

## ЗАГРЯЗНЕНИЕ И ОХРАНА АТМОСФЕРЫ

УДК 502.3

### ВНУТРИ- И МЕЖГОДОВЫЕ ВАРИАЦИИ СРЕДНЕМЕСЯЧНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ИНТЕГРАЛЬНОГО СОДЕРЖАНИЯ ВОДЯНОГО ПАРА В АТМОСФЕРЕ В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ<sup>1</sup>

Д-р физ.-мат. наук А.Г. Гранков, А.А. Мильшин, Н.К. Шелобанова,  
Е.А. Ямпольская

(Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН, e-mail: agrankov@mail.ru)

### INTRA- AND INTER-ANNUAL VARIATIONS OF THE MONTHLY MEAN INTEGRAL ATMOSPHERIC WATER VAPOR IN THE NORTH ATLANTIC

A.G. Granko, A.A. Milshin, N.K. Schelobanova, E.A. Yampolskaya

**Ключевые слова:** СВЧ-радиометрические методы, спутниковые наблюдения, течение Гольфстрим, взаимодействие океана и атмосферы, изменчивость водяного пара.

**Key words:** microwave radiometric methods, satellite observations, Gulfstream current, ocean-atmosphere interaction, water vapor variability

Исследованы внутри- и межгодовые вариации среднемесячных значений общего (интегрального) содержания водяного пара в атмосфере в Северной Атлантике с 1988 по 2011 годы на основе данных измерений многоканальных сканирующих СВЧ-радиометров AMSR-E спутника EOS Aqua и SSM/I спутников серии DMSP. Получены оценки регулярных составляющих изменчивости водяного пара (трендов) с упором на области, характеризующиеся наибольшей интенсивностью тепло- и влагообмена между океаном и атмосферой – Гольфстримская, Ньюфаундлендская и Норвежская, которые пересекают на своем пути Гольфстримское и Северо-Атлантическое течения. Данные области отражают динамику транспорта явного и скрытого тепла (через температуру поверхности океана и через водяной пар атмосферы, соответственно). Разработана методика использования данных спутниковых СВЧ-радиометрических измерений (радиояркостных температур) в качестве прямых характеристик теплообмена между океаном и атмосферой. Возмозжности ее использования демонстрируются для изучения особенностей (аномалий) годовых потоков явного и скрытого тепла в Ньюфаундлендской энергоактивной области Северной Атлантики в 2010 году, когда наблюдались интенсивные нефтяные разливы в Мексиканском заливе весной этого года и сильная летняя засушливость на европейской территории России.

---

<sup>1</sup> Данная работа выполнена по Госзаданию № 0030-2019-0008.

*The intra- and interannual variations of the monthly mean total (integral) atmospheric water vapor in the North Atlantic during 1988–2011 years are studied with use of measurement data of the multichannel scanning microwave radiometers AMSR-E aboard from the satellite EOS Aqua and SSM/I from the DMSP satellites. Some estimates of regular factors of a variability of the atmospheric water vapor (trends) are presented with emphasis on the Gulf Stream, Newfoundland, and Norwegian areas, which are characterized by largest intensity of heat and moisture exchange between the ocean and atmosphere; the Gulf Stream and North Atlantic current are crossing these areas. These areas reflect the dynamics of sensible and latent heat transport (through the ocean surface temperature and atmospheric water vapor, respectively). The method of using the data of satellite microwave radiometric measurements (the brightness temperatures) as the direct characteristics of ocean-atmosphere heat exchange has been elaborated. Some its possibilities to study the peculiarities (anomalies) of the annual heat fluxes of sensible and latent heat in the Newfoundland energy active area of the North Atlantic in 2010 are demonstrated. In the spring of this year intensive oil spillages in the Gulf of Mexico was occurred and strong summer dryness at the European part of Russia was observed.*

