

*Е.В. Заболотских, Л.М. Митник, В. Шапрон, О.Г. Анискина, Ю.Е. Смирнова,
А.В. Дикинис*

**УЛУЧШЕННЫЕ МОДЕЛИ ПОГЛОЩЕНИЯ АТМОСФЕРЫ И
ИЗЛУЧЕНИЯ ОКЕАНА В ДИАПАЗОНЕ 5-100 ГГц ДЛЯ РАСЧЕТА
ЯРКОСТНЫХ ТЕМПЕРАТУР СИСТЕМЫ ОКЕАН-АТМОСФЕРА**

E.V. Zabolotskih, L.M. Mitnik, V. Chapron, O.G. Aniskina, Y.E. Smirnova, A.D. Dikinis

**IMPROVED MODELS OF THE ATMOSPHERIC ABSORPTION AND OCEAN
EMISSION IN THE RANGE OF 5-100 GHz FOR THE SIMULATION OF THE
BRIGHTNESS TEMPERATURES OVER THE OPEN OCEAN**

В работе описаны спектры поглощения атмосферы и коэффициента излучения океана на частотах сканирующих микроволновых радиометров Advanced Microwave Sounding Radiometer – Earth Observing System (AMSR-E) на спутнике Aqua и Special Sensor Microwave Imager/Sounder (SSMIS) на спутнике F16 Defense Meteorological Satellite Program (DMSP), использованные в дальнейшем для определения оптимальной геофизической модели для моделирования радиояркостных температур уходящего излучения системы Океан-Атмосфера в условиях отсутствия осадков. Данная модель представлена как комбинация моделей атмосферного поглощения и излучения океана в микроволновом диапазоне электромагнитного спектра. По результатам анализа публикаций последних лет выбраны 4 модели поглощения водяного пара, 2 модели поглощения кислорода и 2 модели ветровой зависимости коэффициента излучения океана.

Ключевые слова: радиояркостные температуры, моделирование, спектры поглощения водяного пара и кислорода, излучение океана, AMSR-E, SSMIS.

In this study the geophysical model for the simulation of microwave brightness temperature (BT) of the Atmosphere – open Ocean system for Advanced Microwave Sounding Radiometer – Earth Observing System (AMSR-E) onboard Aqua satellite and Special Sensor Microwave Imager/Sounder (SSMIS) onboard F16 satellite of Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) series under non-precipitating conditions is presented as a combination of the atmospheric absorption and ocean emission models. The modern atmospheric water vapor and oxygen absorption models along with ocean emission models, intensively used by the scientific community during the last years, are considered in details. As a result of the publication analysis 4 water vapor absorption models, 2 oxygen absorption models and 2 ocean emission models are selected for the following study aimed at finding the optimal model combination.

Keywords: brightness temperature modeling, atmospheric absorption, ocean emission, AMSR-E, SSMIS.

В данной работе представлены спектры поглощения атмосферы и коэффициента излучения океана, используемые для моделирования радиояркостной температуры ($T_{я}$) над открытыми районами океанов для нерассеивающей атмосферы (в условиях отсутствия осадков) для каналов радиометров Advanced Microwave Sounding

Radiometer – Earth Observing System (AMSR-E) на спутнике Aqua и Special Sensor Microwave Imager/Sounder (SSMIS) на спутнике Defense Meteorological Satellite Program (DMSP). Моделирование основано на использовании геофизической функции, состоящей из эмпирических моделей излучения океана и упрощенных моделей атмосферного поглощения, учитывающих наличие излучения и поглощения кислорода, водяного пара и жидкокапельной влаги облаков. Применимость данного подхода для микроволнового диапазона электромагнитного спектра для частот от 1 до 100 ГГц – частот, на которых принимают излучение радиометры AMSR-E и SSMIS, была многократно доказана и подтверждена многочисленными научными исследованиями [22, 53]. Как правило, основными различиями между используемыми геофизическими моделями являются либо характер учета ветровой зависимости коэффициента излучения океана, либо модель учета поглощения водяного пара [11, 37, 43]. Для низкочастотного участка спектра (L-диапазон) особую важность при моделировании уходящего излучения системы Океан-Атмосфера приобретает также корректность модели диэлектрической проницаемости соленой морской воды [22]. Ограничение модели условиями отсутствия рассеяния, т.е. пренебрежение рассеянием микроволнового излучения на крупных облачных и дождевых каплях и кристаллических частицах справедливо для частот, не превышающих 37 ГГц для ясной и облачной атмосферы и для дождя с интенсивностью, не превышающей ~ 2 мм/ч [4]. В работах [15, 54] показано, что лишь 3% всех глобальных измерений над океанами относятся к условиям, для которых интенсивность осадков превышает 2 мм/ч. Таким образом предложенная модель применима для 97 % всех измерений над океанами.

Наложённое ограничение на отсутствие рассеяния ограничивает использование геофизической модели для радиометрических каналов, работающих на частотах до 37 ГГц. Для SSMIS моделирование излучения для зондирующих каналов в диапазоне 50-60 ГГц исключает возможность даже небольшого дождя с интенсивностью, меньшей 2 мм/ч. Рассмотрение же излучения на высокочастотных каналах радиометров – на 85,5 ГГц для SSMIS и на 89 ГГц для AMSR-E требует исключения из рассмотрения даже пикселей с крупнокапельной фракцией облачных капель, поскольку эффекты рассеяния перестают быть пренебрежимо малыми уже при размерах частиц, превышающих 1 мм [47].

В данной работе дан обзор моделей спектров поглощения атмосферных газов, позволяющих рассчитать излучение атмосферы, и моделей излучения океана, основанных на новых и усовершенствованных данных, опубликованных в научных изданиях в последние годы. Выбраны несколько моделей для последующего определения оптимальной комбинации моделей, обеспечивающей наименьшую среднеквадратичную разность между радиометрическими измерениями и модельными расчетами.

