

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

КОРРЕКТИРОВКА АЛГОРИТМА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОСАДКОВ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ МТВЗА-ГЯ №2-2

© 2024 г. Д. С. Сазонов¹, *

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

*E-mail: sazonov_33m7@mail.ru

Поступила в редакцию 19.04.2024 г.

В настоящей работе представлен скорректированный алгоритм восстановления интенсивности осадков над поверхностью океана по данным МТВЗА-ГЯ №2-2. На основе проведенных исследований по геопривязке данных и сведениям лучей антенной системы МТВЗА-ГЯ были пересчитаны весовые коэффициенты аппроксимирующих функций для индекса рассеяния и интенсивности осадков. Проведенный качественный анализ данных за 2020 год показал, что интенсивность осадков восстанавливается адекватно и сходится с измерениями других спутниковых приборов. Количественный анализ показал, что осадки по данным МТВЗА-ГЯ можно восстанавливать во всем диапазоне, однако, только в диапазоне до 25 мм/ч, можно получать достоверные данные с точностью ~50%. В диапазоне осадков более 25 мм/ч данных для сравнения мало и статистика недостоверна. Исходя из результатов качественного и статистического сравнения, представленных в работе, можно заключить, что точность восстановления интенсивности осадков по данным прибора МТВЗА-ГЯ сравнима с точностями для приборов AMSR-2 и SSMIS.

Ключевые слова: интенсивность осадков, МТВЗА-ГЯ, дистанционное зондирование, радиояркая температура, микроволновое излучение, моделирование, регрессионное соотношение

DOI: 10.31857/S0205961424060075, EDN: RQQQWN

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, большое внимание научного сообщества направлено на исследование климатических процессов и явлений, в особенности связанных с глобальным потеплением. Большой вклад в климатические изменения вносят процессы, происходящие в атмосфере планеты. Одним из них являются осадки в виде дождя и снега. Они имеют огромное значение для метеорологии и климатологии, так как влияют на радиационный баланс Земли, распределение тепла и влаги, а также на формирование погодных явлений. Осадки — одна из главных составляющих глобальной циркуляции воды и энергии, помогающая регулировать климат.

Измерение количества и интенсивности осадков в глобальном масштабе достаточно сложная задача, связанная, в первую очередь, с неравномерностью их выпадения. И, во-вторых, с нехваткой приборов, способных детектировать и измерять осадки (особенно в открытом океане). Решением указанных проблем является использование приборов космического базирования, которые позволяют охватывать наблюдениями большие участки поверхности и атмосферы с максимальной дета-

лизацией. Основными видами приборов для измерения осадков являются радары и микроволновые радиометры. Далее в работе речь идет только о радиометрических приборах спутникового базирования.

Самыми известными радиометрическими приборами, используемыми для оценки интенсивности осадков являются: ATMS (Advanced Technology Microwave Sounder), MWRI-1 (Micro-Wave Radiation Imager 1), SSMIS (Special Sensor Microwave - Imager/Sounder), AMSR-2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer). Так же существует 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 (17 сентября 2009 г.), № 2 (8 июля 2014 г.), № 2-2 (5 июля 2019 г.), № 2-3 (27 июня 2023 г.) и № 2-4 (29 февраля 2024 г.) (Болдырев и др., 2008; Чернявский и др., 2018).

В работе (Сазонов, 2023) проведено исследование возможности восстановления интенсивности осадков по измерениям МТВЗА-ГЯ № 2-2.

Анализ был проведен на данных, полученных за 2020 г. Был представлен алгоритм восстановления интенсивности осадков, разработанный по аналогу модели ALG'85 (Ferraro, 1997), 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 (Integrated Multi-satellite Retrievals for Global Precipitation Measurements) (Huffman et al., 2019). 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, а именно, 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.

В работе (Сазонов, Садовский, 2024) был выполнен анализ качества геопривязки группы каналов 52 – 91 ГГц прибора МТВЗА-ГЯ №2-2. Показано, что геопривязка группы высокочастотных каналов, выполненная программой предварительной обработки данных имеет ошибку более 40 км. Именно эта ошибка и приводит к смещению областей индекса рассеяния (осадков), указанных в работе (Сазонов, 2023). Предложенный в работе алгоритм корректировки геопривязки группы каналов 52 – 91 ГГц позволил уменьшить ее ошибку до 7,62 км.

