

## Возможности использования быстрой радиационной модели CRTM для анализа данных микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ

А. А. Филей, Ю. А. Шаилова

Дальневосточный центр НИЦ «Планета», Хабаровск, 680000, Россия  
E-mail: andreym-61@mail.ru

Рассмотрены функциональные возможности быстрой радиационной модели CRTM (*англ.* Community Radiative Transfer Model) для анализа и валидации измерений микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ (Модуль температурного и влажностного зондирования атмосферы, названный в честь генерального конструктора космических систем, выдающегося учёного Г. Я. Гуськова) на борту космических аппаратов серии «Метеор-М». Представлены основные аспекты по расчёту и добавлению в CRTM весовых коэффициентов для быстрого вычисления коэффициентов пропускания атмосферы в каналах радиометра МТВЗА-ГЯ. Проведена оценка вычислительной производительности и точности расчётов измерений в микроволновых каналах радиометра на примере сравнения с быстрой радиационной моделью RTTOV (*англ.* Radiative Transfer for TOVS (TIROS (Television InfraRed Observation Satellite) Operational Vertical Sounder))). Согласно результатам сравнения смоделированных значений яркостной температуры, полученной с помощью CRTM и RTTOV, средняя ошибка в каналах МТВЗА-ГЯ не превышает 2К. Функциональные возможности CRTM позволяют не только моделировать измерения в каналах МТВЗА-ГЯ, но и осуществлять построение весовых функций и якобианов, что делает CRTM отличным средством для разработки методик решения обратных задач переноса микроволнового излучения в атмосфере с целью получения различного вида информационной продукции. Кроме этого, полученный опыт расчёта весовых коэффициентов позволит в будущем реализовать функциональные возможности для моделирования измерений в каналах любых российских спутниковых приборов.

**Ключевые слова:** МТВЗА-ГЯ, CRTM, RTTOV, «Метеор-М», моделирование, быстрая радиационная модель

Одобрена к печати: 01.07.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-9-23

### Введение

Быстрые радиационные модели (БРМ) переноса излучения в атмосфере в настоящее время стали незаменимым инструментом в различных сферах применения, включая усвоение спутниковых измерений в моделях численного прогноза погоды (ЧПП), восстановление физических параметров состояния системы «атмосфера – подстилающая поверхность», анализ качества измеряемых спектров уходящего излучения, мониторинг качества абсолютной калибровки каналов спутникового прибора. В настоящее время модели переноса излучения CRTM (*англ.* Community Radiative Transfer Model) (Johnson et al., 2023) и RTTOV (*англ.* Radiative Transfer for TOVS (TIROS (Television InfraRed Observation Satellite) Operational Vertical Sounder))) (Saunders et al., 2018) являются наиболее широко используемыми БРМ. Они позволяют выполнять «быстрый» расчёт сигналов в каналах спутниковых приборов за счёт использования весовых коэффициентов, полученных в результате точных построчных (*англ.* line-by-line, LBL) вычислений монохроматического излучения, свёрнутого с функцией спектральной чувствительности (ФСЧ) каналов прибора. Весовые коэффициенты, как правило, вычисляются для обширного ансамбля состояния атмосферы, который характеризуется различными температурно-влажностными и газовыми вариациями. Представленные БРМ обеспечивают высокое быстродействие моделирования измеряемых спектров при погрешности расчётов на уровне инструментального шума и позволяют выполнять расчёты таких характеристик переноса электромагнитного излучения, как коэффициент пропускания, оптическая

толщина, а также вычислять вариационные производные (якобианы) смоделированных измерений по различным параметрам состояния системы «атмосфера – подстилающая поверхность» (Успенский и др., 2013). Основное преимущество CRTM и RTTOV по сравнению с другими БРМ заключается в том, что данные модели используются во многих мировых центрах ЧПП в качестве системы усвоения данных для прогноза погоды, а также для проведения различного анализа состояния атмосферы. Кроме этого, данные БРМ имеют регулярную техническую поддержку, могут проводить моделирование излучения в каналах большинства современных спутниковых приборов в микроволновой (МКВ), инфракрасной (ИК) и видимой (ВД) областях электромагнитного спектра. Это делает БРМ CRTM и RTTOV многофункциональным инструментом для решения прикладных задач дистанционного зондирования Земли из космоса.

В рамках настоящего исследования рассмотрены функциональные возможности БРМ CRTM для анализа и валидации данных измерений микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ (Модуль температурного и влажностного зондирования атмосферы, названный в честь генерального конструктора космических систем, выдающегося учёного Г.Я. Гуськова), являющегося одним из ключевых приборов полезной нагрузки на борту космических аппаратов серии «Метеор-М». Одно из основных целевых применений измерений МТВЗА-ГЯ — получение «всепогодных» данных температурно-влажностного зондирования атмосферы, независимо от наличия или отсутствия облачности и осадков в поле зрения прибора. Согласно оценкам ведущих прогностических центров, наибольший вклад в повышение достоверности краткосрочного ЧПП даёт усвоение именно данных микроволновых спутниковых радиометров. Учитывая тот факт, что сеть наземных метеорологических наблюдений в России имеет неравномерное покрытие, особенно на территории Сибири и Дальнего Востока, МКВ-спутниковая радиометрия становится приоритетным направлением при проектировании и эксплуатации спутниковой группировки космических аппаратов (КА) в нашей стране.

В соответствии с Федеральной космической программой до конца 2025 г. планируется вывести на орбиту Земли два спутника — «Метеор-М» № 2-5 и «Метеор-М» № 2-6 — с установленным на борту радиометром МТВЗА-ГЯ. Вопрос о применении БРМ CRTM для моделирования измерений в каналах МТВЗА-ГЯ рассмотрен в рамках настоящей работы на примере КА «Метеор-М» № 2-3, запущенного 27 июня 2023 г. Именно установленный на КА «Метеор-М» № 2-3 радиометр МТВЗА-ГЯ, в отличие от своих предшественников, получил расширенный наборов каналов (36 каналов), аналогичных по своим спектральным характеристикам каналам радиометров SSMIS (*англ.* Special Sensor Microwave Imager/Sounder) (КА серии DMSP (*англ.* Defense Meteorological Satellite Program)) и AMSR2 (*англ.* Advanced Microwave Scanning Radiometer) (КА GCOM-W (*англ.* Global Change Observation Mission Water)). МТВЗА-ГЯ на КА «Метеор-М» № 2-3 является прототипом прибора, который планируется устанавливать на КА нового поколения «Метеор-МП» (Cherny et al., 2017). Стоит отметить, что актуальная на момент написания настоящей публикации БРМ RTTOV версии v13.2 позволяет моделировать только 29 из 36 каналов МТВЗА-ГЯ, в то время как у CRTM версии v2.4 и вовсе нет функциональных возможностей осуществлять моделирование измерений в каналах МТВЗА-ГЯ. В условиях санкционного давления в настоящий момент отсутствует возможность напрямую обратиться к разработчикам представленных БРМ с целью технической реализации моделирования измерений во всех 36 каналах МТВЗА-ГЯ. Это накладывает серьёзные ограничения по использованию измерений МТВЗА-ГЯ, например, для решения таких задач, как восстановление физических параметров состояния системы «атмосфера – подстилающая поверхность». Однако стоит отметить, что CRTM, в отличие от RTTOV, имеет программные средства расчёта весовых коэффициентов с целью быстрых вычислений пропускания атмосферы в каналах любого спутникового прибора. Это позволяет каждому исследователю, разрабатывающему или тестирующему спутниковый прибор, использовать функциональные возможности БРМ CRTM в своей оперативной практике.

