

# ЗАГРЯЗНЕНИЕ И ОХРАНА ВОД СУШИ, МОРЕЙ И ОКЕАНОВ

УДК 502.51

## АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ АТМОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ И ПОЛИГОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В ТРОПИЧЕСКИХ ШИРОТАХ ОКЕАНА

Д-р физ.-мат. наук **А.Г. Гранков**, **А.А. Мильшин**,  
канд. физ.-мат. наук **Е.П. Новичихин**, **Н.К. Шелобанова**,  
канд. физ.-мат. наук **В.Ю. Солдатов**  
(Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН)  
e-mail: agrankov@ms.ire.rssi.ru

## ALGORITHM FOR THE DETERMINATION OF VERTICAL DISTRIBUTION OF ATMOSPHERIC TEMPERATURE AND MOISTURE BASING ON THE SATELLITE DATA AND ON-SITE MEASUREMENTS IN TROPICAL LATITUDES OF THE OCEAN

**A.G. Grankov, A.A. Milshin, E.P. Novichikhin,  
N.K. Shelobanova, V.Yu. Soldatov**

**Ключевые слова:** тропический циклон, алгоритм, температура, обнаружение, атмосфера, влажность.

**Keywords:** tropical cyclone, algorithm, temperature, detection, atmosphere, moisture.

Разработан алгоритм определения вертикального распределения температуры и влажности атмосферы в районах формирования тропических циклонов. Алгоритм основывается на сочетании данных метеорологических измерений в приземном слое воздуха (полигон NOAA TAO/TRITON) и данных одновременных спутниковых измерений радиометра SSM/I в миллиметровом и сантиметровом участках СВЧ-диапазона. Обсуждены вопросы повышения надежности обнаружения моментов зарождения тропических циклонов. Данная работа выполнена по Госзаданию № 0030-2019-0008.

The algorithm of determination of vertical distribution of the temperature and moisture in the atmosphere in the regions of forming the tropical cyclone is developed. This algorithm combines in one the data of meteorological measurements in the near-surface atmosphere at the NOAA polygon TAO/TRITON and the data of synchronous satellite measurements derived from the SSM/I radiometer at the millimeter and centimeter pieces at the microwave range of wavelengths. The questions of reliability increase for the detection of moments when tropical cyclone is began.

## Постановка задачи

Анализ высотного распределения температуры и влажности воздуха в атмосфере представляет интерес при анализе возможных факторов возникновения тропических циклонов (ТЦ). Эти характеристики формируются, прежде всего, за счет влияния горизонтального переноса тепла и влаги над океанами, который имеет громадный энергетический потенциал [1-5]. Например, в средних широтах Северной Атлантики, подверженных регулярному воздействию циклонов [4,5], этот фактор определяет интенсивность вариаций тепловых (термодинамических) и радиотепловых (СВЧ-радиационных) характеристик системы "океан-атмосфера" (СОА) и их взаимосвязь [3].

До настоящего времени исследования взаимосвязи интенсивности собственно СВЧ-излучения (радиояркой температуры) и параметров СОА в нижних (тропических) широтах практически не проводились. Основное внимание во многих исследованиях было обращено на энергоактивные зоны Северной Атлантики (Гольфстримкая, Ньюфаундлендская, Норвежско-Гренландская), определяющих погодные условия и климатические тенденции на территории Европы и на европейской части России. Основой для проведения данного исследования послужила доступность архивных данных судовых экспериментов НЬЮФАЭКС-88 и АТ-ЛАНТЭКС-90, полученных в рамках программы "РАЗРЕЗЫ"[3], а мотивом - сильная отзывчивость радиояркой температуры СОА к вариациям температуры и влажности атмосферы, которая проявляется наиболее отчетливо во время прохождения среднеширотных циклонов в районе Гольфстримского и Северо-Атлантического течений. Наблюдаемые в это время вариации температуры и влажности приводной атмосферы составляют десятки градусов Цельсия и миллибар, соответственно, а радиояркие контрасты - десятки градусов Кельвина [3], что намного превышает порог чувствительности судовых и спутниковых приборов и позволяет надежно регистрировать такие изменения в СОА.