Описанные выше результаты по корректировке геопривязки свидетельствуют о том, что алгоритм восстановления интенсивности осадков, представленный в работе (Сазонов, 2023) должны быть пересмотрены. Таким образом, целью настоящей работы является корректировка алгоритма восстановления интенсивности осадков над поверхностью океана по данным прибора МТВЗА-ГЯ №2-2. А также сравнение восстановленных осадков с данными других радиометрических приборов, в частности SSMIS и AMSR-2.

РАСЧЕТ ИНДЕКСА РАССЕЙНИЯ ПОСЛЕ КОРРЕКТИРОВКИ ГЕОПРИВЯЗКИ

Индекс Рассеяния (англ. Scattering Index) SI характеризует наличие веществ в атмосфере и на поверхности, которые рассеивают восходящее радиотепловое излучение. Применительно к радио-

метрическим каналам прибора МТВЗА-ГЯ индекс рассеяния для частоты 91,65 ГГц вертикальной поляризации (V), 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. Подробный алгоритм расчета функции F и оценка статистических показателей регрессии, приведены в работе (Сазонов, 2023).

Коэффициенты регрессии для функции F (2) были пересчитаны с учетом новой геопривязки для частоты 91,65 ГГц. Набор слагаемых регрессии остались такими же, как и в работе (Сазонов, 2023). Изменения коснулись только значений самих коэффициентов регрессии (таблица 1).

$$F = a_0 + a_1 \cdot T_{10,6}^V + a_2 \cdot (T_{10,6}^V)^2 + a_3 \cdot T_{23,8}^V + a_4 \cdot (T_{23,8}^V)^2 + a_5 \cdot T_{31,5}^V + a_6 \cdot (T_{31,5}^V)^2 + a_7 \cdot T_{23,8}^H + a_8 \cdot (T_{23,8}^H)^2, \quad (2)$$

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

На рис. 1 (а, б) приведены две карты с расчетом индекса рассеяния SI для одной и той же области восходящего полувитка, (а) – для случая без корректировки, (б) – после корректировки геопривязки канала 91,65 ГГц. На левом рисунке отчетливо видна область, в которой индекс рассеяния принимает отрицательные значения и находится над зоной с осадками. Аналогичная картина наблюдается и на нисходящих витках (здесь не показаны), только с той разницей, что область отрицательного рассеяния находится под зоной с осадками. Это систематически проявляется на всех доступных данных. В работе (Сазонов, 2023) было выдвинуто предположение, что лучи диаграмм направленности для различных частотных каналов прибора МТВЗА-ГЯ сведены некорректно, что и является причиной появления областей с отрицательным индексом рассеяния.

В результате расчетов по формуле (1) были получены карты с индексом рассеяния после выполнения корректировки геопривязки (рис. 1, б). Как можно отметить области с отрицательным рассеянием уменьшились. Оставшиеся небольшие отрицательные значения укладываются в величину разброса, указанную в работе (Сазонов, 2023).

Таблица 1. Коэффициенты a_i регрессии (2)

| Коэффициент | a_0 | a_1 | a_2 | a_3 | a_4 |
|-------------|---------|--------|-------|---------|-------|
| Значение | 425.264 | -17.12 | 0.038 | -4.776 | 0.016 |
| Коэффициент | a_5 | a_6 | a_7 | a_8 | |
| Значение | 17.42 | -0.038 | 0.164 | -0.0026 | |

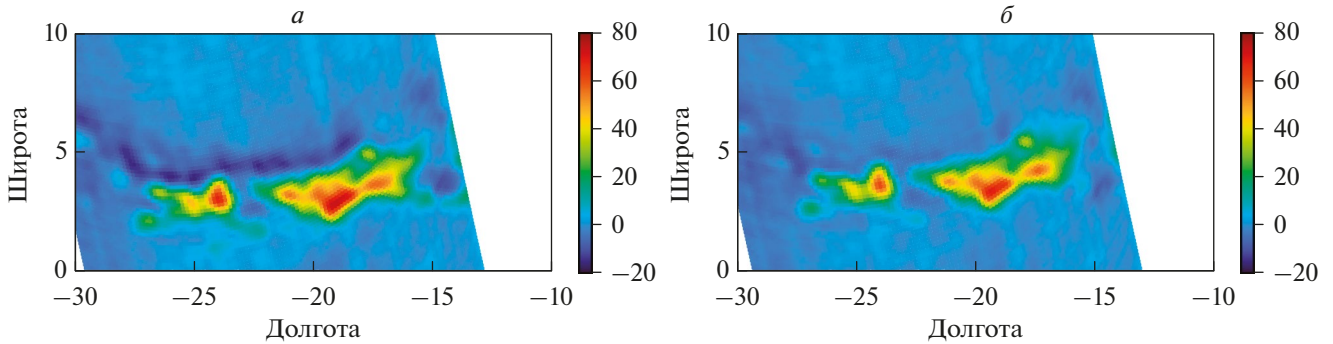


Рис. 1. Индекс рассеяния SI (К) для восходящих витков. Данные за 06.06.2020 г. (а) До корректировки высокочастотных каналов, (б) после корректировки.

УТОЧНЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ИНТЕНСИВНОСТИ ОСАДКОВ ОТ ИНДЕКСА РАССЕЯНИЯ

Анализ и построение зависимости интенсивности осадков I от индекса рассеяния SI проводится по алгоритму, представленному в работе (Сазонов, 2023). Алгоритм состоит из нескольких этапов. (1) Исходные данные собираются в композитное изображение за одни сутки для восходящих и нисходящих полувитков. (2) Полученные композитные карты совмещаются с картами осадков из реанализа GPM IMERG по времени. (3) Области с осадками выделяются из композитных карт. (4) Среди всех областей с осадками, для анализа выбираются только те, в которых временное расхождение между реанализом и измерениями МТВЗА-ГЯ не превышают ± 1 минуту.

В работе (Сазонов, 2023) 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. Эта операция проводилась из-за неточностей геопривязки и необходимости дополнительного сведения областей с рассеянием и осадками. После пересчета и уточнения геопривязки эта операция более не нужна. Теперь зависимость $SI(I)$ строится напрямую по значениям с одинаковыми координатами точки наблюдения.

На рис. 2 приведена связь интенсивности осадков, полученных по данным реанализа GPM IMERG, с индексом рассеяния SI по данным МТВЗА-ГЯ. В статистику вошли все области для

нисходящих и восходящих полувитков с временным совмещением ± 1 минута. Полученные графики соответствуют результатам, представленным в работе (Сазонов, 2023), и, следовательно, корректировка геопривязки выполнена правильно и данные пригодны для дальнейшего анализа.

Графики для восходящих и нисходящих витков (рис. 2) в диапазоне осадков до 20 мм/ч практически идентичны. В диапазоне осадков более 20 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.

Предложенный в работе (Сазонов, 2023) полином 4-ой степени (3) был пересчитан в соответствии с новой статистикой. Аппроксимация построена в предположении, что погрешности реанализа и ошибки моделирования SI отсутствуют. На рис. 3 а приведены средние значения интенсивности осадков от SI , диапазон накопления $\Delta SI = 2$, и СКО, которое обуславливает 68% всех точек. На рис. 3 б приведен график зависимости СКО восстановления интенсивности осадков от реанализа для прибора МТВЗА-ГЯ. Так же выполнен расчет СКО для приборов AMSR-2 и SSMIS. Сравнение СКО этих приборов представлено в следующем разделе.

$$I = a + b \cdot SI + c \cdot SI^2 + d \cdot SI^3 + e \cdot SI^4, \quad (3)$$

где значения коэффициентов полинома приведены в таблице 2.

