

УДК 551.465

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОКЕАНА И АТМОСФЕРЫ С
ПОМОЩЬЮ СВЧ-РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ СРЕДСТВ СПУТНИКОВ
EOS AQUA И МЕТЕОР-М №1**

А. Г. Гранков¹, А. А. Мильшин¹, Н. К. Шелобанова¹, И. В. Черный², Г. Г. Язерян³

¹ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

²НТЦ "Космонит" ОАО Российские космические системы

³ОАО Российские космические системы

Статья получена 12 марта 2014 г.

Аннотация. Приведены оригинальные результаты исследований теплового и динамического взаимодействия океана и атмосферы с помощью американского спутника EOS Aqua (радиометр AMSR-E) и отечественного спутника Метеор-М №1 (радиометр МТВЗА-ГЯ) в Северной Атлантике. Демонстрируется возможность использования этих средств для анализа среднемесячных значений потоков тепла, влаги и импульса на границе раздела океана и атмосферы и их сезонных изменений. Исследования проводятся на основе архивов данных многолетних спутниковых измерений, созданных в ИРЭ РАН при поддержке организаций Роскосмоса и НАСА.

Ключевые слова: спутниковая СВЧ-радиометрия, яркостная температура, система океан-атмосфера, потоки тепла и импульса.

Abstract. Some original results of studies of ocean/atmosphere heat and dynamic interaction in the North Atlantic derived from US satellite EOS Aqua with radiometer AMSR-E and Russian satellite Meteor-M No.1 equipped by radiometer MTVZA-G are presented. A capability of these means for analyzing the monthly mean fluxes of heat, moisture and momentum at the ocean-atmosphere boundary and their seasonal variability is demonstrated. These studies are carried out basing on the archives of long-term satellite measurement data accumulated in IRE RAS under support of the Roscosmos and NASA organizations.

Keywords: Satellite microwave radiometry, brightness temperature, system ocean-atmosphere, heat, moisture and impulse fluxes.

1. Спутниковые архивы и их формирование

Наши исследования в области теплового и динамического взаимодействия океана и атмосферы, проводимые с начала 90-х годов, опираются на данные СВЧ-радиометрических измерений современных спутников DMSP, Метеор 3М, EOS Aqua, Метеор-М №1. Радиометры-сканеры этих спутников, такие как SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager), МТВЗА и МТВЗА-ГЯ (модуль температурно-влажностного зондирования атмосферы), AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer), являющиеся частотными аналогами, позволяют решать актуальные задачи по взаимодействию океана и атмосферы: определение приповерхностных турбулентных потоков тепла, влаги и импульса на различных масштабах времени, изучение влияния горизонтального (адвективного) переноса тепла и влаги в атмосферном пограничном слое на яркостную температуру системы "океан-атмосфера" (COA) и на ее связь с тепловыми процессами в системе, оценка энергетики среднеширотных и тропических циклонов и анализ факторов, способствующих их появлению и развитию [1, 2].

Данные многолетних измерений радиометров SSM/I, TMI, AMSR-E, МТВЗА-ГЯ с суточным разрешением использованы нами для формирования глобальных архивов яркостных температур COA в миллиметровом и сантиметровом диапазонах длин волн, а также среднесуточных и среднемесячных значений тепловых потоков. Подробные сведения о частотных и поляризационных характеристиках каналов этих радиометров приведены в [3, 4].

Краткое описание процедуры формирования файлов ЯТ

При формировании файлов яркостных температур (ЯТ) реализуется суточный цикл представления информации. Файлы, содержат глобальные поля ЯТ. На каждые сутки формируется два файла. Один файл из данных на восходящих витках, другой – на нисходящих витках. Поле представляет собой глобальную прямоугольную сетку с шагом 0,5x0,5 градусов (массив 720x360 элементов). Сетка центрирована по экватору и Гринвичскому меридиану.

Значения ЯТ для каждой ячейки сетки равны средним значениям ЯТ по всем пикселям, отнесенным к данной ячейке. Исходный формат файлов hdf и для его обработки удобно использовать программный продукт HDF Explorer. На этапе предварительной обработки значения ЯТ в различных спутниковых каналах из бинарного формата преобразовывались в текстовый формат.

