

УДК 551.465

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ОКЕАНА И АТМОСФЕРЫ В ЗОНАХ
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЦИКЛОНОВ С ПОМОЩЬЮ СПУТНИКОВЫХ СВЧ-
РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ И НАЗЕМНЫХ СРЕДСТВ**

А. Г. Гранков, С. В. Маречек, А. А. Мильшин, Е. П. Новичихин, Н. К. Шелобанова
Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Получена 11 января 2013 г.

Аннотация. В статье анализируется поведение характеристик системы океан-атмосфера на основе данных прямых (контактных) и спутниковых СВЧ-радиометрических измерений. Рассмотрены общие и отличительные признаки их динамики в средних широтах Северной Атлантики (в энергоактивных зонах Северной Атлантики - Норвежской, Ньюфаундлендской, Гольфстримской), оказывающих значительное влияние на погодные условия в Европе, и в тропических широтах Атлантики (Мексиканский залив, район Багамских островов), являющихся источниками тропического циклогенезиса).

Ключевые слова: североатлантические и тропические циклоны, система океан-атмосфера, спутниковые СВЧ-радиометрические измерения, яркостная температура, прямые измерения.

Abstract. In the paper a behavior of the ocean-atmosphere system characteristics is analyzed basing on the data of direct (contact) and satellite microwave radiometric measurements. We considered some similar and distinctive features of their dynamics in the mid latitudes of the North Atlantic (its energy active zones - Norwegian, Newfoundland and Gulf Stream) forcing the weather conditions in Europe, and in the tropical latitudes of the Atlantic (Gulf of Mexico, areas of the Bahamas), which are the sources of the tropical cyclogenesis.

Keywords: North Atlantic and tropical cyclones, system ocean-atmosphere, satellite microwave radiometric measurements, brightness temperature, direct measurements.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ, ЕЕ АКЦЕНТЫ

Предистория

Возможность исследования характеристик Земли из космоса по ее собственному радиотепловому СВЧ-излучению была впервые показана в эксперименте со спутником "Космос-243" в 1968г. [1]. С тех пор начались многочисленные и успешные разработки методов определения различных параметров земной поверхности (суши и океана) в нашей стране и за рубежом, которые сейчас называются методами спутниковой СВЧ-радиометрии, либо спутниковыми СВЧ-радиометрическими методами. Некоторые итоги применения этих методов подведены в настоящее время в [2].

Задачи и подходы

Здесь мы впервые сравниваем поведение характеристик океана и атмосферы в условиях деятельности среднеширотных (североатлантических) и тропических циклонов на основе данных спутниковых СВЧ-радиометрических измерений. Сейчас, кажется, пора объединить результаты тех и других исследований, проведенных в 90-х годах применительно к северным широтам Северной Атлантики, и в последние годы - применительно к ее южным (тропическим) широтам, рассматривая и анализируя результаты решения следующих задач:

1. Исследование возможностей спутниковых СВЧ-радиометрических методов для анализа характеристик крупномасштабного теплового и динамического взаимодействия океана и атмосферы в зонах деятельности среднеширотных циклонов в Северной Атлантике в виде вертикальных турбулентных потоков явного, скрытого, тепла и импульса на границе раздела воды и воздуха на синоптических, сезонных и многолетних масштабах.

Решение задачи основано на концепции использования области резонансного поглощения радиоволн в водяном паре атмосферы (1.35 см) в качестве "мостика" между интенсивностью восходящего СВЧ-излучения (яркостной температурой) системы океан-атмосфера (СОА), измеряемой с ИСЗ, и тепловыми потоками в "пленочном" для спутниковых масштабов слое

атмосферы. Существуют следующие предпосылки для этого: 1) параметры, влияющие на интенсивность теплового взаимодействия океана и атмосферы (температура поверхности воды, температура и влажность воздуха, скорость ветра), непосредственно участвуют в формировании и трансформации излучения в указанных областях СВЧ-спектра как в приводном (10–20 м), так и в вышележащих слоях атмосферы; 2) толщина слоев атмосферы, в которых формируется СВЧ-излучение, близка в этих областях к толщине слоя турбулентности атмосферы (1000–1500 м). Напротив, для определения потоков импульса используются нерезонансные области СВЧ-диапазона, в которых влияние атмосферы минимально.

2. Исследование возможностей спутниковых СВЧ-радиометрических методов для анализа динамики метеорологических и термодинамических параметров атмосферы в районах зарождения и прохождения тропических циклонов в Мексиканском заливе.

Для решения задачи используется подход, основанный на сочетании данных буйковых измерений параметров приводного слоя атмосферы и поверхности океана с данными одновременных спутниковых СВЧ-радиометрических измерений, которые несут информацию о температуре и влажности воздуха не только в приводном, но и в вышележащих слоях атмосферы.

Приоритетные районы

Областями интересов являются энергоактивные зоны (ЭАЗО) Северной Атлантики такие как Норвежско-Гренландская, Ньюфаундлендская, Гольфстримская, находящиеся в русле течения Гольфстрим и его продолжения - Северно-Атлантического течения, оказывающие значительное влияние на погодные условия и климатические характеристики на территории Европы и европейской части России. Эти области характеризуются очень сильной изменчивостью тепловых потоков, например, амплитуда их суточных вариаций в зимне-весенние месяцы может превышать 2000 Вт м^{-2} . Это явление специалисты-метеорологи называют эффектом "метеорологической бомбы" [3].

