

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

**ВАЛИДАЦИЯ МОДЕЛИ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЧАСТОТАХ
МИКРОВОЛНОВЫХ РАДИОМЕТРОВ SSMIS И AMSR-E И ЕЕ
ПРИМЕНЕНИЕ ПРИ АНАЛИЗЕ МОРСКИХ ПОГОДНЫХ СИСТЕМ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ АЛГОРИТМОВ**

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

**VALIDATION OF THE RADIATIVE TRANSFER MODEL FOR THE
FREQUENCIES OF MICROWAVE RADIOMETERS SSMIS AND AMSR-E AND
ITS APPLICATION FOR THE ANALYSIS OF MARINE WEATHER SYSTEMS
USING ADVANCED ALGORITHMS**

В работе предложена усовершенствованная геофизическая модель для моделирования радиоярких температур уходящего излучения системы Океан-Атмосфера для 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) в условиях отсутствия осадков. Получены настроечные поправки к модельным значениям радиоярких температур, которые могут быть использованы в любых исследованиях, базирующихся на данных моделирования, для учета ошибок калибровки/модели.

Ключевые слова: расчет радиоярких температур микроволнового излучения, валидация, калибровка, 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 adjustments to simulated BT values are obtained. These can be used in any research based on modeling data for removing model/calibration inconsistencies.

Keywords: brightness temperature calculations, validation/calibration, AMSR-E, SSMIS.

Введение

Данные спутниковых пассивных микроволновых приборов являются бесценным источником дистанционно получаемой информации для различных исследований окружающей среды, поскольку они позволяют количественно оценивать целый ряд геофизических параметров независимо от времени суток и практически независимо от большинства облаков. Относительно низкое пространственное разрешение является преимуществом перед другими типами дистанционной информации, когда речь идет об исследованиях климатического характера, поскольку не требуется искусственное пространственное осреднение данных. Особенную ценность эти данные приобретают в полярных районах, поскольку большинство микроволновых радиометров функционируют на спутниках с полярной орбитой, обеспечивая таким образом высокое временное разрешение над морями Северного Ледовитого океана и Антарктикой – в регионах практически полного отсутствия данных наземных измерений. Наличие длительных временных рядов данных спутниковых пассивных микроволновых измерений играет важную роль в исследованиях изменения климата, обеспечивает исследователей необходимой информацией для изучения климатической системы Земли, циркуляции воды и энергии и т.д. Микроволновые радиояркостные температуры являются неотъемлемой компонентой систем наблюдения Земли из космоса, использующейся при ассимиляции данных в моделях численных прогнозов погоды, приобретающей в последние годы все возрастающее значение [1, 3, 8].

Перечисленные преимущества данных пассивных микроволновых инструментов неотделимы от проблем их интерпретации, связанных с необходимостью обеспечения однородности рядов данных. Особую значимость решение этих проблем приобретает для климатических исследований, базирующихся на длинно-временных рядах данных, полученных различными инструментами [6, 10]. Подобная однородность может быть обеспечена как работой по интеркалибровке инструментов [5, 17], так и калибровочными исследованиями, основанными на моделировании радиояркостных температур и выполнении расчетов с использованием наземных измерений параметров океана и атмосферы, определяющих уходящее излучение, и сравнении результатов расчетов с результатами спутниковых измерений совмещенных в пространстве и во времени с наземными измерениями [16]. Во втором случае качество используемых данных, корректность пространственно-временного совмещения приобретают не меньшую значимость, чем адекватность геофизической модели, используемой для расчетов.

Получение геофизических продуктов, обладающих высокой точностью, из измерений спутниковых пассивных микроволновых приборов требует способности моделировать наблюдаемые радиояркостные температуры с очень низкими значениями систематических и случайных ошибок. Систематические ошибки в расчетах радиояркостных температур являются следствием целого ряда причин, среди которых основными являются инструментальная калибровка и неадекватность используемой модели радиационного переноса (МРП) [14]. Целью настоящего исследования является, главным образом, выбор комбинации моделей атмосферного поглощения и излучения океана, обеспечивающей наилучшее воспроизведение измеренных радиометрами 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) радиоярких температур, а также расчет калибровочных поправок к модельным значениям T_y , учитывающих суммарно как неопределенности геофизической модели, так и неточности инструментальной калибровки. Добавление найденных поправок дает возможность использовать модельные значения T_y для разработки алгоритмов оценок геофизических параметров, так и обеспечивает однородность рядов данных параметров независимо от типа используемого инструмента [7]. Данный подход представляется особенно важным, принимая во внимание прекращение работы AMSR-E и текущий этап предварительной работы по калибровке и валидации измерений нового радиометра AMSR2 на спутнике GCOM-W. Подобный же подход может оказаться перспективным и для использования измерений нашего российского радиометра МТВЗА-Гя на спутнике Метеор.

