

## **Радиояркая температура как естественная характеристика теплового и динамического взаимодействия океана и атмосферы**

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

*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 141190 Фрязино Московской области, пл. Введенского, д. 1, E-mail: agrankov@inbox.ru*

*Демонстрируются возможности использования измеряемой со спутников интенсивности собственного СВЧ-излучения (яркостной температуры) в области резонансного поглощения радиоволн в водяном паре атмосферы в качестве непосредственной характеристики тепловых и динамических процессов на поверхности океана и в атмосфере. Рассмотрены некоторые подходы к усвоению данных спутниковых СВЧ-радиометрических измерений для локализации экстремальных явлений в системе океан-атмосфера.*

*It is demonstrated that, measured from satellites intensity of natural microwave radiation (brightness temperature) in the band of its resonant attenuation in atmospheric water vapor can be used as the immediate characteristic of heat and dynamic processes at the ocean surface and in the atmosphere. Some approaches to assimilation of the data of satellite microwave radiometric measurements are considered, which seem to be effective in localization of extreme events in the system ocean-atmosphere.*

### **Введение**

Проведенные в Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН совместно с Институтом океанологии им. П.П. Ширшова РАН и организациями Роскосмоса многолетние исследования показывают, что интенсивность собственного СВЧ-излучения можно рассматривать как неотъемлемое свойство (атрибут) СОА, подобно привычному для широкого круга специалистов тому факту, что интенсивность собственного теплового излучения системы в ИК-диапазоне является естественной (прямой) характеристикой ее радиационного баланса и его составляющих.

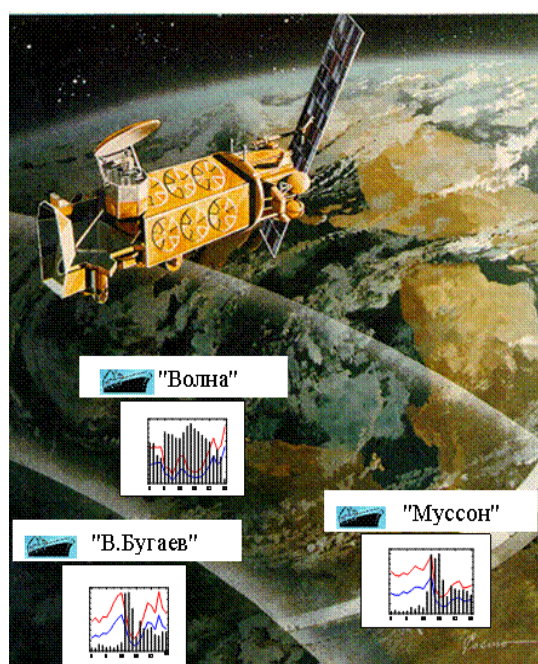
Впервые идея использования данных дистанционных СВЧ-радиометрических измерений для определения не только отдельных (парциальных) параметров Земли, но и интегральных (обобщенных) ее характеристик была предложена сотрудниками Института радиотехники и электроники (ИРЭ) Академии Наук Е. Реутовым и А. Шутко в конце 80-х годов. Ими была выдвинута гипотеза о существовании прямой связи между интенсивностью собственного радиотеплового излучения земной поверхности – радиояркой температурой с введенным А. Григорьевым и М. Будыко количественным понятием радиационного индекса сухости [1]. Впоследствии эта идея была подтверждена результатами многочисленных экспедиционных работ, проведенных ИРЭ в 80-е и 90-е годы с помощью оснащенных СВЧ-радиометрами авиадистанционных носителей в различных республиках СССР, а позднее и за рубежом. Эти результаты во многих отечественных и зарубежных работах, их итогом стала монография [2], вызывающая в настоящее время большой интерес, как у научных работников, так и у специалистов-прикладников в различных странах.