## **Введение**

Изучение процессов крупномасштабного теплового и динамического взаимодействия океана и атмосферы представляет интерес для анализа тепла и влаги в Северной Атлантике, Тихом океане и в глобальном океане. При этом большую роль играют Гольфстримская, Ньюфаундлендская и Норвежско-Гренландская энергоактивные зоны (ЭАЗО), которые пересекают на своем пути Гольфстримское и Северно-Атлантическое течения. Данные ЭАЗО отражают динамику транспорта явного и скрытого тепла (через температуру поверхности океана и через водяной пар атмосферы, соответственно), и сами по себе являются уникальными областями теплового и динамического взаимодействия океана и атмосферы. Долгое время эта тема являлась предметом сотрудничества между ФИРЭ РАН, Роскомгидрометом, Институтом океанологии РАН, и Роскосмосом. Наиболее значимые результаты этих совместных исследований – оценка роли водяного пара атмосферы в формировании связи СВЧ-излучательных (микроволновых) характеристик системы океан-атмосфера (СОА) с характеристиками тепло- и влагообмена на границе ее раздела с учетом механизмов вертикального турбулентного и горизонтального адвективного переноса тепла и влаги в атмосфере. Большое значение в этой работе имело сотрудничество с организациями NASA – Remote Sensing Systems и National Snow and Ice Data Center, откуда мы получили в свое время значительный объем данных измерений с радиометра SSM/I спутников DMSP и радиометра AMSR-E спутника EOS-Aqua.

В статье анализируются межгодовые и внутригодовые вариации общего (интегрального) содержания водяного пара в атмосфере на основе обработки данных долговременных спутниковых СВЧ-радиометрических измерений. Данная характеристика атмосферы доступна для спутниковых СВЧ-радиометрических методов, благодаря наличию сильной резонансной линии поглощения радиоизлучения 22,235 ГГц (1,35 см) в водяном паре атмосферы, и связана с интенсивностью потоков явного и скрытого тепла на границе раздела океана и атмосферы в широком диапазоне интервалов времени.

Географической областью наших исследований является Северная Атлантика – от 0 до 67° с.ш. и от 0 до 95° з.д. Используются архивные данные многоканальных

сканирующих СВЧ-радиометров AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer) спутников EOS-Aqua и радиометров SSM/I (Special Sensor Microwave Imager) спутников серии DMSP. Характеристики этих радиометров (частотные и поляризационные свойства, чувствительность), а также об орбитальных параметрах и тактико-технических характеристиках спутников (периодичность и ширина обзора и пространственное разрешение) общеизвестны. Радиометр AMSR-E, обеспечивающий регулярный обзор поверхности Земли со спутника EOS Aqua с 2002-го года по настоящее время в полосе обзора 1445 км, оснащен по сравнению с радиометром SSM/I дополнительными длинноволновыми каналами 2,82 см (10,65 ГГц) и 3,45 см (6,9 ГГц) на вертикальной и горизонтальной поляризациях.

### **Межгодовые вариации водяного пара в атмосфере в энергоактивных областях Северной Атлантики**

Данные многолетних измерений радиометра SSM/I спутников DMSP, а радиометра AMSR-E спутника EOS Aqua с суточным разрешением использованы нами для формирования глобальных архивов яркостных температур COA в миллиметровом и сантиметровом диапазонах длин волн, а также среднемесячных значений общего содержания водяного пара в атмосфере.

Исходными данными служили файлы яркостной температуры COA с прямоугольной сеткой  $0,25 \times 0,25^\circ$ , центрированной по экватору и Гринвичскому меридиану суточными распределениями водяного пара над Северной Атлантикой, которые определялись по данным спутниковых СВЧ-радиометрических измерений на восходящих и нисходящих витках. Файлы содержат результаты обработки данных измерений радиометра AMSR-E в период 2002 – 2011 гг., дополненные данными измерений радиометра SSM/I в период 1988 – 2001 гг. [1].