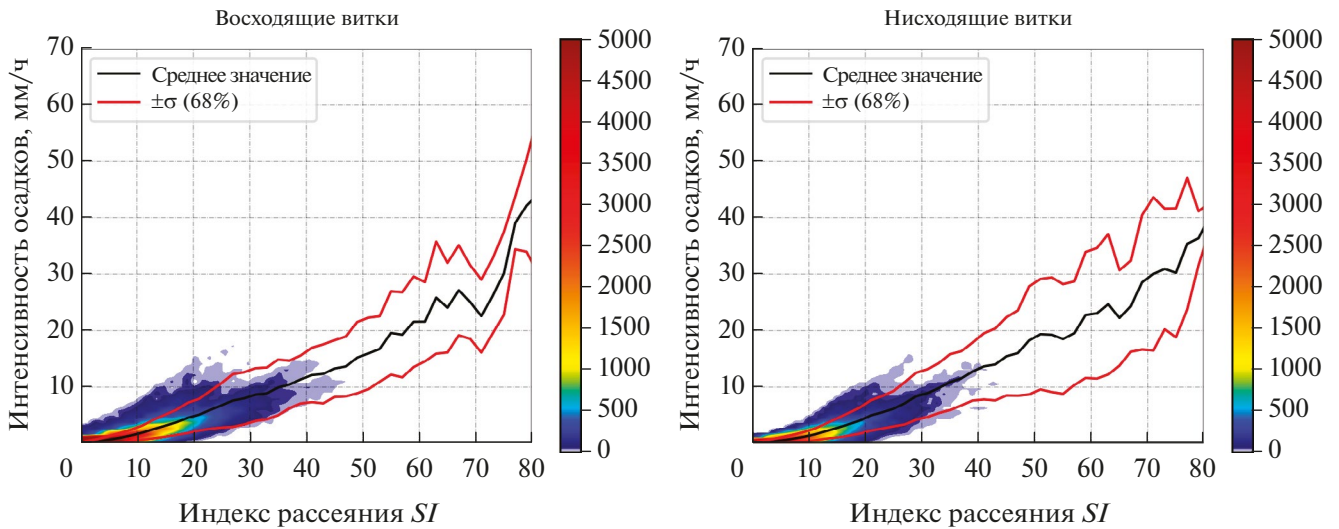


Рис. 2. Связь интенсивности осадков, полученных по данным реанализа GPM IMERG, с индексом рассеяния SI по данным МТВЗА-ГЯ для восходящих и нисходящих ветков. Статистика по всем областям, накопленным за 2020 год в диапазоне временного совмещения ± 1 минута. Шкала указывает количество измерений, попавших в диапазон $\Delta SI = 0,5$ К и $\Delta I = 0,5$ мм/ч.

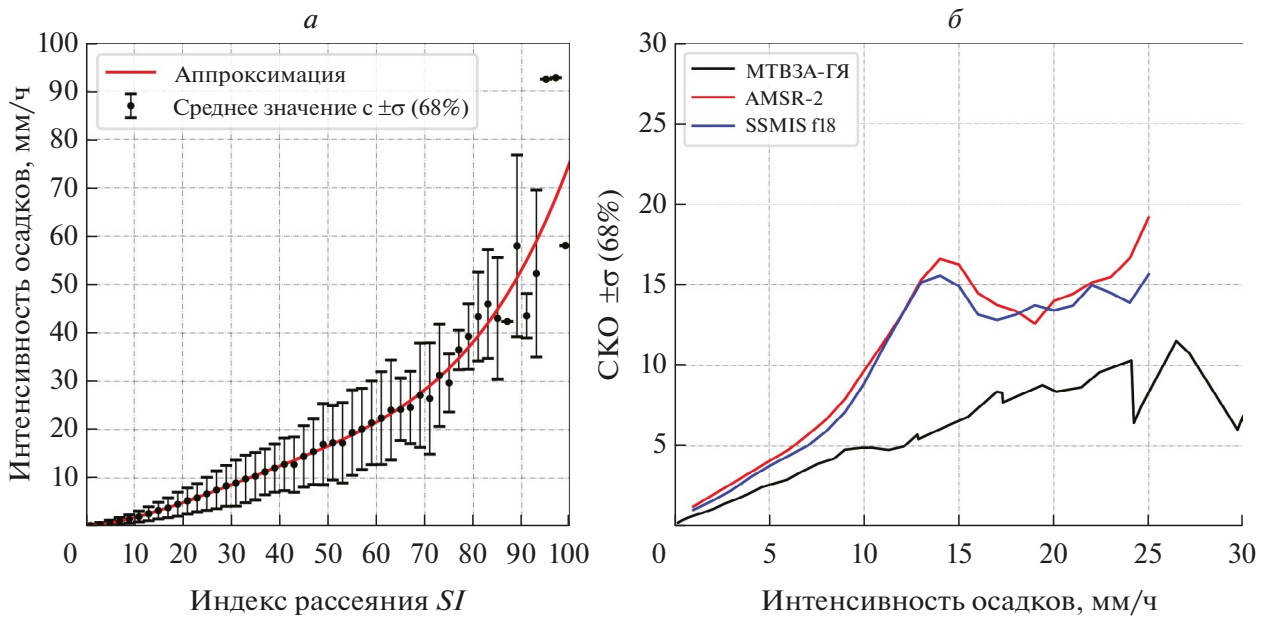


Рис. 3. (а) Зависимость интенсивности осадков от индекса рассеяния SI и ее аппроксимация функцией (3). (б) Среднеквадратичное отклонение восстановленной интенсивности осадков от реанализа.