В дальнейшем эта концепция получила развитие для изучения взаимодействия океана и атмосферы спутниковыми СВЧ-радиометрическими методами. В основу данного направления легло развитие методов анализа тепловых и динамических процессов на границе раздела океана и атмосферы по данным измерений яркостной температуры системы океан-атмосфера с ИСЗ в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн [3].

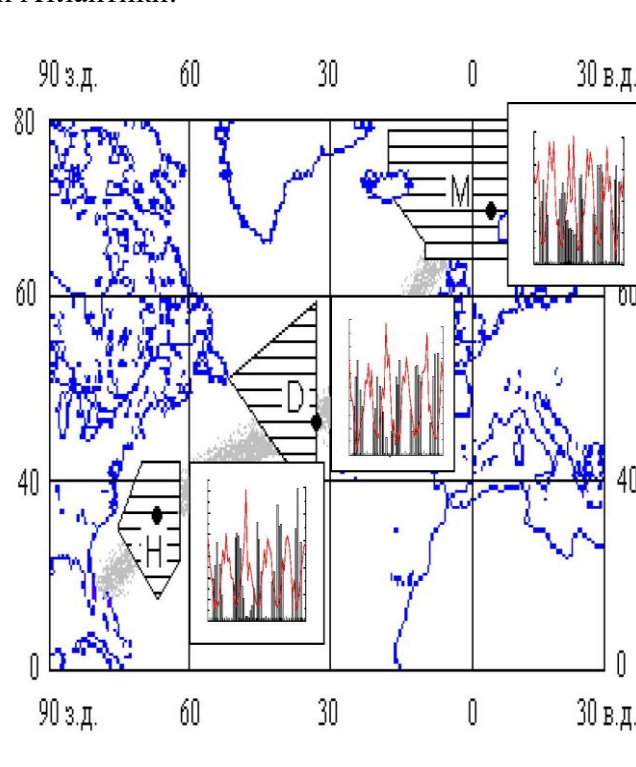
## Результаты, примеры

Ниже приведены отдельные результаты этих исследований, проведенных нами при сотрудничестве с Институтом океанологии (ИО) им. П.П. Ширшова РАН и организациями Роскосмоса. Некоторые из них включены в Годовые отчеты РАН за 1998, 2012 и 2014 гг.

1. Экспериментально подтверждена тесная связь интенсивности собственного СВЧ-излучения (яркостной температуры) СОА с вариациями вертикальных турбулентных потоков явного, скрытого тепла и импульса на синоптических, сезонных и климатических масштабах времени в Норвежской (М), Ньюфаундлендской (D) и Гольфстримской (H) областях Северной Атлантики.