Излучение океана

Микроволновое излучение морской поверхности, не подверженной воздействию приводного ветра, определяется только температурой и диэлектрической постоянной морской воды. При наличии ветра коэффициент излучения становится функцией скорости ветра в приповерхностном слое атмосферы так называемого приводного ветра.

Спокойная морская поверхность характеризуется сильно поляризованным излучением, в то время как под воздействием ветрового напряжения поляризованность излучения ослабевает с ростом скорости ветра.

При отсутствии ветра поверхность океана можно считать зеркально отражающей средой и рассчитывать долю отраженной от поверхности радиации R_V и R_H на вертикальной (V) и горизонтальной (H) поляризации соответственно по известным формулам Френеля [10]:

$$R_V = \left| \frac{\varepsilon_{ок} \cdot \cos \theta - \sqrt{\varepsilon_{ок} - 1 + \cos^2 \theta}}{\varepsilon_{ок} \cdot \cos \theta + \sqrt{\varepsilon_{ок} - 1 + \cos^2 \theta}} \right|^2, \quad (1)$$

$$R_H = \left| \frac{\cos \theta - \sqrt{\varepsilon_{ок} - 1 + \cos^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{\varepsilon_{ок} - 1 + \cos^2 \theta}} \right|^2, \quad (2)$$

где θ - угол падения электромагнитной волны на поверхность океана, а $\varepsilon_{ок}$ - диэлектрическая проницаемость соленой воды.

Все излучение, не отразившееся от поверхности, поглощается средой или проходит через нее. Глубина проникновения микроволнового излучения в соленой воде составляет порядка 1 мм, и это означает, что доля излучения $A = I - R$, не отразившаяся поверхностью, поглощается ею. Согласно закону Кирхгоффа, $A = \chi$, где χ - коэффициент излучения океана, представляющий собой отношение излученной радиации к радиации абсолютно черного тела, излучающего при температуре $T_{ок}$. Таким образом, радиояркостная температура океана, соответствующая излучению его гладкой поверхности, может быть представлена в виде:

$$T_{я\text{ ок } v, p} = \chi_{v, p} \cdot T_{ок} = (1 - R_{v, p}) \cdot T_{ок}, \quad (3)$$

где индекс $p = V, H$ везде в дальнейшем будет обозначать поляризацию: V - вертикальную, H - горизонтальную.

Моделирование коэффициентов отражения и излучения океана с учетом всех факторов, обусловленных действием ветра (волнение, пенные образования различной природы и др.), представляет собой сложнейшую задачу, которой посвящены многочисленные исследования. Результаты этих исследований демонстрируют значительные расхождения, которые остаются в качестве неопределенностей моделей расчета радиояркостных температур системы. Формулировка теоретической модели зависимости коэффициента излучения океана от скорости ветра представляется наиболее сложной задачей [16, 41].

На сегодняшний день может быть выделено три основных механизма, ответственных за изменение излучательной способности океана, подверженного воздействию ветра [44]. Во-первых, появление на морской поверхности волн с длинами много больше, чем длина волны излучения, изменяет локальный угол излучения и перемешивает поляризационные состояния излучения. Это явление может быть представлено

в виде суммы площадок с разными углами наклона, каждая из которых представляет собой квази-зеркальный независимый излучатель [41]. Второй механизм связан с образованием пены при скоростях ветра, превышающих некое пороговое значение – порядка 4-7 м/с, - разное по разным источникам. Эти пенные образования, представляющие собой смесь воздуха и воды, приводят к росту излучения на обеих поляризациях. Модели морской пены развивались в прошлом [39, 42] и продолжают развиваться и совершенствоваться в настоящем, поскольку столь сложный объект на морской поверхности, который объединен под термином «пена», в действительности включает в себя смесь пены, барашков, пузырьков, водяной пыли и брызг, а также биогенных и других эмульсий, моделирование которых представляет значительные трудности в связи с нестабильностью состояния морской поверхности и разнообразия структур [32]. И, наконец, третий эффект воздействия ветра – дифракция микроволн на морских волнах, длина которых много меньше длины волны излучения (брэгговская рябь). В работе [33] впервые были сформулированы основные положения теории рассеяния микроволн на таких волнах. Ряд исследователей [50, 51, 56] использовали эти положения для решения задачи расчета излучения морской поверхности в состоянии ветрового волнения путем параметризации перечисленных эффектов в формулировке среднеквадратичного наклона крупномасштабного волнения, доли пенных образований и среднеквадратичной высоты мелкомасштабного волнения. Каждый из этих параметров зависит от скорости приводного ветра.

Сох и Munk [8], Monahan и O'Muircheartaigh [30], и Mitsuyasu и Honda [29] вывели соотношения между скоростью ветра и перечисленными параметрами, характеризующими ветровое волнение. Эти соотношения, совместно с моделями уклонов, пенных образований и дифракции, обеспечивают исследователей инструментом расчета излучательной способности морской поверхности, подверженной воздействию ветра. Вычисления подобного рода были выполнены в целом ряде работ [13, 22, 27].

Кроме зависимости от скорости ветра, крупномасштабный среднеквадратичный наклон и мелкомасштабная среднеквадратичная высота волнения зависят также от направления ветра [3, 54, 57]. Направление ветра также влияет на излучение за счет того, что пенные образования и мелкомасштабные волны неоднородно распределены по крупномасштабным волнам. Это влияние приводит к асимметрии излучения океана в направлениях по ветру и против ветра. Анизотропия мелкомасштабных волн ответственна за наблюдаемую зависимость сигнала обратного рассеяния в активных микроволновых инструментах от направления ветра, которая дает возможность восстанавливать направление ветра при помощи радаров и скаттерометров [17].