Следует отметить, что полученные поправки, ответственные за разницу между моделированием и измерениями, следует применять лишь над районами океанов, свободными ото льда. Схемы коррекции радиоярких температур, применимые во всем диапазоне наблюдаемых значений, требуют нелинейного и существенно более сложного подхода [2]. Однако для систем Океан-Атмосфера предложенная простая схема коррекции модельных значений T_y может быть успешно применена при соответствующих атмосферных условиях, ограничение на которые зависит от частоты канала. Так, например, для радиометра AMSR-E для измерений на частотах 6,9 и 10,65 ГГц даже наличие дождя интенсивностью больше 2 мм/час не является ограничением использования предложенной геофизической модели и найденных поправок к радиоярким температурам.

В предыдущей части работы, посвященной моделированию излучения системы Океан-Атмосфера, основанному на использовании современных опубликованных данных, были выбраны модели спектров поглощения атмосферы и излучения океана. В данной работе описано создание базы данных совмещенных в пространстве и во времени измерений атмосферных и океанических параметров, определяющих уходящее микроволновое излучение системы Океан-Атмосфера, и радиометрических измерений инструментов AMSR-E и SSMIS, и проведено сравнение расчетных значений радиоярких температур с измеренными, имеющее своей целью, во-первых, выбрать комбинацию моделей, обеспечивающую наименьшую среднеквадратичную разность между измерениями и расчетами, и, во-вторых, определить среднюю разницу в качестве систематического корректирующего сдвига между результатами вычислений и измерениями для последующего использования в качестве настроечной поправки.

Полученные поправки к радиоярким температурам в соответствующих каналах радиометров AMSR-E и SSMIS, наряду с определенной оптимальной моделью, могут рассматриваться как конечная цель представленной работы. Корректное определение геофизической модели микроволнового излучения является главным фактором при разработке алгоритмов оценки параметров, основанных на результатах модельных расчетов. С использованием предложенной (отобранной) геофизической моделью излучения и найденных корректирующих поправок к радиоярким температурам, ответственным за интегральные ошибки модели и калибровки, можно проводить

любые исследования, связанные с разработкой алгоритмов восстановления параметров океана и атмосферы по данным радиометров AMSR-E и SSMIS.

В качестве примера приложения использования предложенной модели приведен алгоритм оценки скорости приводного ветра над океанами по данным радиометра AMSR-E. Алгоритм использует тот же подход, как описан в работе [4], но при его разработке использовались геофизическая модель и калибровочные поправки, описанные в данной работе. Адекватность новой модели, поправок и алгоритма подтверждена рассмотренными примерами тропических ураганов и полярных циклонов, в которых восстанавливалась скорость приводного ветра, открывая перед исследователями новые возможности восстановления этого важнейшего параметра в условиях штормовых ветров.

Данные спутниковых радиометрических измерений

Для определения оптимальной геофизической модели в работе использовались данные измерений радиоярких температур уходящего излучения системы Океан-Атмосфера радиометрами AMSR-E and SSMIS. Измерения только тех каналов были использованы, которые характеризуются низкими ($<0,5$ К) значениями эффективного шума. Для AMSR-E использовались неусредненные данные полного пространственного разрешения уровня Level 1B – калиброванные радиояркие температуры в японской калибровке, предоставленные Японским Аэрокосмическим Агентством Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) в рамках соглашения с Тихоокеанским Океанографическим Институтом (проект GCOM-1RA F10).

AMSR-E проводит измерения уходящего излучения на двух поляризациях – горизонтальной и вертикальной на всех 6 частотах: 6,925, 10,65, 18,7, 23,8, 36,5, и 89,0 гГц на высоте 705 км при угле визирования около $55,0^\circ$ в результирующей полосе обзора 1 445 км. Измерения фиксируются через равные интервалы 10 км (5 км для каналов на 89 гГц) вдоль дуги сканирования, поэтому продукты уровня Level 1B записываются на сетке 10×10 или 5×5 км, хотя реальное пространственное разрешение существенно более низкое, особенно на низкочастотных каналах: от 15 км на 36 гГц до 50 км на 6 гГц. Чувствительность радиометрических каналов на частотах от 10,65 до 36,5 гГц составляет около 0,6 К, и около 1,1 К на 89 гГц [9]. Чувствительность измерений и пространственное разрешение являются важнейшими факторами, которые обязательно должны быть приняты во внимание при сопоставлении результатов модельных расчетов с измерениями. Для радиометра AMSR-E были рассмотрены (использованы) только измерения на 5 низкочастотных каналах радиометра (10 каналов для двух поляризаций). Оба канала на 89 гГц были исключены из рассмотрения из-за большой величины эффективного шума NEΔT. Радиояркие температуры на соответствующих каналах будут в дальнейшем обозначены как TB06H, TB06V, TB10H, TB10V, TB18H, TB18V, TB23H, TB23V, TB36H and TB36V.