В данной статье предложен и апробирован алгоритм восстановления зависимостей температуры ( $T_a$ ) и влажности ( $p$ ) воздуха от высоты ( $h$ ) в тропических широтах океана, реализованный путем сопоставления результатов моделирования радиояркой температуры СОА на основе данных измерений приземных значений этих параметров  $T_a(0)$  и  $p(0)$  буйковыми (островными) станциями в приводном 10-метровом слое атмосферы и данных спутниковых СВЧ-радиометрических измерений. Источником информации о наземных данных является американский Центр - National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA); в качестве источника спутниковых данных используются результаты регулярных измерений радиояркой температуры системы, полученных с помощью радиометра SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager) метеорологических спутников, созданных в рамках метеорологической программы министерства обороны США (Defense Meteorological Satellite Program - DMSP).

Обширная сеть метеорологических станций, в частности, станций полигона ТАО/TRITON в Тихом и Атлантическом океанах, обеспечивают измерения лишь параметров поверхности океана и приводного слоя атмосферы [6-10]. Метеорологические средства наблюдений этих станций не в состоянии дать сведения о температуре и влажности воздуха и их вертикальном распределении в более высоких слоях атмосферы (несколько километров), где формируются характеристики соб-

ственного СВЧ-излучения. Такая информация может быть получена при сочетании данных буйковых (станционных) измерений с данными спутниковых (дистанционных) СВЧ-радиометрических измерений, которые позволяют получить сведения о температурно-влажностных характеристиках атмосферы в различных ее слоях.

Заметим, что спутниковые СВЧ-радиометрические методы дают возможность определить интегральные (усредненные по всей толще) характеристики атмосферы, такие как интегральное поглощение радиоволн в СВЧ-диапазоне, полное влагосодержание атмосферы, ее энтальпию, в то время как предложенный здесь алгоритм позволяет оценить эти характеристики на различных горизонтах (10, 100, 1000, 10000 метров, например) благодаря его модельному блоку, который учитывает вертикальное распределение температуры и влажности атмосферы.

Спутниковый блок алгоритма представляет собой компьютерные программы расчета радиояркостных температур  $T^*$  COA, измеряемой радиометром SSM/I спутников DMSP для ячеек  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  на длинах волн 0.35, 0.81, 1.35, 1.58 см на вертикальной и горизонтальной поляризациях на протяжении последних 20-ти лет.

В настоящее время нами разработаны компьютерные программы обработки данных СВЧ-радиометрических измерений радиометра AMSR-E спутника EOS-Aqua применительно к условиям возникновения ТЦ.

Получены некоторые результаты использования алгоритма для ряда островных (береговых) станций, расположенных в районе южной оконечности полуострова Флорида (Флоридский пролив) во время прохождения мощного ТЦ Катрина в августе 2005г. В настоящее время анализируются возможности применения Алгоритма для изучения других ТЦ, причем не только для определения параметров COA, являющихся индикаторами прохождения тропических циклонов (на основе архивных, исторических данных), но и для определения тех ее параметров, которые могут служить предикторами (предвестниками) возникновения новых ТЦ, преимущественно в тех зонах океана, где ранее тропические циклоны зарождались.

### **Идея и методика решения задачи**

Искомые зависимости  $T_a(h)$  и  $\rho(h)$  находятся в виде экспоненциальных функций  $T_a(h)=T_a(0)\exp(-\kappa_t h)$ ;  $\rho(h)=\rho(0)\exp(-\kappa_\rho h)$ , обеспечивающих минимальную среднеквадратическую разность (невязку) между измеренными спектральными и поляризационными каналами радиометра SSM/I значениями радиояростной температуры COA  $T^*$  и их модельными оценками. Знание зависимостей  $T_a(h)$  и  $\rho(h)$ , а точнее, коэффициентов  $\kappa_t$  и  $\kappa_\rho$ , позволяет дополнить и уточнить результаты расчетов СВЧ-излучательных характеристик COA, полученных на основе данных измерений океанографических и метеорологических параметров системы с помощью буйковых станций. Так как радиометр SSM/I представляет собой многоканальную измерительную систему (табл. 1), то данные ее измерений достаточны для определения коэффициентов  $\kappa_t$  и  $\kappa_\rho$ , необходимых для восстановления зависимостей  $T_a(h)$  и  $\rho(h)$  над океанами.

**Характеристики СВЧ-радиометра SSM/I [5].**

Частота, ГГц	19,35	22,235	37	85,5
Длина волны, см	1,55	1,35	0,81	0,35
Поляризация (V/H)*	V, H	V	V, H	V, H
Обозначение	19,35V(H)	22,2V	37V(H)	85,5V(H)
Угол зондирования, гр.	53			
Пространственное разрешение, км	43 x 69	40 x 60	29 x 37	13 x 15
Чувствительность, градусы Кельвина	0,7	0,7	0,4	0,8

\*V (vertical) - вертикальная поляризация; \*H (horizontal) - горизонтальная поляризация.