В настоящей работе рассматриваются основные аспекты по расчёту и добавлению в CRTM весовых коэффициентов для быстрого вычисления коэффициентов пропускания атмосферы в 36 каналах радиометра МТВЗА-ГЯ. Оцениваются функциональные возможности

CRTM, а также точность расчётов её измерений в микроволновых каналах на примере сравнения с БРМ RTTOV.

### Описание аппаратуры МТВЗА-ГЯ

Сканер-зондировщик МТВЗА-ГЯ — один из основных приборов полезной нагрузки КА серии «Метеор-М». По параметрам и характеристикам радиометр МТВЗА-ГЯ схож с зарубежными аналогами, такими как AMSR-E (англ. Advanced Microwave Scanning Radiometer Earth Observing System) (КА Aqua), SSMIS, AMSR2. Радиометрические каналы сканера МТВЗА-ГЯ имеют рабочие частоты с вертикальной (V) и горизонтальной (H) поляризацией как в окнах прозрачности атмосферы 6,9 ГГц, 7,3; 10,6; 18,7; 23,8; 31,5; 36,7; 42,0; 48,0; 91,65 и 165 ГГц, так и в линиях поглощения кислорода 52–57 ГГц (пять с V- и пять с H-поляризацией) и водяного пара 183,31 ГГц (пять каналов с V-поляризацией) (Cherny et al., 2017). Измерения в каналах прибора МТВЗА-ГЯ имеют пространственное разрешение 16–198 км, а заявленная погрешность измерения яркостной температуры (BT) составляет от 0,5 до 1,5 К (Чернявский и др., 2020). Основные характеристики каналов прибора представлены в *табл. 1*.

Таблица 1. Информационные характеристики каналов радиометра МТВЗА-ГЯ спутника «Метеор-М» № 2-3

№ канала	Центральная частота, ГГц	Кол-во полос	Ширина полосы, МГц	Чувствительность, не хуже, К/пиксель	Поляризация	Пространственное разрешение, км		
1, 2	6,9	1	350	0,5	V/H	136×280		
3, 4	7,3					100	0,4	122×250
5, 6	10,6							89×198
7, 8	18,7		200	0,3		52×116		
9, 10	23,8		400			42×94		
11, 12	31,5		1000	0,4		35×76		
13, 14	36,7					30×67		
15, 16	42,0		400	0,4		26×60		
17, 18	48,0					24×43		
19	52,8					V	21×48	
20	53,3						21×48	
21	53,8						21×48	
22	54,64						21×48	
23	55,63						21×48	
24	57,290344±0,3222±0,1		4	50		H	21×48	
25	57,290344±0,3222±0,05			20			0,7	21×48
26	57,290344±0,3222±0,025			10			0,9	21×48
27	57,290344±0,3222±0,01			5			1,3	21×48
28	57,290344±0,3222±0,005			3			1,7	21×48
29, 30	91,655	2	2500	0,6	V/H	14×30		
31	165,0	1	3000	0,8	V	12×25		
32	183,31±7,0	2	500		9×21			
33	183,31±4,5				9×21			
34	183,31±3,0	1000	0,6		9×21			
35	183,31±1,8	2000	0,8		9×21			
36	183,31±1,4				0,5	9×21		

По сравнению с радиометром МТВ3А-ГЯ спутника «Метеор-М» № 2-2, на КА «Метеор-М» № 2-3 были добавлены семь каналов на частотах 6,3V/Н ГГц, 7,3V/Н, 183,31±4,5V, 183,31±1,8V, 165V ГГц. По своему частотному диапазону прибор МТВ3А-ГЯ на КА «Метеор-М» № 2-3 в большинстве своём объединяет частотные характеристики таких приборов, как ATMS (*англ.* Advanced Technology Microwave Sounder) (КА Suomi NPP (*англ.* National Polar-orbiting Partnership)), NOAA-20/21 (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration) и AMSR2.

### Быстрая радиационная модель CRTM

Быстрая модель переноса излучения CRTM разработана в Объединённом центре ассимиляции спутниковых данных США (*англ.* Joint Center for Satellite Data Assimilation — JCSDA) (Weng et al., 2006), используется в численных расчётах погоды, калибровке и анализе спутниковых данных в различных федеральных агентствах и университетах США. В частности, CRTM внедрена в базу данных реанализа MERRA (*англ.* Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications) (Rienecker et al., 2011), в модель ЧПП WRF (*англ.* Weather Research and Forecasting) для ассимиляции спутниковых измерений (Thodsan et al., 2022), в программный комплекс MIRS (*англ.* Microwave integrated Retrieval System) для восстановления параметров системы «атмосфера — подстилающая поверхность» (Boukabara et al., 2011), а также в систему расчёта температуры поверхности океана ACSPO (*англ.* Advanced Clear-Sky Processor for Oceans) (Liang et al., 2009). В настоящее время БРМ CRTM развивается в противовес европейской модели RTTOV и по своим функциональным возможностям позволяет не хуже БРМ RTTOV моделировать излучение в широком диапазоне электромагнитного спектра для различных спутниковых приборов, имеет возможность рассчитывать коэффициенты пропускания, оптическую толщину и якобианы смоделированных измерений по различным параметрам состояния системы «атмосфера — подстилающая поверхность» (Zou et al., 2016).

Принцип работы БРМ CRTM основан на быстром вычислении коэффициентов пропускания слоёв атмосферы с последующим расчётом излучения в каналах спутникового прибора. Высокая скорость вычислений достигается применением множественной линейной регрессии, в которой используются заранее выбранные предикторы — параметры состояния атмосферы для заданного зенитного угла наблюдений. Конкретный вид и параметры регрессии определяются на основе результатов точных радиационных расчётов со строгим полинейным учётом спектров поглощения атмосферных газов (Успенский и др., 2013). Для нахождения регрессионных (весовых) коэффициентов используется обучение БРМ на представительном глобальном наборе моделей атмосферы, содержащем информацию о температурно-влажностном и газовом состоянии реальной атмосферы. В качестве таких наборов для CRTM могут выступать данные, сформированные Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды ECMWF (*англ.* European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) (Chevallier et al., 2006), либо Университетом Мэриленда (*англ.* University of Maryland, Baltimore County) (Strow et al., 2003). Стоит отметить, что изначально в первой ревизии CRTM для расчёта коэффициентов пропускания атмосферы в каналах спутникового прибора использовалась методика ODAS (*англ.* Optical Depth in Absorber Space), которая допускала только вариации водяного пара и озона. Однако начиная с CRTM версии V2 была внедрена новая методика ODPS (*англ.* Optical Depth in Pressure Space), которая позволяет дополнительно учитывать поглощение излучения малыми газовыми составляющими атмосферы, такими как CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub> и др. с возможностью добавления других газовых составляющих (Chen et al., 2012; Johnson et al., 2023). Это особенно важно для моделирования излучения в каналах ИК-гиперспектрометров типа ИКФС-2 (Инфракрасный Фурье-Спектрометр) (КА серии «Метеор-М»), IASI (*англ.* Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) (КА серии MetOp), CrIS (*англ.* Cross-track Infrared Sounder) (Suomi NPP, NOAA-20/21) и др.

Структурно оба алгоритма — ODAS и ODPS — схожи, основаны на регрессии и концептуально различаются лишь тем, как они стратифицируют атмосферу по вертикали. При рас-

чёте используются построчные коэффициенты пропускания, свёрнутые с ФСЧ каналов и переменными состояниями атмосферы, выступающими в качестве предикторов.