Характеристики волнения и доля пенных образований, непосредственно влияющих на коэффициент излучения океана кроме силы ветра определяются целым рядом геофизических параметров, включающих время действия ветра, вязкость морской воды (которая, в свою очередь, является функцией температуры океана), поверхностное натяжение, зависящее от наличия поверхностно-активных веществ и другие. Поэтому при физическом моделировании эффектов воздействия ветра на коэффициент излучения океана, особенно важно представлять, насколько существенно при любой параметризации упрощается реальная физика происходящих на поверхности явлений. Более того, необходимость практического применения результатов теоретического

моделирования излучения океана требует либо численного интегрирования сложных уравнений, либо использования допущений, упрощений и параметризаций.

С другой стороны, существует альтернативный подход к моделированию излучения океана, суть которого заключается в эмпирической параметризации ветровой зависимости коэффициента излучения. Применение данного подхода требует аккуратных измерений отклика в изменении радиоярких температур на ветровой сигнал и выведение экспериментальной зависимости коэффициента излучения от скорости ветра при различных углах излучения, температурах поверхности и значениях солености морской воды. Большинство эмпирических моделей излучения океана используют измерения микроволновых яркостей вблизи поверхности океана для исключения влияния атмосферы. Например, подобные измерения были организованы в рамках эксперимента Fluxes, Air-Sea Interaction, and Remote Sensing (FAIRS) [3]. Результаты, полученные в процессе FAIRS, хорошо согласуются с экспериментальными моделями, описанными в [16, 35, 41, 49, 53], и демонстрируют наличие ярко выраженной линейной зависимости между скоростью ветра в диапазоне 4-16 м/с при трех углах визирования (45° , 53° , и 65°) для радиоярких температур на частотах 10,8 и 36,5 ГГц. Будучи подтвержденными в целом ряде работ, данные эмпирические зависимости использовались при моделировании уходящего излучения системы Океан-Атмосфера и последующей разработке алгоритмов оценки скорости приводного ветра в ряде работ [32, 33].

Немного отличающиеся от [3] экспериментальные результаты были получены в [26]. В этой работе изотропная поправка к коэффициенту излучения на горизонтальной и вертикальной поляризациях, вызванная воздействием ветра, была получена путем усреднения результатов измерений по всем направлениям приводного ветра.

В данной работе для определения комбинированной геофизической модели, включающей атмосферную и океаническую составляющие, использовались две эмпирические модели зависимости излучения от скорости ветра. Первая модель уже продемонстрировала свою способность адекватно воспроизводить ветровой сигнал в модельных значениях радиоярких температур в диапазоне скоростей ветра до 20 м/с. С использованием данной модели в работе [5, 1] были рассчитаны массивы радиоярких температур и на их основе настроены Нейронные Сети (НС) для оценки таких параметров атмосферы, как интегральная влажность атмосферы и интегральный водозапас облаков по данным радиометров SSM/I и AMSR-E. Разработанные алгоритмы были валидированы с использованием независимых измерений влажности на станциях радиозондирования и продемонстрировали существенное (40 %) улучшение точности по сравнению с традиционно используемыми алгоритмами. Данная модель будет обозначена в дальнейшем как Ros92, хотя фактически она является комбинацией нескольких эмпирических моделей. Для моделирования излучения на горизонтальной поляризации используется модель [35], поскольку она находится в наилучшем соответствии с моделями, упомянутыми в данной статье, и к тому же дает поправки к коэффициенту излучения (χ) как функции скорости ветра (WS) $d\chi/dWS$ для всего диапазона частот радиометров SSMIS и AMSR-E от 6 до 90 ГГц. Для вертикально поляризованного излучения $d\chi/dWS$, Ros92 использует комбинацию моделей [3, 35]. Главной характерной особенностью модели можно считать независимость величины

$\partial\chi/\partial WS$ от скорости ветра. Подобная независимость предполагается многими исследователями [3, 35, 38, 40], которые считают, что увеличение микроволнового излучения со скоростью ветра есть константа, не зависящая от скорости ветра, и появление на поверхности моря пенных образований эту константу не меняет. Величина $\partial\chi/\partial WS$ определяется из соответствующих измерений микроволновых яркостей, которые, как правило, ограничены определенным набором углов визирования, частот и других условий эксперимента (температура, соленость морской воды). Подобные модели отличаются лишь собственно величиной $\partial\chi/\partial WS$. Для ранних работ [35] характерны примерно в два раза более низкие значения $\partial\chi/\partial WS$ относительно более поздних работ [10, 12, 19].

Отличительной особенностью второй модели, использованной в данной работе, является рост $\partial\chi/\partial WS$, начиная с определенных скоростей ветра, при которых появляются пенные образования. Данная эмпирическая модель основана также на интегрировании экспериментальных результатов измерений скорости ветра и одновременных спутниковых измерений излучения. Результатом объединения данных различных экспериментов явилось создание базы данных консолидированных данных измерений [6], на основании которой группа ученых под руководством Бертрана Шапрона вывела эмпирическую зависимость, согласно которой

$$\chi = \alpha \cdot (1 - f) + \beta \cdot f, \quad (4)$$

где α – коэффициент, интегрально ответственный за добавку к коэффициенту излучения, появляющуюся в результате ветрового волнения с учетом как крупно- так и мелкомасштабных волн; β – коэффициент, интегрально ответственный за добавку к коэффициенту излучения, вызванную всеми типами пенных образований; f – доля поверхности океана, покрытая этими образованиями.