С помощью полученных зависимостей рассчитывается погонное и интегральное поглощение для всех частот в слоях атмосферы до высот  $h = 10, 100, 1000, 10000$  м, а также интегральное влагосодержание атмосферы в этих слоях, которое играет исключительную роль в теплообмене океана и атмосферы в тропических широтах за счет скрытого тепла, содержащегося в водяном паре атмосферы.

По этим данным вычислены значения радиояркостной температуры COA с помощью известной плоско-слоистой модели излучения [2], в соответствии с которой радиояркостная температура COA складывается из 3-х компонент:

- радиояркостная температура восходящего излучения океана, ослабленного поглощением в атмосфере;
- радиояркостная температура прямого (восходящего) излучения атмосферы;
- радиояркостная температура нисходящего излучения атмосферы, переотраженного от водной поверхности.

Радиояркостная температура восходящего излучения и коэффициент отражения поверхности океана зависят от термодинамической температуры его поверхности, степени шероховатости и интенсивности пенообразований, связанными со скоростью приводного ветра (ветра на высоте  $h = 0$  м) на различных горизонтах на различных горизонтах (0–10 м); их расчет выполнен с помощью радиационной модели, основанной на систематизации теоретических и экспериментальных данных, приведенных в [2,6,7]. Яркостная температура прямой и переотраженной компонент атмосферы определяется поглощением в водяном паре и молекулярном кислороде атмосферы, которое зависит от температуры, влажности, давления воздуха и их вертикального распределения; соответствующие оценки получены на основе приведенных в [2] соотношений. Эти модельные соотношения устойчивы, они повторяются на различных пространственно-временных масштабах в Северной Атлантике [1,3].

**Результаты использования алгоритма**

На основе созданного алгоритма получены результаты оценки влияния воздействия мощного ТЦ Катрина (август 2005г.) в районе станции SMKF1 Флоридского пролива (рис.1 и 2).

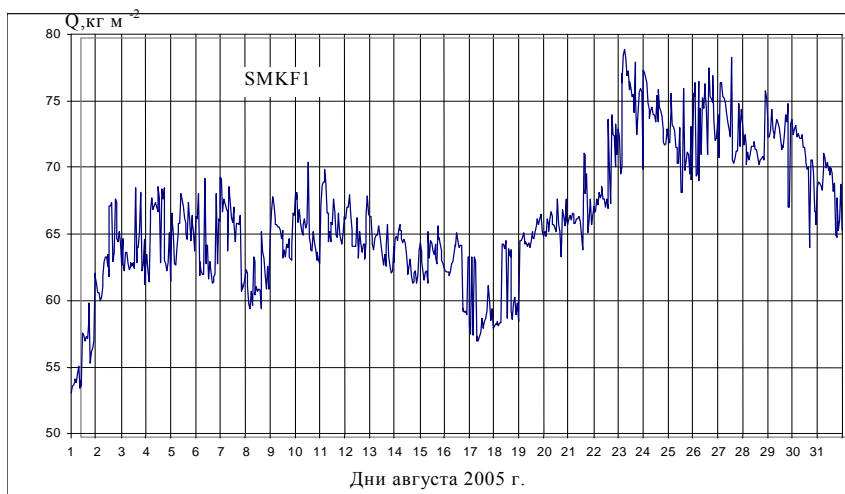


Рис. 1. Интегральное влагосодержание атмосферы  $Q$  ( $\text{кг/м}^2$ ) в зоне метеорологической станции SMKFI ( $24^{\circ}37'36''\text{N}$ ,  $81^{\circ}06'36''\text{W}$ ) в августе 2005 г.

