

Алгоритм определения вертикального распределения температуры и влажности атмосферы и результаты его использования на примере ТЦ Катрина

А.Г. Гранков, А.А. Мильшин, Е.П. Новичихин, Н.К. Шелобанова

*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники РАН,
141190 Фрязино Московской обл., пл. Введенского 1
E-mail: agrankov@ms.ire.rssi.ru*

Разработан алгоритм определения вертикального распределения температуры и влажности атмосферы, основанный на сопоставлении данных дистанционных измерений яркостной температуры системы "поверхность океана-атмосфера" спутниковым радиометром SSM/I в миллиметровой и сантиметровой областях СВЧ-диапазона и результатов ее моделирования на основе данных прямых метеорологических измерений в приводном слое атмосферы и предположении об экспоненциальном убывании температуры и влажности воздуха с высотой. Алгоритм апробирован на примере мощного тропического циклона КАТРИНА (Katrina) во Флоридском проливе в августе 2005 г.

Ключевые слова: спутниковый СВЧ-радиометрический метод, (радио)яркостная температура, буйковая станция, система "океан-атмосфера", тропический циклон.

Постановка задачи

Анализ вертикального распределения температуры и влажности воздуха в атмосфере представляет, на наш взгляд, интерес при анализе возможных факторов возникновения тропических циклонов (ТЦ) – ураганов.

Эти характеристики формируются, прежде всего, за счет влияния горизонтального переноса тепла и влаги над океанами, который имеет огромный энергетический потенциал. Например, в средних широтах Северной Атлантики, подверженных регулярному воздействию циклонов [1, 2], этот фактор определяет интенсивность вариаций тепловых (тепловых) и радиотепловых (СВЧ-радиационных) характеристик системы "океан-атмосфера" (СОА) и их взаимосвязь [3].

До настоящего времени нами не проводились исследования взаимосвязи интенсивности собственного СВЧ-излучения (радиояркостной температуры) и параметров СОА в нижних (тропических) широтах. Упор первоначально был сделан на энергоактивные зоны Северной Атлантики (Гольфстримкая, Ньюфаундлендская, Норвежско-Гренландская), определяющих погодные условия и климатические тенденции на территории Европы и на европейской части России. Эти зоны характеризуются сильной чувствительностью радиояркостной 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 радиояркостные контрасты – десятки градусов Кельвина [3], что намного превышает порог чувствительности судовых и спутниковых приборов и позволяет надежно регистрировать такие изменения в СОА.

В статье предложен и апробирован алгоритм (далее – Алгоритм) восстановления зависимостей температуры (T_a) и влажности (e) воздуха от высоты (h) в тропических широтах

океана, реализованный путем сопоставления результатов моделирования радиояркостной температуры СОА на основе данных измерений приводных значений этих параметров $T_a(0)$ и $e(0)$ буйковыми (островными) станциями в приводном 10-метровом слое атмосферы и данных спутниковых СВЧ-радиометрических измерений. Источником информации о наземных данных является американский Центр – National Data Buoy Center (NDBC); в качестве источника спутниковых данных используются результаты регулярных измерений радиояркостной 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 обеспечивает измерения лишь параметров поверхности океана и приводного слоя атмосферы (<http://www.ndbc.noaa.gov/>). 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 собственного 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 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 СОА, измеряемых радиометром SSM/I спутников DMSP для ячеек $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ на длинах волн 0.35 см (85.7 ГГц), 0.81 см (37 ГГц), 1.58 см (19 ГГц) на вертикальной и горизонтальной поляризациях, 1.35 см (22.235 ГГц) на вертикальной поляризации 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 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 2005 г. В настоящее время анализируются возможности применения Алгоритма для изучения других тропических циклонов, причем не только для определения параметров СОА, 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 температуры $T_a(h)$ и влажности $e(h)$ атмосферы и находятся в виде экспоненциальных функций $T_a(h) = T_a(0) \exp(-\kappa_T h)$; $e(h) = e(0) \exp(-\kappa_e h)$, обеспечи-

вающих минимальную среднеквадратическую разность (невязку) между измеренными спектральными и поляризационными каналами радиометра SSM/I значениями радиоярковой температуры COA $T^{\text{Я}}$ и их соответствующими модельными оценками. Знание зависимостей $T_a(h)$ и $e(h)$, а точнее, коэффициентов k_T и k_e , позволяет дополнить и уточнить результатов 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 (см. табл. 1; это значит, что), данные ее СВЧ-радиометрических измерений достаточны для определения коэффициентов k_T и k_e , необходимых для восстановления зависимостей $T_a(h)$ и $e(h)$ над океанами.