При расчёте коэффициентов пропускания атмосферы с помощью методики ODAS атмосфера разделяется на определённое количество слоёв с интегральным распределением объёма газа, который выступает в качестве предиктора. Уравнение для расчёта коэффициентов пропускания в каналах спутникового прибора по методике ODAS имеет следующей вид (Chen et al., 2010):

$$\begin{cases} t_i = e^{-k_i(A_i - A_{i-1})}, \\ k_i = c_{i,0}(A) + \sum_{j=1}^N c_{i,j}(A)X_{i,j}(A), \\ A_i = \int_0^p \frac{\sigma_i}{g \cos(\theta)} dp, \end{cases} \quad (1)$$

где  $t_i$  — коэффициент пропускания;  $k_i$  — объёмный коэффициент поглощения;  $c_i$  — весовой коэффициент;  $X_i$  — предиктор состояния атмосферы (допускаются вариации только водяного пара и озона);  $i$  — атмосферный уровень;  $N$  — число предикторов на атмосферном уровне  $i$ ;  $j$  — номер предиктора;  $p$  — атмосферное давление;  $A_i$  — интегральный коэффициент;  $\theta$  — угол наблюдения;  $g$  — ускорение свободного падения;  $\sigma_i$  — массовый коэффициент ослабления.

В отличие от ODAS, в методике ODPS восстановление коэффициентов пропускания атмосферы осуществляется в пространстве давления, когда атмосфера разделена на определённые изобарические уровни. Расчёт коэффициентов пропускания по методике ODPS определяется следующим выражением (Saunders et al., 1999):

$$\begin{cases} t_i = e^{-(\tau_i - \tau_{i-1})}, \\ \tau_i - \tau_{i-1} = \sum_{j=1}^N c_{i,j}X_{i,j}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\tau_i$  — оптическая толщина.

Подробную информацию о методиках ODAS и ODPS, а также используемых предикторах для расчёта коэффициентов пропускания атмосферы, можно узнать из работы (Chen et al., 2010). От используемой методики и числа входных предикторов зависит точность получаемых коэффициентов пропускания атмосферы. Короткие микроволновые электромагнитные волны испытывают сильное атмосферное поглощение благодаря наличию в этих диапазонах многочисленных спектральных линий поглощения кислорода и водяного пара. Наибольшее число предикторов в методиках ODAS или ODPS связано с водяным паром, так как он является одним из наиболее сильных поглотителей электромагнитного излучения в атмосфере, степень поглощения которого очень трудно оценить из-за его значительной пространственной и временной изменчивости. Стоит отметить, что во всех спектрах поглощения кислородом и водяным паром наблюдается существенное нерезонансное «континуальное» поглощение, обусловленное вкладом дальних крыльев резонансных атмосферных линий. Для учёта в CRTM нерезонансной составляющей водяного пара в МКВ-области спектра используются модели Liebe89 (Liebe, 1989), Rosen (Rosenkranz, 1998, 2003) и MonoRTM (англ. Monochromatic Radiative Transfer Model) (Clough et al., 2005; Turner et al., 2009), а для кислорода модель MPM92 (англ. Microwave Propagation Model) (Liebe et al., 1992). Представленные модели расчёта коэффициентов поглощения различаются описанием силы линии поглощения, её ширины, формы линии и величины нерезонансного поглощения. Расчёты по разным моделям могут давать существенные различия в яркостной температуре, особенно в спектральных областях, где доминирует нерезонансное поглощение водяного пара.

## Расчёт весовых коэффициентов

Начиная с CRTM версии 2.4, JCSDA стал выпускать в свободный доступ программный пакет продуктов, который, помимо непосредственно модели CRTM, включает в себя ещё и средства расчёта весовых коэффициентов с целью быстрого вычисления пропускания атмосферы в каналах спутниковых приборов. Кроме этого, отдельно в оперативный доступ выкладываются весовые коэффициенты для большинства современных микроволновых спутниковых приборов. На момент представления настоящей работы для расчёта весовых коэффициентов использовалась CRTM версии 2.4, доступная по адресу <ftp://ftp.ssec.wisc.edu/pub/s4/CRTM> (<https://github.com/JCSDA/crtm>).

Расчёт весовых коэффициентов в каналах радиометра МТВЗА-ГЯ является нетривиальной задачей, так как требует большой подготовки данных и сложных математических расчётов. Однако наличие исходного кода CRTM, программных модулей, официальной документации (Stegmann, 2020) с описанием подробных расчётов весовых коэффициентов делает поставленную задачу вполне достижимой. На *рис. 1* представлена общая схема расчёта весовых коэффициентов для CRTM.

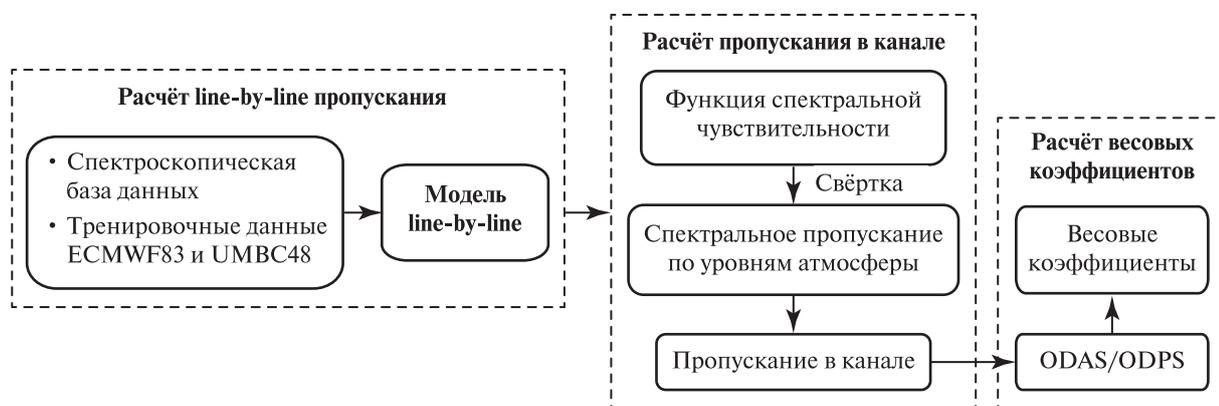


Рис. 1. Общая схема расчёта весовых коэффициентов для CRTM

В *табл. 2* представлены основные подпрограммы, входящие в программный пакет продуктов CRTM и необходимые для расчёта весовых коэффициентов.

Таблица 2. Подпрограммы для расчёта весовых коэффициентов

Подпрограмма	Назначение
Create_MW_SRF	Создание файла с описанием характеристик спектральных каналов
Create_SpcCoeff	Расчёт спектральных коэффициентов
MW_TauProfile	Расчёт пропускания по уровням атмосферы
Create_TauCoeff	Расчёт весовых коэффициентов
NC2BIN	Преобразование формата netCDF в двоичный формат CRTM

Перед началом работ необходимо с помощью подпрограммы Create\_MW\_SRF подготовить файл с описанием характеристик спектральных каналов радиометра МТВЗА-ГЯ, среди которых ФСЧ каналов, поляризация, ширина и количество полос пропускания, коэффициенты пересчёта интенсивности излучения в яркостную температуру и др. В данном контексте ФСЧ представляет собой табличное описание относительной чувствительности канала к регистрируемому МКВ-излучению. Так как доступной информации о форме ФСЧ каналов МТВЗА-ГЯ нет, то в рамках проведённого исследования было принято, что ФСЧ имеют пря-