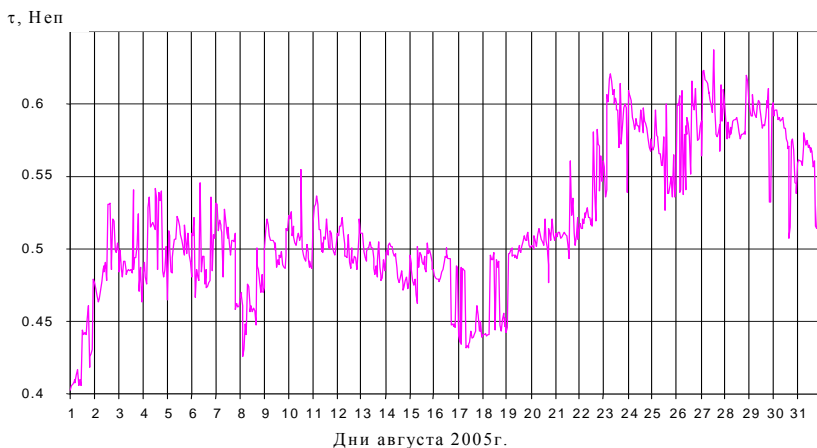


Рис. 2. Распределение показателя поглощения  $\tau$  электромагнитного излучения в слое атмосферы в августе 2005 г. в зоне метеорологической станции SMKFI ( $24^{\circ}37'36''\text{N}$ ,  $81^{\circ}06'36''\text{W}$ ).

Видно, что поведение приведенных на рис. 1 и 2 кривых согласуется с ранее полученными результатами оценки состояния СОА, полученными с помощью индикатора неустойчивости [11]. Из рис. 3 видно, что между индикатором неустойчивости и показателями теплообмена в СОА перед зарождением урагана Катрина существует корреляция [8].

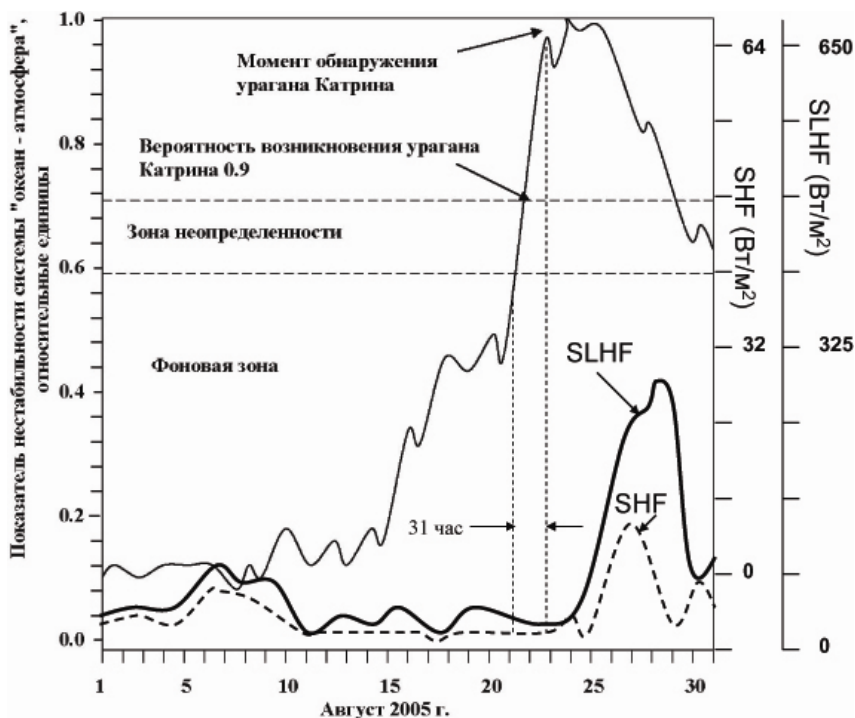


Рис. 3. Сравнительный анализ индикатора неустойчивости и тепловых потоков в динамике СОА в августе 2005 г. Обозначения: SHF (surface heat flux)- поверхностный поток физической (ощутимой) теплоты, SLHF (surface latent heat flux) - поверхностный поток скрытой теплоты.

### Заключение. Выводы:

Полученный здесь результат показывает, что перед зарождением тропического циклона происходит резкая смена фазового состояния СОА. Обнаружение этого момента путем диагностики показателей влагосодержания атмосферы и ослабления электромагнитного излучения в атмосфере может служить показателем возникновения тропического циклона. Однако, для более надежных выводов необходимо провести подобные расчеты для других ситуаций зарождения тропических циклонов и попытаться рассмотреть более детальную шкалу фазовых переходов в СОА.

Именно полное влагосодержание атмосферы, определяемое со спутников в линии резонансного поглощения водяного 1, 35 см позволило оценить реакцию параметров СОА на зарождение и прохождение тропического циклона «Катрина». Представленный на рис. 1 эффект нарастания градиента изменчивости влагосодержания атмосферы перед зарождением циклона позволяет предположить, что для повышения эффективности алгоритма обнаружения фазовых переходов в СОА необходимо выполнить следующие исследования:

- расширить индикатор нестабильности [11] за счет учета в нем показателей интегрального влажосодержания атмосферы и ослабления электромагнитного сигнала в слое атмосферы;
- провести серию оценок нестабильности СОА в зонах уже прошедших тропических циклонов;
- рассчитать поведение показателя нестабильности СОА по трассам ряда тропических ураганов с выделением их категорий;
- оценить важность различных компонент индикатора нестабильности СОА путем их исключения из рассмотрения.