Таблица 1. Характеристики СВЧ-радиометра SSM/I [4]

Частота, ГГц	19.35	22.235	37.0	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, градусы	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 $h = 10, 100, 1000, 10000$ 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 радиоярковой температуры COA с помощью известной плоско-слоистой модели излучения [5], в соответствии с которой, радиоярковая температура COA складывается из 3-х компонент:

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

Радиоярковая температура восходящего излучения и коэффициент отражения поверхности океана зависят от термодинамической температуры его поверхности, степени шероховатости и интенсивности пенообразования, связанными со скоростью приводного ветра (ветра на высоте $h = 0$ метров) на различных горизонтах (0–10 м); их расчет выполнен с помощью радиационной модели, основанной на систематизации теоретических и экспериментальных данных, приведенных в [5-7]. Ярковая 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 [5] соотношений.

На основе созданного алгоритма нами получены результаты оценки *влияния* воздействия мощного ТЦ Катрина (август 2005г.) в районе станции SMKF1 Флоридского пролива. Далее, в процессе работы над нашим проектом МНТЦ 3827, мы планируем рассмотреть критерии (предпосылки) *возникновения* циклонов (ураганов) в тропических широтах с помощью спутниковых СВЧ-радиометрических средств, используя данные стационарных (морских) и одновременных спутниковых СВЧ-радиометрических измерений в районе зарождения ТЦ Umberto, который лишь немного уступает по своей интенсивности ТЦ Katrina. Отличительное свойство ТЦ Umberto - наличие морской станции NOAA 42019 у истоков зарождения этого урагана.

Результаты применения Алгоритма к ТЦ Катрина

В качестве опорной точки нами использована морская станция SMKF1 из арсенала NOAA; ближайшее расстояние между траекторией ТЦ Катрина и этой станцией составило ~120 км 26 августа 2005 г. в 12 часов дня, к этому моменту ураган прошел от места зарождения в районе Багамских островов расстояние около 800 км. В дальнейшем планируется изучить реакцию температурных, влажностных и СВЧ-радиационных характеристик СОА на прохождение ТЦ Катрина со станций LONF1, MLRF1, FWYF1, находящихся вблизи траектории циклона.

Рис. 1 и 2 иллюстрируют результаты использования Алгоритма в интервалы времени 26.08.2005 - предшествующем возникновению ТЦ Катрина .

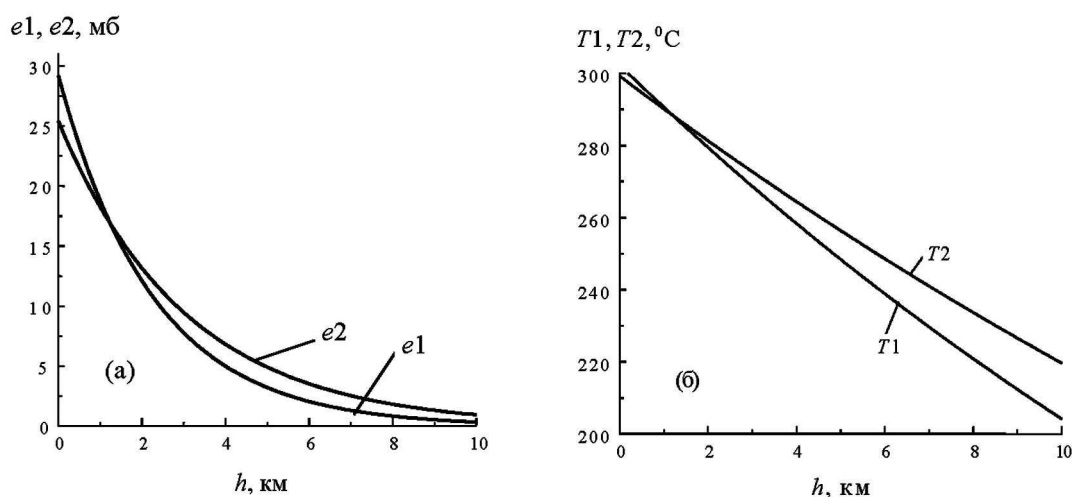


Рис.1. Вертикальное распределение влажности (а) и температуры (б) воздуха в тропосфере на станции SMKF1: e_1 , T_1 - до прихода ТЦ Катрина (21-26 августа 2005 г.); e_2 , T_2 - после прихода ТЦ Катрина (26-31 августа 2005 г.)