Для радиометра SSMIS неусредненные данные полного пространственного разрешения уровня Level 1B, представляющие собой калиброванные радиояркие температуры в калибровке NOAA, были получены из архивного центра обработки данных NOAA Comprehensive Large Array - data Stewardship System (CLASS) (<http://www.class.ncdc.noaa.gov>). SSMIS проводит измерения уходящего излучения на 24 каналах на частотах от 19,35 до 183,31 гГц, включая каналы, работающие в полосе поглощения кислорода,

что позволяет использовать эти каналы для восстановления профилей температуры атмосферы [13]. Излучение регистрируется в 180 точках вдоль дуги скана в активной части угла сканирования около $143,2^\circ$, что при высоте спутника порядка 833 км обеспечивает широкую полосу обзора 1707 км и 12,5 километровый интервал между пикселями. Для части каналов производится пространственное усреднение, уменьшающее эффективный шум ценой ухудшения пространственного разрешения. Также 10 каналов были выбраны для выбора оптимальной геофизической модели и калибровки: вертикально и горизонтально поляризованные каналы на 19,35 и 37,0 ГГц, и только вертикально поляризованные каналы на 22,235, 50,3, 52,8, 53,596, 54,40 и 55,5 ГГц. Радиояркие температуры на соответствующих каналах будут в дальнейшем обозначены как TB19N, TB19V, TB22V, TB37N, TB37V, TB50V, TB52V, TB53V, TB54V and TB55V.

Данные для проведения модельных расчетов уходящего излучения

Сопоставление результатов модельных расчетов радиоярких температур с измерениями радиометров, имеющее своей целью определение корректирующих калибровочных поправок к расчетам, ответственным за суммарные ошибки модели и инструментальной калибровки, требуют не только наличия адекватной геофизической модели, но и надежных, точных данных измерений параметров атмосферы и океана, определяющих излучение системы Океан-Атмосфера. Данные моделей, включая данные ре-анализа, не пригодны для такой задачи не только из-за недостаточной точности, но и в силу недостаточной подробности информации об атмосфере (данные имеются только для основных изобарических поверхностей). Результаты расчетов радиоярких температур представляется возможным сравнивать со спутниковыми радиометрическими измерениями только в случае, если атмосферные метеорологические параметры, определяющие коэффициент поглощения (температура, давление, влажность), известны с детальностью, превышающие детальность разделения на основные изобарические поверхности. Особенно это касается уровней вблизи поверхности земли, где наблюдается максимальная по профилю влажность воздуха.

Этим требованиям удовлетворяют данные радиозондирования, полученные на метеорологических станциях. Такие данные собираются, проверяются и архивируются университетом в Вайоминге (Wyoming University <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>). Они содержат более 40 уровней измерений от поверхности земли до уровня с относительной влажностью около 10 %. Станция радиозондирования должна быть расположена на небольшой высоте над уровнем моря. В противном случае при расчетах требуется экстраполяция профиля температуры и влажности до нулевого уровня, связанная с внесением дополнительных ошибок в расчет радиояркой температуры. Поскольку использование пространственно-временного совмещения измерений в точке (профили метеопараметров для расчета радиояркой температуры) и измерений в пикселе (радиояркая температура, измеряемая радиометром) накладывает ограничения на пространственную однородность наиболее значимых для расчета параметров, выбор станций радиозондирования ограничен полярными районами, для которых характерно минимальное содержание водяного пара в атмосфере и минимальные же его вариации. При отборе данных для сопоставления дополнительно необходима проверка отсутствия таких вариаций по полям радиоярких температур,

наиболее чувствительных к данному параметру (на каналах в линии поглощения водяного пара). Учитывая непереносимое отсутствие облачности для исключения неопределенностей в расчетах, связанных с отсутствием информации о влажности облаков, измерения в каналах 36,5–37 ГГц использовались лишь для проверки корректности отбора безоблачных условий. Следует отметить, что выполнение требования отсутствия вариаций полей радиоярких температур на каналах, чувствительных к водяному пару (22,235 ГГц для SSMIS и 23,8 ГГц для AMSR-E) практически невозможно удовлетворить в районах, характеризующихся высокими значениями влажности атмосферы, т.е. в тропиках. Полярные метеорологические станции Jan Mayen (№ 01001: 70,93 с.ш.; 8,67 з.д., 9 м над уровнем моря) и Bjornoya (№ 01028: 74,51 с.ш.; 19,01 в.д., 18 м над уровнем моря) представляются наиболее пригодными для использования их измерений в расчетах радиоярких температур, поскольку удовлетворяют всем вышеперечисленным требованиям. Немаловажным преимуществом выбора станций в полярных районах является также высокая широта, т.е. высокое временное разрешение радиометрических измерений со спутников с полярной орбитой, позволяющее подобрать микроволновые снимки с минимальной временной разницей между измерениями. Кроме того, поскольку радиозонды проводят измерения 2 раза в сутки – в 0:00 среднего времени по Гринвичу (UTC) и в 12:00 UTC, принципиально важным представляется наличие снимков над станцией примерно в это же самое время. И SSMIS на спутнике F16, и AMSR-E на спутнике Aqua измеряют излучение над обеими станциями около 12:00 UTC \pm 4 ч. Следующее требование к выбору станции связано с наличием синхронных измерений скорости ветра. Требование совмещения измерений и расчетов по времени обуславливает наличие ограничений в выборе станций радиозондирования в зависимости от конкретного скаттерометра. В настоящий момент в качестве регулярных данных низкого разрешения (12,5 км) по приводному ветру можно использовать данные скаттерометра ASCAT со спутника Metop (начиная с 3 марта 2009 г. по настоящее время) из архива PO.DAAC (Physical Oceanography Distributed Active Archive Center, NASA Jet Propulsion Laboratory – <ftp://podaac.jpl.nasa.gov/OceanWinds>). Скаттерометрические поля ветра в районе станций радиозондирования представляются наиболее подходящими для использования в модельных расчетах, поскольку пространственное разрешение этих данных соответствует разрешению радиометрических данных, и использование измерений морских буев в точке существенно менее пригодно для проведения сравнений.