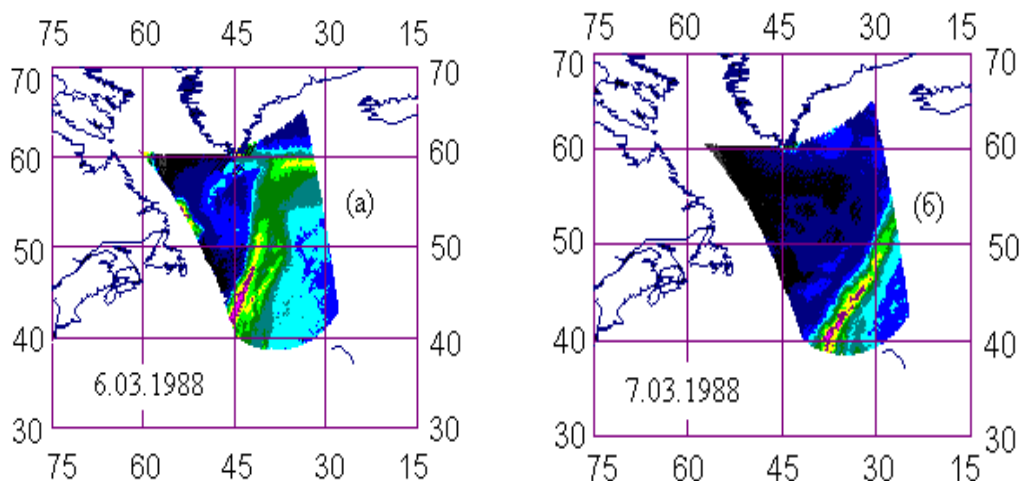


**Рис.1.** Яркостная температура, измеренная со спутника F-08 на длине волны излучения 1,35 см (верхние кривые), расчетные авиационные оценки (нижние кривые); оценки тепловых потоков (вертикальные столбики) для НИСП «Волна», «Муссон» и «В. Бугаев» в эксперименте АТЛАНТЭКС-90 (апрель 1990 г.)



**Рис.2.** Результаты сопоставления среднемесячных значений потоков суммарного тепла (кривые) и яркостной температуры (вертикальные столбики), измеренной с метеорологических ИСЗ серии DMSP на длине волны 1,35 см для областей М, D, H Северной Атлантики с 1988 по 1994 гг. Источниками данных о тепловых потоках служат известные архивы NCEP/NCAR

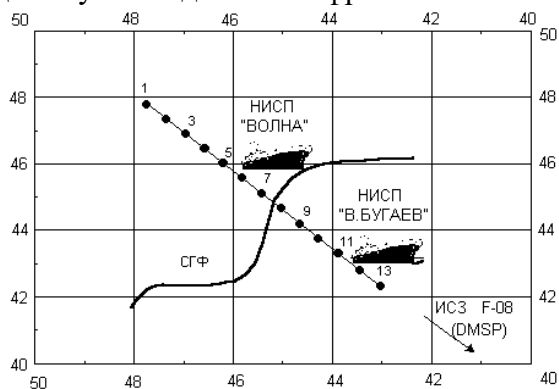
2. Данные спутниковых СВЧ-радиометрических измерений в области резонансного поглощения в водяном паре атмосферы (на длине волны 1,35 см) могут давать прямую информацию о пространственно-временной динамике передвижения атмосферных масс над океаном.



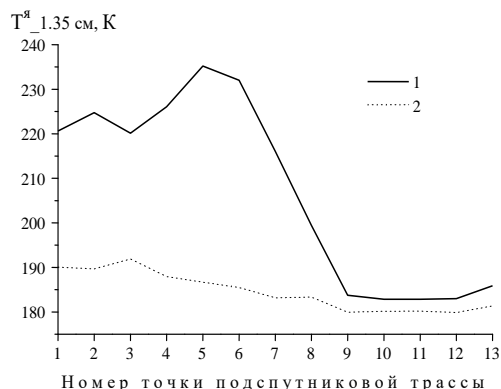
**Рис.3. Динамика полей яркостной температуры на длине 1,35 см в диапазоне изменения 180÷240 К по данным измерений спутника F-08 во время перемещения мощного циклона: (а) – 8 ч утра 6 марта 1988 г.; (б) – 8 ч утра 7 марта 1988 г.**

Приведенные иллюстрации позволяют сделать вывод о том, что по результатам спутниковых СВЧ-радиометрических измерений можно судить о направлении и скорости перемещения атмосферных фронтов. В данном случае можно сделать вывод о том, что в атмосферные массы перемещались в направлении Азорских островов со скоростью, оцениваемой приблизительно в 30 км/ч.

3. Данные спутниковых СВЧ-радиометрических измерений могут использоваться для изучения динамики фронтальных областей в океане при воздействии циклонов.