Выбор таких районов важен и с точки спутниковой СВЧ-радиометрии, т.к. данный эффект сопровождается резкими изменениями метеорологических параметров СОА и соответствующими откликами яркостной температуры системы в различных участках миллиметрового и сантиметрового диапазонов длин волн, широко используемых в современных спутниковых СВЧ-радиометрических системах.

Ньюфаундлендская ЭАЗО выделяется среди других ЭАЗО Северной Атлантики максимальной энергетикой, что связано с "соседством" в этой зоне теплого Гольфстримского и холодного Лабрадорского течений, обуславливающим значительные океанографические, метеорологические, а также СВЧ-радиационные контрасты [4]. Здесь в свое время были выполнены уникальные и дорогостоящие даже по меркам советского времени океанографические, метеорологические, и аэрологические (радиозондовые) измерения параметров СОА в рамках экспериментов НЬЮФАЭКС-88 и АТЛАНТЭКС-90 [3].

Другой приоритетной областью в наших исследованиях являются Мексиканский залив и район Багамских островов, где регулярно зарождаются и развиваются тропические циклоны, которые наносят значительный ущерб южному побережью США.

Базовые архивы

1) данные долговременных СВЧ-радиометрических измерений сканирующего многоканального радиометра SSM/I (Special Sensor Microwave Imager) американских метеорологических спутников серии DMSP (1987-1998 гг.) над глобальным океаном с 1-3 суточным разрешением объемом около 700 Гб, полученных из НАСА (впоследствии этот архив наращивался и наращивается за счет сети INTERNET);

2) данные долговременных СВЧ-радиометрических измерений сканирующего многоканального радиометра AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer) американского океанографического спутника EOS Aqua

(2002-2010 гг.) над глобальным океаном с 1-2 суточным разрешением объемом около 600 Гб;

3) данные метеорологических и аэрологических измерений в экспериментах АТЛАНТЭКС-90 и НЬЮФАЭКС-88 в Ньюфаундлендской ЭАЗО с 1-часовым и 6-часовым разрешением;

4) океанографические и метеорологические данные американского центра - National Data Buoy Center (NDBC) в Мексиканском заливе и прилегающих акваториях.

Партнеры

В разное время нашими партнерами были и есть Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Институт космических исследований РАН, Росгидрометцентр, Центр космических наблюдений Роскосмоса, Marshall Space Flight Center NASA (MSFC), Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR).

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СПУТНИКОВЫХ СВЧ-РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ АНАЛИЗА ЦИКЛОНИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ЭНЕРГОАКТИВНЫХ ЗОНАХ СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ

Примеры в Ньюфаундлендской энергоактивной зоне Северной Атлантики (синоптический диапазон временных масштабов)

Основные результаты получены путем *совмещения* данных судовых экспериментов НЬЮФАЭКС-88 и АТЛАНТЭКС-90 в Ньюфаундлендской ЭАЗО Северной Атлантике с данными СВЧ-радиометрических измерений, проведенных СВЧ-радиометром SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager) с метеорологического спутника США F08 серии DMSP (Defence Meteorological Satellite Program) - схематически эта идея иллюстрируется на рис. 1. Те и другие измерения были запланированы и выполнялись в то время *независимо* научными и промышленными организациями СССР (и США. Основные технические характеристики радиометра SSM/I приведены в [5].

Использованы результаты судовых экспериментов НЬЮФАЭКС-88 и АТЛАНТЭКС-90 (НИСП "Виктор Бугаев", "Муссон" и "Волна"), ставшими

заключительными в изучении процессов крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы в энергоактивных зонах (ЭАЗО) Северной Атлантики, (в частности, в Ньюфаундлендской ЭАЗО), проведенных в рамках программы "Разрезы" [3].

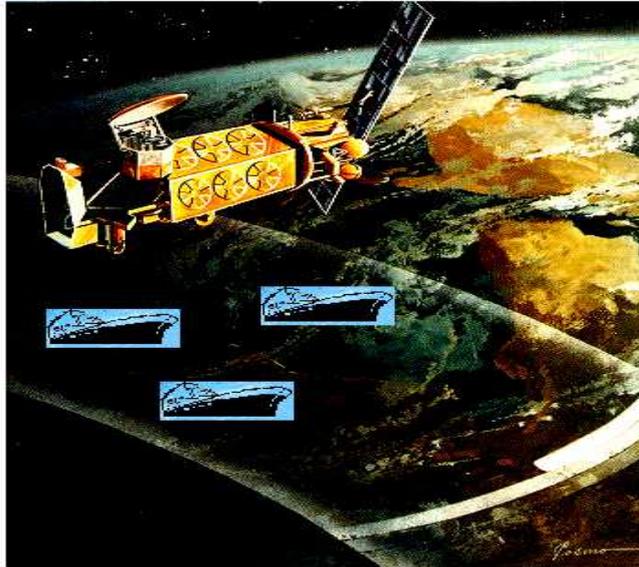


Рис. 1. Совмещенные спутниковый и наземный эксперименты в районе Ньюфаундлендской ЭАЗО Северной Атлантики в 1980 и 1990 гг. (положение судов слева-направо: НИСП "Виктор Бугаев", "Волна" и "Муссон"); координаты центра исследуемой области 43° с.ш., 45° з.д.