моугольную форму. Сформированный подпрограммой Create\_MW\_SRF файл используется подпрограммой Create\_SpcCoeff для расчёта величины реликтового излучения, величины монохроматической температурной поправки, солнечной постоянной (для каналов видимого диапазона длин волн) и др. Далее осуществляется непосредственно LBL-расчёт монохроматических коэффициентов пропускания по уровням атмосферы с помощью подпрограммы MW\_TauProfile. Для этого могут использоваться такие LBL-модели, как Liebe89 или Rosen. В рамках настоящего исследования использовалась модель (Rosenkranz, 2003). Расчёт осуществлялся для 83 атмосферных профилей, сформированных ECMWF, на 100 изобарических уровнях для различных углов наблюдения. Результат работы подпрограммы MW\_TauProfile — создание выходного файла, в котором хранится информация о коэффициентах пропускания на 100 изобарических уровнях 83 профилей атмосферы для различных углов наблюдения в 36 каналах радиометра МТВЗА-ГЯ. Завершающим этапом становится расчёт весовых коэффициентов с помощью подпрограммы Create\_TauCoeff, которая включает в себя два программных модуля: ODPS\_Regress — расчёт по методике ODPS (см. выражение (2)), ODAS\_Regress — расчёт по методике ODAS (см. выражение (1)). Для расчёта весовых коэффициентов используется полученный ранее файл, содержащий информацию о пропускании атмосферы на изобарических уровнях. В рамках настоящего исследования расчёт осуществлялся как по методике ODAS, так и ODPS, число предикторов, их структура, а также условия расчёта не менялись. Результат работы подпрограммы Create\_TauCoeff — формирование netCDF-файла, содержащего информацию о весовых коэффициентах для быстрого расчёта коэффициентов пропускания атмосферы в каналах радиометра МТВЗА-ГЯ. С помощью подпрограммы NC2BIN файл формата netCDF преобразовывается в специальный двоичный файл, который непосредственно загружается в процессе работы в модель CRTM.

Время и точность расчёта весовых коэффициентов напрямую зависит от количества спектральных каналов используемой LBL-модели и объёма глобального набора данных о температурно-влажностном и газовом состоянии реальной атмосферы. У исследователя есть возможность по своему усмотрению менять параметры расчёта в зависимости от поставленных перед ним задач. В следующем разделе настоящей работы будут представлены результаты моделирования измерений в каналах радиометра МТВЗА-ГЯ с помощью рассчитанных весовых коэффициентов.

## Моделирование измерений

Для оценки корректности рассчитанных весовых коэффициентов было проведено сопоставление результатов моделирования измерений в каналах МТВЗА-ГЯ, полученных с помощью CRTM v.2.4 и RTTOV v.13.2. С подробным руководством пользователя для БПМ CRTM и RTTOV можно ознакомиться в работах (Johnson et al., 2020) и (Hocking et al., 2022) соответственно. Так как RTTOV позволяет моделировать только 29 из 36 каналов МТВЗА-ГЯ, было принято решение заменить измерения в оставшихся семи каналах на измерения подобных каналов с других спутниковых приборов: каналы № 1–4 — измерения AMSR2, канал № 31 — измерения GMI (*англ.* Global Precipitation Measurement Microwave Imager), каналы № 33 и 35 — измерения ATMS.

Процедуре моделирования измерений в каналах прибора МТВЗА-ГЯ с помощью CRTM и RTTOV предшествовал выбор источника информации о состоянии атмосферы и подстилающей поверхности. В качестве такого источника была выбрана модель ЧПП NCEP (*англ.* National Centers for Environmental Prediction) GFS (*англ.* Global Forecast System) с пространственным разрешением  $0,25^\circ$  (*nomads.ncep.noaa.gov*). В *табл. 3* представлен список информационных полей GFS, используемых в качестве входных переменных при моделировании.

Моделирование проводилось над морской поверхностью, коэффициенты излучения для которой в каналах МТВЗА-ГЯ рассчитывались с помощью модели FASTEM-6 (*англ.* Fast microwave emissivity model) (Kazumori, English, 2015). Рассматривалось два сценария состояния атмосферы: облачный и безоблачный.

Таблица 3. Список полей GFS, используемых при моделировании измерений

№	Поле	
1	Географические координаты	
2	Температура на высоте 2 м н. у. м (над уровнем моря)	
3	Давление на высоте 2 м н. у. м	
4	Отношение смеси водяного пара на высоте 2 м н. у. м	
5	Компоненты векторов ветра <i>U</i> и <i>V</i> на высоте 10 м н. у. м	
6	Температура подстилающей поверхности	
7	Вертикальный профиль	Температура
8		Отношение смеси водяного пара
9		Давление
10		Удельное содержание жидкой воды в облаках
11		« « льда в облаках
12		« « жидкой воды в виде осадков
13		« « снега в виде осадков
14		« « ледяной крупы в виде осадков
15		Доля облачности

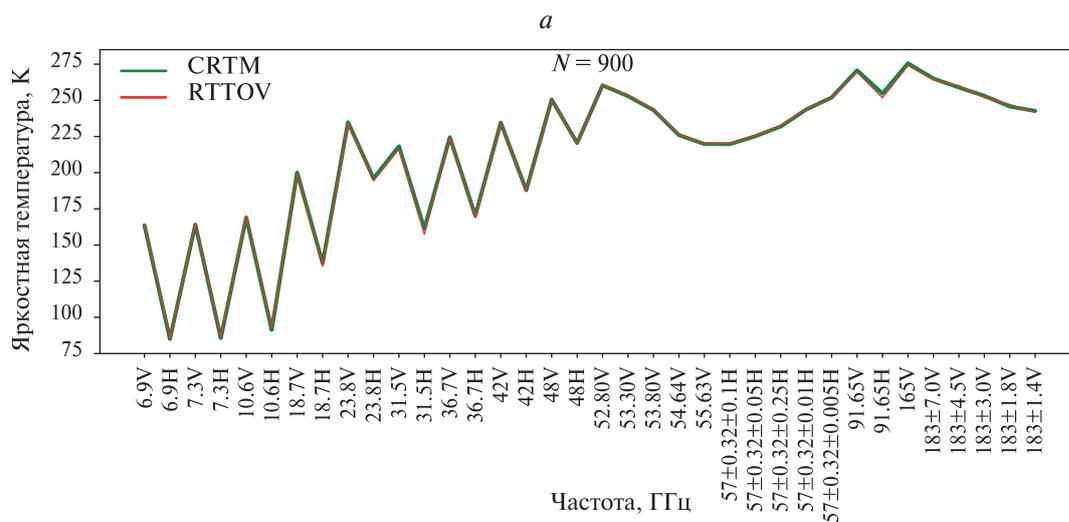
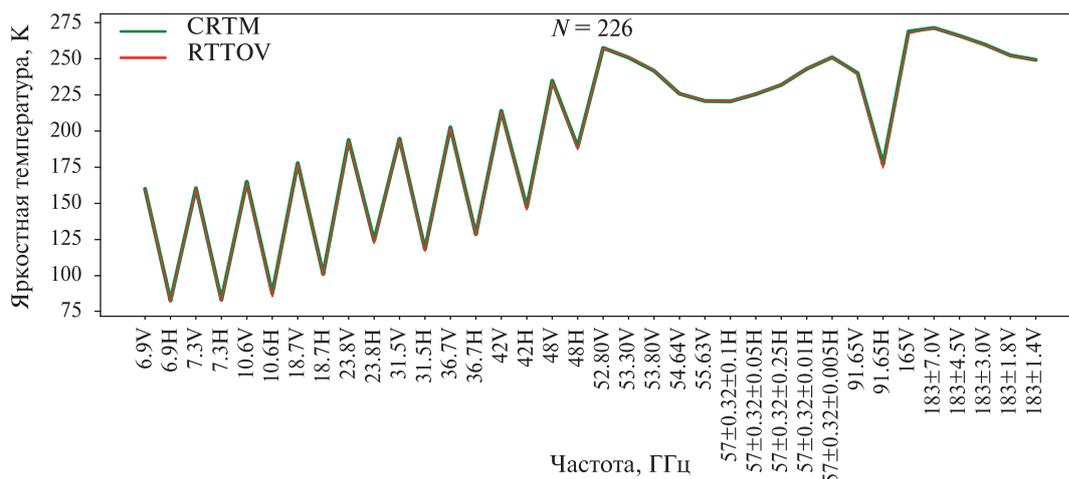


