) используя только данные прибора МТВЗА-ГЯ. Это позволит исследовать возможность восстановления интенсивности осадков по измерениям МТВЗА-ГЯ и определить ряд проблем/задач, которые требуют дополнительных исследований.

## МОДУЛЬ ТЕМПЕРАТУРНОГО И ВЛАЖНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ (МТВЗА-ГЯ)

Приборы серии МТВЗА похожи на свои зарубежные аналоги. Основным отличием серии МТВЗА является необычный, для приборов с коническим сканированием, угол визирования ( $53.3^\circ$ ) и соответственно угол падения в  $65^\circ$ . Для большинства зарубежных аналогов угол падения составляет порядка  $53^\circ$ . Такое отличие приводит к необходимости разрабатывать новые (или переделывать уже имеющиеся) алгоритмы обработки данных, для того чтобы конечный пользователь мог получить качественную информацию из нового независимого источника. (Ермаков и др., 2021).

Радиометрические каналы сканера МТВЗА-ГЯ включают рабочие частоты в окнах прозрачности атмосферы 10.6, 18.7, 23.8, 31.5, 36.7, 42, 48 и 91.65 ГГц, а зондирующего – в линиях поглощения кислорода 52–58 ГГц и водяного пара 183 ГГц. Подробное описание можно найти в работах (Болдырев и др., 2008; Чернявский и др., 2018).

Спутниковые данные МТВЗА-ГЯ поступают в ЦКП (Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа данных спутниковых наблюдений ИКИ РАН) “ИКИ-Мониторинг” в виде сформированных потоков данных и сопутствующей информации звездных датчиков (Ермаков и др., 2021). Результаты сохраняются в архивах ЦКП “ИКИ-Мониторинг” (Лупян и др., 2019; <http://ckp.geosmis.ru/>), что обеспечивает автоматическое формирование наборов данных для дальнейшей обработки и отображения в картографическом веб-интерфейсе системы Vega-Science (<http://sci-vega.ru/>).

## ТЕХНИКА ВЫДЕЛЕНИЯ СВОБОДНОЙ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Восстановление интенсивности осадков над поверхностью воды подразумевает наблюдение сцен свободной водной поверхности (без суши и льда). Для выделения суши была взята топографическая карта с шагом 60 угловых секунд. (NOAA National Centers for Environmental Information. 2022: ETOPO 2022 15 Arc-Second Global Relief Model. NOAA National Centers for Environmental Information. <https://doi.org/10.25921/fd45-gt74>. Accessed [15.01.2022]). По указанной топографической карте была создана маска для картирования данных МТВЗА-ГЯ по типам: суша, берег и вода. Так как пространственное разрешение самого низкочастотного канала МТВЗА-ГЯ (10.6 ГГц) составляет порядка 100 км по одной из осей, то отступ от берега был увеличен на 1 градус в сторону воды для того чтобы все анализируемые изменения находились над поверхностью воды.

Картирование ледовой области представляет определенные трудности, связанные с пространственным и временным изменением площади ледового покрытия в океане. Одним из важных источников информации для оперативных задач мониторинга ледяного покрова являются поля сплоченности льда (англ. sea ice concentration – SIC). Одно из недавних исследований по восстановлению SIC по данным МТВЗА-ГЯ представлено в работе Заболотских и др., 2022. Часть предложенного алгоритма использована для текущей задачи картирования ледовой области.

Традиционно, для восстановления SIC используют данные полученные на частотах вблизи 90 ГГц, благодаря чему достигается максимально возможное на сегодняшний день разрешение при использовании радиометрии. Однако, у прибора МТВЗА-ГЯ не работает канал с горизонтальной поляризацией на частоте 91.65 ГГц, поэтому использовать общепринятые алгоритмы картирования ледовой области не представляется возможным. В работе (Заболотских и др., 2022) предложен алгоритм, по которому возможно определить концентрацию ледяного покрова используя частоты 10.6 и 36.7 ГГц. В текущем исследовании нет необходимости определять концентрацию льда, а достаточно определить наличие льда на поверхности, поэтому будет использована только поляризационная разница ( $PD$  – разница между вертикально и горизонтально поляризованным излучением на одной частоте) на частоте в 10.6 ГГц. Использование указанной частоты ухудшает пространственное разрешение, однако, по оценкам (Заболотских и др., 2022) позволяет восстанавливать SIC с меньшими погрешностями, а, следовательно, и лучше будет проводиться картирование ледовой области. Указано, что при  $PD < 120$  К (10.6 ГГц) начинает появляться лед, поэтому значение в 120 К выбрано как пороговое.

Известно, что максимальная площадь ледового покрова Арктики обычно наблюдается в марте, а Антарктики в конце сентября. Для этих периодов были проанализированы данные полученные из системы Remote Sensing Systems DMSP SSM/I or SSMIS (Wentz et al., 2012). По полученным картам была построена маска максимальной площади ледового покрытия регионов Арктики и Антарктики. К построенной маске максимальной площади ледового покрытия добавлен запас в 2 градуса по широте. Если наблюдения попадают в область, где возможен лед, то проходят проверку поляризационной разницы, если  $PD < 120$  К, то данное измерение маркируется как лед и не используется при анализе осадков.

## ИНДЕКС РАССЕЯНИЯ. ПОДБОР УРАВНЕНИЯ

Для определения интенсивности осадков используется два четких процесса: (1) излучение дождевых капель, которое приводит к увеличению микроволнового излучения на частотах ниже 40 ГГц, и (2) рассеяние, вызванное осадками, что приводит к уменьшению интенсивности проходящего через осадки излучения на частотах выше 80 ГГц. Значения указанных пороговых частот радиотеплового излучения условное, и связано с работой радиометрических систем, используемых для мониторинга поверхности, в окнах прозрачности атмосферы. Величина эффектов излучения и рассеяния на дождевых каплях зависит от размера и количества частиц. Однако возможности измерения осадков определяются также и свойствами подстилающей поверхности. В работе (Grody, 1991) проведено обширное исследование классификации снежного покрова и осадков на основе измерений прибора SSM/I (Special Sensor Microwave Imager), и показано, что над водной поверхностью классифицировать осадки проще, чем над поверхностью суши. Это связано с неоднородностью излучающей способности суши по сравнению с практически однородной излучающей способностью морской воды.

В работе (Grody, 1991) используется Индекс Рассеяния (англ. Scattering Index)  $SI$  как пологительная разница между измерениями на частотах 22 и 85 ГГц. Данный индекс характеризует наличие веществ в атмосфере и на поверхности, которые рассеивают восходящее радиотепловое излучение. Так же было отмечено, что для более точной идентификации рассеяния необходимо привлекать измерения на других частотных каналах и что оценки должны быть выполнены на большом наборе данных, включающем в себя различные состояния поверхности и атмосферы.