Из обширного архива данных, накопленных за весь период эксперимента, мы привлекли данные стационарной фазы эксперимента (4-21 апреля 1990 г.), отличающейся от остальных этапов следующими особенностями:

- а) наибольшая периодичность и регулярность метеорологических и особенно аэрологических наблюдений в этот период;
- б) возможность исследования *в чистом виде* временной динамики параметров океана и атмосферы благодаря фиксированному положению судов погоды "Виктор Бугаев", "Муссон", "Волна".

Суда погоды в этот период проводили измерения в трех точках дельты Гольфстрима: в южной периферии основной струи Гольфстрима ($42,3^{\circ}$ с.ш., 46° з.д. - НИСП "Виктор Бугаев"), в южной ветви Гольфстрима ($41,3^{\circ}$ с.ш., 41° з.д. - НИСП "Муссон") и в восточной ветви Лабрадорского течения ($48,2^{\circ}$ с.ш., 46° з.д. - НИСП "Волна"). Данная область океана характеризуется значительной

синоптической изменчивостью параметров океана и атмосферы, что обусловлено близостью субполярного гидрологического фронта, образуемого холодным Лабрадорским течением и теплым квазистационарным антициклоническим вихрем Гольфстрима. Кроме того, важным ее атрибутом является интенсивная горизонтальная циркуляция атмосферы - примерно 50% всего времени она подвергается воздействию мощных среднеширотных циклонов, сопровождающихся значительными изменениями полей температуры и влажности атмосферы, а также потоков явного, скрытого тепла и импульса [3].

Из архивных материалов стационарной фазы нами выделены следующие параметры:

- ежечасные значения температуры поверхности океана, температуры и влажности воздуха в приводном слое, скорости приводного ветра (более 1000 ежечасных метеорологических наблюдений);

- значения температуры, влажности и давления воздуха на 20 уровнях в диапазоне высот 10–16000 м с 6-часовым интервалом (более 200 аэрологических зондирований атмосферы);

- оценки вертикальных турбулентных потоков явного, скрытого, суммарного тепла и импульса на границе океана и атмосферы, рассчитанные в Государственном океанографическом институте по стандартным методикам на основе данных судовых измерений.

Фрагмент стационарной фазы эксперимента АТЛАНТЭКС-90 с 8 по 13 апреля 1990 г. проанализирован наиболее детально в связи с тем, что именно в этот период на всех судах погоды отмечался дружный отклик параметров океана и атмосферы на прохождение мощного циклона в этой области Северной Атлантики.

На рис. 2 и 3 показаны примеры линейного регрессионного анализа между синоптическими вариациями яркостной температуры COA, измеренными радиометром SSM/I с метеорологического спутника США F08 серии DMSP (рис. 2а), и потоками суммарного (явного и скрытого) тепла (рис. 2б),

зарегистрированных в экспериментах НЬЮФАЭКС-88 и АТЛАНТЭКС-90 в Ньюфаундлендской энергоактивной зоне Северной Атлантики в марте 1988 г., характеризующейся активной деятельностью среднеширотных атлантических циклонов.

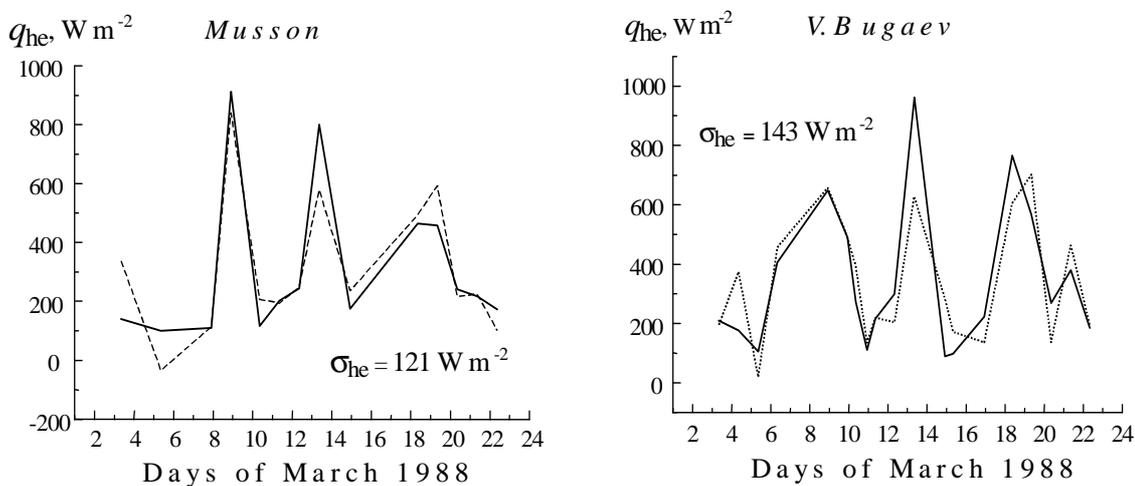


Рис. 2. Эксперимент НЬЮФАЭКС-88. Прямые (судовые) оценки потоков суммарного тепла q_{he} (сплошные линии) и их спутниковые СВЧ-радиометрические оценки по данным измерений радиометра SSM/I (точечные линии) в Ньюфаундлендской ЭАЗО в районе расположения НИСП "В. Бугаев" и "Муссон". На полях рисунков указаны количественные оценки расхождения между теми и другими оценками (σ)

