

УДК 551.465

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

А. Г. Гранков<sup>1</sup>, А. А. Мильшин<sup>1</sup>, Н. К. Шелобанова<sup>1</sup>, И. В. Черный<sup>2</sup>, Г. Г. Язерян<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

<sup>2</sup>НТЦ "Космонит" ОАО Российские космические системы

<sup>3</sup>ОАО 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  $T_{\Pi}$  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  $\rho$ .

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  $\rho$  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.

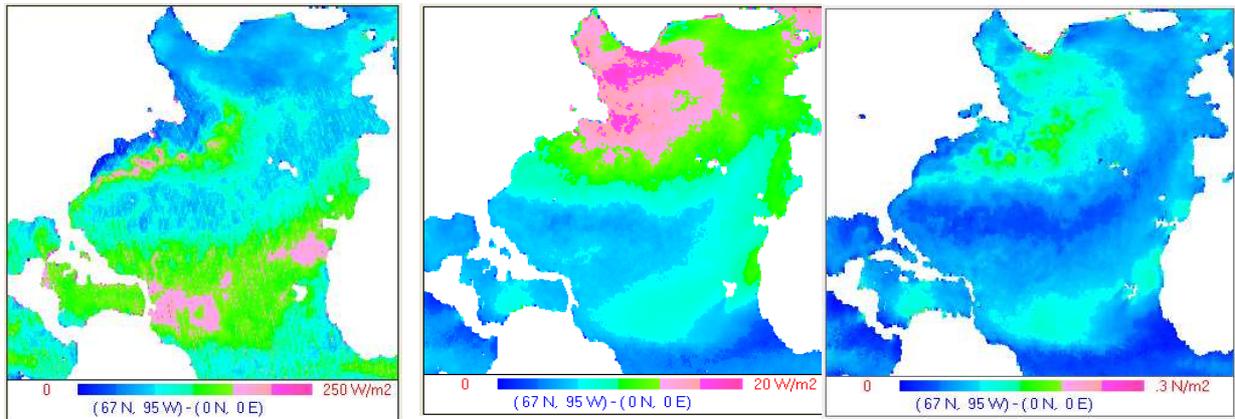
### **3. Пространственная и сезонная изменчивость полей среднемесячных потоков тепла, влаги и импульса в Северной Атлантике по данным радиометра AMSR-E**

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

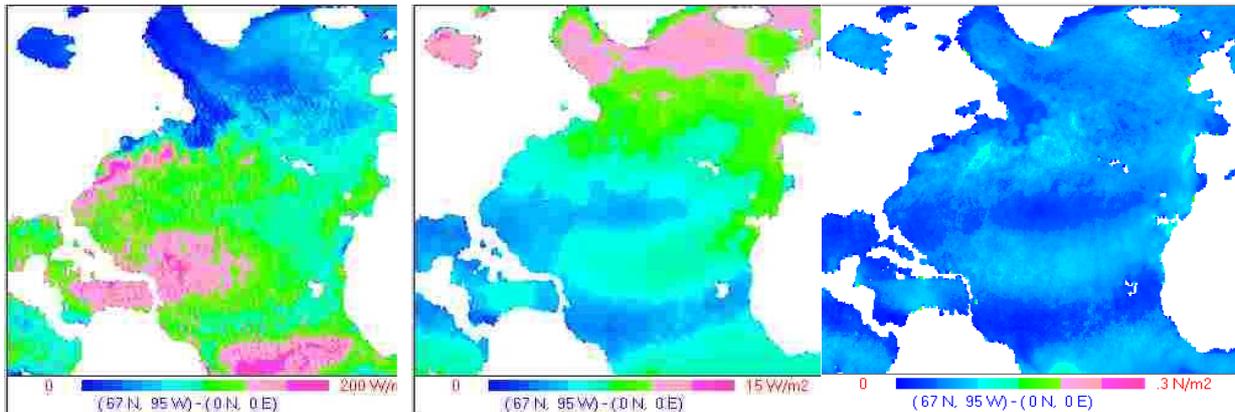
Некоторые результаты обработки представлены на рис 1 (пространственное разрешение данных составляет  $0,25 \times 0,25^\circ$ ).

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.