Применительно к радиометрическим каналам прибора МТВЗА-ГЯ индекс рассеяния для частоты 91.65 ГГц вертикальной поляризации ( $I$ ), далее просто  $SI$ , может быть записан как

$$SI = F - T_{91.65}^V, \quad (1)$$

где  $F$  – это функция, выраженная в виде суммы с весовыми коэффициентами радиоярких температур на частотах отличных от 91.65 ГГц, и характеризующая каким могло бы быть излучение на частоте 91.65 ГГц в отсутствии рассеяния.  $T_{91.65}^V$  – радиояркая температура на частоте 91.65 ГГц вертикальная поляризация.

У прибора МТВЗА-ГЯ всего доступно 24 радиометрических канала. Однако, на некоторых каналах есть сбой и высокий уровень шумов, они не используются (это каналы  $T_{91.6}^H$ ,  $T_{42}^{V,H}$ ,  $T_{48}^{V,H}$ ). Так же не используются каналы в линии погло-

**Таблица 1.** Коэффициенты  $a_i$  регрессии (3)

Коэффициент	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$
Значение	422.055	-14,293	0,031	-7.302	0.022
Коэффициент	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	
Значение	17.114	-0.037	0.421	-0.0035	

щения кислорода. Поэтому для анализа индекса рассеяния  $SI$  будет использовано всего 11 каналов данных. Это каналы  $T_{10.6}^{V,H}$ ,  $T_{18.7}^{V,H}$ ,  $T_{23.8}^{V,H}$ ,  $T_{31.5}^{V,H}$ ,  $T_{36.7}^{V,H}$  и  $T_{91.65}^V$ . Для разработки соотношения для функции  $F$  используются все данные за 2020 г., усредненные за каждый месяц. Усреднение было сделано для уменьшения объема точек и многократного сокращения вычислительных ресурсов. Усреднение проводилось для всех измерений над открытой поверхностью океана свободной ото льда в диапазоне  $\pm 0.5^\circ$  по широте для всех значений долгот. Таким образом, за каждый месяц получены средние значения радиояркосных температур для каждого радиометрического канала МТВЗА-ГЯ в зависимости от широты.

Для составления регрессионного соотношения функции  $F$  изначально были использованы все радиометрические каналы данных в “окнах прозрачности” атмосферы.

$$F = a_0 + \sum_{i=1}^{11} a_i T_i + \sum_{i=1}^{20} a_i (T_i)^2, \quad (2)$$

где:  $a_i$  – коэффициенты регрессии. Под радиометрическим каналом  $T_i$  понимается измерение на одной частоте и на одной поляризации. Коэффициенты регрессии вычисляются методом наименьших квадратов по методике, указанной в статье (Сазонов и др., 2020). Общий коэффициент корреляции между радиояркосной температурой  $T_{91.65}^V$  и функцией  $F$  составил 0.9961, а СКО не более 2 К.

Соотношение (2) адекватно связывает радиояркосную температуру  $T_{91.65}^V$  с ее расчетом на основе других радиометрических каналов прибора МТВЗА-ГЯ, однако, избыточно и может быть упрощено с помощью проверки коэффициентов регрессии по уровню значимости. Это позволит убрать из уравнения (2) факторы, влияние которых незначительно, либо полностью отсутствует, что упростит вид регрессионного соотношения.

Методика проверки коэффициентов линейной регрессии на статистическую значимость приведена в приложении статьи (Сазонов и др., 2020). Для коэффициентов регрессии (2) были рассчитаны значения  $t$ -критерия ( $t_a$ ). Из таблицы критических точек распределения Стьюдента выбирается пороговое значение  $t(k, a = 0.01) = 2.58$

( $a$  – уровень значимости,  $k$  – число степеней свободы, при большом количестве экспериментальных данных,  $k$  принимается равным бесконечности). Таким образом, если  $t_a < 2.58$  для какого либо коэффициента  $a_i$ , то этот коэффициент статистически незначим и может быть убраны из уравнения регрессии без потери качества модели. Результирующее уравнение будет иметь следующий вид:

$$F = a_0 + a_1 T_{10.6}^V + a_2 (T_{10.6}^V)^2 + a_3 T_{23.8}^V + a_4 (T_{23.8}^V)^2 + a_5 T_{31.5}^V + a_6 (T_{31.5}^V)^2 + a_7 T_{23.8}^H + a_8 (T_{23.8}^H)^2, \quad (3)$$

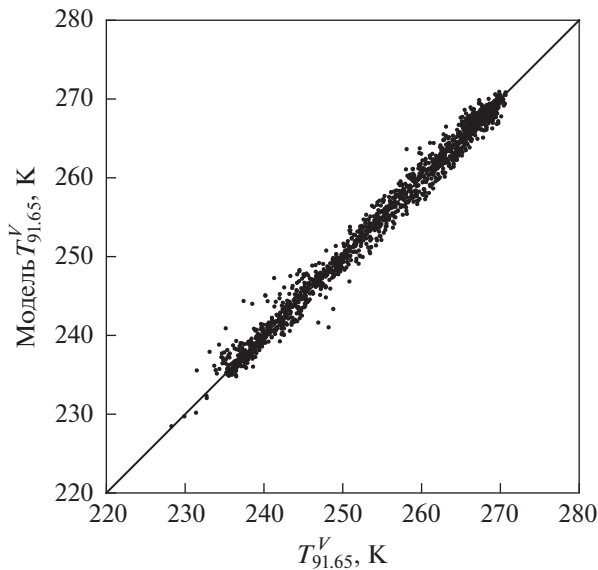
где коэффициенты  $a_0 - a_8$  приведены в табл. 1.

На рис. 1 приведена диаграмма рассеяния усредненных за месяц радиояркосных температур на канале  $T_{91.65}^V$  и их модельных по регрессии (3) значений. Корреляция составляет 0.9932. На рис. 2 приведены расчетные значения СКО, накопленные в диапазоне  $\pm 0.5$  К. СКО, в среднем, составляет порядка 1.5 К. Большое значение СКО в области с температурами менее 235 К связан с малым количеством анализируемых данных в этой области.

На рис. 3 приведены измеренные значения радиояркосной температуры на канале  $T_{91.65}^V$ , ее модельный расчет на основе уравнения (3) и их разница на основе уравнения (1) – индекс рассеяния  $SI$  на частоте 91.65 ГГц. Индекс рассеяния используется для анализа и восстановления интенсивности осадков.