Таблица 2. Коэффициенты полинома (3)

| Коэффициент полинома | Значение коэффициента | Значение коэффициента для 95% доверительного интервала |
|----------------------|-----------------------|--|
| a | 0.1173 | (0.0911, 0.1435) |
| b | 0.0621 | (0.05487, 0.06933) |
| c | 0.01321 | (0.01271, 0.01371) |
| d | -0.0002508 | (-0.0002622, -0.0002394) |
| e | 1.879e-06 | (1.801e-06, 1.957e-06) |

РЕЗУЛЬТАТ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОСАДКОВ ПО ДАННЫМ МТВЗА-ГЯ

На рис. 4 приведена глобальная карта восстановленных по представленному ранее алгоритму интенсивность осадков. Качественное сравнение полученной карты с реанализом показало, что все зоны с осадками совпадают. Минимальный уровень восстановления осадков составил 0.4 мм/ч. Это связано с наличием шумов на радиометрическом канале (23,8 ГГц, вертикальная поляризация), что приводит к ложному детектированию осадков с малой интенсивностью. Поэтому был установлен пороговый уровень в 0.4 мм/ч, чтобы максимально отфильтровать ложные значения осадков. В сравнение, для приборов SSMI как указано в статье (Ferraro, 1997), осадки не восстанавливаются при $SI < 10$. В представленной модели при $SI = 10$ интенсивность осадков составляет ~ 1 мм/ч.

Представленная на рис. 4 карта осадков аналогична результатам, получаемым с приборов AMSR-2 и SSMIS. На рисунке 5 представлены карты осадков для одной и той же области для приборов AMSR-2, МТВЗА-ГЯ (№2-2) и SSMIS (f18). Указанные два прибора наиболее близки по времени к измерениям МТВЗА-ГЯ. Локальное время пересечения экватора для приборов составляет (среднее, по состоянию на 2020 год): AMSR-2 – 13 часов 33 мин., МТВЗА-ГЯ – 15 часов 00 мин., SSMIS F18 17 часов 00 мин. Получается, что первым измеряет AMSR-2, за ним через 1,5 часа измеряет МТВЗА-ГЯ и еще через 2 часа измеряет SSMIS. В нижнем ряду рис.

5 приведены данные из реанализа совмещенные по времени для каждого из приборов.

В представленной области интенсивность осадков для МТВЗА-ГЯ совпадает с данными из реанализа. Отчетливо восстановлена область с осадками более 25 мм/ч, несколько хуже восстановлена область с малой интенсивностью ($< 1-2$ мм/ч), что может быть связано с описанной ранее фильтрацией ложных срабатываний. Также восстановленная область осадков качественно сходится и с измерениями AMSR-2 и SSMIS, несмотря на большую разницу по времени. Стоит отметить, что восстановленные осадки по AMSR-2 и SSMIS лучше сходятся с реанализом, потому что их данные этим реанализом усваиваются, в отличие от данных МТВЗА-ГЯ. Так же для совмещения данных по времени используется интерполяция между соседними по времени глобальными картами осадков из реанализа, в котором данные представлены с интервалом в 1 час. Для осадков такая разница по времени критична, и интерполированная карта на определенное время, отстоящее от времени измерений, не может отображать истинной картины происходящего, таким образом, сравнение с реанализом стоит считать условным.

Количественное сравнение между спутниковыми приборами напрямую провести невозможно ввиду того, что выпадение осадков очень динамичный и быстро меняющийся процесс. Можно провести только статистическое сравнение отклонений при восстановлении осадков. На рис. 3б приведен