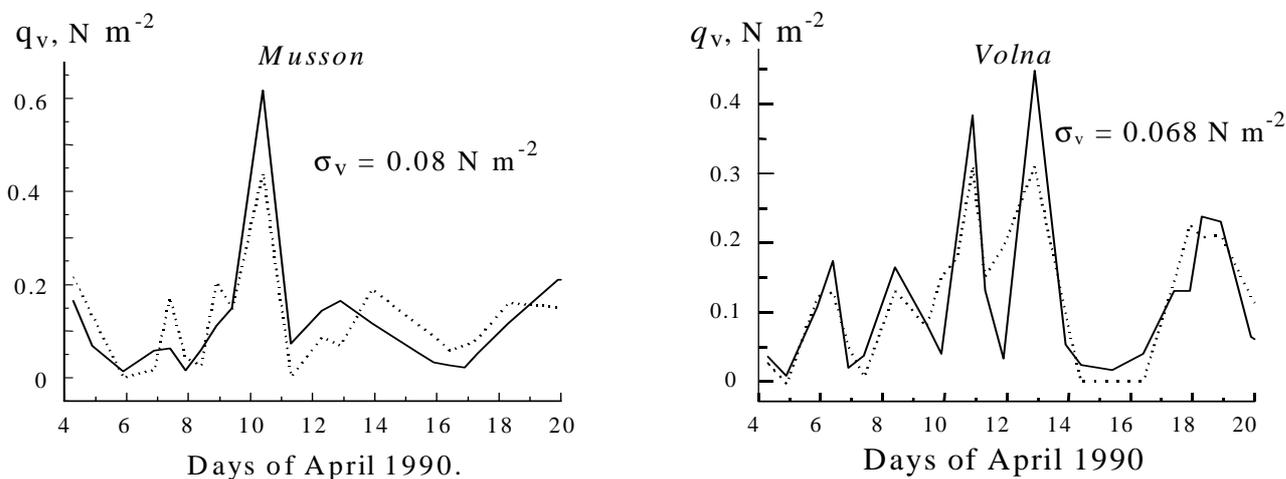


Рис. 3. Эксперимент АТЛАНТЭКС-90. Прямые оценки потоков импульса q_v (сплошные линии) и их спутниковые СВЧ-радиометрические оценки (точечные линии) по данным измерений радиометра SSM/I в Ньюфаундлендской ЭАЗО в районе расположения НИСП "Муссон" и "Волна" (пунктирные линии). На полях рисунков указаны количественные оценки расхождения между теми и другими оценками (σ)

При построении рисунков 2, 3 использовались множественные линейные регрессии между яркостными температурами СОА, измеренными со спутника

F08 на частотах 22.2 ГГц, 37 ГГц и 19.55 ГГц и данными прямых (метеорологических) измерений с НИСП "Волна", "Муссон" и "Виктор Бугаев".

Несмотря на значительные *количественные* различия процессов теплового взаимодействия между океаном и атмосферой (в величине тепловых потоков) и *качественные* (характер обмена теплом - от океана к атмосфере, или наоборот) в исследованных нами районах Ньюфаундлендской ЭАЗО Северной Атлантики отмечается хорошее согласие между судовыми и спутниковыми оценками потоков суммарного тепла q_{he} и импульса q_v . Отношения среднеквадратических разностей (невязок) между величинами между параметрами q_{he} и q_v значениями потоков, зафиксированных в судовых измерениях и их дистанционными оценками к максимальным значениям естественных вариаций потоков колеблется от 12% (НИСП "Волна") до 19% ("Муссон") для величины q_{he} и от 13% (НИСП "Муссон") до 18% (НИСП "Виктор Бугаев") для величины q_v . Это наблюдение подводит к мысли о необходимости более детального анализа степени воспроизводимости (устойчивости) полученных оценок.

Об устойчивости соотношений между потоками суммарного тепла и их спутниковыми оценками, построенными с помощью линейных регрессий с данными измерений радиометра SSM/I спутника F08 свидетельствуют результаты сопоставления параметров q_{he} (прямых оценок) и q_{he}^* (спутниковых СВЧ-радиометрических оценок), полученных на стационарных фазах экспериментов НЬЮФАЭКС-88 и АТЛАНТЭКС-90, практически в одних и тех же районах Ньюфаундлендской энергоактивной зоны, но с 2-х летним сдвигом во времени (рис. 4).

Наблюдается также тесная взаимосвязь судовых оценок потоков суммарного тепла в точке М Норвежско-Гренландской ЭАЗО (материалы предоставлены Йоргом Шульцем из Центра дистанционного зондирования Германии) со спутниковыми оценками, полученными с помощью линейных регрессий с данными одновременных измерений радиометра SSM/I спутника F08 на частотах 22.2, 37 и 19.55 ГГц (рис. 5).