## СОВМЕЩЕНИЕ ДАННЫХ РЕАНАЛИЗА И МТВЗА. ВЫБОР ОБЛАСТЕЙ С ОСАДКАМИ

Для исследования интенсивности осадков необходим большой набор наблюдений разных по интенсивности зон осадков в разных частях Земли. Одним из таких наборов является GPM IMERG (Integrated Multi-satellitE Retrievals for Global Precipitation Measurements) (Huffman et al., 2019). Указанный набор состоит из оценок осадков с различных пассивных микроволновых радиометров входящих в созвездие GPM (<https://gpm.nasa.gov/missions/GPM/constellation>). Осадки рассчитываются с использованием алгоритма Goddard

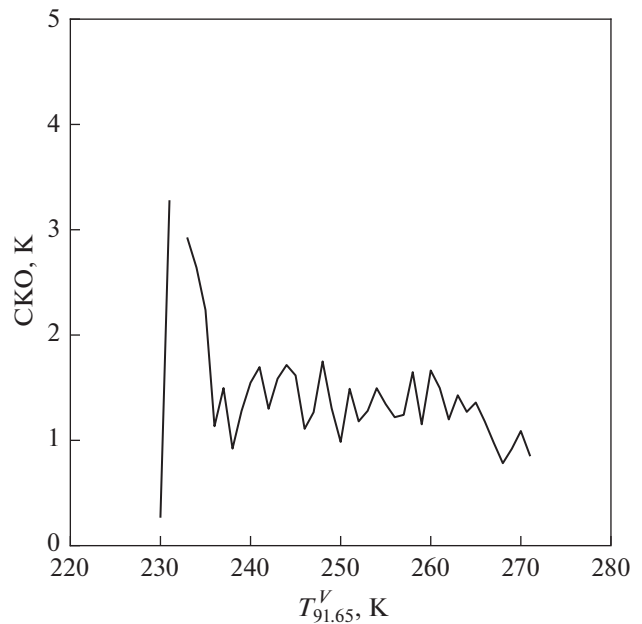


**Рис. 1.** Диаграмма рассеяния усредненных за месяц радиоярких температур на канале  $T_{91.65}^V$  и их модельных по регрессии (3) значений. Приведены данные за период с февраля по декабрь 2020 г.

Profiling Algorithm версии 2017 г. (GPROF2017) (Randel et al., 2020), затем приводятся к координатной сетке и проходят интеркалибровку по алгоритму Combined Ku Radar-Radiometer Algorithm (CORRA). Итоговый продукт – получасовые поля размером  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  (примерно  $10 \times 10$  км).

Данные МТВЗА-ГЯ состоят из файлов записей восходящих и нисходящих полувитков. По отдельности работать с этими файлами достаточно сложно. Поэтому полученные данные были собраны в один массив за 1 день с разделением на восходящие и нисходящие витки. Совмещение набора GPM IMERG с данными МТВЗА-ГЯ проведено по времени, то есть, для каждого измерения МТВЗА-ГЯ выбирались данные из набора GPM IMERG с разницей по времени не более чем на  $\pm 15$  мин. Таким образом, получены наборы данных об осадках в координатах широты, долготы и времени, соответствующих прибору МТВЗА-ГЯ. Затем, для удобства обработки и визуализации, полученные массивы всех данных накладываются на регулярную сетку  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  (рис. 3, карта интенсивности осадков). Собраны все имеющиеся данные МТВЗА-ГЯ за 2020 г. с 1 февраля по 31 декабря.

Выделение областей с осадками/индексом рассеяния производится в следующей последовательности: (1) На рассчитанные карты с индексом рассеяния  $SI$  накладывается маска при условии, что  $SI > 10$ . (2) Полученная маска преобразуется в контур, и выбираются замкнутые контуры с количеством точек периметра не менее 80 (данное

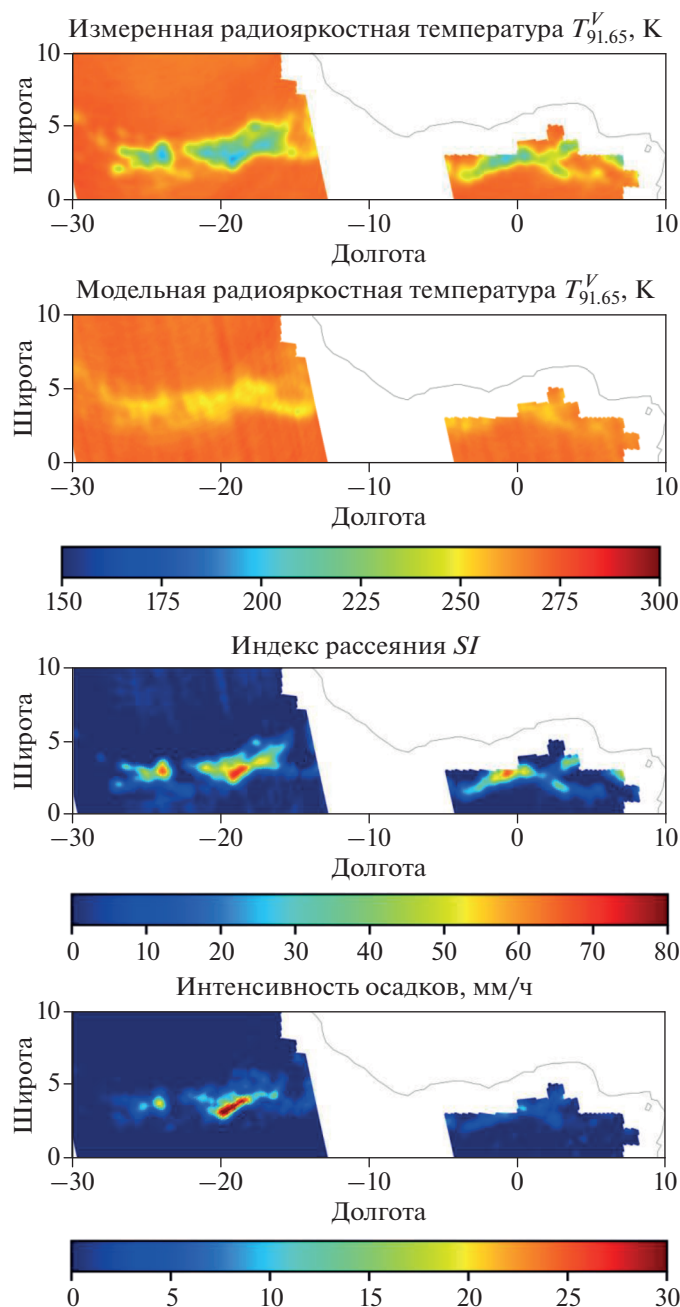


**Рис. 2.** Расчетные значения СКО при моделировании радиояркой температуры на канале  $T_{91.65}^V$ . СКО рассчитано для радиоярких температур попавших в диапазон  $\Delta T = 1$  К.

значение получено опытным путем, и позволяет выделить средние и большие области с увеличенным рассеянием). (3) Определяются границы областей и к ним добавляется запас величиной в  $1^\circ$ . Полученные прямоугольные области используются для анализа связи индекса рассеяния и интенсивности осадков. За 2020 г. накоплено 3448 областей для восходящих витков и 4166 областей для нисходящих витков.

### ПОСТРОЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ИНТЕНСИВНОСТИ ОСАДКОВ ОТ ИНДЕКСА РАССЕЯНИЯ

На рис. 4 представлена анализируемая область с осадками, полученная по данным GPM IMERG, область с рассеянием, полученным по уравнению (1). Временное расхождение при совмещении данных составляет  $-1$  мин, т.е. измерения, выполненные прибором МТВЗА-ГЯ проведены на 1 мин раньше, чем оценки интенсивности осадков по данным GPM IMERG. Как видно из представленных карт есть разница в расположении области рассеяния и области осадков. Это может быть связано с неточностью геопривязки наблюдений МТВЗА-ГЯ, о которой изложено в работе (Sadovsky, Sazonov, 2022). Также возможны ошибки сведения лучей диаграммы направленности МТВЗА-ГЯ для разных радиометрических каналов (этот вопрос еще не исследован).