Если доля пены является функцией скорости ветра, то коэффициенты α и β являются функциями не только скорости ветра, но также частоты, температуры поверхности, солености морской воды, угла визирования и поляризации. Комплексная параметризация коэффициентов α и β получена в результате обобщения экспериментальных данных. Данная модель, которая в дальнейшем будет обозначена как Chapr12, демонстрирует результаты, очень близкие к результатам, опубликованным в [27].

Результирующие зависимости коэффициента излучения от скорости ветра для разных значений температуры океана приведены для примера для низкочастотных радиометрических каналов AMSR-E на 10,65 и 18,7 ГГц на рис. 1а, б, где верхние кривые относятся к коэффициенту излучения на вертикальной поляризации, а нижние – на горизонтальной поляризации. Угол визирования постоянный и равен углу зондирования AMSR-E – 55°, соленость морской воды – 34‰. Температура поверхности меняется от 0 до 25°C. Более жирные кривые соответствуют большим температурам.

Согласно формулам (1) и (2), для определения излучения океана требуется знание диэлектрической проницаемости соленой воды $\epsilon_{ок}$. Почти все модели $\epsilon_{ок}$, используемые в настоящее время при моделировании излучения океана [18, 40, 55], основываются на экспериментальных исследованиях, проведенных много лет назад. До сих пор наиболее

цитируемой работой, посвященной данному вопросу, остается работа [30]. Эта модель $\epsilon_{ок}$ используется, например, в таких фундаментальных работах, как [13, 35, 50]. В то же время, авторы [30] рекомендуют их модель использовать только для частот ниже 10 ГГц, предупреждая об ухудшении точности на более высоких частотах. Основной источник ошибок в определении диэлектрической проницаемости соленой воды кроется в определении оптической ($\nu \rightarrow \infty$) проницаемости ϵ_o (время релаксации τ_p практически одинаково для всех моделей), которую, за отсутствием экспериментальных данных, часто полагают постоянной.

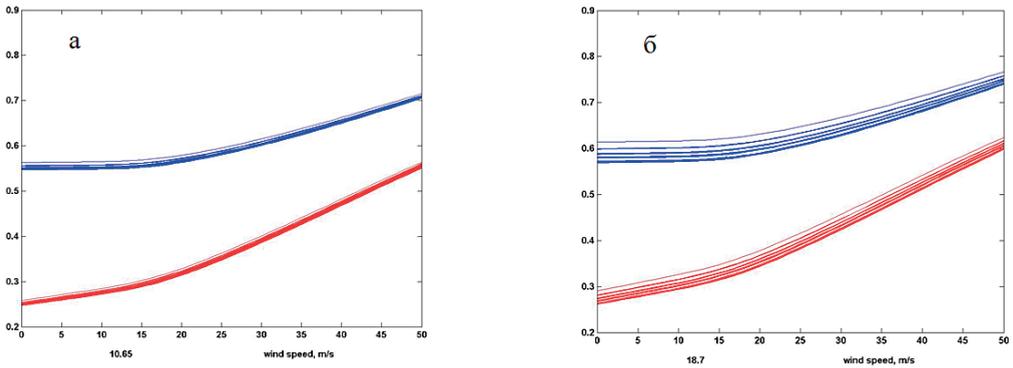


Рис. 1. Коэффициент излучения океана по модели Chapp12 как функция скорости ветра для двух каналов радиометра AMSR-E: *а* – на 10,65 ГГц, *б* – на 18,7 ГГц. SST изменяется от 0 до 25°C. Более толстые линии относятся к большей температуре. Верхние кривые относятся к вертикально поляризованному, нижние – к горизонтально поляризованному излучению.

Результаты одних из наиболее часто используемых исследований, посвященных вопросу определения $\epsilon_{ок}$ [10, 12], продемонстрировали значительные расхождения с данными ранних работ. Экспериментальные данные [52] привели к новым оценкам ϵ_o , зависящим от температуры. Однако, и модели [52] также присущи погрешности, особенно на частоте 85,5 ГГц. Сравнительно недавно появилась новая модель [22], в общем и целом повторяющая идеологию модели [10], но с новыми коэффициентами, полученными в результате обработки новых экспериментальных данных, включающим в себя, в том числе новые исследования чувствительности радиояркостности морской воды к солености на низких частотах, что представляется особенно важным для моделирования измерений на частоте L-диапазона (для радиометров SMOS).

В настоящей работе геофизическая модель использует $\epsilon_{ок}$, заимствованную из работы [25], поскольку данная модель протестирована для частот как минимум до 90 ГГц для пресной воды в диапазоне температур -20 – +40°C, включая условия переохлажденных облаков, и для температур океана -2 – +29°C. Данная модель имеет существенные отличия от остальных в областях отрицательных температур. Следует, однако, отметить, что для частот L-диапазона следует применять модель [22], как более точно отражающую зависимость излучения от солености морской воды.

Спектры поглощения атмосферы

Корректный учет атмосферного вклада в излучение и поглощение, определение оптических толщин и соответствующих им функций пропускания требуют знания коэффициента поглощения (излучения) атмосферы $\alpha_\nu(h)$. В исследуемом диапазоне электромагнитного спектра заметно поглощают лишь газы, молекулы которых имеют дипольные моменты [48], и жидкая фаза воды в виде облачных капель (напомним, что рассматривается атмосфера без осадков). Кроме основных газов, среди которых молекула водяного пара обладает электрическим дипольным моментом, а молекула кислорода – магнитным, дипольными моментами обладают также некоторые малые газовые примеси (CO , SO_2 , NO , NO_2 , O_3). Однако их содержание в атмосфере и интенсивности линий поглощения настолько малы, что их вкладом в общее поглощение микроволнового излучения обычно пренебрегают. Таким образом, поглощение и излучение в атмосфере на частотах ниже 100 ГГц для геометрии измерений сканирующих микроволновых радиометров практически полностью определяется тремя компонентами: молекулярным кислородом, водяным паром и жидкокапельной влагой облаков:

$$\alpha(h) = \alpha_{\text{O}_2}(h) + \alpha_{\text{H}_2\text{O}}(h) + \alpha_L(h). \quad (5)$$

Каждый из компонентов в (5) представляет собой функцию высоты атмосферы h .