Описание созданных архивов яркостных температур и тепловых потоков

Перечень основных архивов, созданных в 2008–2011 гг. (52000 файлов объемом > 1000 Гб):

- Архив спутниковых SSM/I данных (1996–1999 гг.)
- Архив спутниковых TMI данных (1997–1999 гг.)
- Архив спутниковых AMSR-E данных (2002–2008 гг.)
- Архив среднесуточных и среднемесячных потоков (1996–1999 гг.)

Перечень основных архивов созданных в 2012-2013 гг. (>9000 файлов объемом >200 Гб):

- Архив спутниковых SSM/I данных (2009–2011 гг.)
- Архив спутниковых TMI данных (2009–2011 гг.)
- Архив спутниковых AMSR-E данных (2009–2010 гг.)
- Архив среднесуточных и среднемесячных потоков (2009–2010 гг.)
- Архив спутниковых МТВЗА данных (11.2009–05.2010 гг.)

Всего в архиве > 9000 файлов объемом > 200 ГБ

2. Методика определения потоков тепла, влаги и импульса по спутниковым измерениям

С учетом возможностей современной техники дистанционного зондирования, перспективным является подход к определению тепловых потоков, базирующийся на косвенной (корреляционной) связи между интегральными (усредненными по высоте) значениями температуры и влажности атмосферы, вариации которых надежно регистрируются по данным спутниковых СВЧ- и ИК-радиометрических измерений в определенных участках спектра, с температурой и влажностью нижних слоев атмосферы [1, 2]. Эта связь обусловлена существующим в приводном и пограничном слоях

воздуха механизмом турбулентного перемешивания тепла и влаги, которое в атмосфере намного более развито и интенсивно по сравнению с океаном.

Существование корреляционных связей между температурными и влажностными характеристиками в различных слоях атмосферы, служит отправной точкой для использования спутниковых радиометрических методов при определении основных количественных характеристик теплового взаимодействия океана и атмосферы – вертикальных турбулентных потоков явного (Q_h) и скрытого (Q_e) тепла на границе раздела СОА на основе полуэмпирических формул – так называемых балк-формул, полученных на основе аэродинамического метода (Global Bulk Aerodynamic Method). В соответствии с этим подходом величины Q_h и Q_e характеризуются следующими соотношениями [5]:

$$Q_h = c_p \rho C_T (T_{\Pi} - T_a) V, \quad (1)$$

$$Q_e = L \rho C_E (q_s - q) V, \quad (2)$$

т.е. выражаются через следующие параметры СОА - температуру T_a и удельную влажность приводного воздуха q , давление P_a и скорость ветра V в приводном воздухе, а также через температуру поверхности океана T_{Π} и максимальную для данной величины ТПО насыщенную удельную влажность над поверхностью воды q_s . В качестве коэффициентов пропорциональности в соотношениях (1) и (2) служат коэффициенты обмена теплом C_T (число Шмидта) и влагой C_E (число Дальтона), и удельная теплота испарения (L), удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении c_p и его плотность ρ .

Рамки аэродинамического метода допускают также простую параметризацию соотношений между интенсивностью механического (динамического) взаимодействия поверхности океана и атмосферы Q_v - потоком количества движения (импульса) со скоростью приводного ветра V , где в качестве коэффициентов пропорциональности фигурируют плотность воздуха ρ и коэффициент сопротивления C_v):

$$Q_v = \rho C_v V^2 \quad (3)$$

Формулы (1)–(3) положены в основу расчетов срочных, среднесуточных и среднемесячных значений потоков явного, скрытого тепла и импульса по данным измерений спутниковых радиометров SSM/I, TMI, AMSR-E, МТВЗА-ГЯ. Развитые в настоящее время регрессионные алгоритмы позволяют получить прямые оценки ТПО $T_{\text{п}}$ и скорости приводного ветра V , а также общего влагосодержания атмосферы, тесно связанного с температурой T_a и удельной влажностью q приводного воздуха. Примером может служить разработанный для радиометра AMSR-E спутника EOS Aqua алгоритм [6] в виде линейных регрессионных соотношений между температурой и удельной влажностью приводного воздуха с ЯТ каналов радиометра.