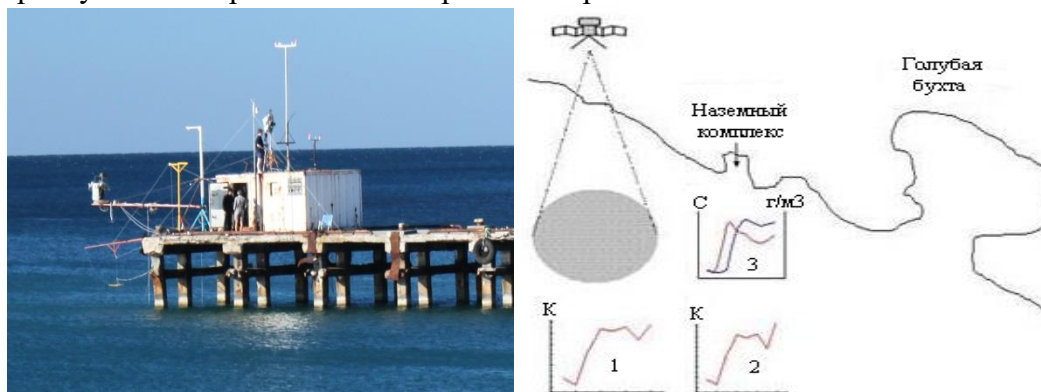
**Рис.4. Карта-схема спутниковых СВЧ-радиометрических и прямых судовых измерений в эксперименте НЬЮФАЭКС-88 в районе СГФ (субполярного гидрологического фронта) в Северной Атлантике в марте 1988 г. Ньюфаундленская энергоактивная область Северной Атлантики**



**Рис.5. Вариации яркостной температуры на длине волны 1,35 см по данным измерений спутника F-08: (1) до прихода циклона; (2) – после его прохождения. Точками обозначены спутниковые выборки. Заметен эффект сглаживания СВЧ-радиационных характеристик после прохождения фронта**

Приведенный пример свидетельствует о том, что спутниковые СВЧ-радиометрические измерения позволяют оперативно оценивать резкие изменения характеристик СОА во фронтальных зонах Северной Атлантики.

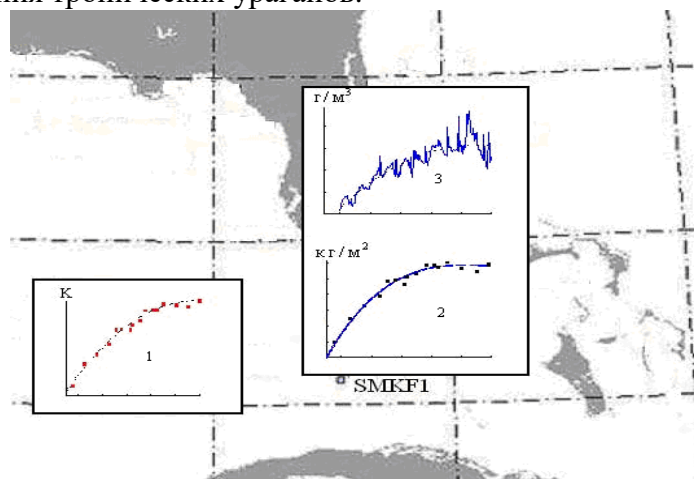
4. Результаты спутниковых СВЧ-радиометрических измерений могут быть полезными для исследования динамики характеристик системы водная поверхность-атмосфера в условиях приближения морских штормов.



**Рис.6.** Результаты одновременных СВЧ-радиометрических и метеорологических измерений в районе Голубой бухты Черного моря 22–30 сентября 2010 г. накануне прихода мощного морского шторма: 1 – яркостная температура на длине волны 1,35 см (в градусах Кельвина), измеренная со спутника EOS Aqua; 2 – яркостная температура атмосферы на длине волны 1,35 см (в градусах Кельвина), измеренная ориентированным вверх радиометром с пирса Геленджикского филиала ИО РАН; 3 – метеорологические измерения с пирса температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ) и влажности ( $\text{г}/\text{м}^3$ ) приводного воздуха

Из иллюстрации видно сходство характера реакции на приближение шторма температуры и влажности воздуха в приводном слое атмосферы на пирсе, а также яркостных температур СОА в резонансной области поглощения радиоволн в водяном паре атмосферы, независимо от способа спутниковых СВЧ-радиометрических измерений (сверху или снизу).