На основе этих данных были получены оценки среднемесячных значений общего влагосодержания атмосферы над Северной Атлантикой с пространственным разрешением 0,25 градуса по широте и долготе в этот период. Наиболее детально рассмотрена временная динамика водяного пара в районах расположения судовых станций (кораблей погоды) M (MIKE –  $66^\circ$  с.ш.,  $0,5^\circ$  з.д.), D (DELTA –  $44^\circ$  с.ш.,  $41^\circ$  з.д.) и H (HOTEL –  $38^\circ$  с.ш.,  $71^\circ$  з.д.), относящихся к Норвежско-Гренландской, Ньюфаундлендской и Гольфстримской энергоактивным зонам.

На серии рисунков ниже представлены результаты обработки спутниковых данных – среднемесячные значения общего влагосодержания атмосферы в ЭА-30 областях M, D и H Северной Атлантики в период с 1988 по 2011 гг., полученные по данным радиометров SSM/I и AMSR-E на разных этапах их обработки в разное время от фрагментарных оценок (рис. 1 и 2) до окончательного варианта (рис. 3).

Из этих иллюстраций заметен эффект наращивания количества водяного пара в эти годы, который наблюдается особенно отчетливо в областях D и H. Наблюдается «выстрелы» среднемесячных значений общего влагосодержания атмосферы в 1994 и 2009 гг. в этих областях Северной Атлантики, которые могут представить интерес для метеорологов и климатологов.

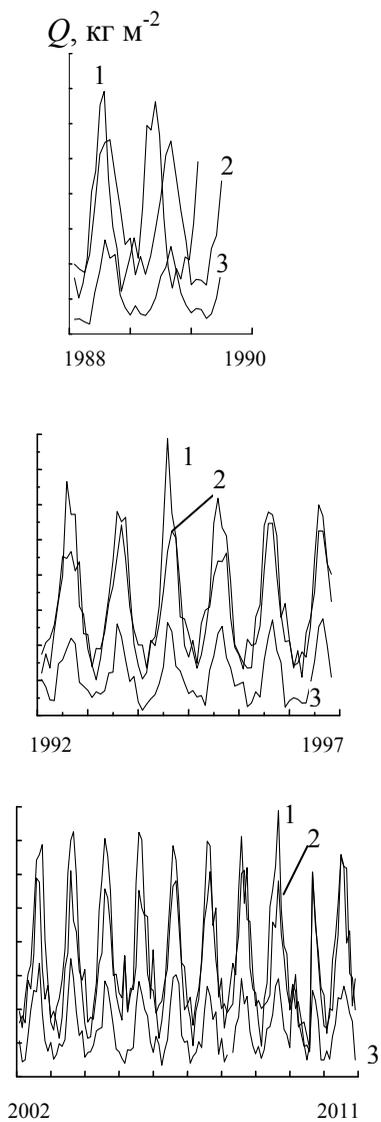


Рис. 1. Первоначальный этап исследований многолетних вариаций среднемесячных значений общего содержания водяного пара в атмосфере  $Q$  в зонах Н (1), D (2), М (3) Северной Атлантики на 22-летнем периоде спутниковых измерений

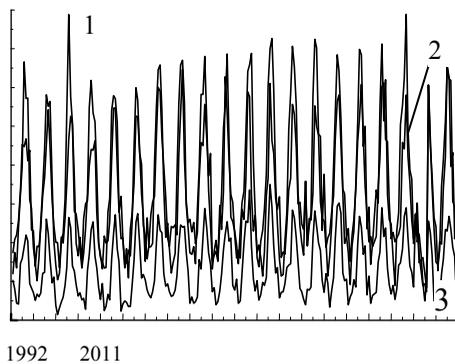
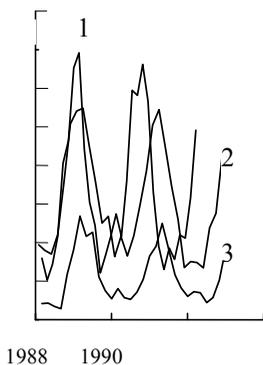
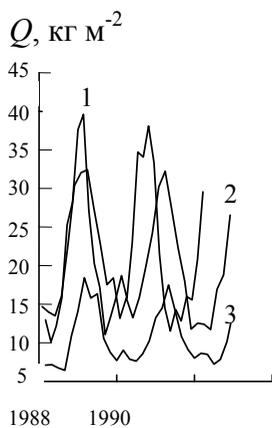