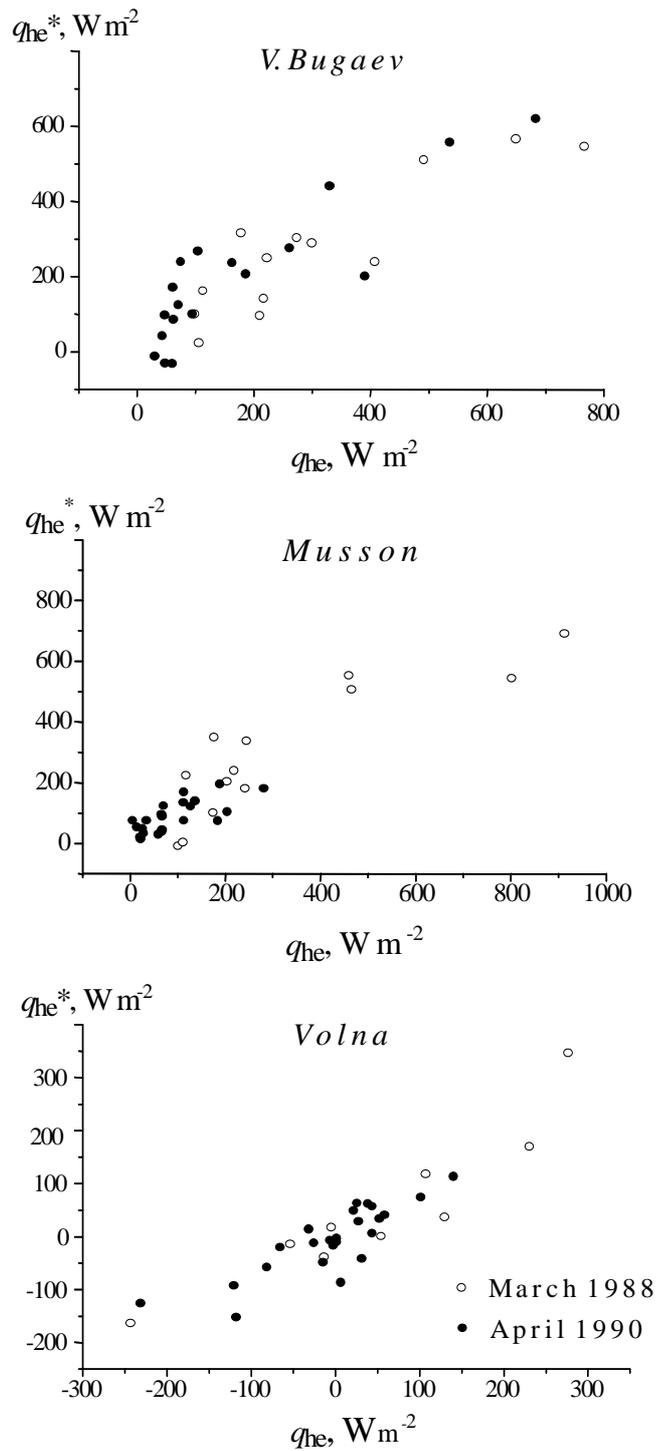


Рис. 4. Результаты сопоставления прямых измерений потоков суммарного тепла q_{he} и их спутниковых оценок q_{he}^* в районах расположения судов "В. Бугаев", "Муссон", "Волна" на стационарных фазах экспериментов НЬЮФАЭКС-88 и АТЛАНТЭКС-90

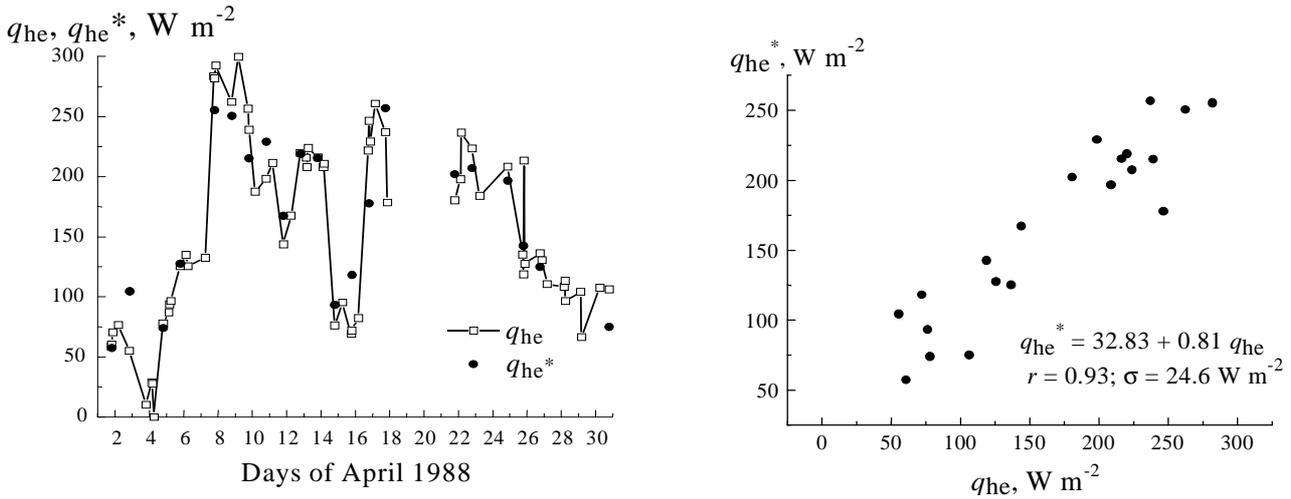


Рис. 5. Результаты сопоставления данных прямых (судовых) q_{he} и спутниковых оценок потоков суммарного тепла q_{he}^* в точке М Северной Атлантики: вариации параметров q_{he} и q_{he}^* в апреле 1988 г. (левый рисунок); линейная регрессия между параметрами q_{he} и q_{he}^* (правый рисунок)