Отсутствие облачности проверялось двумя путями: во-первых, отбирались только те данные радиозондирования, для которых относительная влажность не превышала 70 % по всему профилю. Вероятность образования капель воды при такой влажности ничтожна. Затем, для отобранных данных радиозондирования были проанализированы данные спектрорадиометра MODIS на спутнике Aqua для отбора тех ситуаций, для которых диагностировалось отсутствие облаков не только непосредственно над станцией, но и над сравнительно обширным районом, имея в виду ненулевое время совмещения всех измерений и изменяющееся во времени состояние атмосферы. Отобранные данные MODIS, будучи безоблачными, представляли также подходящий источник данных о температуре поверхности океана (SST), также необходимой для организации модельных расчетов. Значения солености морской воды были взяты

из World Ocean Atlas (<http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOA09/>): учитывая отсутствие каналов в L-диапазоне, использование более точных значений солености не представляется необходимым.

Около 150 данных, удовлетворяющих всем перечисленным выше требованиям, были отобраны для проведения валидации/калибровки геофизической модели и определения настроечных поправок. Эти данные состояли из измерений радиозондами атмосферных профилей температуры, влажности и давления на станциях Jan Maeyen и Vjornoуа в безоблачных условиях, совмещенных по времени полями ветра по данным скаттерометра Metop ASCAT, однородных полей измерений радиоярких температур радиометрами DMSP F16 SSMIS и Aqua AMSR в пределах 2-часовой временной разницы, полей SST по данным Aqua MODIS и климатологических значений солености по данным World Ocean Atlas. Расстояние от станции до радиометрического/скаттерометрического пикселя выбиралось в пределах 70-120 км для того, чтобы, с одной стороны, исключить влияние суши на спутниковые измерения и, с другой стороны, не отклониться слишком далеко от станции радиозондирования. Однородность атмосферы проверялась путем анализа полей радиоярких температур для каналов на 22,235 и 23,8 ГГц на вертикальной поляризации для SSMIS и AMSR-E соответственно. Только те данные были отобраны, для которых вариации радиоярких температур в пределах расстояния совмещения не превышали величину NEΔT. Пример полей спутниковых данных измерений, соответствующих условиям, приемлимым для проведения сопоставлений с модельными расчетами, приведен на рис. 1.

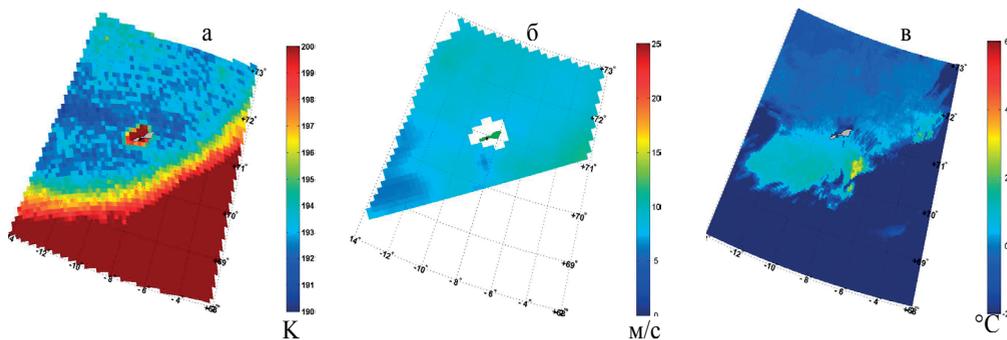


Рис. 1. Поля спутниковых данных над станцией Jan Maeyen 3 мая 2011 г.:

а – Радиояркая температура по данным Aqua AMSR-E на канале 23,8 ГГц вертикальной поляризации, 12:28 UTC; *б* – Поле скорости ветра по данным Metop ASCAT, 13:34 UTC; *в* – Температура поверхности океана по данным Aqua MODIS, 12:45 UTC.

Результаты

Отобранные данные атмосферных профилей влажности, температуры и давления были использованы для проведения численных расчетов микроволнового излучения для характеристик (углов визирования, частот, поляризаций) радиометров AMSR-E и

SSMIS с использованием 4-х моделей спектров поглощения водяного пара – Liebe87, Ros98, MonoRTM и Turn09, 2-х моделей спектров поглощения кислорода – Liebe87 и Tret05, 2-х моделей зависимости излучения океана от скорости ветра – Ros92 и Chapr12 и одной модели зависимости излучения океана от солёности морской воды [12].

Рассчитанные значения радиоярких температур сравнивались с радиометрическими измерениями для AMSR-E на каналах на 6.925, 10.65, 18.7, 23.8 и 36.5 ГГц для вертикальной и горизонтальной поляризаций, и для SSMIS на спутнике DMSP F16 на каналах на 19,35 и 37,0 гГц для вертикальной и горизонтальной поляризаций, и на каналах на 22.235, 50.3, 52.8, 53.596, 54.40 и 55.5 гГц только для вертикальной поляризации.