Рис. 2. Промежуточный этап исследований многолетних вариаций среднемесячных значений общего содержания водяного пара в атмосфере  $Q$  в зонах Н (1), D (2), М (3) Северной Атлантики на 22-летнем периоде спутниковых измерений

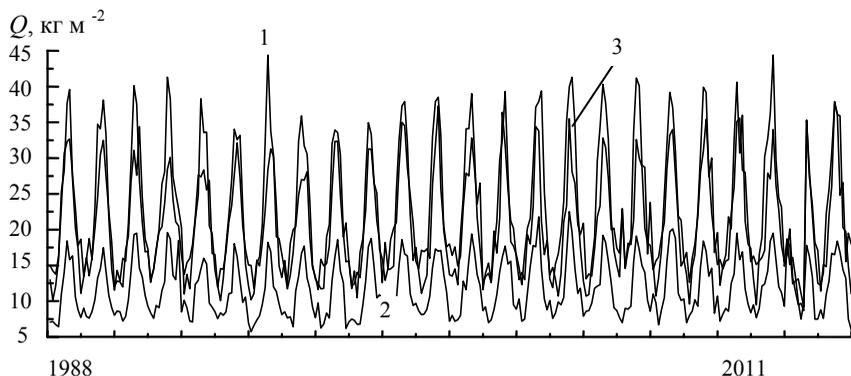


Рис. 3. Окончательный вариант

Увеличение средних за год значений общего содержания водяного пара в атмосфере за период 1996 – 2005 гг., в областях М, D, H, составило соответственно, 1, 1,1 и 1,5  $\text{кг м}^{-2}$ . Для сравнения заметим, что согласно последним оценкам глобальные вариации водяного пара в атмосфере за этот же период в этих ЭАЗО составляют 0,3–0,5  $\text{кг м}^{-2}$  по версиям GOME-SCIAMCHY (Global Ozone Monitoring Experiment-SCanning Imaging Absorption spectrometer for Atmospheric CHartography) и HOAPS (Hamburg Ocean Atmosphere Parameters and Fluxes from Satellite Data) [6].

### Годовые циклы (петли) яркостной температуры в области D течения Гольфстрим

В работе [4] предложена методика расчета широко используемых в климатических исследованиях интегральных (усредненных за год) потоков явного и скрытого тепла на границе раздела океана и атмосферы. Методика основана на важном наблюдении, сделанном авторами, суть которого в том, что величина интегрального теплового потока зависит не только от величин среднемесячной температуры поверхности океана ( $t_n$ ) и температуры приводной атмосферы ( $t_a$ ), играющих важную роль в процессах теплообмена, но и от величины опережения (запаздывания) вариаций одной из них по отношению к вариациям другой в течение года. Это обстоятельство связано с тем, что параметры  $t_n$  и  $t_a$  приспосабливаются друг к другу при периодах осреднения год и более. На сезонных масштабах, чтобы определить интенсивность теплообмена и его характер (приток тепла из океана в атмосферу, либо из атмосферы в океан) необходимо учитывать степень согласования (рассогласования) этих параметров. Данная методика легко реализуется графически, т.к. интенсивность тепло- влажнообмена между океаном и атмосферой можно описать парами величин в виде фазовых траекторий ( $t_n, t_a$  - петля), геометрические характеристики которых такие как площадь, ориентация петли, степень отличия ее формы от прямоугольной позволяют сравнивать интегральные (годовые) потоки в различных районах Мирового океана и оценивать их межгодовую изменчивость [4].