Поскольку данная работа посвящена выбору геофизической модели, наиболее близко воспроизводящей радиометрические измерения, при расчетах следует исключить из рассмотрения все неопределенности, связанные с неточным заданием модели облаков и профилей водности. Это означает, что все дальнейшее рассмотрение будет проводиться для безоблачных условий. В этих условиях $\alpha_L = 0$ и поглощение излучение в облаках рассматриваться не будет. Модели поглощения для α_L могут быть заимствованы, например, из [24, 26]

Модели поглощения радиации разрабатываются уже больше полувека и до сих пор продолжают совершенствоваться. Большое количество исследований посвящено изучению зависимостей коэффициента поглощения кислорода α_{O_2} и водяного пара $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$ от частоты (ν), температуры атмосферы (T), давления (P) и влажности ρ [9, 19, 20, 21, 34, 23, 45]. Для корректного учета вклада в излучение атмосферных газов модели радиационного переноса используют результаты аккуратных лабораторных спектрографических измерений параметров спектрального поглощения. Имеющиеся модели различаются описанием силы линии поглощения, ее ширины и факторов, на нее влияющих, формы линии и величины нерезонансного поглощения. Каждый из этих параметров в отдельности влияет на коэффициенты поглощения кислорода и водяного пара и существующие неопределенности в их задании влияют на точность их расчета и, в конечном итоге, на точность расчета излучения.

В настоящий момент спектральные параметры для большинства атмосферных газов, включая кислород и водяной пар, доступны в так называемых спектральных базах данных (например, HITRAN [36]). Значения этих параметров не являются абсолютной истиной и различны в различных моделях. Кроме того, во всех спектрах поглощения наблюдается существенное нерезонансное, или «континуальное» поглощение,

обусловленное крыльями далеких линий. Улучшение точности учета в моделях этой нерезонансной составляющей, особенно для расчета поглощения водяного пара, составляет в последние годы предмет постоянного внимания исследователей, занимающихся моделированием переноса излучения в атмосфере [45]. Часть исследователей используют параметры одной выбранной модели со слегка модифицированными силой или формой одной или нескольких спектральных линий. Например, Wentz в работе [53] использовал модель, описанную в [20], но с уменьшенной в 0,52 раза компонентой, ответственной за само-уширение нерезонансного спектра водяного пара.

Микроволновый спектр кислорода состоит из системы линий (полосы) в области 50-70 гГц и одиночной линии, имеющей резонансную частоту около 120 гГц. При давлении > 40 гПа система линий в области 50-70 гГц образует непрерывную область поглощения. Кроме того, в этом диапазоне спектра наблюдается существенное нерезонансное поглощение, обусловленное крыльями далеких линий. В диапазоне частот действующих радиометров оно может составлять от 10 до 30 % суммарного поглощения кислородом, причем доля нерезонансного поглощения увеличивается с уменьшением частоты. Существующие в настоящее время модели поглощения кислородом микроволнового излучения, были разработаны, опираясь как на теоретические расчеты, так и на лабораторные экспериментальные исследования.

Основной вклад в излучение водяного пара в исследуемом диапазоне частот вносит резонансная линия, центрированная на 22,235 гГц. Измерения в области резонанса позволяют получать информацию о содержании водяного пара во всей толще атмосферы.

Так же как и для кислорода, при сравнении расчетных значений поглощения с экспериментальными, особенно вне областей резонанса, наблюдается существенное добавочное поглощение, природа которого до конца не изучена. Частично оно объясняется неточностями в описании крыльев далеких линий (формы линий), частично — наличием короткоживущих димеров водяного пара. Спектры поглощения водяного пара в существующих методиках расчета [9, 20, 21, 34] демонстрируют значительные расхождения по всем параметрам — силе, ширине и форме линий, методам учета нерезонансного поглощения. Как правило, калибровочные измерения поглощения вблизи 22 гГц включают в себя сравнение между измерениями на двух или трех выбранных частотах радиометра и рассчитанными по данным радиозондирования значениями T_y (которые являются неточными для экстремальных условий — очень сухих или очень влажных). В работе [9] проводились измерения двумя радиометрами одновременно, что позволило произвести абсолютную калибровку измерений. По оценкам авторов, точность их модели составляет порядка 3 % между 20 и 24 гГц, ухудшаясь до 8 % вблизи 32 гГц.

Прямым следствием неточности задания модели поглощения водяного пара являются погрешности последующих оценок таких параметров, как интегральная влажность атмосферы и интегральная водность облаков, если в основе методики восстановления лежит физическое моделирование. В связи с этим большое количество исследований посвящено сравнению различных спектральных моделей поглощения [19, 21, 25.]. Обычно такое сравнение проводится путем сравнения результатов расчетов с измерением нисходящей радиации микроволновыми радиометрами, расположенными на поверхности Земли — для исключения ошибок, связанных с неопределенностями расчета излучения океана и также для безоблачных условий — для исключения

ошибок, связанных с неопределенностями задания параметров облачности. Задача таких исследований всегда заключается в выборе модели, наилучшим образом воспроизводящей излучение. Для этого всегда требуется задание профилей метеопараметров, от которых зависят коэффициенты излучения, т.е. измерение этих профилей радиозондами. На этом этапе при сравнении моделей одну из немаловажных ролей играет качество данных радиозондирования и высокоточная калибровка наземных радиометрических измерений.