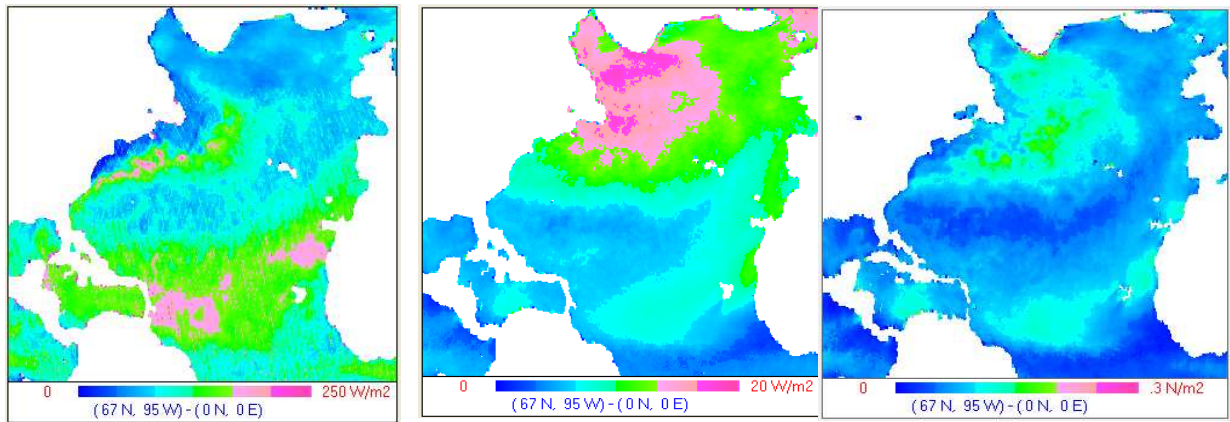
3. Пространственная и сезонная изменчивость полей среднемесячных потоков тепла, влаги и импульса в Северной Атлантике по данным радиометра AMSR-E

Обработаны восходящие и нисходящие витки за период с ноября 2009 г. по декабрь 2010 г. в области Северной Атлантики с координатами 67° с.ш., 95° з.д. – 0° с.ш., 0° в.д. и получены суточные оценки потоков явного, скрытого тепла и импульса, затем на их основе определены среднемесячные значения потоков.

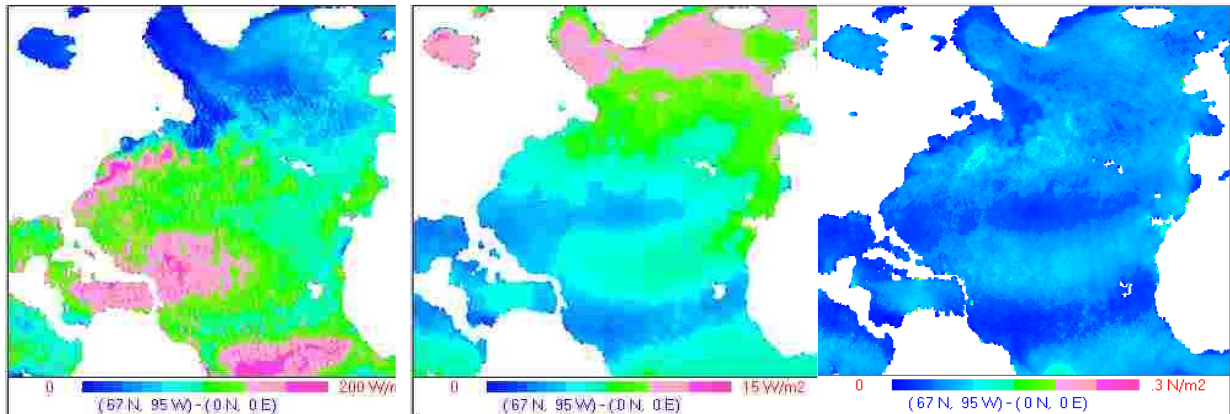
Некоторые результаты обработки представлены на рис 1 (пространственное разрешение данных составляет $0,25 \times 0,25^\circ$).