Рис. 2. Смоделированная усреднённая яркостная температура в каналах МТВЗА-ГЯ: а — безоблачная атмосфера; б — облачная атмосфера

Таблица 4. Результаты моделирования

№ канала	Центральная частота, ГГц	$BT_{CRTM} - BT_{RTTOV}$ , К (без-облачная атмосфера)	$BT_{CRTM} - BT_{RTTOV}$ , К (облачная атмосфера)	Примечание (данные RTTOV)
1	6,9V	0,52	-0,51	AMSR2
2	6,9H	1,05	-0,62	
3	7,3V	0,59	-0,55	
4	7,3H	1,18	-0,67	
5	10,6V	1,37	-1,18	МТВЗА-ГЯ
6	10,6H	2,62	-1,58	
7	18,7V	0,6	1,17	
8	18,7H	1,29	2,17	
9	23,8V	1,11	1,0	
10	23,8H	2,19	1,8	
11	31,5V	0,73	2,04	
12	31,5H	1,61	2,93	
13	36,7V	0,58	0,69	
14	36,7H	1,35	1,55	
15	42V	0,96	0,27	
16	42H	2,1	0,81	
17	48V	0,97	0,24	
18	48H	2,12	0,72	
19	52,80V	0,26	-0,07	
20	53,30V	-0,65	-0,88	
21	53,80V	-0,28	-0,38	
22	54,64V	0,01	-0,17	
23	55,63V	0,02	-0,22	
24	57,290344±0,3222±0,1H	-0,15	-0,34	
25	57,290344±0,3222±0,05H	-0,15	-0,37	
26	57,290344±0,3222±0,02H	-0,19	-0,5	
27	57,290344±0,3222±0,01H	-0,04	-0,3	
28	57,290344±0,3222±0,005H	0,04	0,14	
29	91,655V	1,14	1,25	
30	91,655H	2,83	2,97	
31	165V	1,51	1,52	GMI
32	183,31±7,0V	-0,05	0,95	МТВЗА-ГЯ
33	183,31±4,5V	0,42	-1,29	ATMS
34	183,31±3,0V	0,41	1,15	МТВЗА-ГЯ
35	183,31±1,8V	0,33	-1,35	ATMS
36	183,31±1,4V	0,38	1,08	МТВЗА-ГЯ

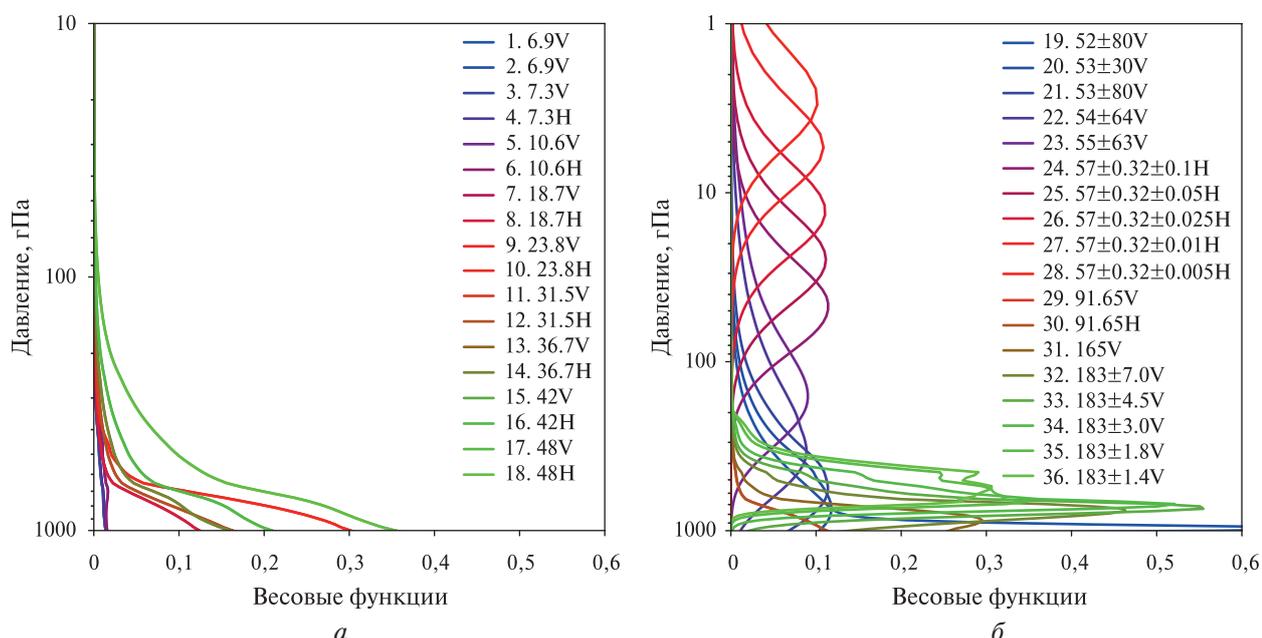
Структура облачной атмосферы в CRTM определяется шестью типами гидрометеоров в виде воды, льда, снега, дождя, ледяной крупы и града. Для RTTOV такие же типы, за исключением града. Для каждого типа гидрометеора в CRTM задаётся размер частиц (в мкм) и их содержание (в кг/м<sup>2</sup>) по уровням атмосферы, в RTTOV только их содержание (в кг/кг) по уровням атмосферы. Оптические свойства гидрометеоров в RTTOV и CRTM описываются заранее рассчитанными справочными таблицами, в которых, помимо оптических параметров,

записана информация о частотном распределении массового коэффициента ослабления гидрометеоров для различных размеров частиц (Hocking et al., 2022; Johnson et al., 2023).

При моделировании случайным образом из GFS отбирались различные сценарии состояния атмосферы по всему охвату земного шара. На *рис. 2* (см. с. 16) представлены смоделированные с помощью CRTM и RTTOV усреднённые значения яркостной температуры в каналах МТВЗА-ГЯ. В *табл. 4* представлены численные оценки результатов моделирования.

Согласно результатам сравнения смоделированных значений яркостной температуры, полученных с помощью CRTM и RTTOV, разница между двумя БРМ не превышает 2 К. Высокая точность полученной с помощью CRTM яркостной температуры в каналах МТВЗА-ГЯ подтверждает корректность рассчитанных весовых коэффициентов.

По результатам моделирования были рассчитаны весовые функции и якобианы в спектральных каналах радиометра МТВЗА-ГЯ, вид которых представлен на *рис. 3* и *4* (см. с. 19) соответственно.