Как и следовало ожидать, наибольшая разница в результатах расчетов проявилась на частотах каналов, близких к центральным частотам линий поглощения водяного пара и кислорода. Так, не наблюдалось различий между двумя моделями кислородного поглощения на каналах, меньших 50 гГц. И, аналогично, не имеет значения выбор модели поглощения водяного пара при расчете радиоярких температур в диапазоне 50-60 гГц. Для каждого из 10 каналов для каждого радиометра была построена диаграмма разброса измеренных значений T_y от рассчитанных и выполнен соответствующий статистический анализ. Пример такой диаграммы для SSMIS TB19H представлен на рис. 2.

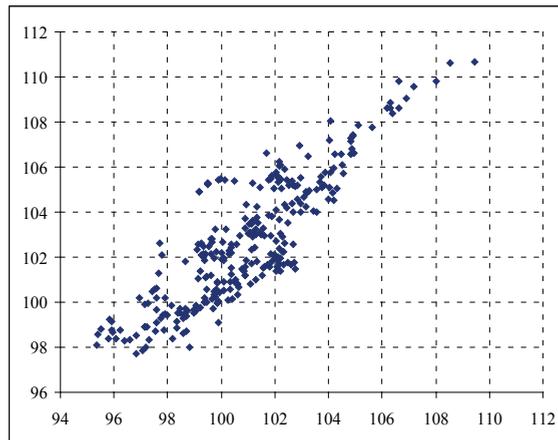


Рис. 2. Диаграмма разброса измеренных DMSP F16 SSMIS значений T_y на канале 19,35 гГц горизонтальной поляризации от рассчитанных T_y с использованием Turn09 модели для расчета спектра поглощения водяного пара, Liebe87 модели для расчета спектра поглощения кислорода и Chapr12 модели для расчета зависимости излучения океана от скорости ветра.

Полученные результаты позволили не решать вопрос выбора критерия для определения оптимальной модели в случае, если бы наименьшая среднеквадратичная разница между измерениями и расчетами (σ_{\min}) на разных каналах обеспечивалась разными комбинациями моделей. Для всех каналов σ_{\min} достигалась единственной комбинацией

моделей: Turn09 модели для расчета спектра поглощения водяного пара (WV), Liebe87 модели для расчета спектра поглощения кислорода (OX) и Chapr12 модели для расчета зависимости излучения океана от скорости ветра (OE). Результирующие среднеквадратичные разницы представлены в табл. 1-3 для SSMIS и AMSR-E.

Таблица 1

Среднеквадратичная разница между измерениями и расчетами (К) для 4-х модельных комбинаций для каналов SSMIS в полосе поглощения кислорода

Спектр	Модель	50V	52V	53V	54V	55V
OX	Liebe87	0,46	0,57	0,84	0,56	0,88
OE	Chapr12					
OX	Tret05	0,51	0,59	0,92	0,58	1,10
OE	Chapr12					
OX	Liebe87	0,77	0,81	1,10	0,78	1,20
OE	Ros92					
OX	Tret05	0,81	0,85	1,20	0,83	1,40
OE	Ros92					

Таблица 2

Среднеквадратичная разница между измерениями и расчетами для 8-и модельных комбинаций для низкочастотных каналов SSMIS

Спектр	Модель	19H	19V	22V	37H	37V
WV	Turn09	1,42	1,21	1,25	1,28	0,76
OE	Chapr12					
WV	Ros98	1,50	1,32	1,40	1,31	1,20
OE	Chapr12					
WV	MonoRTM	1,49	1,32	1,27	1,30	0,81
OE	Chapr12					
WV	Liebe87	1,43	1,23	1,38	1,30	0,95
OE	Chapr12					
WV	Turn09	1,62	1,43	1,55	1,47	1,10
OE	Ros92					
WV	Ros98	1,67	1,48	1,62	1,52	1,40
OE	Ros92					
WV	MonoRTM	1,65	1,47	1,58	1,51	1,20
OE	Ros92					
WV	Liebe87	1,64	1,44	1,60	1,51	1,30
OE	Ros92					

Таблица 3

**Среднеквадратичная разница между измерениями и расчетами для 8-и модельных комбинаций
для низкочастотных каналов AMSR-E**

Спектр	Модель	06H	06V	10H	10V	18H	18V	23H	23V	36H	36V
WV	Turn09	0,83	0,70	0,91	0,78	1,14	0,77	1,94	1,08	1,22	0,65
OE	Chapr12										
WV	Ros98	0,84	0,71	0,91	0,79	1,21	0,93	2,60	1,50	1,42	0,90
OE	Chapr12										
WV	MonoRTM	0,83	0,71	0,91	0,78	1,20	0,90	2,40	1,48	1,38	0,87
OE	Chapr12										
WV	Liebe87	0,83	0,70	0,92	0,79	1,16	0,79	2,00	1,10	1,23	0,69
OE	Chapr12										
WV	Turn09	1,11	1,00	1,30	1,22	1,40	0,92	2,15	1,30	1,43	0,95
OE	Ros92										
WV	Ros98	1,12	1,11	1,32	1,25	1,48	1,20	3,20	1,96	1,56	1,43
OE	Ros92										
WV	MonoRTM	1,11	1,11	1,31	1,24	1,47	1,10	3,15	1,90	1,52	1,35
OE	Ros92										
WV	Liebe87	1,12	1,1	1,35	1,24	1,46	0,94	2,18	1,35	1,47	1,10
OE	Ros92										