Благодаря отзывчивости поля собственного СВЧ-излучения системы океан-атмосфера на вариации температуры поверхности океана и температуры привод-

ной атмосферы существует возможность построения радиационных "образов" годичных  $t_n$ ,  $t_a$  - циклов с помощью значений яркостной температуры COA, например, в спектральном интервале 3–5 см, где максимальна чувствительность яркостной температуры к изменениям ТПО, и на длине волны 1,35 см, характеризующейся тесной взаимосвязью яркостной температуры с температурными и влажностными характеристиками атмосферы.

Такой подход рассмотрен и обоснован в нами в работах [2,3,5]; показано, в частности, что площади годовых (среднегодовых) радиояркостных петель в Гольфстримской, Ньюфаундлендской и Норвежской ЭАЗО энергоактивных зонах Северной Атлантики сильно отличаются, причем их соотношения близки к соотношениям значений среднегодовых потоков теплов на границе океана и атмосферы для этих ЭАЗО. При этом использовались оценки яркостной температуры COA, вычисленные на основе архивных данных об океанографических и метеорологических параметрах с помощью известных радиационных моделей. В настоящее время, благодаря созданному глобальному архиву данных спутниковых СВЧ-радиометрических измерений за последние 25 лет, появляется возможность решения этих задач экспериментальным путем.

Рис. 4 иллюстрирует особенности (аномалии) годовых циклов спутниковых оценок среднемесячных значений яркостной температуры в 2010-ом году в области D течения Гольфстрим на пути транзита тепла от южных широт к северным широтам.

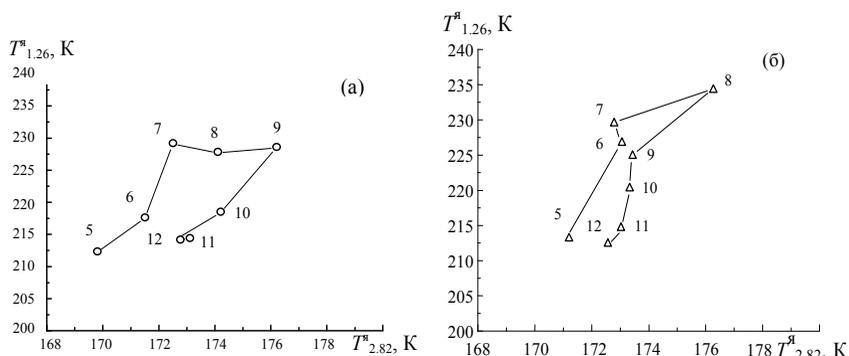


Рис. 4. Годовые траектории яркостной температуры на длинах волн 1,26 и 2,8 см в области D Северной Атлантики: (а) 2005 г.; (б) 2010 г. Цифры на рисунке – месяцы года

По нашим оценкам, соотношение площадей радиояркостных петель в этой зоне Северной Атлантики, эквивалентное, интегральному (годовому) потоку тепла в системе океан-атмосфера) в 2010-ом году по сравнению с 2005 г. снизилось в 1,7 раза. Возможное объяснение этому значительному контрасту тепловых и СВЧ-радиационных характеристик между 2010 г. и 2005 г. в области D – разлив нефти в Мексиканском заливе в апреле 2010 г. Заметим, что этот год заметно отличается от ординарного (мало отличающегося от среднеклиматических норм) 2005-го года в данной области Северной Атлантики по своим тепловым и радиояркостным характеристикам.