### Список литературы

1. Арманд Н.А., Гранков А.Г., Мильшин А.А., Лаппо С.С., Гулев С.К. Использование данных одновременных спутниковых СВЧ-радиометрических и судовых измерений для исследования процессов взаимодействия океана и атмосферы в Северной Атлантике // *Океанология*. – 2004. – 44. - №1. – С. 49-61.
2. Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т. Радиоизлучение Земли как планеты. - М.: Наука. - 1974. - 188 с.
3. Гранков А.Г., Мильшин А.А. Взаимосвязь радиоизлучения системы океан-атмосфера с тепловыми и динамическими процессами на границе раздела. - М.: Физматлит. – 2004. - 168 с.
4. Гулев С.К., Колинко А.В, Лаппо С.С. Синоптическое взаимодействие океана и атмосферы в средних широтах. - СПб.: Гидрометеиздат. - 1994. - 320 с.
5. 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.
6. Райзер В.Ю., Черный И.В. Микроволновая диагностика поверхностного слоя океана. С.-П.: Гидрометеиздат, 1994. - 231 с.
7. Шутко А.М. СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. - М.: Наука. -1986.- 190 с.
8. Drennan W.M., Zhang J.A., French J.R., VeCormick C., and Black P.G. Turbulent fluxes in the hurricane boundary layer. Part II: Latent heat flux // *Journal of Atmospheric Sciences*. -2007. – 64. - No.4. - P. 1103-1115.
9. Hollinger P H, Peirce J L, Poe G A (1990) SSM/I instrument evaluation // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sensing*. - № 28. – P. 781-790.
10. McPhaden M.J. Tropical atmosphere ocean project (<http://pmel.noaa.gov/tao/>)
11. Sukov A.I., Soldatov V.Yu., Krapivin V.F., Cracknell A.P., and Varotsos C.A. A Sequential analysis method for the prediction of tropical hurricanes // *International Journal of Remote Sensing*. – 2008. – 29. - No.9. – P. 2787-2798.

### REFERENCES

1. Armand N.A., Grankov A.G., Milshin A.A., Lappo S.S., Gulev S.K. Using the data of synchronous satellite SHF-radiometric and ship's measurements for research of interaction processes between the ocean and Northern Atlantic // *Oceanology*, 2004. V.44. Nr.1. P. 49-61.
2. Basharinov A.E., Gurvich A.S., Egorov S.T. Radio-wave radiation of the Earth as planet. M.: Science, 1974. 188 pp.

3. Grankov A.G., Milshin A.A. Interrelation of the ocean-atmosphere system radio-wave radiation with heat and dynamic processes on the boundary. M.: Phisimatlit, 2004. 168 pp.
4. Gulev S.K., Kolinko A.V., Lappo S.S. Synoptical interaction of the ocean and atmosphere at middle latitudes. Sankt-Petersburg: Hydrometeoizdat, 1994. 320 pp.
5. Lappo S.S., Gulev S.K., Rogdestvensky A.E. Large-scale heat interaction at the ocean-atmosphere system and energy-active regions of the World Ocean. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1990. 336 pp.
6. Raiser B.Yu., Cherny I.V. Microwave diagnostics of the ocean surface layer. Sankt-Petersburg: Hydrometeoizdat, 1994. 231 pp.
7. Shutko A.M. SHF-radiometry of water surface and soils. M.: Science, 1986. 190 pp.
8. Drennan W.M., Zhang J.A., French J.R., VcCormick C., and Black P.G. Turbulent fluxes in the hurricane boundary layer. Part II: Latent heat flux // Journal of Atmospheric Sciences. -2007. – 64. - No.4. - P. 1103-1115.
9. Hollinger P H, Peirce J L, Poe G A (1990) SSM/I instrument evaluation // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sensing. - № 28. – P. 781-790.
10. McPhaden M.J. Tropical atmosphere ocean project (<http://pmel.noaa.gov/tao/>)
11. Sukov A.I., Soldatov V.Yu., Krapivin V.F., Cracknell A.P., and Varotsos C.A. A Sequential analysis method for the prediction of tropical hurricanes // International Journal of Remote Sensing. – 2008. – 29. - No.9. – P. 2787-2798.