*Рис. 3.* Весовые функции спектральных каналов радиометра МТВЗА-ГЯ: *а* — каналы сканера; *б* — каналы зондировщика

Добавление семи каналов на частотах 6,3В/Н ГГц, 7,3В/Н, 183,31±4,5В, 183,31±1,8В, 165В ГГц открывает новые возможности по построению информационных продуктов по данным радиометра МТВЗА-ГЯ. Так, измерения в каналах на частотах 6,9 и 7,3 ГГц более всего подходят для восстановления параметров морского льда, снега, почв. В то же время каналы на частотах 165 и 183 ГГц, чувствительные к вариациям водяного пара в атмосфере, хорошо подходят для обнаружения осадков разного агрегатного состояния (Sandò et al., 2022; You et al., 2022), в том числе для обнаружения осадков в твёрдой фазе. Таким образом, наличие 36 каналов в широком частотном диапазоне позволяет радиометру МТВЗА-ГЯ объединить в себе функциональные возможности таких зарубежных радиометров, как ATMS и AMSR2.

Полученное в ходе работы расхождение в 2 К в модельных спектрах, рассчитанных с помощью CRTM и RTTOV, сопоставимо с подобными оценками, представленными в работе (Moradi et al., 2020) для радиометра ATMS. В силу отсутствия на момент представления настоящей работы качественных калиброванных измерений МТВЗА-ГЯ в терминах яркостной температуры с КА «Метеор-М» № 2-3 не представляется возможным оценить на практике значимость этого расхождения путём сравнения смоделированных и измеренных сигналов в каналах прибора. Тем не менее, подобные сравнения для радиометра ATMS дают среднюю ошибку в 6 К вне зависимости от используемой БРМ. Ошибка в первую очередь зависит

от спектроскопической модели учёта поглощения излучения кислородом и водяным паром, а также от точности модели расчёта коэффициентов излучения подстилающей поверхности (Moradi et al., 2020).

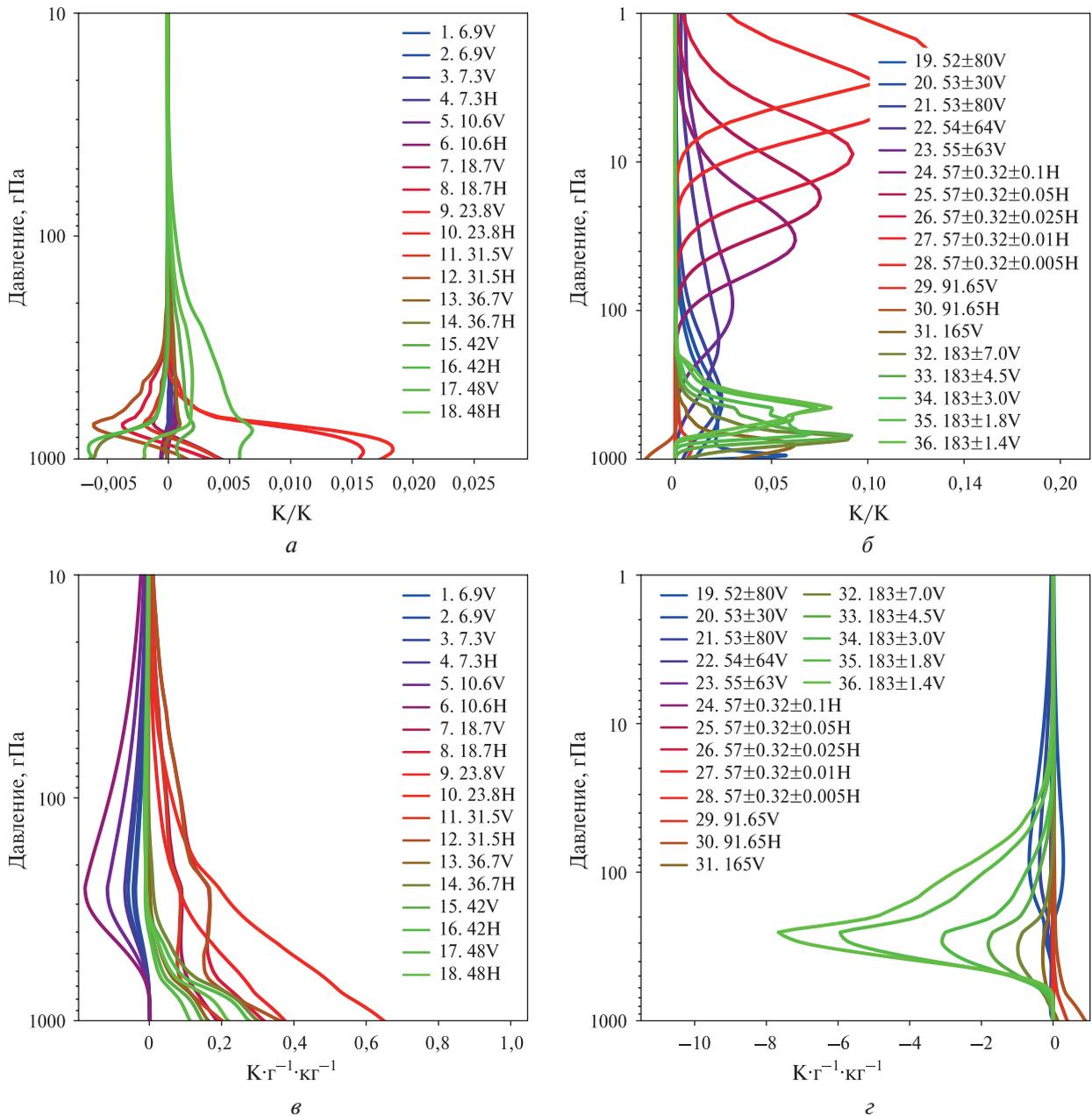


Рис. 4. Якобианы спектральных каналов радиометра МТВЗА-ГЯ: а — по температуре в каналах сканера; б — по температуре в каналах зондировщика; в — по водяному пару в каналах сканера; з — по водяному пару в каналах зондировщика

## Заключение

В ходе работы были рассмотрены функциональные возможности быстрой радиационной модели CRTM для анализа и валидации данных измерений микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ. Подробно изложены основные аспекты по расчёту и внедрению в CRTM весовых коэффициентов для получения коэффициентов пропускания атмосферы. Согласно результатам сравнения смоделированной с помощью CRTM и RTTOV яркостной температуры в каналах МТВЗА-ГЯ, разница не превышает 2К. Высокая точность полученных с помощью

CRTM значений яркостной температуры в каналах МТВЗА-ГЯ подтверждает корректность рассчитанных весовых коэффициентов. Построение весовых функций и якобианов в каналах радиометра МТВЗА-ГЯ открывает возможность разработки методик по решению обратных задач переноса МКВ-излучения в атмосфере с целью получения различного вида информационной продукции. Кроме этого, разработанный подход по добавлению весовых коэффициентов в модель CRTM позволяет в будущем реализовать функциональные возможности расчёта измерений в каналах любых российских спутниковых приборов.