Отмечается высокая пространственная изменчивость потоков всех типов в Северной Атлантике. Для потоков скрытого тепла Q_e характерно более чем десятикратное изменение от минимального значения к максимальному значению. Наибольшая интенсивность параметра Q_e наблюдается в летний сезон, а пик приходит на июль. Повышенным уровнем потоков скрытого тепла характеризуется тропическая зона восточнее Кубы в весенний и летний сезоны, а также в сентябре – октябре. Эта зона относится к районам зарождения, формирования и прохождения тропических циклонов.

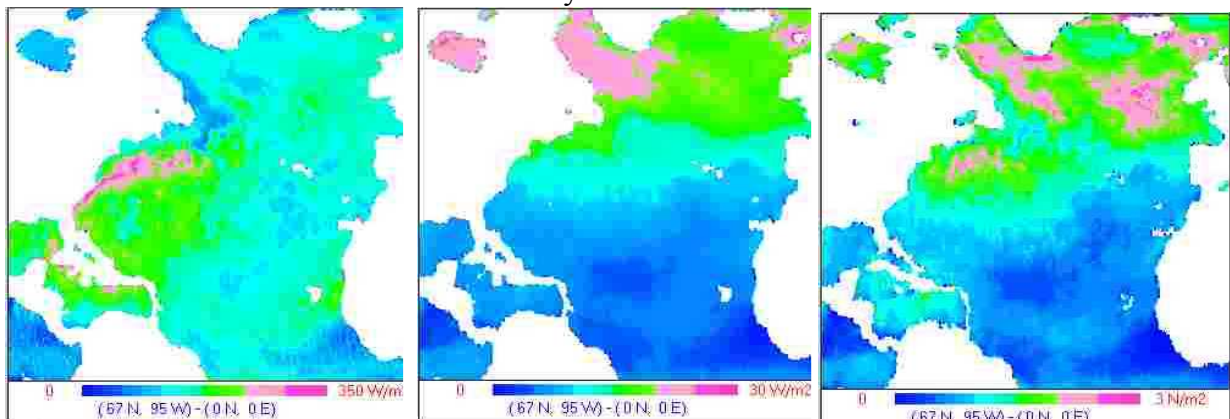
Для потоков явного тепла наблюдается отчетливая широтная зависимость: – наиболее интенсивны потоки на севере Атлантики, их величина снижается по мере приближения к экваториальным широтам.



Май 2010 г.



Август 2010 г.



а)

б)

в)

Ноябрь 2010 г.

Рис. 1. Среднемесячные потоки: а) скрытого тепла; б) явного тепла; в) импульса

На рис. 2 приведен пример восстановления параметров, необходимых для определения потоков явного, скрытого тепла и импульса – температуры

поверхности океана (ТПО), приводного ветра в приводном слое атмосферы и общего влагосодержания атмосферы, вариации которого тесно связаны с температурой и влажностью приводного воздуха. Именно такие ежесуточные данные, накапливаемые в течение месяца, позволят рассчитать среднемесячные значения потоков явного, скрытого тепла и импульса в Северной Атлантике.