Тот факт, что наилучшие результаты были получены для всех каналов при использовании единственной комбинации моделей для двух разных инструментов, обладающих разной внутренней калибровкой, позволяет сделать вывод, что данная комбинация может быть успешно применена и к другим радиометрам, включая новый японский радиометр AMSR2, первые данные которого в ближайшее время станут доступны научной общественности.

Описательная статистика для массива разностей между измеренными и рассчитанными радиояркими температурами для оптимальной комбинации моделей для всех рассмотренных каналов радиометров AMSR-E и F16 SSMIS представлена в табл. 4 и 5.

Таблица 4

**Описательная статистика для массива разностей между измеренными и рассчитанными
радиояркими температурами для радиометра F16 SSMIS**

	19H	19V	22V	37H	37V	50V	52V	53V	54V	55V
Среднее, К	1,76	1,37	0,80	1,93	-2,03	-0,63	1,34	4,54	1,55	0,99
s, К	1,42	1,21	1,25	1,28	0,76	0,46	0,57	0,84	0,56	0,88
минимум, К	-1,29	-1,17	-2,89	-1,06	-4,08	-2,05	0,04	2,46	0,25	-1,05
максимум, К	5,79	5,11	4,04	5,14	-0,16	0,45	2,61	6,26	2,63	2,64

Описательная статистика для массива разностей между измеренными и рассчитанными радиояркими температурами для радиометра F16 SSMIS

	06H	06V	10H	10V	18H	18V	23H	23V	36H	36V
среднее, К	1,10	0,56	-0,09	-0,09	0,28	-0,21	0,90	0,67	-3,81	-4,07
s, К	0,83	0,70	0,91	0,78	1,14	0,77	1,94	1,08	1,22	0,65
Минимум, К	-0,79	-0,80	-2,32	-1,81	-2,24	-1,75	-4,14	-1,95	-6,27	-5,71
максимум, К	3,00	2,40	1,72	2,07	2,66	2,43	4,24	3,07	-0,55	-2,37

Геофизическая модель, использованная для расчетов, использует спектр поглощения водяного пара по модели Turn09, спектр поглощения кислорода по модели Liebe87 и параметризацию излучения океана по модели Chapr12.

Полученные средние разности могут быть использованы в качестве калибровочных / настроечных поправок к результатам модельных расчетов для перехода от рассчитанных $T_{я}$ к измеренным в любых исследованиях, в частности, в работах по разработке алгоритмов, основой которых служат данные моделирования.

Применение

Иллюстрацией возможностей применения геофизической модели и найденных поправок к радиоярким температурам может послужить разработанный алгоритм оценки скорости ветра WS по данным радиометра AMSR-E. Детальное описание алгоритма выходит за рамки данной работы, а методология, использованная для разработки метода, близка к описанной в работе [4]. Основу алгоритма составляют расчеты радиоярких температур уходящего излучения, выполненные для базы данных, состоящей из профилей атмосферных метеопараметров, полученных радиозондами, и параметров океана, измеренных на научных судах погоды. В результате вычислений, проведенных для характеристик и геометрии сканирования радиометра AMSR-E, были получены массивы радиоярких температур и соответствующих им значений параметров атмосферы и океана, включая скорость приводного ветра. На этих массивах были настроены нейронные сети (НС) для оценки скорости приводного ветра. Было обнаружено, что наименьшую среднеквадратичную ошибку восстановления скорости ветра и наименее зависимую от погодных условий работу алгоритма обеспечивает использование измерений на 4 низкочастотных каналах AMSR-E (6H, 6V, 10H, 10V).

Ниже представлены результаты применения алгоритма к изучению полей ветра для 2 примеров погодных систем, характеризующихся штормовыми ветрами. На рис. 2 показаны два полярных циклона в Баренцевом море, проявляющие себя на микроволновом снимке в виде вихревой структуры поля ветра со скоростями, превышающими 15 м/с. Поле ветра на рис. 2а построено с применением алгоритма, настроенного при использовании в расчетах $T_{я}$ в качестве модели излучения океана модель Ros92, а поле ветра на рис. 2б - при использовании Chapr12. Сравнение результатов применения алгоритмов с полем ветра высокого разрешения, полученным по данным радара с синтезированной апертурой Envisat ASAR (рис. 3) позволяет сделать вывод о более

адекватной работе алгоритма в областях высоких (> 15 м/с) скоростей ветра при использовании при моделировании модели Chapr12,