**Рис. 3.** Карты измеренной радиояркостной температуры на частоте  $T_{91.65}^V$ , ее модельный расчет и их разница – индекс рассеяния  $SI$ , совмещенные данные интенсивности осадков из набора данных GPM IMERG. Данные за 6 июня 2020 г.

Таким образом, нет возможности наложить напрямую карты с рассеянием и осадками друг на друга.

Для получения зависимости интенсивности осадков от индекса рассеяния  $SI$  по выбранной области все значения, как осадков, так и рассеяния были построены в ряд и отсортированы по убыванию. Полученная зависимость показана рис. 4, и она соответствует результатам аналогич-

ных исследований, показанных, например, в работе (Ferraro, 1997).

На рис. 5 приведены зависимости интенсивности осадков от индекса рассеяния  $SI$ . Статистика накоплена по всем выделенным областям для восходящих и нисходящих витков. Временное совмещение составляет  $\pm 1$  мин. Как видно из рис. 5, результаты для восходящих и нисходящих витков в диапазоне осадков до 25 мм/ч практиче-

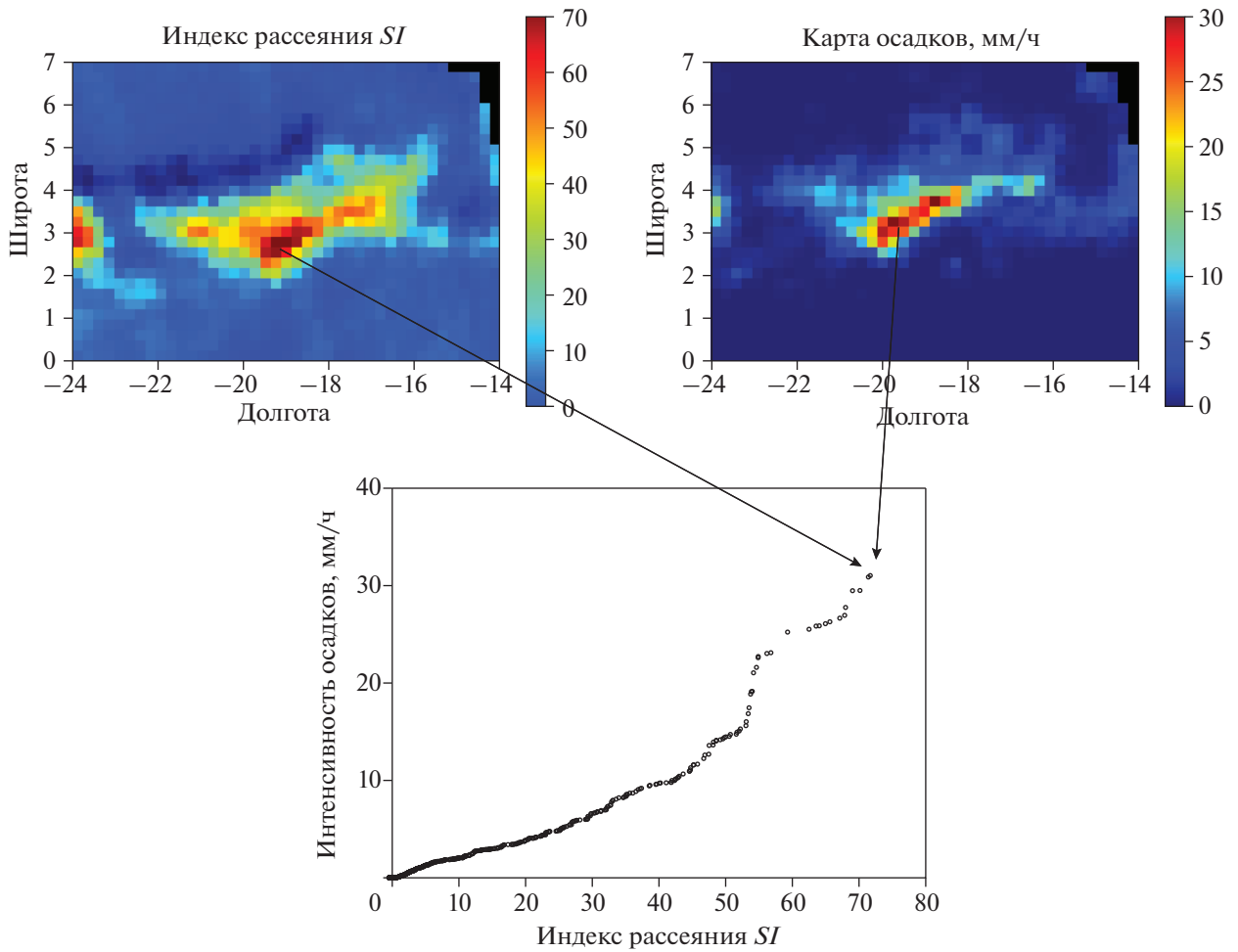


Рис. 4. Карта области с рассеянием (слева), карта интенсивности осадков (справа) и график их совмещения (снизу).