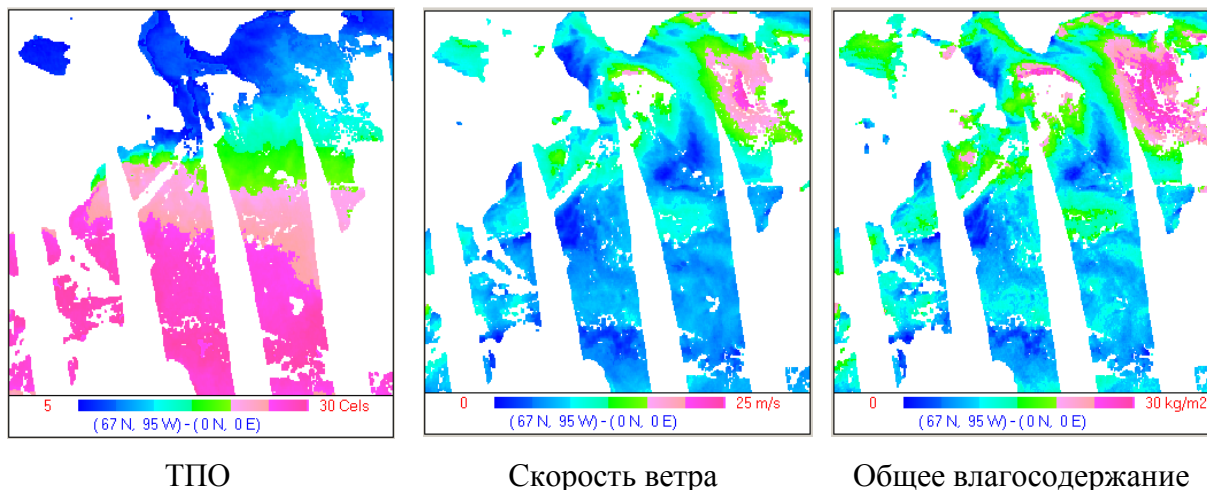


Рис.2. Распределение ТПО, скорости ветра, общего влагосодержания в Северной Атлантике по данным AMSR-E на 4.11.2009 г.

Результаты, иллюстрируемые на рис. 1, демонстрирует важный результат – возможность наблюдения из космоса течения Гольфстрим *в поле потоков скрытого тепла* при пространственном разрешении $0,25 \times 0,25^\circ$, которое обеспечивается современными спутниковыми СВЧ-радиометрическими средствами.

4. Соотношение суточных и среднемесячных значений ЯТ радиометров AMSR-E и МТВЗА-ГЯ

Здесь приведены результаты анализа статистической связи ЯТ радиометра МТВЗА-ГЯ спутника Метеор-М №1 и AMSR-E спутника EOS Aqua на среднемесячных масштабах времени на длинах волн, близких к линии резонансного поглощения радиоволн в водяном паре 1,35 см (частота 22,23 ГГц. Эти результаты для американских и российских космических аппаратов обычно различались благодаря различиям в ширине полосы обзора тех и других

радиометров, обусловленным существенным их различиям в углах зондирования антенных систем.

Мы убедились в этом, проводя сравнительный анализ пространственных полей яркостной температуры COA и их временной динамики для ряда энергоактивных зон Северной Атлантики, находящихся в русле течения Гольфстрим и его продолжения – Северно-Атлантического течения в рамках договорных отношений с НТЦ “Космонит” ООО Российские космические системы и Маршалльским центром космических полетов (MSFC Disributed Active Archive Center), предоставившим архивные данные долговременных СВЧ-радиометрических измерений со спутников серии DMSP [7].

Нами были отобраны массивы ЯТ AMSR-E с пространственным разрешением $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ и МТВЗА-ГЯ с пространственным разрешением $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ за период с ноября 2009 г. по апрель 2010 г. для области Северной Атлантики с координатами 67° с.ш., 95° з.д. - 0° с.ш., 0° в.д. Затем данные AMSR-E были преобразованы в данные с разрешением $0,5^\circ \times 0,5^\circ$. На следующем этапе выполнялось временное осреднение срочных данных с пространственным размером 134×170 элементов по широте и долготе для шестимесячного интервала. На заключительном этапе для океана (суша исключалась) строилась регрессионная зависимость вида:

$$T_M^{BT} = A + B \cdot T_A^{BT},$$

где T_M^{BT}, T_A^{BT} - среднемесячные яркостные температуры радиометров МТВЗА-ГЯ и AMSR-E.

На рис. 3 в качестве примера представлены результаты сопоставления среднемесячных значений ЯТ МТВЗА и AMSR-E на длине волны 1,26 см в феврале 2010 г. на вертикальной и горизонтальной поляризациях (в виде линейных регрессий типа $y = a + bx$). Наблюдается хорошая сопоставимость данных измерений ЯТ для радиометров МТВЗА и AMSR-E на значительной части акватории Северной Атлантики, несмотря на некоторые отличия их тактико-технических характеристик.