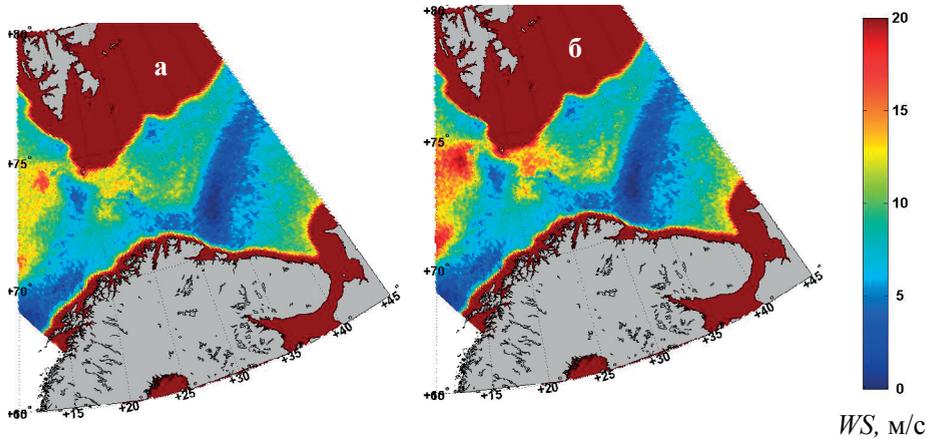


Рис. 2. Два полярных циклона в Баренцевом море 12 марта 2011 9:56 UTC: скорость приводного ветра, восстановленная по данным Aqua AMSR-E с помощью HC алгоритма, настроенного на данных модельных расчетов: *а* – с использованием модельных расчетов на основе модели излучения океана Ros92; *б* – с использованием модельных расчетов на основе модели излучения океана Chapr12.

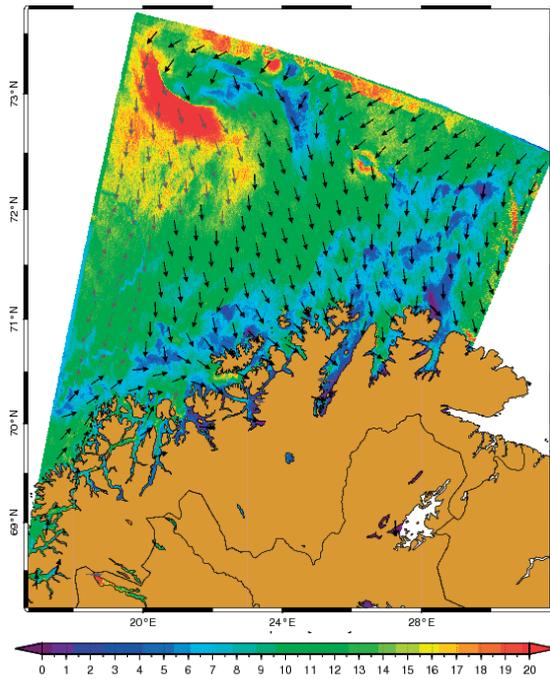


Рис. 3. Поле ветра высокого разрешения по данным радара с синтезированной апертурой Envisat ASAR, 12 марта 2011, 9:25 UTC.

Трудно переоценить наличие точных методов оценки скорости ветра в условиях тропических ураганов. Наличие корректно измеренных параметров атмосферы и океана напрямую определяет точность прогноза их траектории и интенсивности. Рис. 4 демонстрирует возможности нового алгоритма оценивать высокие скорости ветра в условиях тропических ураганов. Ураган 5-й категории Игорь в северной Атлантике в сентябре 2010 г. к 18 сентября превратился в ураган 1-й категории. На рисунке представлено сравнение нескольких продуктов по скорости ветра – продукт ветрового анализа H*Wind американского Отделения Атлантической Лаборатории Океанографии и Метеорологии, занимающегося исследованиями ураганов (на рис. 4, б и в – два поля ветрового анализа с 1,5-часовой разницей), основанный на наиболее точных на сегодняшний день самолетных и наземных измерениях скорости ветра, поле ветра по данным AMSR-E, восстановленное с помощью НС-алгоритма (рис.4а) и оперативный стандартный продукт Remote Sensing Systems (рис.4г).

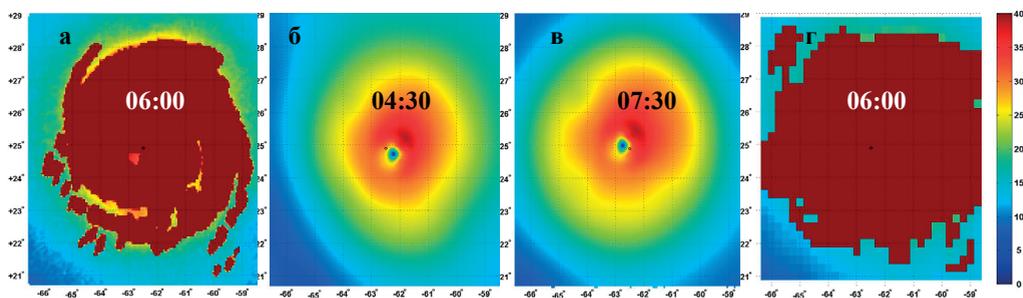


Рис. 4. Поле скорости ветра в урагане Игорь 18 сентября 2010:

а – восстановленное при помощи НС алгоритма по данным AMSR-E, 06:00 UTC, б – поле ветрового анализа H*Wind, 04:30 UTC, в – поле ветрового анализа H*Wind, 07:30 UTC, г – стандартный продукт AMSR-E из Remote Sensing Systems AMSR-E.