Наблюдаемое в экспериментах НЬЮФАЭКС-88 и АТЛАНТЭКС-90 расхождение между прямыми и дистанционными оценками интенсивности тепловых потоков обуславливается не только неоднозначностью взаимосвязи между яркостной температурой системы океан-атмосфера и параметрами q_{he} и q_v , но и существованием ряда причин, которые усугубляют расхождение между прямыми и спутниковыми оценками граничных значений потоков тепла и импульса и затрудняют анализ устойчивости взаимосвязи между характеристиками собственного СВЧ-излучения СОА и параметрами q_{he} и q_v :

1. Существование значительных *горизонтальных* градиентов потоков тепла в районах местоположения судов погоды "Виктор Бугаев", "Муссон" и "Волна". Например, судя по данным [3], в районе местоположения НИСП "Виктор Бугаев", наиболее приближенного к субполярному гидрологическому фронту, величина горизонтального градиента параметра суммарного теплового потока может достигать $25 W m^{-2}$ на километр; таким образом, в пределах поля зрения приемных антенн радиометра, линейные размеры которого составляют 15–30 км, неоднозначность оценки q_{he} может достигать 30–150 $W m^{-2}$.

2. Наличие временного сдвига (до 30 минут) между данными спутниковых и судовых измерений, которая по нашим оценкам обуславливает

дополнительную погрешность при их сопоставлении до 20 Вт м^{-2} для параметра qhe и до 0.03 Н м^{-2} для параметра qv .

Все эти результаты вначале обсуждались и критиковались на семинарах и конференциях в Институте радиотехники и электроники, в Институте космических исследований, Институте океанологии РАН - вызвало подозрение наличие высокой корреляции между синоптическими вариациями яркостной температурой СОА и потоками явного и скрытого тепла. Все же эти закономерности подтвердились позже, после сравнительного анализа многочисленных судовых и СВЧ-радиометрических измерений в других районах Мирового океана и в другие сезоны времени года [4]. Мы этот эффект объясняем наличием интенсивного *горизонтального переноса* тепла и влаги в атмосфере, который приводит к резким (принудительным) скачкам (перепадам) температурных и влажностных характеристик атмосферы по горизонтали и вертикали и ее СВЧ-излучательных характеристик. Эти скачки обуславливают тесную связь яркостных контрастов в области поглощения радиоволн в области 1.35 см атмосферы с ее метеорологическими параметрами, что необходимо учитывать при анализе динамики переходных процессов характеристик СОА для исследования как среднеширотных, так и тропических циклонов на различных фазах их деятельности.

Примеры в Норвежской, Ньюфаундлендской и Гольфстримской ЭАЗО (сезонные и многолетние временные масштабы)

Здесь приведены результаты исследования взаимосвязи среднемесячных значений яркостной температуры СОА в миллиметровом и сантиметровом диапазонах длин волн и вертикальных турбулентных потоков тепла на границе раздела океана и атмосферы. В качестве объектов исследования выбраны Норвежская, Ньюфаундлендская и Гольфстримская ЭАЗО Северной Атлантики, находящиеся в русле Гольфстримского и Северно-Атлантического течений и оказывающих сильное влияние на формирование погодных условий

и климатических характеристик на территории Европы и европейской территории России.

Из результатов анализа данных многолетних СВЧ-радиометрических измерений с ИСЗ DMSP можно отчетливо наблюдать некоторые особенности межгодовой динамики яркостной температуры COA, в частности сделать вывод о том, что интенсивность ее вариаций в различных каналах радиометра SSM/I заметно растет по мере перемещения от северных к южным акваториям Северной Атлантики (от Норвежской до Гольфстримской ЭАЗО) [3]. Результаты этого анализа указывают на потенциальную возможность применения спутниковых СВЧ-радиометрических методов для анализа внутри- и межгодовой изменчивости яркостной температуры COA, а также использования этих данных с целью определения ее основных климатически значащих параметров. Основанием для такого вывода служит значительное превышение (в десятки и сотни раз) интенсивности внутригодовых (сезонных) вариаций яркостной температуры COA по сравнению с величиной чувствительности СВЧ-радиометрических каналов радиометра SSM/I и погрешностям их калибровки.

Благодаря этим свойствам радиометра SSM/I (с учетом способности спутников DMSP обеспечивать практически ежесуточную регулярность обзора), становится возможной постановка задачи выделения локальных (годовых) аномалий яркостной температуры COA на фоне ее многолетних (в нашем случае усредненных за период 1988-1994 гг.) значений в различных областях океана.

В качестве иллюстрации на рис. 6 представлены результаты анализа на частоте 22 ГГц радиометра SSM/I - в линии поглощения водяного пара атмосферы 1.35 см, которая как было показано в [4], принадлежит к одной из наиболее информативных областей СВЧ-диапазона в задачах исследования теплового взаимодействия океана и атмосферы.

Примечательно, что именно на этой длине волны с помощью судовых станций погоды в точках Северной Атлантики М (Mike) с координатами

66°с.ш., 2°в.д. (Норвежско-Гренландская ЭАЗО Атлантики), D (Delta) с координатами 44°с.ш., 41°з.д. Ньюфаундлендская ЭАЗО) и Н (Hotel) с координатами 38°с.ш., 71°з.д. (Гольфстримская ЭАЗО) можно наблюдать прямую связь между среднемесячными значениями яркостной температуры СОА, измеренной радиометром SSM/I спутника F08 и вертикальными турбулентными потоками суммарного (явного и скрытого) тепла на границе раздела океана и атмосферы в течение 1988-1994 гг. (рис. 6).