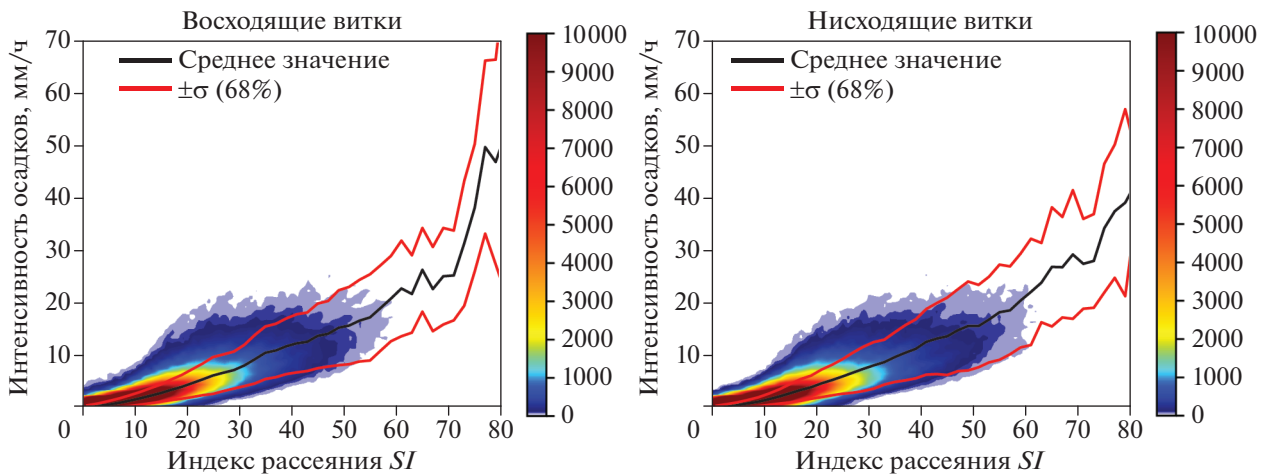


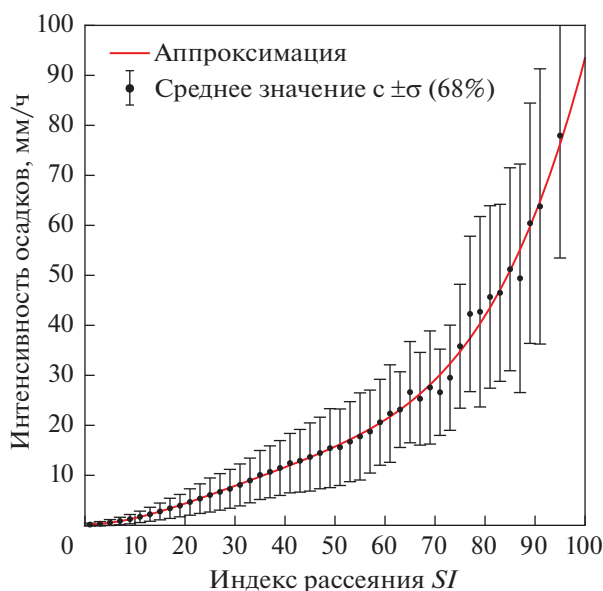
Рис. 5. Карты зависимости интенсивности осадков от индекса рассеяния для восходящих и нисходящих витков. Статистика по всем областям, накопленным за 2020 г. в диапазоне временного совмещения  $\pm 1$  мин. Шкала указывает количество измерений, попавших в диапазон  $\Delta_{SI} = 0.5$  К и  $\Delta_I = 0.5$  мм/ч.

**Таблица 2.** Коэффициенты полинома (4)

Коэффициент полинома	Значение коэффициента	Значение коэффициента для 95% доверительного интервала
<i>a</i>	0.1511	(0.1386, 0.1636)
<i>b</i>	0.004848	(0.001024, 0.008672)
<i>c</i>	0.01557	(0.01528, 0.01586)
<i>d</i>	−0.0003138	(−0.0003212, −0.0003064)
<i>e</i>	2.504e−06	(2.447e−06, 2.561e−06)

ски идентичны. В диапазоне осадков более 25 мм/ч (и для  $SI > 50$ ) данных очень мало и поэтому статистика не достоверна. Таким образом, для построения функциональной связи  $SI$  с интенсивностью осадков данные с обоих типов витков объединены.

Функциональную связь между индексом рассеяния и интенсивностью осадков  $I$  наиболее часто описывают степенным уравнением или полиномом. После исследования степенных, показательных и экспоненциальной функций в качестве аппроксимационных, было принято решение использовать полином 4-ой степени (4), который обладает наилучшим коэффициентом корреляции. Аппроксимация построена в предположении, что погрешности реанализа и ошибки моделирования  $SI$  отсутствуют. На рис. 6 приведены

**Рис. 6.** Зависимость интенсивности осадков от индекса рассеяния  $SI$  и ее аппроксимация функцией (4).

средние значения интенсивности осадков от  $SI$ , диапазон накопления  $\Delta_{SI} = 2$ , и СКО, которое обуславливает 68% всех точек.

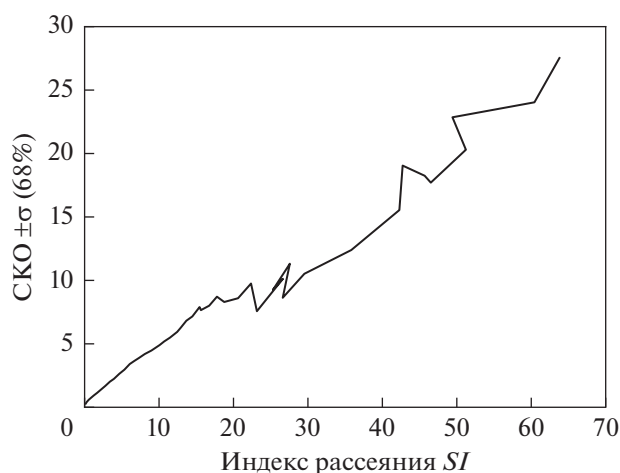
$$I = a + bSI + cSI^2 + dSI^3 + eSI^4, \quad (4)$$

где значения коэффициентов полинома приведены в табл. 3.

На рис. 7 приведено среднее квадратичное отклонение интенсивности осадков от модельных значений функции (4). СКО составляет в среднем 40–50% от восстанавливаемой величины.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 8 приведены три области с восстановленными интенсивностями осадков и соответствующие им значения осадков по данным GPM IMERG. Качественное сравнение указывает на существенную разницу между восстановленными осадками и данными GPM IMERG и на наличие