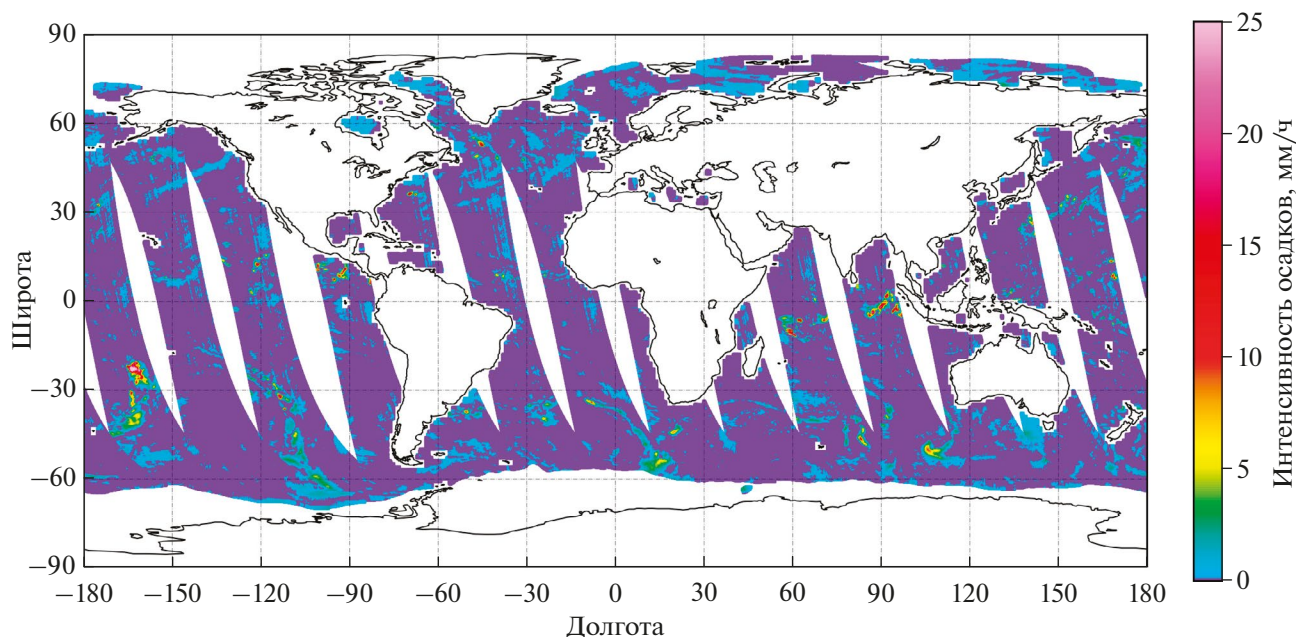


Рис. 4. Восстановленная интенсивность осадков по данным МТВЗА-ГЯ №2-2. Данные за 21 июля 2020 г.