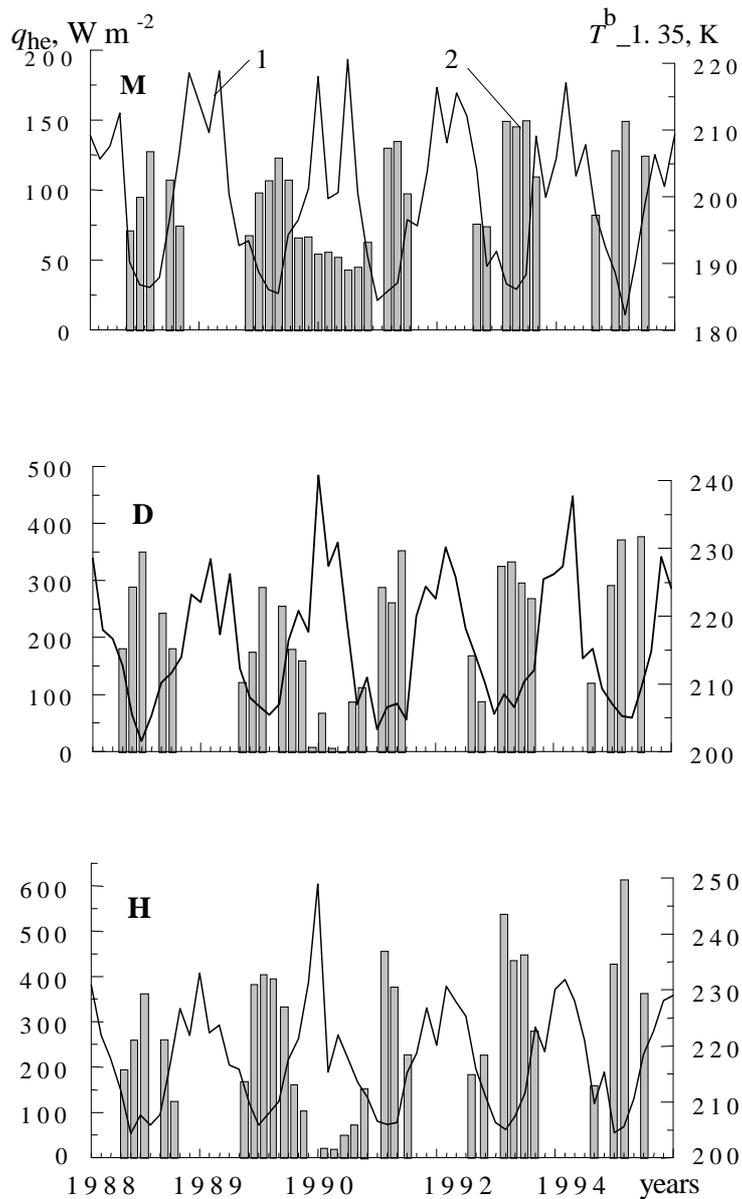


Рис. 6. Результаты сопоставления среднемесячных значений потоков суммарного тепла q_{he} (1) и яркостной температуры Тя_1.35 (2) для точек М, D и Н Северной Атлантики с 1988 по 1994 гг.

Эти результаты заслуживают отдельного обсуждения, т.к. традиционно считается, что для восстановления тепловых потоков на границе раздела океана и атмосферы необходимо опираться не только на результаты метеорологического зондирования COA, но и на оценки температуры поверхности океана, которые получают обычно либо в области 3–8 см СВЧ-диапазона, либо в области 8–12 мкм ИК-диапазона, отсутствующих в радиометре SSM/I. Впервые этот вопрос возник при анализе роли различных параметров океана и атмосферы в формировании взаимосвязи между яркостной температурой и тепловыми потоками на синоптических временных масштабах, когда выяснилось, что вклад температуры поверхности океана в этом случае минимален по сравнению с параметрами атмосферы на *синоптических масштабах* времени [4]. В результате дискуссий со специалистами Института океанологии РАН появилось понимание и объяснение этого результата инерцией *теплового режима* поверхности океана по отношению к *быстропеременным* тепловым и динамическим процессам в атмосфере, свойственным синоптическим временным масштабам? Здесь океан не может приспособливаться к резким перестройкам тепловых (температурных и влажностных) характеристик атмосферы, обусловленных циклонической деятельностью атмосферы. Именно, более динамичные по сравнению с океаном атмосферные процессы играют главную роль в процессах их теплового и динамического взаимодействия.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПУТНИКОВЫХ СВЧ-РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ И ПРЯМЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ АНАЛИЗА ФАКТОРОВ, СПОСОБСТВУЮЩИХ ВОЗНИКНОВЕНИЮ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ

Анализ изменчивости характеристик атмосферы в зонах деятельности тропических циклонов Humberto и Katrina по данным спутниковых и станционных измерений

Анализ поведения характеристик атмосферы и океана в зонах деятельности тропических циклонов (ТЦ) на различных стадиях их

существования является актуальной задачей. Особый интерес представляет исследование различных параметров СОА на стадиях зарождения (прохождения) ТЦ, предшествующих их появлению в данной области океана, а также на стадии релаксации, т.е. возвращения системы к ее первоначальному состоянию.