**Рис. 7.** Среднее квадратичное отклонение интенсивности осадков от модельных значений функции (4).



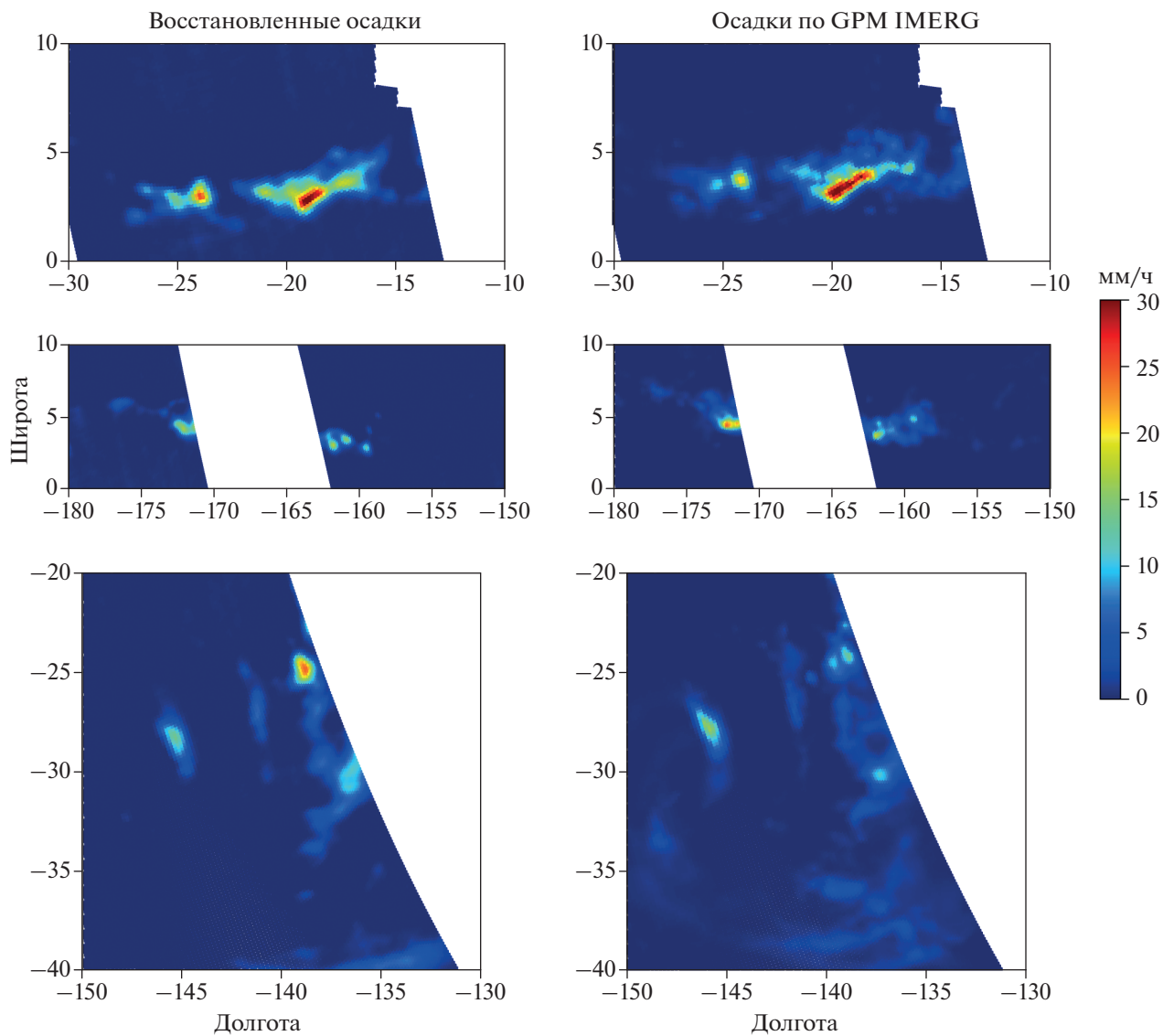


Рис 8. Восстановленные области осадков и данные по GPM IMERG, данные за 06.06.2020 г., восходящие витки.

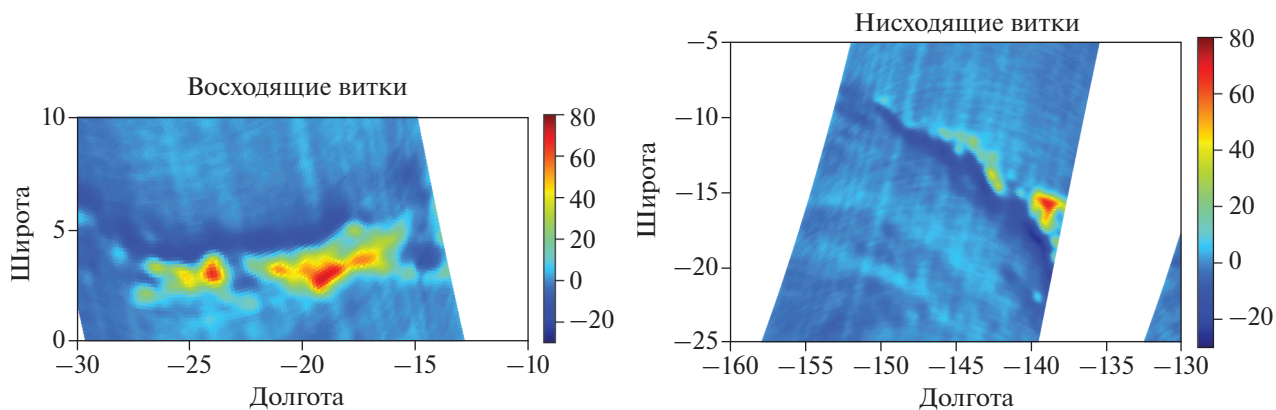


Рис. 9. Индекс рассеяния SI (К) для восходящих и нисходящих витков. Данные за 06.06.2020 г.

смещения области осадков вниз для восходящих витков и вверх для нисходящих (здесь нисходящие витки не показаны). Указанная разница может быть связана с временным расхождением между наборами данных, которое для показанных областей составляет  $-1$ ,  $7$  и  $15$  мин (соответственно, сверху вниз). Тогда на верхних областях мы должны наблюдать практически одинаковую картину распределения осадков. В принципе, так и есть если отбросить смещение и учесть погрешности из рис. 6 и 7.

Однако, большое значение СКО не может объяснить отмеченного смещения области восстановленной интенсивности осадков. Это можно объяснить, используя карты для индекса рассеяния  $SI$  на рис. 9. Над областью с большим рассеянием для восходящих витков есть темные участки, в которых значения нулевые и отрицательны. Для нисходящих витков эти участки находятся под областью осадков. В обоих случаях участки с отрицательными значениями  $SI$  повторяют контур области осадков. Исходя из формул (1) и (3), индекс рассеяния не может быть меньше нуля, однако, учитывая СКО для регрессии 3 (рис. 2) отрицательные значения возможны, но не более  $5$  К (в среднем), а получаемые значения  $SI$  могут достигать и  $-20$  К, что физически не возможно.

Объяснить отрицательные значения  $SI$  можно только тем, что измерения для частоты  $91.65$  ГГц выполнены в другой точке пространства, нежели измерения для каналов с “низкой” частотой ( $10.6$ ,  $23.8$  и  $31.5$  ГГц). Например, измерения на каналах с “низкой” частотой выполнены в области осадков. По формуле (3) проводится расчет  $F$  – модельной оценки излучения на частоте  $91.65$  ГГц. (Стоит учесть, что “низкочастотные” каналы тоже чувствительные к осадкам, хотя и в значительно меньшей степени, чем на частоте  $91.65$  ГГц, что можно отметить по 2-ому сверху графику на модельном расчете  $F$  (рис. 3)). Если луч диаграммы направленности канала  $91.65$  ГГц смотрит в ту же точку, что и другие, тогда в зоне с осадками на данной частоте должно быть большое рассеяние (низкая радиояркость температура) и результат по формуле (3) получится положительный. Если же диаграммы направленности канала  $91.65$  ГГц смотрит в другую, точку пространства, где осадков нет, тогда нет рассеяния на частицах осадков (высокая радиояркость температура) и результат по формуле (3) получится отрицательный. В обратном случае, когда на канале  $91.65$  ГГц регистрируются осадки, а на других нет, будет положительное значение индекса рассеяния  $SI$ .

Предложенное объяснение, по-видимому, и определяет наблюдаемый сдвиг области рассеяния на рис. 9 и, как следствие, сдвиг области осадков на всех левых областях рис. 8. Таким образом, можно сделать вывод, что луч диаграммы направ-

ленности канала  $91.65$  ГГц захватывает другой участок пространства, нежели лучи для каналов ( $10.6$ ,  $23.8$  и  $31.5$  ГГц). Более того, наблюдаемое смещение областей с осадками носит систематический характер. Все, вышесказанное, позволяет предположить, что лучи диаграмм направленности для различных частотных каналов прибора МТВЗА-ГЯ сведены некорректно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в работе результаты показывают, что разброс СКО достигает  $50\%$ , а коэффициент корреляции не превышает  $0.75$ , по сравнению с результатами работы (Zabolotskikh, Charpon, 2015), где по данным прибора AMSR-2 интенсивность осадков восстанавливается с коэффициентом корреляции  $0.8$  и СКО =  $1$  мм/ч. Такие показатели не обеспечивают должную надежность связи радиоизлучения системы “океан–атмосфера” и интенсивности осадков, восстановленных по данным МТВЗА-ГЯ.