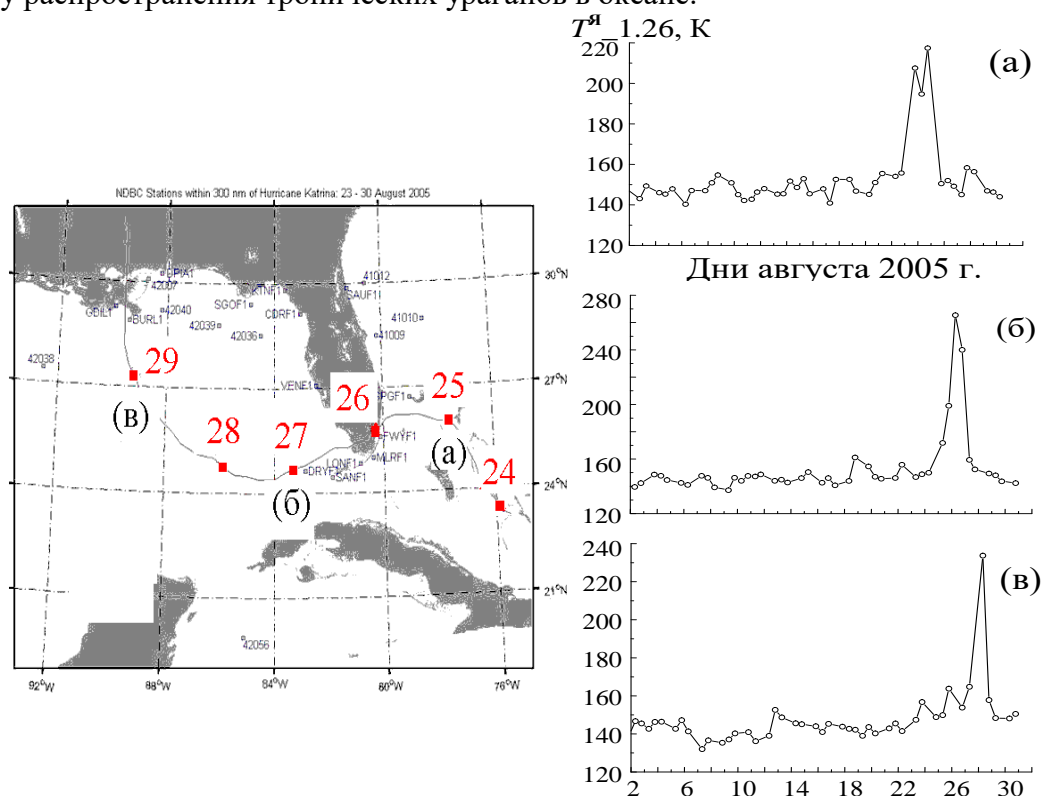
5. Результаты спутниковых СВЧ-радиометрических измерений могут использоваться для исследования динамики характеристик системы океан-атмосфера в условиях приближения тропических ураганов.



**Рис.7.** Результаты одновременных СВЧ-радиометрических измерений и метеорологических измерений во время прохождения тропического урагана Katrina во Флоридском проливе Мексиканского залива 18–28 августа 2005 г.: 1 – яркостная температура СОА на длине волны 1,26 см (в градусах Кельвина), измеренная со спутника EOS Aqua; 2 – общее влагосодержание атмосферы (в  $\text{кг}/\text{м}^2$ ), оцененное по данным спутниковых измерений; 3 – влажность приводного слоя атмосферы (в  $\text{г}/\text{см}^3$ ), измеренная с метеорологической станции SMKf1 (Sombrero Key)

Обнаружен эффект тепловой "накачки" атмосферы (т.е. аккумуляции скрытого тепла) в атмосферном водяном паре в период времени, предшествующий приближению урагана Katrina к станции SMKF1, который выражается в монотонном нарастании значений общего влагосодержания атмосферы, влажности воздуха в ее приводном слое, а также яркостной температуры COA в области резонансного поглощения радиоволн в водяном паре атмосферы.