На рис. 1 (а, б) приведены, полученные с помощью Алгоритма оценки зависимости абсолютной влажности воздуха e (в миллибарах) и температуры T (в градусах Кельвина) районе расположения станции SMKF1: e_1 , T_1 - до прихода в эту точку ТЦ Катрина (21-26 августа 2005 г.); e_2 , T_2 - после прохождения ТЦ Катрина (26-31 августа 2005 г.). Здесь отчетливо наблюдаются контрасты температуры и влажности атмосферы во время прохождения ТЦ Катрина во Флоридском проливе на различных уровнях h в рамках принятой экспоненциальной зависимости температуры и влажности воздуха от высоты в тропосфе-

ре. Из иллюстрации видно, что вариации параметра T составляют около десяти градусов Кельвина (Цельсия), достигающие максимума на верхней границе тропосферы (10000 м), а вариации параметра e достигают 2 мб на высотах 3-6 км. Эти значения нами определены как наиболее контрастные - *наибольшие* в период, предшествующий возникновению ТЦ Катрина (21-26 августа 2005 г.), и на промежутке времени после его прохождения (26-31 августа 2005 г.).

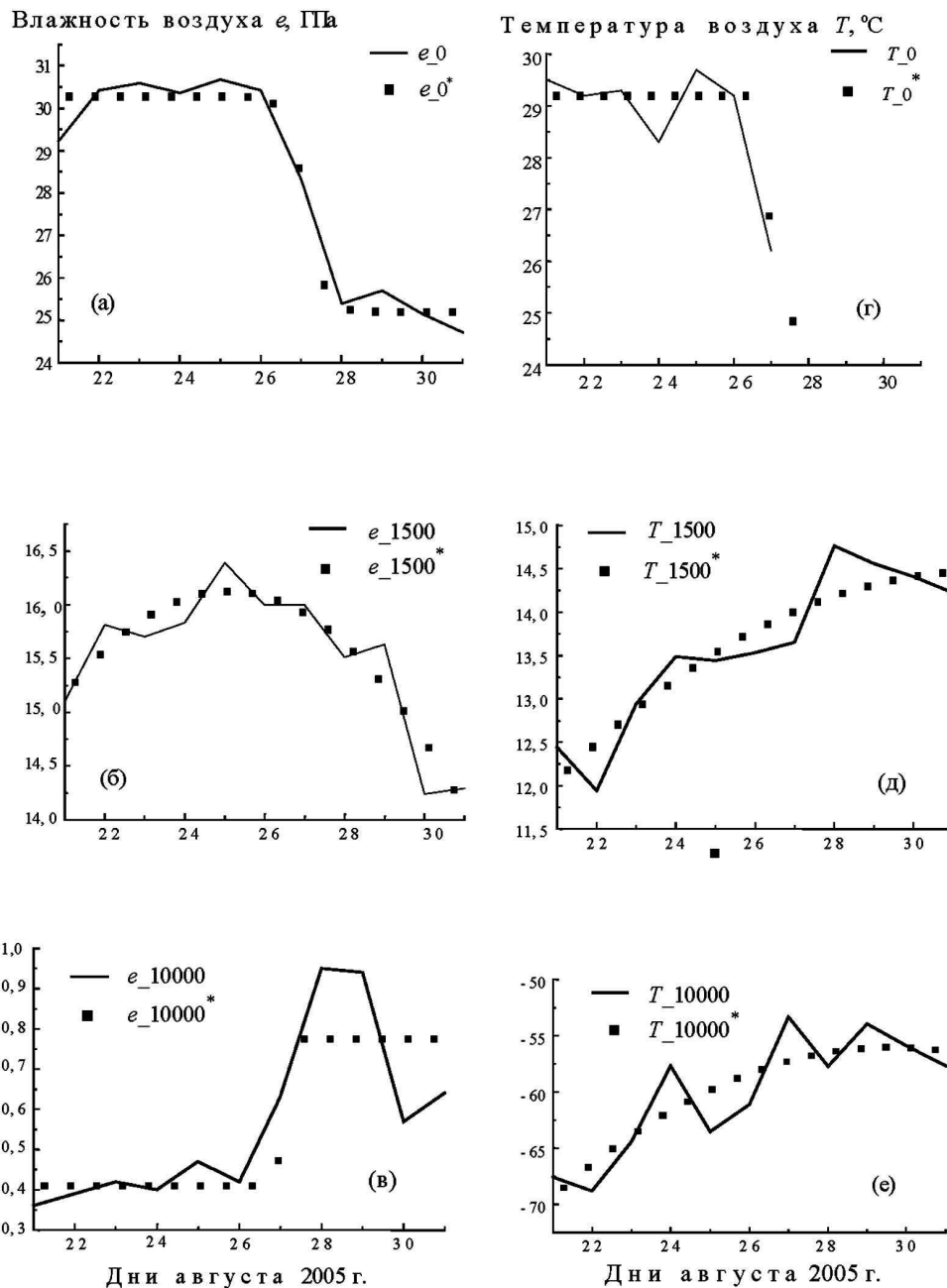


Рис.2. Вариации влажности e и температуры T воздуха на поверхности океана ($h = 0$), на верхней границе АПС ($h = 1500$ м, на верхней границе тропосферы ($h = 10000$ м) и их аппроксимации за период 21-31 августа 2005 г. на высотах 0 м (а, г), 1500 м (б, д), и 10000 м (в, е). Сплошные линии - данные Алгоритма, точечные данные - результаты их аппроксимации