Конечно, интенсивность осадков, возможно, восстанавливать по радиометрическим измерениям МТВЗА-ГЯ. Однако на данном этапе работ точность неудовлетворительная, по сравнению с другими приборами и алгоритмами. Необходимо провести углубленный анализ параметров работы прибора – его геопривязку по всем каналам, сведение лучей диаграмм направленности, приведение пространственного разрешения к единому масштабу. И только после решения указанных вопросов вернуться к восстановлению интенсивности осадков и других геофизических параметров.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (тема “Мониторинг”, госрегистрация № 122042500031-8).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Болдырев В.В., Горобец Н.Н., Ильгасов П.А., Никитин О.В., Панцов В.Ю., Прохоров Ю.Н., Стрельников Н.И., Стрельцов А.М., Черный И.В., Чернявский Г.М., Яковлев В.В.* Спутниковый микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ГЯ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 1. № 5. С. 243–248.
- Бухаров М.В., Миронова Н.С., Сизенова Е.А.* Распознавание метеорологических явлений и оценка их параметров по многоспектральной информации микроволнового радиометра МТВЗА // Восьмая всероссийская открытая ежегодная конференция “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2010. С. 140.
- Ермаков Д.М., Кузьмин А.В., Мазуров А.А., Пашинов Е.В., Садовский И.Н., Сазонов Д.С., Стерлядкин В.В., Чернушич А.П., Черный И.В., Стрельцов А.М., Шарков Е.А.,*

- Екимов Н.С.* Концепция потоковой обработки данных российских спутниковых СВЧ-радиометров серии MTVZA на базе ЦКП “ИКИ-Мониторинг” // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 298–303. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-4-298-303>
- Заболотских Е.В., Балашова Е.А., Азаров С.М.* Восстановление сплоченности морского льда по данным измерений МТВЗА-ГЯ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 27–38. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-1-27-38>
- Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Кашицкий А.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Константинова А.М., Кобец Д.А., Мазуров А.А., Марченков В.В., Матвеев А.М., Радченко М.В., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А.* Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП “ИКИ-Мониторинг”) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170>
- Сазонов Д.С., Садовский И.Н., Кузьмин А.В.* Космический эксперимент “Конвергенция”. Дистанционное определение температуры океана по радиоизмерениям на частотах 10.65, 18.7 и 36.5 ГГц // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 2. С. 82–94.
- Чернявский Г.М., Митник Л.М., Кулешов В.П., Митник М.Л., Чёрный И.В.* 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. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-4-78-100>
- Chang A.T.C., Chiu L.S., Kummerow C.D., Meng J., Wilheit T.T.* First results of the TRMM Microwave Imager (TMI) monthly oceanic rain rate: Comparison with SSM/I, Geophys. Res. Lett., 1999. 26. P. 2379–2382.
- Chinnawat Surussavadee, David H. Staelin* NPOESS Precipitation Retrievals Using the ATMS Passive Microwave Spectrometer, IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS, 2010, V. 7. № 3. P. 440–444. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2009.2038614>
- Ferraro R.R., Marks G.F.* The development of SSM/I rain-rate retrieval algorithms using ground-based radar measurements, J. Atmos. Oceanic Technol. 1995. 12. P. 755–770.
- Ferraro R.R.* Special sensor microwave imager derived global rainfall estimates for climatological applications // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. № D14. P. 16.715–16.735.
- Grody N.C.* Classification of snow cover and precipitation using the Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I), J. Geophys. Res. 1991. 96. P. 7423–7435.
- Huffman G.J., Stocker E.F., Bolvin D.T., Nelkin E.J., Tan Jackson* (2019), GPM IMERG Final Precipitation L3 Half Hourly 0.1 degree x 0.1 degree V06, Greenbelt, MD, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Accessed: [30.04.2022]. <https://doi.org/10.5067/GPM/IMERG/3B-HH/06>
- Kidd C., Levizzani V., Laviola S.* Quantitative Precipitation Estimation From Earth Observation Satellites, In book Rainfall: State of the Science, American Geophysical Union, 2010. P. 127–158. <https://doi.org/10.10292009GM000920>
- Kummerow C.D., Hong Y., Olson W.S., Yang S., Adler R.F., McCollum J., Ferraro R.R., Petty G., Shin D.-B., Wilheit T.T.* The evolution of the Goddard Profiling Algorithm (GPROF) for rainfall estimation from passive microwave sensors, J. Appl. Meteorol. 2001. V. 40. № 8. P. 1801–1820.
- Kummerow C.D., Randel D.L., Kulie M., Wang N.Y., Ferraro R., Munchak S.J., Petkovic V.* The Evolution of the Goddard Profiling Algorithm to a Fully Parametric Scheme. JOURNAL OF ATMOSPHERIC AND OCEANIC TECHNOLOGY, 2015. V. 32. № 12. P. 2265–2280. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-15-0039.1>
- Randel D.L., Kummerow C.D., Ringerud S.* The Goddard Profiling (GPROF) Precipitation Retrieval Algorithm. Advances in Global Change Research. 2020. P. 141–152. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-24568-9\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-24568-9_8)
- Sadovsky I.N., Sazonov D.S.* Geographic Reference of MTVZA-GYa Radiometric Remote-Sensing Data // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2022. V. 58, № 12. P. 1664–1674. <https://doi.org/10.1134/S0001433822120210>
- Wentz F.J., Hilburn K.A., Smith D.K.* Remote Sensing Systems DMSP [SSM/I or SSMIS] [Daily, 3-Day, Weekly, Monthly] Environmental Suite on 0.25 deg grid, Version 7, 2012 Remote Sensing Systems, Santa Rosa, CA. Available online at [www.remss.com/missions/ssmi](http://www.remss.com/missions/ssmi). [Accessed 15 Jan 2022].
- Zabolotskikh E., Chapron B.* Validation of the New Algorithm for Rain Rate Retrieval from AMSR2 Data Using TMI Rain Rate Product. Advances in Meteorology Volume 2015. Article ID 492603. 12 p. <https://doi.org/10.1155/2015/492603>
- Zhang R., Wang Z., Hilburn K.A.* Tropical Cyclone Rainfall Estimates from FY-3B MWRI Brightness Temperatures Using the WS Algorithm. Remote Sens. 2018. 10. 1770. <https://doi.org/10.3390/rs10111770>

## Study the Possibility of Precipitation Intensity Recovery from MTVZA-GYa Measurements

D. S. Sazonov

Space Research Institute RAS, Moscow, Russia

In this paper, we present an algorithm for restoring rain rate over the ocean according to the data of the microwave sounder MTVZA-GYa. The basis of the developed algorithm is the ALG'85 regression model, in which the scattering index on the high-frequency radiometric channel (~90 GHz) is used to estimate the intensity of precipitation. In this work, the scattering index was simulated based on the MTVZA-GYa data and

compared with the GPM IMERG reanalysis data. To restore the rain rate, it is proposed to use a polynomial of the fourth degree. The obtained quantitative estimates show that the spread of RMS reaches 50%, and the correlation coefficient does not exceed 0.75. The qualitative comparison indicates a significant difference between the restored rain rate and the GPM IMERG data and the presence of a shift in the precipitation area. As a result of the analysis, it was concluded that one of the reasons may be the incorrect convergence of the beams of the radiation patterns for various frequency channels of the MTVZA-GYa device.