Области высокой интенсивности осадков в урагане маскируются алгоритмом (коричневые области на рисунке), но для тех пикселей, для которых оценки скорости ветра возможны, включая области с $WS > 15$ м/с среднеквадратичная ошибка между НС-оценками ветра и H*Wind составляет 1,7 м/с.

Рассмотренные 2 примера демонстрируют адекватную работу нового НС-алгоритма оценки скорости ветра по данным AMSR-E и возможность его использования в условиях высоких скоростей ветра, характерных для полярных циклонов и тропических ураганов.

Заключение

Моделирование радиояркостных температур над открытыми районами океанов для сканирующих микроволновых радиометров AMSR-E и SSMIS с использованием различных комбинаций используемых в настоящее время моделей спектров поглощения водяного пара и кислорода и моделей излучения океана и последующее сравнение

результатов расчетов с измерениями T_a для массива совмещенных в пространстве и времени наземных измерений позволило выбрать оптимальную комбинацию моделей, обеспечивающую наименьшую среднеквадратичную разницу между измерениями и расчетами, и определить систематические калибровочные поправки, ответственные за интегральные ошибки модели/калибровки. Вычисления были выполнены для базы данных синхронных и совмещенных в пространстве измерений параметров атмосферы и океана в безоблачных условиях. Сравнение проводилось для каналов радиометра F16 SSMIS на 19,35 и 37,0 ГГц для обеих поляризаций, на 22,235; 50,3; 52,8; 53,596; 54,40 и 55,5 ГГц на вертикальной поляризации и для для каналов радиометра AMSR-E для каналов на 6,925; 10,65; 18,7; 23,8 и 36,5 ГГц для обеих поляризаций. Наилучшие в смысле минимальной среднеквадратичной разницы между измерениями и расчетами результаты были достигнуты при использовании геофизической модели, использующей спектр поглощения водяного пара по модели Turn09 [15], спектр поглощения кислорода по модели Liebe87 [11] и параметризацию излучения океана по модели Chapr12 (неопубликованные результаты). Данная комбинация моделей обеспечила лучшие результаты для всех рассмотренных радиометрических каналов. Полученные средние значения разностей между измерениями и расчетами, представленные в таблицах 4 и 5, могут быть использованы в любом исследовании, основанном на модельных расчетах, для компенсации ошибок модели/калибровки. Демонстрация реализации такой возможности показана на примере разработки алгоритма оценки скорости приводного ветра по данным AMSR-E и применения его к изучению погодных систем, отличающихся высокими скоростями ветра, - полярных циклонов и тропических ураганов.

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 1.2.1 федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (Соглашение №14.B37.21.0673).

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. Auligné T, McNally A.R., Dee D.P. Adaptive bias correction for satellite data in a numerical weather prediction system. // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, vol. 133, no. 624, pp. 631-642, 2007.
3. Bell W., Candy B., Atkinson N., Hilton F., Baker N. et al. The Assimilation of SSMIS Radiances in Numerical Weather Prediction Models. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, vol. 46, no. 4, pp. 884-900, apr. 2008.
4. 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.
5. Cao C., Weinreb M., Xu H. Predicting Simultaneous Nadir Overpasses among Polar-Orbiting Meteorological Satellites for the Intersatellite Calibration of Radiometers. // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, vol. 21, no. 4, pp. 537-542, apr. 2004.
6. Cavalieri D.J., Parkinson C.L., DiGirolamo N., Ivanoff F. Intersensor Calibration Between F13 SSMI and F17 SSMIS for Global Sea Ice Data Records, 2012.

7. *Dee D.P.* Bias and data assimilation. // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, vol. 131, no. 613, pp. 3323-3343, 2005.
8. *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.
9. *Kawanishi T., Sezai T., Ito Y., Imaoka K., Takeshima T., Ishido Y et al.* The Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth Observing System (AMSR-E), NASDA's contribution to the EOS for global energy and water cycle studies. // Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, vol. 41, no. 2, pp. 184-194, 2003.
10. *Kunkee D.B., Swadley C.D., Poe G.A., Hong Y., Werner M.F.* Special Sensor Microwave Imager Sounder (SSMIS) Radiometric Calibration Anomalies #x2014;Part I: Identification and Characterization. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, vol. 46, no. 4, pp. 1017-1033, fpr. 2008.
11. *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. pp. 87-24, 1987.
12. *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.
13. *Sun N., Weng F.* Evaluation of special sensor microwave imager/sounder (SSMIS) environmental data records. // Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, vol. 46, no. 4, pp. 1006-1016, 2008.
14. *Turner D.D.* Systematic errors inherent in the current modeling of the reflected downward flux term used by remote sensing models. // Applied optics, vol. 43, no. 11, pp. 2369-2383, 2004
15. *Turner D.D., 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.
16. *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, 2000.
17. *Yan B., Weng F.* Intercalibration Between Special Sensor Microwave Imager/Sounder and Special Sensor Microwave Imager. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, vol. 46, no. 4, pp. 984-995, apr. 2008.