б. С помощью данных регулярных СВЧ-радиометрических измерений яркостной температуры системы океан-атмосфера в резонансной области поглощения радиоволн в водяном паре атмосферы можно исследовать пространственную и временную динамику распространения тропических ураганов в океане.

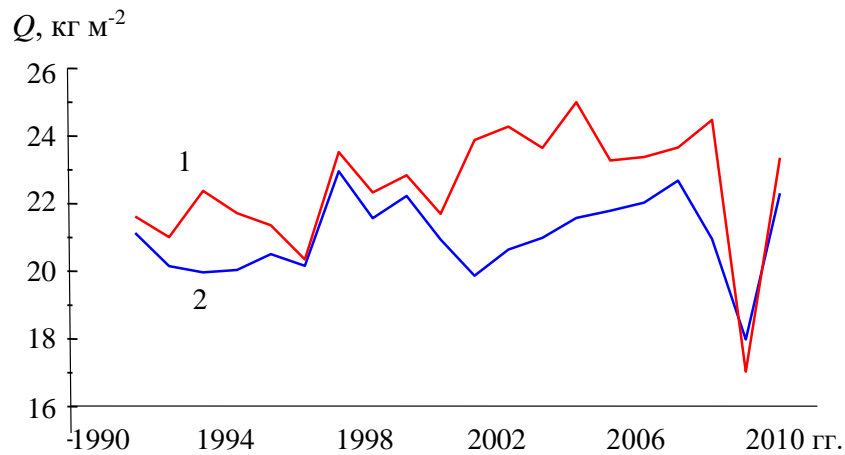


**Рис.8.** Траектория распространения тропического урагана Katrina в период 24–29 августа 2005 г. (рисунок слева). Вариации яркостной температуры COA на длине волны 1,26 см, измеренные со спутника EOS Aqua в различных точках траектории распространения урагана Katrina от очага его возникновения к южному побережью США: а) 26°с.ш., 78°з.д.; б) 25°с.ш., 83°з.д.; в) 27°с.ш., 89°з.д. (рисунок справа)

Из иллюстрации видно, что появление урагана Katrina в той или иной области Мексиканского залива сопровождается резким всплеском яркостной температуры COA на длине волны 1,26 см, природа которых объясняется накоплением водяного пара в атмосфере в периоды времени, предшествующие приходу урагана.

7. Результаты спутниковых СВЧ-радиометрических измерений могут использоваться для исследования нарушений естественной динамики крупномасштабного тепло- и влагообмена между океаном и атмосферой вследствие антропогенных факторов.





**Рис.9. Вариации общего содержания водяного пара в атмосфере в Гольфстримской (1) и Ньюфаундлендской (2) энергоактивных областях Северной Атлантики в период 1990–2010 гг.**

Отмечается резкое снижение общего содержания атмосферного водяного пара в 2010-ом году, когда наблюдались интенсивные нефтяные разливы в Мексиканском заливе весной этого года и сильная летняя засухливость на европейской территории России, что можно объяснить уменьшением испарения с поверхности океана в Гольфстримской ЭАЗО и снижением транспорта скрытого тепла в другие области Северной Атлантики, находящиеся в русле течения Гольфстрим. Благодаря тесной связи общего содержания водяного пара в атмосфере с интенсивностью собственного СВЧ-излучения системы океан-атмосфера в области резонансного поглощения радиоволн в водяном паре атмосферы аналогичная картина наблюдается по данным измерений яркостной температуры на длине волны 1,26 см радиометром AMSR-E со спутника EOS Aqua.