## Заключение

На основе данных 24-летних спутниковых СВЧ-радиометрических измерений выявлено возрастание среднемесячных значений общего содержания водяного пара в атмосфере в Гольфстримской (на 1,5°C), Ньюфаундлендской (1,1°C) и Норвежско-Гренландской (1°C) областях Северной Атлантики, характеризующихся значительной интенсивностью энергообмена между океаном и атмосферой. Современные оценки содержания водяного пара над глобальным океаном подтверждают этот тренд, отличаясь от приведенных нами значений в локальных областях Северной Атлантики, меньшими значениями. Здесь, вероятно, играет роль сглаживание эффектов влияния этих динамичных и контрастных областей Северной Атлантики при их распространении на акватории всего Мирового океана.

Обнаружено заметное снижение интенсивности теплообмена между океаном и атмосферой в 2010-ом году в Ньюфаундлендской энергоактивной области Северной Атлантики. Весной этого года наблюдались интенсивные нефтяные разливы в Мексиканском заливе и сильная летняя засушливость на европейской территории России.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гранков А.Г., Мильшин А.А., Солдатов В.Ю., Шелобанова Н.К. Архивы микроволновых, океанографических и метеорологических данных в зонах возникновения тропических ураганов // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2012. № 5. С. 107–124.
2. Гранков А.Г., Мильшин А.А. Взаимосвязь радиоизлучения системы океан-атмосфера с тепловыми и динамическими процессами на границе раздела. М.: Физматлит, 2004. 165 с.
3. Гранков А.Г., Мильшин А.А., Новичихин Е.П. Радиоизлучение системы океан-атмосфера в ее энергоактивных зонах. Saarbrucken: Lambert Academic Publishing, 2016, 314 с.
4. Лаппо С.С., Гулев С.К., Рождественский А.Е. Крупномасштабное тепловое взаимодействие в системе океан-атмосфера и энергоактивные области Мирового океана. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 336 с.
5. Grankov A.G., Mil'shin A.A. Microwave radiation of the ocean-atmosphere: boundary heat and dynamic interaction (second edition). Heidelberg: Springer, 2010. 193 p.
6. Mieruch S, Schroder M, Noltz S, Schulz J.S. Comparison of decadal global water vapor changes derived from independent satellite time series // J. Geophys. Res., 2014. P. 1–11.

## REFERENCES

1. Grankov A.G., Milshin A.A., Soldatov V.Yu., Shelobanova N.K., Arkhivy mikrovolnovykh, okeanograficheskikh i meteorologicheskikh dannykh v zonakh vznikhoveniya tropicheskikh uraganov (Systematization of the archival microwave data, oceanographic and meteorological data in tropical zones where hurricanes are beginning), Problemy okruzhayushchei sredy i prirodnykh resursov, 2012, No. 5, pp. 107–124.

2. Grankov A.G., Milshin A.A. Vzaimosvyaz' radioizlucheniya sistemy okean-atmosfera s teplovymi i dinamicheskimi protsessami na granitse razdela (Microwave Radiation of the Ocean-Atmosphere: Boundary Heat and Dynamic Interaction). Moscow: Fizmatlit, 2004. 165 p.
3. Grankov A.G., Milshin A.A., Novichikhin E.P. Radioemission of the system ocean-atmosphere in the energy active zones. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2016. 314 p.
4. Grankov A.G., Milshin A.A. Microwave radiation of the ocean-atmosphere: boundary heat and dynamic interaction (second edition). Heidelberg: Springer, 2010. 193 p.
5. Lappo S.S., Gulev S.K., Rozhdestvenskii A.E. Krupnomasshtabnoe teplovoe vzaimodeistvie v sisteme okean-atmosfera i energoaktivnye oblasti Mirovogo okeana (Large-scale heat interaction in the ocean-atmosphere system and energy-active areas of the World Ocean). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1990. 336 p.
6. Mieruch S, Schroder M, Noltz S, Schulz J.S. Comparison of decadal global water vapor changes derived from independent satellite time series. J. Geophys. Res., 2014. pp. 1–11.