По результатам подобного сравнения, например, в работе [45] был сделан вывод (подтвержденный в [14]), что оригинальная модель [21] не воспроизводит наблюдаемые радиояркие температуры на 150 и 31,4 ГГц. А эта модель (ее часть, описывающая нерезонансное поглощение водяного пара) до сих пор используется в качестве основополагающей многими группами ученых (например, все работы, перечисленные в сравнительном анализе [28]).

В данной работе использовался аналогичный описанному в [45] подход. Главное отличие заключается в том, что вместо использования нисходящего излучения, измеряемого наземными радиометрами, рассматривались измерения спутниковыми радиометрами и модельные расчеты восходящего излучения системы Океан-Атмосфера, включающего, помимо атмосферной составляющей, излучение океана, описанное в предыдущем разделе, и небольшую добавку в виде космического излучения 2,7 К [53].

Поскольку факт некорректной работы модели [21], несмотря на ее широкое распространение, считается подтвержденным, она была исключена из рассмотрения. По результатам анализа сравнительных работ, упомянутых выше, было оставлено для сравнения 4 модели спектров поглощения водяного пара [19] (будет обозначена как Liebe87), [34] (Ros98), [7] (MonoRTM), и модифицированная MonoRTM [45] (Turn09), и 2 модели спектров поглощения кислорода [19] (Liebe87) and [23] (Tret05). Детальное описание данных моделей выходит за рамки данной работы и может быть найдено в соответствующих публикациях. Для иллюстрации разницы между моделями на рис. 2 представлены рассчитанные по разным моделям оптические толщины атмосферы τ как функции частоты. Расчеты производились для облачной (интегральный водо-запас облаков $W = 0,2 \text{ кг/м}^2$) полярной (низкое значение интегральной влажности $Q = 9,4 \text{ кг/м}^2$) атмосферы для диапазона частот вблизи линии поглощения водяного пара 22,234 ГГц. Модель Liebe87 использована во всех расчетах. Модель [21] (Liebe93) представлена на рисунке для иллюстрации недооценки τ относительно других моделей.

Следует еще раз отметить, что в отличие от исследований, упомянутых ранее, конечной целью данной работы являлся не выбор наиболее точной спектрографической модели поглощения кислорода или водяного пара, а нахождение оптимальной комбинации модели атмосферного поглощения и модели излучения океана, использование которой наилучшим (с минимальной среднеквадратичной разницей между измерениями и результатами модельных расчетов) образом воспроизводило бы радиояркие температуры, измеряемые радиометрами AMSR-E и SSM/I. Выбор такой оптимальной комбинации произведен в другой работе, в которой будет проведено тестирование путем сравнения расчетных значений радиоярких температур с измеренными радиометрическими значениями для совмещенных в пространстве и во времени натуральных данных, использованных для расчетов, и спутниковых данных AMSR-E и SSM/I.

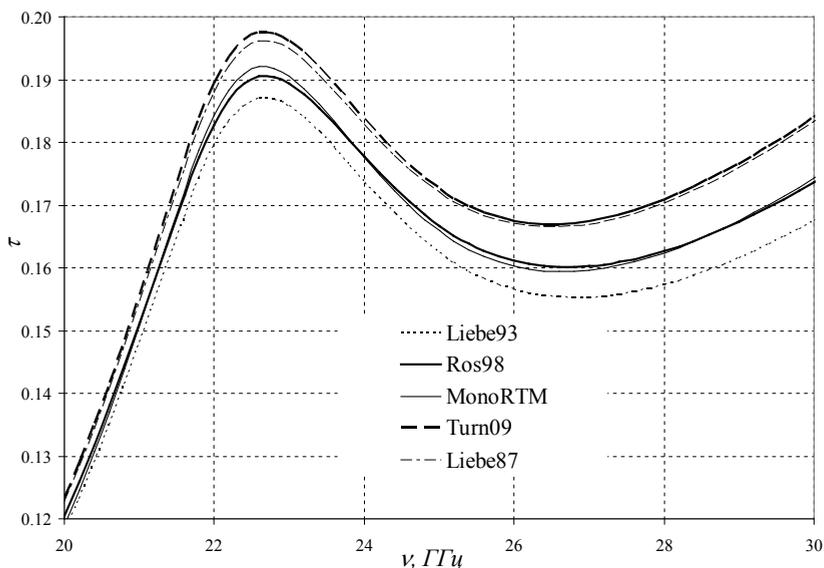


Рис. 2. Общее атмосферное поглощение t , рассчитанные по моделям поглощения водяного пара Liebe87, Liebe93, Ros98, MonoRTM и Turn09 для облачной полярной атмосферы ($Q = 9,4 \text{ кг/м}^2$, $W = 0,2 \text{ кг/м}^2$) для диапазона частот около 22,234 ГГц. Liebe87, который используется для вычисления поглощения кислородом.

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете при поддержке гранта Правительства РФ (Договор №11.G34.31.0078) для поддержки исследований под руководством ведущих ученых, а также в рамках мероприятия 1.1 федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (Соглашение №14.B37.21.0619).

Литература

1. Смирнова Ю.Е., Заболотских Е.В., Бобылев Л.П., Сычев В.И. Исследование полярных циклонов в Балтийском море методом спутникового дистанционного зондирования. // Ученые записки РГГМУ, 2011, № 21, с. 95-106.
2. Митник Л. М., Митник М.Л. Алгоритм восстановления скорости приводного ветра по измерениям микроволнового радиометра AMSR-E со спутника Aqua. Исследования Земли из Космоса, no. 6, pp. 34-44, 2011.
3. Aziz M.A., Reising S.C., Asher W.E., Rose L.A., Gaiser P.W., Horgan K.A. Effects of air-sea interaction parameters on ocean surface microwave emission at 10 and 37 GHz. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, vol. 43, no. 8, pp. 1763-1774, 2005.
4. Basharinov A.E., Kutuza B.G. Investigation of cloud atmosphere emission and absorption in millimeter and centimeter wave ranges. VMGO transactions, vol. 222, pp. 100-110, 1968.
5. Bobilev L.P., Zabolotskikh E.V., Mitnik L.M., Mitnik M.L. Atmospheric water vapor and cloud liquid water retrieval over the Arctic Ocean using satellite passive microwave sensing. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 48, no. 1, pp. 283-294, 2010.