### **Перспективные подходы для изучения причин и условий зарождения тропических ураганов**

#### **1. Использование сопряженных уравнений гидротермодинамики.**

Данный математический аппарат был разработан академиком Г.И. Марчуком и его сотрудниками на основе теории возмущений [4] и был использован для локализации зон в океане, оказывающих наибольшее влияние на глобальные температурные и тепловые поля. В результате были выявлены так называемые энергоактивные зоны океанов, отличающиеся от других областей экстремальными показателями интенсивности теплового и динамического взаимодействия океана и атмосферы в широком диапазоне временных масштабов – от синоптических и сезонных до климатических. Результаты многолетних судовых экспедиционных исследований, проведенных в рамках программы "Разрезы" подтвердили теоретические оценки, в частности, позволили установить важную роль Норвежско-Гренландской, Ньюфаундлендской и Гольфстримской энергоактивных зон Северной Атлантики в формировании температурных аномалий воздуха и короткопериодных колебаний климата [5].

Представляется целесообразным применение сопряженных уравнений для изучения предвестников зарождения таких экстремальных природных явлений как тропические ураганы. В настоящее время нами совместно с сотрудниками Института вычислительной математики РАН прорабатывается возможность использования данного аппарата для анализа временной динамики зарождения тропического урагана

Humberto в Мексиканском заливе в сентябре 2007 г. на основе данных измерений радиометра AMSR-E спутника EOS Aqua.

## 2. Использование уравнений притока тепла и баланса турбулентной энергии.

Нами накоплен положительный опыт использования уравнений притока тепла и баланса турбулентной энергии для моделирования вертикальных турбулентных потоков тепла и влаги на границе раздела системы океан-атмосфера и их связи с радиояркой температурой системы, измеряемой с ИСЗ [6,7]. Результаты исследований показали, что модель *вертикального* турбулентного переноса тепла и влаги в атмосфере [6] не отражает в полной мере связь процессов тепло- и влагообмена между поверхностью океана и атмосферой с интенсивностью собственного СВЧ-излучения системы океан-атмосфера. Удовлетворительное совпадение результатов моделирования и данных спутниковых СВЧ-радиометрических измерений достигается лишь с учетом механизма *горизонтального* адвективного переноса тепла и влаги в атмосфере [7].

Данные наработки, полученные для Ньюфаундлендской энергоактивной зоны, подверженной активному влиянию североатлантических циклонов, используются в настоящее время для анализа процессов и условий зарождения и развития урагана Humberto и ряда других ураганов в тропических широтах на основе данных измерений радиометра AMSR-E спутника EOS Aqua.

## 3. Применение методов и подходов теории горения и взрывов.

Учитывая лавинообразный, "взрывной" характер изменений океанографических и метеорологических параметров системы океан-атмосфера в периоды времени, предшествующие появлению тропических ураганов [3], мы считаем перспективной и прорабатываем возможность использования методов и подходов теории горения и взрывов для поиска их предвестников на основе данных спутниковых СВЧ-радиометрических измерений.

## Литература

1. Шутко А.М. СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. М.: Наука, 1986.
2. СВЧ-радиометрия земной и водной поверхностей: от теории к практике (научные редакторы: В.С. Верба, Ю.В. Гуляев, А.М. Шутко, В.Ф. Крапивин). София: Академическое издательство им. проф. М. Дринова, 2014.
3. Гранков А.Г., Мильшин А.А., Новичихин Е.П. Радиоизлучение системы океан-атмосфера в ее энергоактивных зонах. LAMBERT, Academic Publishing, 2016.
4. Марчук Г.И., Скиба Ю.Н. Роль сопряженных функций в изучении чувствительности модели теплового взаимодействия атмосферы и океана к вариациям входных данных // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1990, т. 26, №5, 451-460.
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.
6. Гранков А.Г., Реснянский Ю.Д. Моделирование отклика собственного излучения системы океан-атмосфера на возмущение теплового равновесия на ее границе, Метеорология и гидрология, 1997, №11, 78-89.
7. Гранков А.Г., Реснянский Ю.Д., Новичихин Е.П., Мильшин А.А. Моделирование отклика собственного СВЧ-излучения системы "океан-атмосфера" на горизонтальный перенос тепла в атмосферном пограничном слое, Метеорология и гидрология, 2014, №2, .33-44.