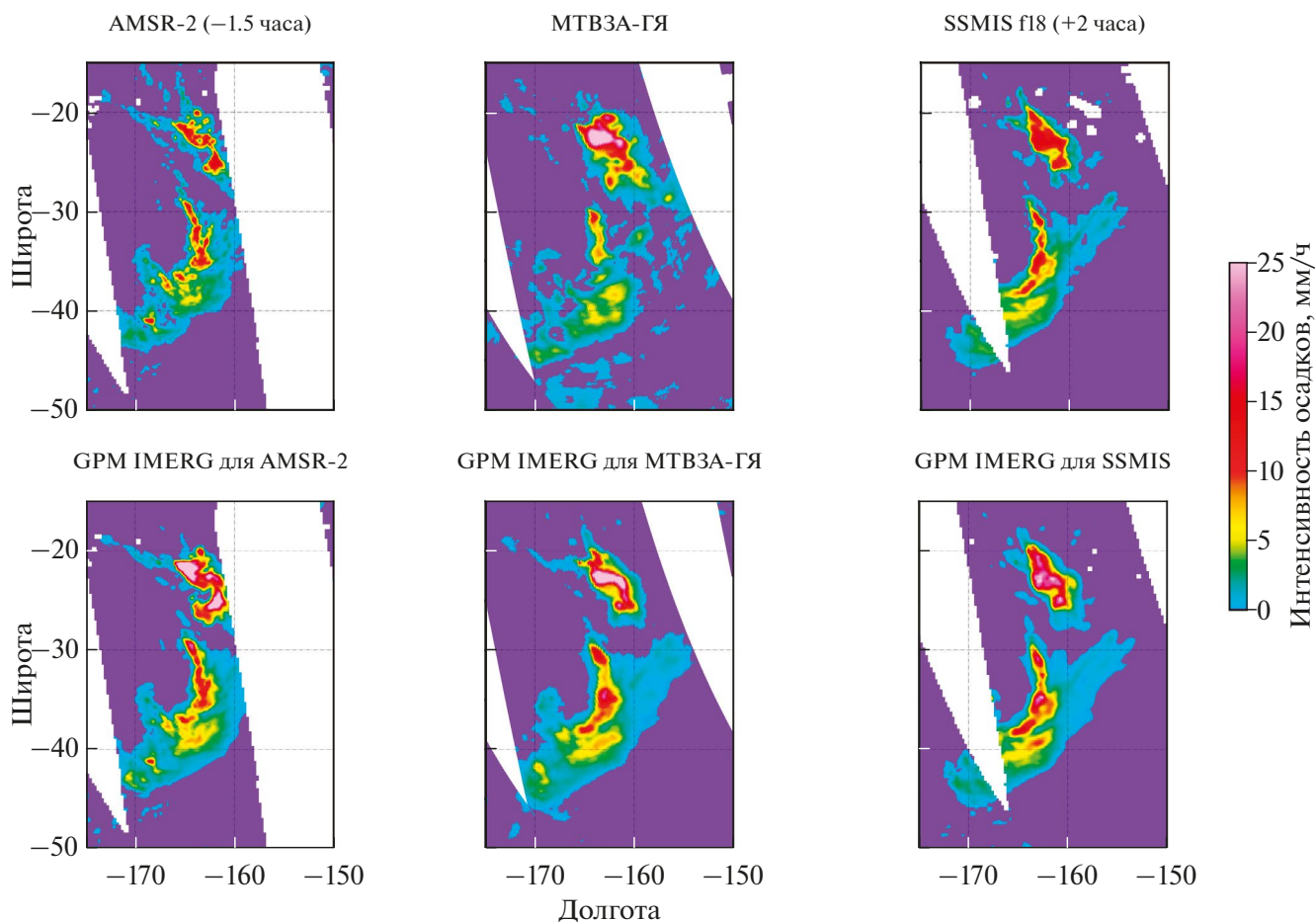


Рис. 5. Сравнение интенсивности осадков, восстановленных по данным МТВ3А-ГЯ, с осадками по AMSR-2 и SSMIS. Данные за 21 июля 2020 г.

график зависимости СКО восстановлению интенсивности осадков от реанализа для прибора МТВ3А-ГЯ. Так же выполнен расчет СКО для приборов AMSR-2 и SSMIS (анализ за весь 2020 год). СКО для AMSR-2 и SSMIS практически совпадают, что ожидаемо, за счет усвоения реанализом данных этих приборов. СКО для МТВ3А-ГЯ меньше, это объясняется тем, что для вычисления коэффициентов функции (3) используется часть реанализа.

Для оценки точности восстановления интенсивности осадков стоит использовать погодные радары. К сожалению, в открытом океане таких радаров крайне мало, а использование данных с радаров на побережье проблематично из-за большого пространственного разрешения прибора МТВ3А-ГЯ. Вблизи береговой линии восстановление геопараметров не проводится. Однако, исходя из представленных результатов качественного (рис. 5) и статистического сравнения (рис. 3б), можно заключить, что точность восстановления интенсивности осадков по данным прибора МТВ3А-ГЯ если не лучше, то, как минимум сравнима с точностями приборов AMSR-2 и SSMIS.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленное исследование показало огромный потенциал серии приборов МТВ3А-ГЯ для восстановления интенсивности осадков над поверхностью воды. В настоящей работе была выполнена корректировка алгоритма восстановления интенсивности осадков. Были рассчитаны глобальные карты осадков за 2020 год. Сравнение указанных карт с аналогичными результатами, полученными по приборам AMSR-2 и SSMIS, показали, что интенсивность осадков восстанавливается адекватно. Статистический анализ показал, что осадки по данным МТВ3А-ГЯ можно восстанавливать во всем диапазоне, однако, только в диапазоне до 25 мм/ч, можно получать достоверные данные с точностью ~50%. В диапазоне осадков более 25 мм/ч данных для сравнения мало и статистика не достоверна.

Наиболее важным выводом проделанного исследования является возможность восстанавливать интенсивность осадков по данным серии приборов МТВ3А-ГЯ со статистической точностью не хуже, чем у зарубежных приборов.

Необходимо продолжать исследования в данном направлении и перейти к решению задачи восстановления осадков над поверхностью суши, а в дальнейшем и в береговой линии. Так же необходимо вернуться к задаче восстановления температуры поверхности океана и скорости приводного ветра по данным прибора МТВЗА-ГЯ (Сазонов, 2022). С учетом результатов настоящей работы, провести корректировку алгоритмов восстановления других геопараметров в зонах с интенсивными осадками.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность: А.М. Стрельцову (АО “Российские космические системы”) за своевременное и оперативное предоставление преобразованных данных измерений МТВЗА-ГЯ, использованных в работе.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке 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.