*Keywords:* remote sensing, brightness temperature, precipitation intensity, microwave radiation, modeling, regression relation

## REFERENCES

- Boldyrev V.V., Gorobets N.N., Il'gasov P.A., Nikitin O.V., Pantsov V.Yu., Prokhorov Yu.N., Strel'nikov N.I., Strel'tsov A.M., Chernyi I.V., Chernyavskii G.M., Yakovlev V.V.* Satellite microwave scanner/sounder MTVZA-GY. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2008. V. 1. № 5. P. 243–248. (In Russian).
- Bukharov M.V., Mironova N.S., Sizenova E.A.* Raspoznavanie meteorologicheskikh yavlenii i otsenka ikh parametrov po mnogospektral'noi informatsii mikrovolnovogo radiometra MTVZA [Recognition of meteorological phenomena and estimation of their parameters from multispectral information of the MTVZA microwave radiometer] // Vos'maya vserossiiskaya otkrytaya ezhegodnaya konferentsiya "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa": Tez. dokl. M.: IKI RAN, 2010. P. 140. (In Russian).
- Chang A.T.C., Chiu L.S., Kummerow C.D., Meng J., Wilheit T.T.* First results of the TRMM Microwave Imager (TMI) monthly oceanic rain rate: Comparison with SSM/I, *Geophys. Res. Lett.*, 1999. 26. P. 2379–2382.
- Chernyavskii G.M., Mitnik L.M., Kuleshov V.P., Mitnik M.L., Chernyi I.V.* Microwave sensing of the ocean, atmosphere and land surface from Meteor-M № 2 data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2018. V. 15. № 4. P. 78–100.
- Chinnawat Surussavadee, David H. Staelin*, NPOESS Precipitation Retrievals Using the ATMS Passive Microwave Spectrometer, *IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS*, 2010. V. 7. № 3. P. 440–444. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2009.2038614>
- Ermakov D.M., Kuz'min A.V., Mazurov A.A., Pashinov E.V., Sadvovskii I.N., Sazonov D.S., Sterlyadkin V.V., Chernushich A.P., Chernyi I.V., Strel'tsov A.M., Sharkov E.A., Eki-mov N.S.* The concept of streaming data processing of Russian satellite microwave radiometers of the MTVZA series based on the IKI-Monitoring Center for Collective Use, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2021. V. 18. № 4. P. 298–303. (In Russian). <https://doi.org/10.10.21046/2070-7401-2021-18-4-298-303>
- Ferraro R.R., Marks G.F.* The development of SSM/I rain-rate retrieval algorithms using ground-based radar measurements, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1995. 12. P. 755–770.
- Ferraro R.R.* Special sensor microwave imager derived global rainfall estimates for climatological applications // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102. № D14. P. 16.715–16.735.
- Grody N.C.* Classification of snow cover and precipitation using the Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I), *J. Geophys. Res.*, 1991. 96. P. 7423–7435.
- Huffman G.J., Stocker E.F., Bolvin D.T., Nelkin E.J., Jackson Tan* (2019), GPM IMERG Final Precipitation L3 Half Hourly 0.1 degree x 0.1 degree V06, Greenbelt, MD, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Accessed: [30.04.2022]. <https://doi.org/10.10.5067/GPM/IMERG/3B-HH/06>
- Kidd C., Levizzani V., Laviola S.* Quantitative Precipitation Estimation From Earth Observation Satellites, In book *Rainfall: State of the Science*, American Geophysical Union, 2010. P. 127–158. <https://doi.org/10.10292009GM000920>
- Kummerow C.D., Hong Y., Olson W.S., Yang S., Adler R.F., McCollum J., Ferraro R.R., Petty G., Shin D.-B., Wilheit T.T.* The evolution of the Goddard Profiling Algorithm (GPROF) for rainfall estimation from passive microwave sensors, *J. Appl. Meteorol.*, 2001. V. 40. № 8. P. 1801–1820.
- Kummerow C.D., Randel D.L., Kulie M., Wang N.Y., Ferraro R., Munchak S.J., Petkovic V.* The Evolution of the Goddard Profiling Algorithm to a Fully Parametric Scheme. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2015. V. 32. № 12. P. 2265–2280. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-15-0039.1>
- Loupian E.A., Proshin A.A., Bourtsev M.A., Kashnitskii A.V., Balashov I.V., Bartalev S.A., Konstantinova A.M., Kobets D.A., Mazurov A.A., Marchenkov V.V., Matveev A.M., Radchenko M.V., Sychugov I.G., Tolpin V.A., Uvarov I.A.* Experience of development and operation of the IKI-Monitoring center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019. V. 16. № 3. P. 151–170. (In Russian). <https://doi.org/10.10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170>
- Randel D.L., Kummerow C.D., Ringerud S.* The Goddard Profiling (GPROF) Precipitation Retrieval Algorithm. *Advances in Global Change Research*. 2020. P. 141–152. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-24568-9\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-24568-9_8)
- Sadvovsky I.N., Sazonov D.S.* Geographic Reference of MTVZA-GYa Radiometric Remote-Sensing Data // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2022. V. 58. № 12. P. 1664–1674. <https://doi.org/10.1134/S0001433822120210>

- Sazonov D.S., Sadovskii I.N., Kuz'min A.V.* Space Experiment "Convergence". Remote Determination of the Ocean Temperature by Radio Measurements at a Frequency of 10.65, 18.7 and 36.5 GHz, *Issled. Zemli iz kosmosa*. 2020. № 2. P. 82–94. (In Russian).
- Wentz F.J., Hilburn K.A., Smith D.K.* Remote Sensing Systems DMSP [SSM/I or SSMIS] [Daily, 3-Day, Weekly, Monthly] Environmental Suite on 0.25 deg grid, Version 7, 2012 Remote Sensing Systems, Santa Rosa, CA. Available online at [www.remss.com/missions/ssmi](http://www.remss.com/missions/ssmi). [Accessed 15 Jan 2022].
- Zabolotskikh E., Chapron B.* Validation of the New Algorithm for Rain Rate Retrieval from AMSR2 Data Using TMI Rain Rate Product. *Advances in Meteorology* Volume 2015. Article ID 492603. 12 p. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/492603>
- Zabolotskikh E.V., Balashova E.A., Azarov S.M.* Sea ice concentration retrieval from MTVZA-GYa measurements, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2022. V. 19. № 1. P. 27–38. (In Russian). <https://doi.org/10.10.21046/2070-7401-2022-19-1-27-38>
- Zhang R., Wang Z., Hilburn K.A.* Tropical Cyclone Rainfall Estimates from FY-3B MWRI Brightness Temperatures Using the WS Algorithm. *Remote Sens.* 2018. 10. 1770. <https://doi.org/10.10.3390/rs10111770>