На рис. 2 (а-е) представлены результаты использования разработанного алгоритма. Здесь представлены также результаты их аппроксимации, анализа вариаций влажности e и температуры воздуха T на различных атмосферных горизонтах в период 21-31 августа

2005 г., полученных с помощью подчеркивающие поведение этих характеристик атмосферы в эти дни. Здесь использованы штатные средства программы ORIGIN - Polynomial (аппроксимация плавных графиков (рис. 2а, в, г), и Sigmoidal - аппроксимация скачкообразных графиков (рис. 2б, д, е).

Из этой иллюстрации следует, что датчики станции SMKF1, удалены от траектории ТЦ Катрина на расстояние ~120 км и расположены на 800 км от очага возникновения циклона (Багмские острова. заметно реагируют на этот циклон, т.е. эта станция находится в зоне его влияния. Далее мы планируем изучить реакцию на прохождение ТЦ Катрина для других морских станций, находившихся под влиянием циклона ТЦ Катрина во Флоридском проливе - LONF1, MLRF1, FWYF1.

При этом, реакция параметров СОА проявляется по разному на различных атмосферных горизонтах, откуда следует необходимость оценивания параметров СОА не только на границе раздела СОА, но и различных уровнях атмосферы. Например, из рис.1 видно, что на высоте 1500 м (на верхняя граница атмосферного пограничного слоя - слой турбулентности), температура и влажность воздуха нечувствительны к прохождению ТЦ Катрина, в то время как на границе раздела в атмосфере данные Алгоритма для параметров $h = 0$ м и 10000 м эти данные измерений сильно меняются.

Выводы

Разработан и апробирован на примере ТЦ Катрина алгоритм определения вертикального распределения температуры и влажности воздуха в интервале высот 0 до 10000 метров основе моделирования контактных (прямых) данных и данных спутниковых СВЧ-радиометрических измерений.

Результаты работы могут служить в дальнейшем инструментом для анализа реакции параметров СОА на возбуждение тропических ураганов.

Литература

1. *Ланно С.С., Гулев С.К., Рождественский А.Е.* Крупномасштабное тепловое взаимодействие в системе океан-атмосфера и энергоактивные зоны мирового океана. Л.: Гидрометеиздат, 1990, 336с.
2. *Гулев С.К., Колинко А.В., Ланно С.С.* Синоптическое взаимодействие океана и атмосферы в средних широтах. С.-Петербург, 1994, 320с.
3. *Гранков А.Г., Мильшин А.А.* Взаимосвязь радиоизлучения системы океан-атмосфера с тепловыми и динамическими процессами на границе раздела. М.: Физматлит, 2004, 168с.
4. *Hollinger P.H., Peirce J.L., Poe G.A.* SSM/ Instrument evaluation. IEEE Trans. Geosci. Rem. Sensing. 1990. V. 28. №5. P. 781-790.
5. *Башиаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т.* Радиоизлучение Земли как планеты. М.: Наука. 1974. 188 с.
6. *Шутко А.М.* СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. М.: Наука. 1986, 190 с.
7. *Райзер В.Ю., Черный И.В.* Микроволновая диагностика поверхностного слоя океана. С.-П.: 1994. 231 с.

Algorithm of retrieving the vertical distribution of the atmosphere temperature and humidity and some results of its use for the tropical cyclone Katrina as the example

A.G. Grankov, A.A. Mil'shin, Je.P. Novichikhin, N.K. Shelobanova

*Fryazino branch of the Institute of Radioengineering and Electronics RAS,
141190 Fryazino Moscow Region, 1, ac.Vvedenskii Sq
E-mails: agrankov@ms.ire.rssi.ru*

Algorithm of retrieving the vertical distribution of the atmosphere temperature and humidity has been elaborated. It is based on comparison of the brightness temperature of the system "ocean surface-atmosphere" measured by satellite radiometer SSM/I at microwaves in the millimeter and centimeter wavelength ranges and its simulated estimates derived from direct meteorological measurements in the near-surface atmosphere and an assumption on exponentially vanishing with a height the air temperature and humidity. The algorithm was approved with the data of powerful tropical cyclone KATRINA in the Florida Strait in August 2005.

Keywords: satellite passive microwave radiometric method, (radio)brightness temperature, buoy station, system "ocean surface-atmosphere", tropical cyclone.