6. *Chapron B., Bingham A., Collard F., Donlon C., Johannessen J.A. et al.* Ocean remote sensing data integration-examples and outlook // in OceanObs' 09: Sustained Ocean Observations and Information for Society (vol. 1), Venice, Italy, 21-25 September 2009, 2010.
7. *Clough S.A., Shephard M.W., Mlawer E.J., Delamere J.S., Iacono M.J. et al.* Atmospheric radiative transfer modeling: A summary of the AER codes. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 91, no. 2, pp. 233-244, 2005.
8. *Cox C., Munk W.* Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter. *J Opt Soc Amer*, vol. 44, 1954.
9. *Cruz Pol S.L., Ruf C.S., Keilm S.J.* Improved 20-to 32-GHz atmospheric absorption model. *Radio Science*, vol. 33, no. 5, pp. 1319-1333, 1998.
10. *Ellison W., Balana A., Delbos G., Lamkaouchi K., Eymard L. et al.* New permittivity measurements of seawater. *RADIO SCIENCE-WASHINGTON-*, vol. 33, pp. 639-648, 1998.
11. *Greenwald T., Bennartz R., O'Dell C., Heidinger A.* Fast Computation of Microwave Radiances for Data Assimilation Using the 'Successive Order of Scattering' Method. *Journal of Applied Meteorology*, vol. 44, no. 6, pp. 960-966, Jun. 2005.
12. *Guillou C., Ellison W., Eymard L., Lamkaouchi K., Prigent C. et al.* Impact of new permittivity measurements on sea surface emissivity modeling in microwaves. *RADIO SCIENCE-WASHINGTON-*, vol. 33, pp. 649-668, 1998
13. *Guissard A., Sobieski P.* An approximate model for the microwave brightness temperature of the sea. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 8, no. 11, pp. 1607-1627, 1987.
14. *Hewlow T.J., Cimini D., Martin L., Gaffard C., Nash J.* Validating clear air absorption models using ground-based microwave radiometers and vice-versa. *Meteorologische Zeitschrift*, vol. 15, no. 1, pp. 27-36, 2006.
15. *Hilburn K.A., Wentz F.J.* Intercalibrated passive microwave rain products from the unified microwave ocean retrieval algorithm (UMORA). *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 47, no. 3, pp. 778-794, 2008.
16. *Hollinger J.P.* Passive microwave measurements of sea surface roughness. *Geoscience Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 9, no. 3, pp. 165-169, 1971.
17. *Jones W.L., Black P.G., Boggs D.M., Bracalente E.M., Brown R.A. et al.* Seasat scatterometer: Results of the Gulf of Alaska workshop. *Science*, vol. 204, no. 4400, pp. 1413-1415, 1979.
18. *Klein L., Swift C.* An improved model for the dielectric constant of sea water at microwave frequencies. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 25, no. 1, pp. 104-111, 1977.
19. *Liebe H.J., Layton D.H.* Millimeter-wave properties of the atmosphere: Laboratory studies and propagation modeling. *Nat. Tech. Inf. Service Boulder, CO, NTIA Rep.* 87-24, 1987.
20. *Liebe H.J.* An updated model for millimeter wave propagation in moist air. *Radio Science*, vol. 20, pp. 1069-1089, 1985.
21. *Liebe H.J., Hufford G.A., Cotton M.G.* Propagation modeling of moist air and suspended water/ice particles at frequencies below 1000 GHz in In AGARD, Atmospheric Propagation Effects Through Natural and Man-Made Obscurants for Visible to MM-Wave Radiation 11 p (SEE N94-30495 08-32), vol. 1, 1993.
22. *Liu Q., Weng F., English S.J.* An Improved Fast Microwave Water Emissivity Model. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, no. 99, pp. 1-13, 2011.
23. *Makarov D.S., Tretyakov M.Y., Rosenkranz P.W.* 60-GHz oxygen band: Precise experimental profiles and extended absorption modeling in a wide temperature range. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2011.
24. *Meirolid-Mautner I., Prigent C., Defer E., Pardo J. R., Chaboureau J. P. et al.* Radiative transfer simulations using mesoscale cloud model outputs: Comparisons with passive microwave and infrared satellite observations for midlatitudes. *Journal of the atmospheric sciences*, vol. 64, no. 5, pp. 1550-1568, 2007.
25. *Meissner T., Wentz F.J.* The complex dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 42, no. 9, pp. 1836-1849, 2004.
26. *Meissner T., Wentz F.* Ocean retrievals for WindSat: Radiative transfer model, algorithm, validation. in *OCEANS, 2005. Proceedings of MTS/IEEE*, pp. 130-133, 2005.
27. *Meissner T., Wentz F.J.* The Emissivity of the Ocean Surface Between 6 and 90 GHz Over a Large Range of Wind Speeds and Earth Incidence Angles. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. PP, no. 99, pp. 1-23, 2010.
28. *Melsheimer C., Verdes C., Buehler S.A., Emde C., Eriksson P. et al.* Intercomparison of general purpose clear sky atmospheric radiative transfer models for the millimeter/submillimeter spectral range. *Radio Sci*, vol. 40, no. 1, 2005.