Сазонов Д.С. Алгоритм восстановления температуры поверхности океана, скорости приводного ветра и интегрального паросодержания по данным МТВЗА-ГЯ, Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2022, Т. 19, № 1, с. 50–64. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-50-64

Сазонов Д.С. Исследование возможности восстановления интенсивности осадков по измерениям МТВЗА-ГЯ // Исследование Земли из космоса, 2023, № 5, с. 23–35. DOI: 10.31857/S020596142305007X, EDN: XQPADE

Сазонов Д.С., Садовский И.Н. Корректировка географической привязки частотных каналов 52 – 91 ГГц спутникового микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ // Исслед. Земли из космоса. 2024 (в печати).

Чернявский Г.М., Митник Л.М., Кулешов В.П., Митник М.Л., Черный 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. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-78-100

Chinnawat Surussavadee, David H. Staelin, NPOESS Precipitation Retrievals Using the ATMS Passive Microwave Spectrometer, IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS, 2010, VOL. 7, NO. 3, pp. 440–444, DOI: 10.1109/LGRS.2009.2038614

Ferraro R.R. Special sensor microwave imager derived global rainfall estimates for climatological applications // J. Geophys. Res. 1997. Vol. 102. NO. D14. Pp. 16,715–16,735.

Huffman, G.J., E.F. Stocker, D.T. Bolvin, E.J. Nelkin, 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], DOI: 10.5067/GPM/IMERG/3B-HH/06

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, Vol. 32, NO 12, pp. 2265–2280, DOI: https://doi.org/10.1175/JTECH-D-15-0039.1

Zabolotskikh E. and 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 pages http://dx.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; DOI:10.3390/rs10111770

Adjustment of Precipitation Restoration Algorithm According to MTVZA-GY No. 2-2 Measurements

D. S. Sazonov¹

¹Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

This paper presents an adjusted algorithm for restoring precipitation intensity over the ocean surface based on MTVZA-GY No. 2-2 data. Based on the studies carried out on georeferencing data and convergence of the beams of the MTVZA-GY antenna system, the weighting coefficients of the approximating functions for the scattering index and precipitation intensity were recalculated. A qualitative analysis of data for 2020 showed that precipitation intensity is restored adequately and correlate with measurements from other satellite instruments. Quantitative analysis showed that precipitation according to MTVZA-GY data can be reconstructed over the entire range, however, only in the range up to 25 mm/h can reliable data be obtained with an accuracy of ~50%. In the precipitation range of more than 25 mm/h, there is not enough data for comparison and the statistics are unreliable. Based on the results of the qualitative and statistical comparison presented in the work, we can conclude that the accuracy of the precipitation intensity restoring based on the MTVZA-GY instrument data is comparable to the accuracies for the AMSR-2 and SSMIS instruments.

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. Vol. 1. No 5. Pp. 243–248. (In Russian).
- 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 No. 2 data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2018. Vol. 15. No. 4. Pp. 78–100.
- Chinnawat Surussavadee, David H. Staelin*, NPOESS Precipitation Retrievals Using the ATMS Passive Microwave Spectrometer, *IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS*, 2010, VOL. 7, NO. 3, pp. 440–444. DOI: 10.1109/LGRS.2009.2038614
- Ferraro R.R.* Special sensor microwave imager derived global rainfall estimates for climatological applications // *J. Geophys. Res.* 1997. Vol. 102. NO. D14. Pp. 16,715–16,735.
- Huffman, G.J., E.F. Stocker, D.T. Bolvin, E.J. Nelkin, 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]. DOI: 10.5067/GPM/IMERG/3B-HH/06
- 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, Vol. 32, NO 12, Pp. 2265–2280. DOI: <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-15-0039.1>
- Sazonov D.S.* Algorithm for reconstructing ocean surface temperature, near-surface wind speed and integral vapor content from MTVZA-GY data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2022. Vol. 19. No 1. Pp. 50–64. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-50-64 (In Russian)
- Sazonov D.S.* Study the possibility of precipitation intensity recovery from MTVZA-GY measurements, *Issled. Zemli iz kosmosa*. 2023. No. 5. Pp. 23–35. DOI: 10.31857/S020596142305007X, EDN: XQPADE (in Russian)
- Sazonov D.S., Sadovskii I.N.* Geographical reference adjustment of MTVZA-GY frequency channels, *Issled. Zemli iz kosmosa*. 2024 (in print)
- Zabolotskikh E. and 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 pages <http://dx.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. DOI:10.3390/rs10111770