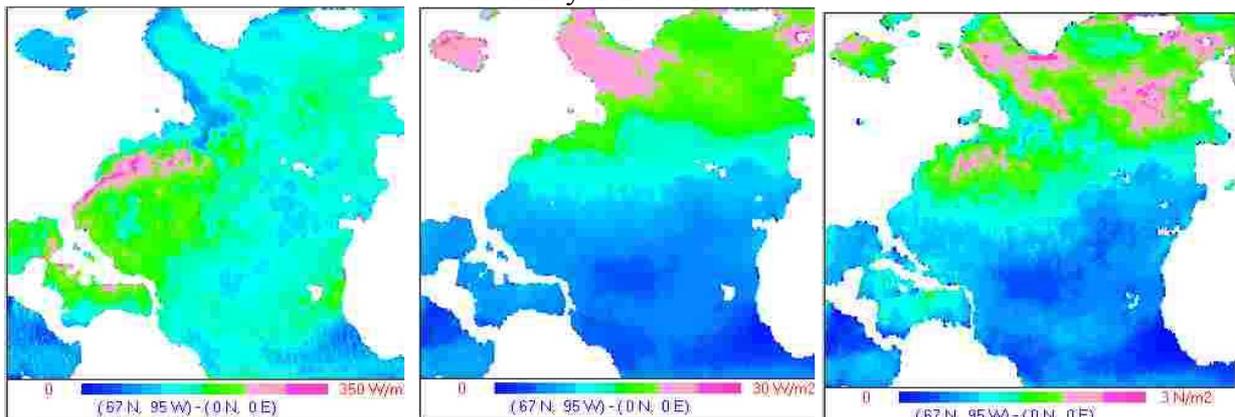
Для потоков явного тепла наблюдается отчетливая широтная зависимость: – наиболее интенсивны потоки на севере Атлантики, их величина снижается по мере приближения к экваториальным широтам.



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.

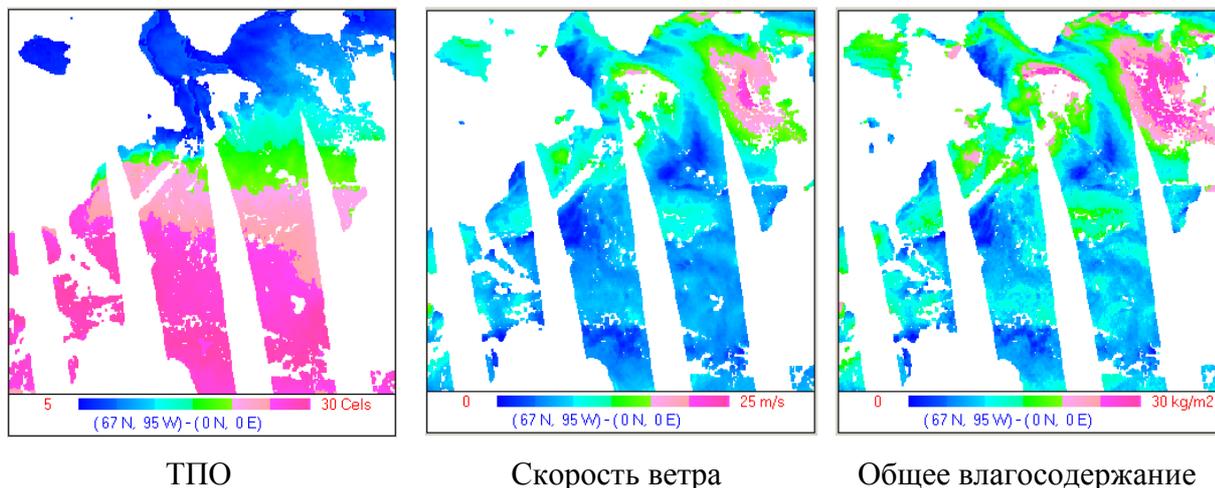


Рис.2. Распределение ТПО, скорости ветра, общего влагосодержания в Северной Атлантике по данным AMSR-E на 4.11.2009 г.

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 Distributed 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  $67^\circ$  с.ш.,  $95^\circ$  з.д. -  $0^\circ$  с.ш.,  $0^\circ$  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  $134 \times 170$  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.

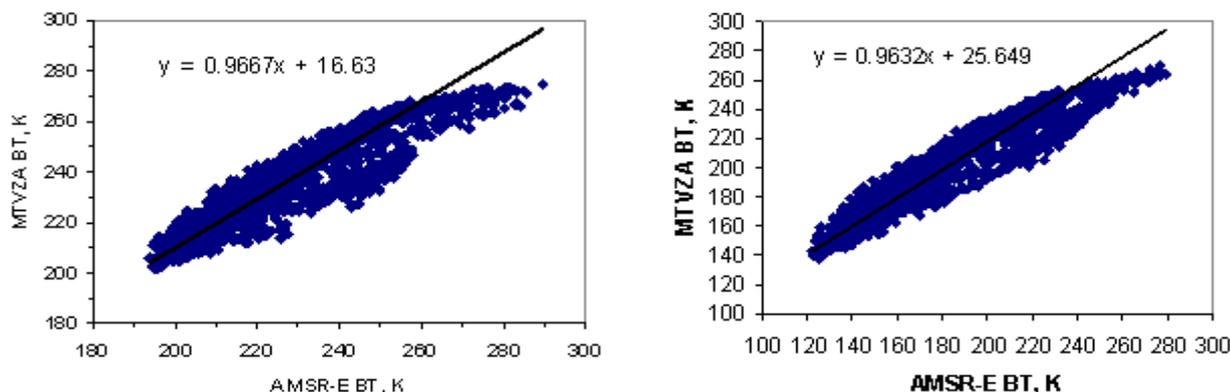


Рис. 3. Сопоставление среднемесячных яркостных температур МТВЗА и AMSR-E на волне 1,26 см в феврале 2010 г. на вертикальной (левый рисунок) и горизонтальной (правый рисунок) поляризациях

### 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.