29. *Mitsuyasu H., Honda T.* Wind-induced growth of water waves. *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 123, pp. 425-42, 1982.
30. *Monahan E.C., Muircheartaigh I.Ó.* Optimal power-law description of oceanic whitecap coverage dependence on wind speed. *Journal of Physical Oceanography*, vol. 10, no. 12, pp. 2094-2099, 1980.
31. *Nimri I.J., Jones W.L., Uhlhorn E., Ruf C., Johnson J. et al.* An improved C-band ocean surface emissivity model at hurricane-force wind speeds over a wide range of earth incidence angles. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, vol. 7, no. 4, pp. 641-645, 2010.
32. *Raizer V.* Macroscopic Foam–Spray Models for Ocean Microwave Radiometry. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 45, no. 10, pp. 3138-3144, 2007.
33. *Rice S.O.* Reflection of electromagnetic waves from slightly rough surfaces. *Communications on pure and applied mathematics*, vol. 4, no. 2-3, pp. 351-378, 1951.
34. *Rosenkranz P.W.* Water vapor microwave continuum absorption: A comparison of measurements and models. *Radio Science*, vol. 33, no. 4, pp. 919-928, 1998.
35. *Rosenkranz P.W.* Rough-sea microwave emissivities measured with the SSM/I. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 30, no. 5, pp. 1081-1085, 1992.
36. *Rothman L.S., Gordon I.E., Barbe A., Benner D.C., Bernath P.F. et al.* The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 110, no. 9-10, pp. 533-572, Jun. 2009.
37. *Saunders R., Matricardi M., Brunel P.* An improved fast radiative transfer model for assimilation of satellite radiance observations. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 125, no. 556, pp. 1407-1425, 1999.
38. *Shibata A.* A wind speed retrieval algorithm by combining 6 and 10 GHz data from Advanced Microwave Scanning Radiometer: Wind speed inside hurricanes. *Journal of oceanography*, vol. 62, no. 3, pp. 351-359, 2006.
39. *Smith P.M.* The emissivity of sea foam at 19 and 37 GHz. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 26, no. 5, pp. 541-547, 1988.
40. *Stogryn A.* Equations for calculating the dielectric constant of saline water (Correspondence). *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, vol. 19, no. 8, pp. 733-736, 1971.
41. *Stogryn A.* The apparent temperature of the sea at microwave frequencies. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 15, no. 2, pp. 278-286, 1967.
42. *Stogryn A.* The emissivity of sea foam at microwave frequencies. *Journal of Geophysical Research*, vol. 77, no. 9, pp. 1658-1666, 1972.
43. *Sun Y.* Evaluation of a microwave radiative transfer model using satellite radiometer observations. *School of Electrical Engineering and Computer Science*, 2003.
44. *Tsang L., Kong J.A., Shin R.T.* Theory of microwave remote sensing. A WileyInterscience publication, pp. 214-235, 1985.
45. *Turner D.S., Cadeddu M.P., Lohnert U., Crewell S., Vogelmann A.M.* Modifications to the water vapor continuum in the microwave suggested by ground-based 150-GHz observations. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 47, no. 10, pp. 3326-3337, 2009.
46. *Uhlhorn E.W., Black P.G., Franklin J.L., Goodberlet M., Carswell J. et al.* Hurricane surface wind measurements from an operational stepped frequency microwave radiometer. *Month. Weath. Rev.*, vol. 135, no. 9, p. 3070, 2007.
47. *Ulaby F.T., Moore R.K., Fung A. K.* Microwave remote sensing: Active and passive. Volume 1-Microwave remote sensing fundamentals and radiometry, 1981.
48. *Waters J.W.* Absorption and Emission by Atmospheric Gases in Astrophysics Radio Telescopes, vol. 12, part B, Academic Press, pp. 142-176, 1976.
49. *Webster Jr W.J., Wilheit T.T., Ross D.B., Gloersen P.* Spectral characteristics of the microwave emission from a wind-driven foam-covered sea. *Journal of Geophysical Research*, vol. 81, no. 18, pp. 3095-3099, 1976.
50. *Wentz F.J.* A model function for ocean microwave brightness temperatures. *J. Geophys. Res.*, vol. 88, no. C3, pp. 1892-1908, 1983.
51. *Wentz F.J.* A two-scale scattering model for foam-free sea microwave brightness temperatures. *J. Geophys. Res.*, vol. 80, no. 24, pp. 3441-3446, 1975.
52. *Wentz F.J., Meissner T.* Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD), Version 2, AMSR Ocean Algorithm, RSS Tech. Proposal 121599A-1, Remote Sensing Systems. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD), Version 2, AMSR Ocean Algorithm, RSS Tech. Proposal 121599A-1, Remote Sensing Systems, 2006.
53. *Wentz F.J.* A well-calibrated ocean algorithm for special sensor microwave imager. *J. Geophys. Res.*, vol. 102, pp. 8703-8718, 1997.

54. *Wentz F.J., Spencer R.W.* SSM/I rain retrievals within a unified all-weather ocean algorithm. *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 55, no. 9, pp. 1613-1627, 1998.
55. *Wisler M.M., Hollinger J.P.* Estimation of Marine Environmental Parameters Using Microwave Radiometric Remote Sensing Systems. Naval Research Laboratory. – Washington. – DC., NRL Tech. Rep. 3661, 1977.
56. *Wu S.T., Fung A.K.* A non-coherent model for microwave emission and backscattering from the sea surface. *J. Geophys. Res.*, vol. 77, pp. 5917-5929, 1972.
57. *Yueh S.H.* Modeling of wind direction signals in polarimetric sea surface brightness temperatures. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 35, no. 6, pp. 1400-1418, 1997.