## Литература

1. Успенский А. Б., Рублев А. Н., Русин Е. В., Пяткин В. П. Быстрая радиационная модель для анализа данных гиперспектрального ИК-зондировщика спутников серии «Метеор-М» // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 6. С. 16–24. DOI: 10.7868/S0205961413060109.
2. 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. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-51-65.
3. Boukabara S.-A., Garrett K., Chenet W. et al. MiRS: An all-weather 1DVAR satellite data assimilation and retrieval system // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2011. V. 49(9). P. 3249–3272. DOI:10.1109/TGRS.2011.2158438.
4. Chen Y., Han Y., van Delst P., Weng F. On water vapor Jacobian in fast radiative transfer model // J. Geophysical Research. 2010. V. 115. Iss. D12. Article D12303. DOI: 10.1029/2009JD013379.
5. Chen Y., Han Y., Weng F. Comparison of two transmittance algorithms in the community radiative transfer model: Application to AVHRR // J. Geophysical Research: Atmospheres. 2012. V. 117. Iss. D6. Article D06206. DOI: 10.1029/2011jd016656.
6. Cherny I. V., Chernyavsky G. M., Mitnik L. M. et al. Advanced Microwave Imager/Sounder MTVZA-GY-MP for new Russian meteorological satellite // Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS). 2017. P. 1220–1223. DOI: 10.1109/IGARSS.2017.8127178.
7. Chevallier F., Michele S. D., McNally A. P. Diverse profile datasets from the ECMWF 91-level short-range forecast: NWP SAF Rep. NWPSAF-EC-TR-010. 2006. 16 p.
8. Clough S. A., Shephard M. W., Mlawer E. J. et al. Atmospheric radiative transfer modeling: A summary of the AER codes // J. Quantitative Spectroscopy Radiative Transfer. 2005. V. 91(2). P. 233–244. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2004.05.058.
9. Hocking J., Saunders R., Geer A., Vidot J. RTTOV v13: Users Guide. NWPSAF-MO-UD-046 / EUMETSAT. 2022. 169 p. [https://raw.githubusercontent.com/wiki/JCSDA/crtm/files/CRTM\\_User\\_Guide.pdf](https://raw.githubusercontent.com/wiki/JCSDA/crtm/files/CRTM_User_Guide.pdf).
10. Johnson B. T., Stegmann P., Dang C., van Delst P. Community Radiative Transfer Model v2.4.0: User guide / Joint Center for Satellite Data Assimilation. 2020. 208 p. DOI: 10.5281/zenodo.7415561.
11. Johnson B. T., Dang C., Stegmann P. et al. The Community Radiative Transfer Model (CRTM), Community-focused collaborative model development accelerating research to operations // Bull. American Meteorological Society. 2023. V. 104. P. 1817–1830. DOI: 10.1175/BAMS-D-22-0015.1.
12. Kazumori M., English S. J. Use of the ocean surface wind direction signal in microwave radiance assimilation // Quarterly J. Royal Meteorological Society. 2015. V. 141(689). P. 1354–1375. DOI: 10.1002/qj.2445.
13. Liang X., Ignatov A., Kihai Yu. Implementation of the Community Radiative Transfer Model (CRTM) in Advanced Clear-Sky Processor for Oceans (ACSPO) and validation against nighttime AVHRR radiances // J. Geophysical Research. 2009. V. 114. Iss. D6. Article D06112. DOI: 10.1029/2008JD010960.
14. Liebe H. J. MPM — An atmospheric millimeter-wave propagation model // Intern. J. Infrared and Millimeter Waves. 1989. V. 10(6). P. 631–650. DOI: 10.1007/BF01009565.
15. Liebe H., Rosenkranz P., Hufford G. Atmospheric 60-GHz oxygen spectrum: New laboratory measurements and line parameters // J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 1992. V. 48(5–6). P. 629–643. DOI: 10.1016/0022-4073(92)90127-p.
16. Moradi I., Goldberg M., Brath M. et al. Performance of radiative transfer models in the microwave region // J. Geophysical Research: Atmospheres. 2020. V. 125(6). Article e2019JD031831. DOI: 10.1029/2019JD031831.
17. Rienecker M., Suarez M., Gelaro R. et al. MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective analysis for research and applications // J. Climate. 2011. V. 24(14). P. 3624–3648. DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00015.1.
18. Rosenkranz P. W. Water vapor microwave continuum absorption: A comparison of measurements and models // Radio Science. 1998. V. 33(4). P. 919–928. DOI: 10.1029/98RS01182.

19. *Rosenkranz P. W.* Rapid radiative transfer model for AMSU/HSB channels // *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*. 2003. V. 41. No. 2. P. 362–368. DOI: 10.1109/TGRS.2002.808323.
20. *Sanò P., Casella D., Camplani A. et al.* A machine learning snowfall retrieval algorithm for ATMS // *Remote Sensing*. 2022. V. 14(6). Article 1467. DOI: 10.3390/rs14061467.
21. *Saunders R. M., Matricardi M., Brunel P.* An improved fast radiative transfer model for assimilation of satellite radiance observation // *Quarterly J. Royal Meteorological Society*. 1999. V. 125. P. 1407–1425. DOI: 10.1256/smsqj.55614.
22. *Saunders R., Hocking J., Turner E. et al.* An update on the RTTOV fast radiative transfer model (currently at version 12) // *Geoscientific Model Development*. 2018. V. 11. P. 2717–2737. DOI: 10.5194/gmd-11-2717-2018.
23. *Stegmann P.* Transmittance Coefficient Generation / Joint Center for Satellite Data Assimilation. 2020. 17 p. <https://wiki.ucar.edu/display/CRTM/Transmittance+Coefficient+Generation>.
24. *Thodsan T., Wu F., Torsri K. et al.* Satellite radiance data assimilation using the WRF-3DVAR system for tropical storm Dianmu // *Forecasts. Atmosphere*. 2022. V. 13(6). Article 956. DOI: 10.3390/atmos13060956.
25. *Turner D. D., Cadeddu M. P., Loehnert U. et al.* Modifications to the water vapor continuum in the microwave suggested by ground-based 150-GHz Observations // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2009. V. 47(10). P. 3326–3337. DOI: 10.1109/tgrs.2009.2022262.
26. *Strow L. L., Hannon S. E., Souza-Machado S. D. et al.* An overview of the AIRS radiative transfer model // *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*. 2003. V. 41(2). P. 303–313. DOI: 10.1109/TGRS.2002.808244.
27. *Weng F., Han Y., Delst P., Liu Q., Kleespies T., Yan B., Le Marshal J.* JCSDA community radiative transfer model (CRTM) —Version 1 // NOAA Technical Report. 2006. 122 p.
28. *You Y., Meng H., Dong J. et al.* Snowfall detection algorithm for ATMS over ocean, sea ice, and coast // *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2022. V. 15. P. 1411–1420. DOI: 10.1109/JSTARS.2022.3140768.
29. *Zou X., Xiaoyong Z., Weng Z. F.* Characterization of bias of advanced Himawari Imager infrared observations from NWP background simulations using CRTM and RTTOV // *J. Atmospheric and Oceanic Technology*. 2016. V. 33(12). P. 2553–2567. DOI: 10.1175/JTECH-D-16-0105.1.

## The use of Community Radiative Transfer Model for analysis of MTVZA-GYa microwave radiometer measurements

A. A. Filei, Yu. A. Shamilova

*Far-Eastern Center of SRC Planeta, Khabarovsk 680000, Russia  
E-mail: vmer@dyrcpod.ru*

This paper presents the functionality of the fast Community Radiative Transfer Model (CRTM) for the analysis and validation of MTVZA-GYa (Imaging/Sounding Microwave Radiometer) measurements on board the Meteor-M satellite series. The main aspects of calculating and adding weighting coefficients to CRTM to quickly calculate atmospheric transmittance coefficients in MTVZA-GYa channels are presented. The computational performance and accuracy of calculations of MTVZA-GYa measurements were assessed using the example of comparison with the fast radiation transfer model RTTOV (Radiative Transfer for TOVS). According to the results of comparison of simulated values of brightness temperatures obtained using CRTM and RTTOV, the average error in the MTVZA-GYa channels does not exceed 2K. The functionality of CRTM allows not only to simulate measurements in the MTVZA-GYa channels, but also to calculate weighting functions and Jacobians. Thus, CRTM is an excellent tool for developing methods for solving inverse problems of microwave radiation transfer in the atmosphere in order to obtain various types of information products. In addition, the experience gained in calculating the weighting coefficients will make it possible in the future to implement functionality for modeling measurements in the channels of any Russian satellite instruments.