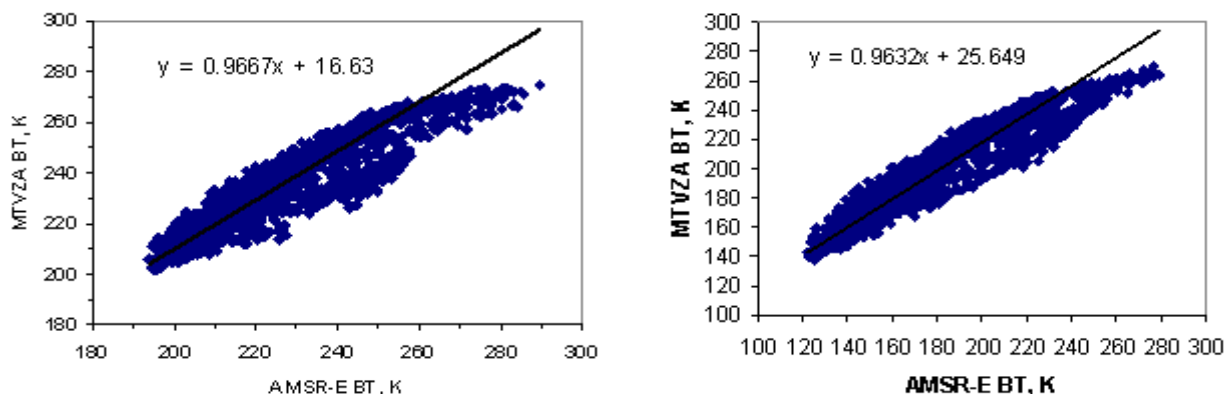


Рис. 3. Сопоставление среднемесячных яркостных температур МТВЗА и AMSR-E на волне 1,26 см в феврале 2010 г. на вертикальной (левый рисунок) и горизонтальной (правый рисунок) поляризациях

Заключение

Получены впервые глобальные оценки сезонной динамики среднемесячных вертикальных турбулентных потоков явного, скрытого тепла и импульса в Северной Атлантике по данным сканирующего радиометра AMSR-E спутника EOS Aqua в период с ноября 2009 г. по декабрь 2010 г. Установлено, что в поле потока скрытого тепла, восстановленного радиометром AMSR, отчетливо наблюдается течение Гольфстрим и хорошо прослеживается его внутригодовая динамика.

Результаты исследования показывают, что спутниковые радиометры-сканеры типа радиометра AMSR-E (в частности, его частотный аналог – радиометр МТВЗА-ГЯ) могут служить эффективным инструментом изучения сезонной и межгодовой динамики вертикальных турбулентных потоков явного, скрытого тепла и импульса на границе раздела поверхности океана и атмосферы, важных при исследовании климатических тенденций в Северной Атлантике и ее влияния на погодные условия в Европе и в Европейской части России.

Литература

1. А.Г. Гранков, А.А. Мильшин. Взаимосвязь радиоизлучения системы океан-атмосфера с тепловыми и динамическими процессами на границе раздела. М.:

Физматлит, 2004, 168 с.

2. A.G. Grankov, A.A. Milshin. Microwave Radiation of the Ocean-Atmosphere: Boundary Heat and Dynamic Interaction, Springer, 2009, 160 p.
3. А.Г. Гранков, А.А. Мильшин, В.Ю. Солдатов, Н.К. Шелобанова. Архивы микроволновых, океанографических и метеорологических данных в зонах возникновения тропических ураганов // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2012. №5. С. 107-124.
4. И Д. Барсуков, О.В. Никитин, А.М. Стрельцов, И.В. Черный, Г.М. Чернявский. Предварительная обработка данных СВЧ-радиометра МТВЗА-ГЯ КА «Метеор-М» №1 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т.8. №2. С. 257-263.
5. С.С. Лаппо, С.К. Гулев, А.Е. Рождественский. Крупномасштабное тепловое взаимодействие в системе океан атмосфера и энергоактивные области Мирового океана. Л.: Гидрометеиздат. 1990. 336с.
6. M. Kubota, T. Hihara. Retrieval of Surface Air Specific Humidity Over the Ocean Using AMSR-E Measurements // Sensors. 2008, 8, P. 8016-8026.
7. А.Г. Гранков, А.А. Мильшин, И.В. Черный. Результаты моделирования измерений радиометра МВТЗА ИСЗ "Метеор-3М" и их валидация на основе фактических измерений радиометра SSM/I ИСЗ F-08 (DMSP) в Северной Атлантике // Исслед. Земли из космоса. 2000. № 5. С. 20-27.