**Keywords:** MTVZA-GYa, CRTM, RTTOV, Meteor-M, modeling, fast radiative transfer model

Accepted: 01.07.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-9-23

## References

1. Uspensky A. B., Rublev A. N., Rusin E. V., Pyatkin V. P., Fast radiative transfer model for “Meteor-M” satellite-based hyperspectral IR sounders, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 6, pp. 16–24 (in Russian), DOI: 10.7868/S0205961413060109.
2. Chernyavsky G. M., Mitnik L. M., Kuleshov V. P. et al., Brightness temperature modeling and first results derived from the MTVZA-GY radiometer of the Meteor-M No. 2-2 satellite, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 3, pp. 51–65 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-51-65.
3. Boukabara S.-A., Garrett K., Chenet W. et al., MiRS: An all-weather 1DVAR satellite data assimilation and retrieval system, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2011, Vol. 49(9), pp. 3249–3272, DOI: 10.1109/TGRS.2011.2158438.
4. Chen Y., Han Y., van Delst P., Weng F., On water vapor Jacobian in fast radiative transfer model, *J. Geophysical Research*, 2010, Vol. 115, Issue D12, Article D12303, DOI: 10.1029/2009JD013379.
5. Chen Y., Han Y., Weng F., Comparison of two transmittance algorithms in the community radiative transfer model: Application to AVHRR, *J. Geophysical Research Atmospheres*, 2012, Vol. 117, Issue D6, Article D06206, DOI: 10.1029/2011jd016656.
6. Cherny I. V., Chernyavsky G. M., Mitnik L. M. et al., Advanced Microwave Imager/Sounder MTVZA-GY-MP for new Russian meteorological satellite, *Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS)*, 2017, pp. 1220–1223, DOI: 10.1109/IGARSS.2017.8127178.
7. Chevallier F., Michele S. D., McNally A. P., *Diverse profile datasets from the ECMWF 91-level short-range forecast*, NWP SAF Rep. NWPSAF-EC-TR-010, 2006, 16 p.
8. Clough S. A., Shephard M. W., Mlawer E. J. et al., Atmospheric radiative transfer modeling: A summary of the AER codes, *J. Quantitative Spectroscopy Radiative Transfer*, 2005, Vol. 91(2), pp. 233–244, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2004.05.058.
9. Hocking J., Saunders R., Geer A., Vidot J., *RTTOV v13, Users Guide*, NWPSAF-MO-UD-046, EUMETSAT, 2022, 169 p., [https://raw.githubusercontent.com/wiki/JCSDA/crtm/files/CRTM\\_User\\_Guide.pdf](https://raw.githubusercontent.com/wiki/JCSDA/crtm/files/CRTM_User_Guide.pdf).
10. Johnson B. T., Stegmann P., Dang C., van Delst P., *Community Radiative Transfer Model v2.4.0, User Guide*, Joint Center for Satellite Data Assimilation, 2020, 208 p., DOI: 10.5281/zenodo.7415561.
11. Johnson B. T., Dang C., Stegmann P. et al., The Community Radiative Transfer Model (CRTM): Community-focused collaborative model development accelerating research to operations, *Bull. American Meteorological Society*, 2023, Vol. 104, pp. 1817–1830, DOI: 10.1175/BAMS-D-22-0015.1.
12. Kazumori M., English S. J., Use of the ocean surface wind direction signal in microwave radiance assimilation, *Quarterly J. Royal Meteorological Society*, 2015, Vol. 141(689), pp. 1354–1375, DOI: 10.1002/qj.2445.
13. Liang X., Ignatov A., Kihai Yu., Implementation of the Community Radiative Transfer Model (CRTM) in Advanced Clear-Sky Processor for Oceans (ACSPO) and validation against nighttime AVHRR radiances, *J. Geophysical Research*, 2009, Vol. 114, Issue D6, Article D06112, DOI: 10.1029/2008JD010960.
14. Liebe H. J., MPM — An atmospheric millimeter-wave propagation model, *Intern. J. Infrared and Millimeter Waves*, 1989, Vol. 10(6), pp. 631–650, DOI: 10.1007/BF01009565.
15. Liebe H., Rosenkranz P., Hufford G., Atmospheric 60-GHz oxygen spectrum: New laboratory measurements and line parameters, *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1992, Vol. 48(5–6), pp. 629–643, DOI: 10.1016/0022-4073(92)90127-p.
16. Moradi I., Goldberg M., Brath M. et al., Performance of radiative transfer models in the microwave region, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, Vol. 125(6), Article e2019JD031831, DOI: 10.1029/2019JD031831.
17. Rienecker M., Suarez M., Gelaro R. et al., MERRA: NASA’s Modern-Era Retrospective analysis for research and applications, *J. Climate*, 2011, Vol. 24(14), pp. 3624–3648, DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00015.1.
18. Rosenkranz P. W., Water vapor microwave continuum absorption: A comparison of measurements and models, *Radio Science*, 1998, Vol. 33(4), pp. 919–928, DOI: 10.1029/98RS01182.
19. Rosenkranz P. W., Rapid radiative transfer model for AMSU/HSB channels, *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*, 2003, Vol. 41, No. 2, pp. 362–368, DOI: 10.1109/TGRS.2002.808323.
20. Sanò P., Casella D., Camplani A. et al., A machine learning snowfall retrieval algorithm for ATMS, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14(6), Article 1467, DOI: 10.3390/rs14061467.
21. Saunders R. M., Matricardi M., Brunel P., An improved fast radiative transfer model for assimilation of satellite radiance observation, *Quarterly J. Royal Meteorological Society*, 1999, Vol. 125, pp. 1407–1425, DOI: 10.1256/smsqj.55614.
22. Saunders R., Hocking J., Turner E. et al., An update on the RTTOV fast radiative transfer model (currently at version 12), *Geoscientific Model Development*, 2018, Vol. 11, pp. 2717–2737, DOI: 10.5194/gmd-11-2717-2018.

23. Stegmann P., *Transmittance Coefficient Generation*, Joint Center for Satellite Data Assimilation, 2020, 17 p., <https://wiki.ucar.edu/display/CRTM/Transmittance+Coefficient+Generation>.
24. Thodsan T., Wu F., Torsri K. et al., Satellite Radiance Data Assimilation Using the WRF-3DVAR System for Tropical Storm Dianmu, *Forecasts, Atmosphere*, 2022, Vol. 13(6), Article 956, DOI: 10.3390/atmos13060956.
25. Turner D.D., Cadeddu M.P., Loehnert U. et al., Modifications to the water vapor continuum in the microwave suggested by ground-based 150-GHz observations, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2009, Vol. 47(10), pp. 3326–3337, DOI: 10.1109/tgrs.2009.2022262.
26. Strow L.L., Hannon S.E., Souza-Machado S.D. et al., An overview of the AIRS radiative transfer model, *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*, 2003, Vol. 41(2), pp. 303–313, DOI: 10.1109/TGRS.2002.808244.
27. Weng F., Han Y., Delst P., Liu Q., Kleespies T., Yan B., Le Marshal J., JCSDA community radiative transfer model (CRTM) —Version 1, *NOAA Technical Report*, 2006, 122 p.
28. You Y., Meng H., Dong J. et al., Snowfall detection algorithm for ATMS over ocean, sea ice, and coast, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2022, Vol. 15, pp. 1411–1420, DOI: 10.1109/JSTARS.2022.3140768.
29. Zou X., Xiaoyong Z., Weng Z.F., Characterization of bias of advanced Himawari Imager infrared observations from NWP background simulations using CRTM and RTTOV, *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 2016, Vol. 33(12), pp. 2553–2567, DOI: 10.1175/JTECH-D-16-0105.1.