Здесь представлены результаты исследования реакции параметров СОА на прохождение мощного ТЦ Katrina в августе 2005 г. во Флоридском проливе в районе буйковой станции SMKF1 (Sombrero Key), а также анализ поведения системы в период времени, предшествующий зарождению, развитию ТЦ Humberto и угасанию его последствий в этой области в сентябре 2007 г. в Мексиканском заливе в районе буйковой станции 42019. Проведен анализ синоптических вариаций следующих характеристик океана и атмосферы в эти периоды времени:

1. Температура поверхности океана (ТПО), температура, влажность и давление воздуха, скорость ветра в приводном 10-метровом слое в районах станций SMKF1 и 42019.

2. Вертикальные турбулентные потоки явного, скрытого тепла и импульса на границе раздела воды и воздуха, рассчитанные по данным измерений со станций SMKF1 и 42019.

3. Полное (интегральное) влагосодержание атмосферы и ее энтальпия, рассчитанные путем послойного интегрирования влажности воздуха в диапазоне высот от 10 до 10000 метров.

Источником информации о наземных данных является американский Центр - National Data Buoy Center NOAA (NDBC); в качестве источников спутниковых данных используются данные регулярных измерений СВЧ-радиометров SSM/I метеорологического спутника F15 и радиометра AMSR-E спутника EOS Aqua. Технические характеристики этих радиометров приведены в [5] и [6], соответственно.

Обширная сеть метеорологических станций NOAA (в частности, станций, расположенных в Мексиканском заливе и в экваториальном поясе Тихого

океана), обеспечивают измерения лишь параметров поверхности океана и приводного слоя атмосферы. Метеорологические средства наблюдений этих станций не в состоянии дать сведения о вертикальном распределении температуры и влажности воздуха в атмосфере. Эта задача может быть решена, например, с использованием данных измерений многоканального СВЧ-радиометра SSMIS (Special Sensor Microwave Imager/Sounder) спутников DMSP F16 и F17 [7]. Помимо функции сканера этот прибор несет и функцию зондировщика, позволяющего определять температуру и влажность атмосферы на различных высотах. Однако, периодичность зондирования этих характеристик атмосферы (~1 раз в сутки) недостаточна для изучения таких быстропеременных процессов как формирование тропических циклонов, характеристики которых могут существенно изменяться в течение нескольких часов.

Нами развита методика, основанная на сочетании данных буйковых измерений параметров приводного слоя атмосферы и поверхности океана с данными спутниковых СВЧ-радиометрических измерений, которые несут информацию о температуре и влажности воздуха не только в приводном, но и в вышележащих слоях атмосферы, что позволяет определять значения температуры и влажности атмосферы на различных ее горизонтах (свойство спутниковых СВЧ-радиометрических измерений) и ежечасно (свойство буйковых метеорологических измерений).

Динамика параметров, измеряемых со станции SMKF1 (ТЦ Katrina)

В качестве опорной точки при анализе влияния ТЦ Катрина на параметры атмосферы используется станция SMKF1 во Флоридском проливе (24.38°с.ш., 81.07°з.д.) из арсенала данных NDBC. Ближайшее расстояние между траекторией ТЦ Katrina и этой станцией составило ~120км 26 августа 2005 г. в 12 часов дня, к этому моменту циклон прошел от места зарождения в районе Багамских островов расстояние около 800 км.

На рис. 7 представлены вариации температуры t_a и давления P воздуха в приводном слое атмосферы в период с 21 по 31 августа 2005г., зарегистрированные датчиками станции SMKF1, а также расчетные оценки влажности (упругости водяного пара) e приводного воздуха, которые получены на основе данных обширных экспериментальных исследований в различных частях Мирового океана связи этого параметра с разностью температур воды и воздуха, систематизированных в [8] - прямые измерения влажности воздуха на буйковых станциях NOAA не предусмотрены. Рисунок 7 иллюстрирует *сглаженные* результаты стационарных измерений параметров t_a , P и расчетных оценок параметра e ; сглаживание выполнено с помощью штатных средств программы ORIGIN - Adjacent Averaging (скользящее среднее) с интервалом усреднения ежечасных выборок в 3 часа. Объем исходных данных, полученных с помощью датчиков станции SMKF1, составил 240 ежечасных выборок для каждого из параметров t_a , e и P , характеризующих стадию, предшествующую появлению ТЦ Katrina в районе станции SMKF1 (21-24 августа), стадию его прохождения (25-29 августа) а также на стадии релаксации COA (30-31 августа).

Из иллюстрации видно, что при прохождении ТЦ Katrina в районе станции SMKF1 наблюдаются значительные вариации параметров приводного слоя атмосферы по отношению к их невозмущенным (фоновым) значениям, наблюдаемым до прихода циклона и после его удаления: контрасты температуры, влажности и давления воздуха, составляют около -6°C , -15 мб и -13 мб, соответственно, причем реакция параметров t_a , e и P на прохождение циклона носит резонансный характер с продолжительностью 3-4 суток.

Результаты линейного регрессионного анализа указывает на тесную связь между вариациями температуры и влажности приводного воздуха за весь наблюдаемый период (21-31 августа) - коэффициент корреляции параметров t_a , и e составляет 0.94.

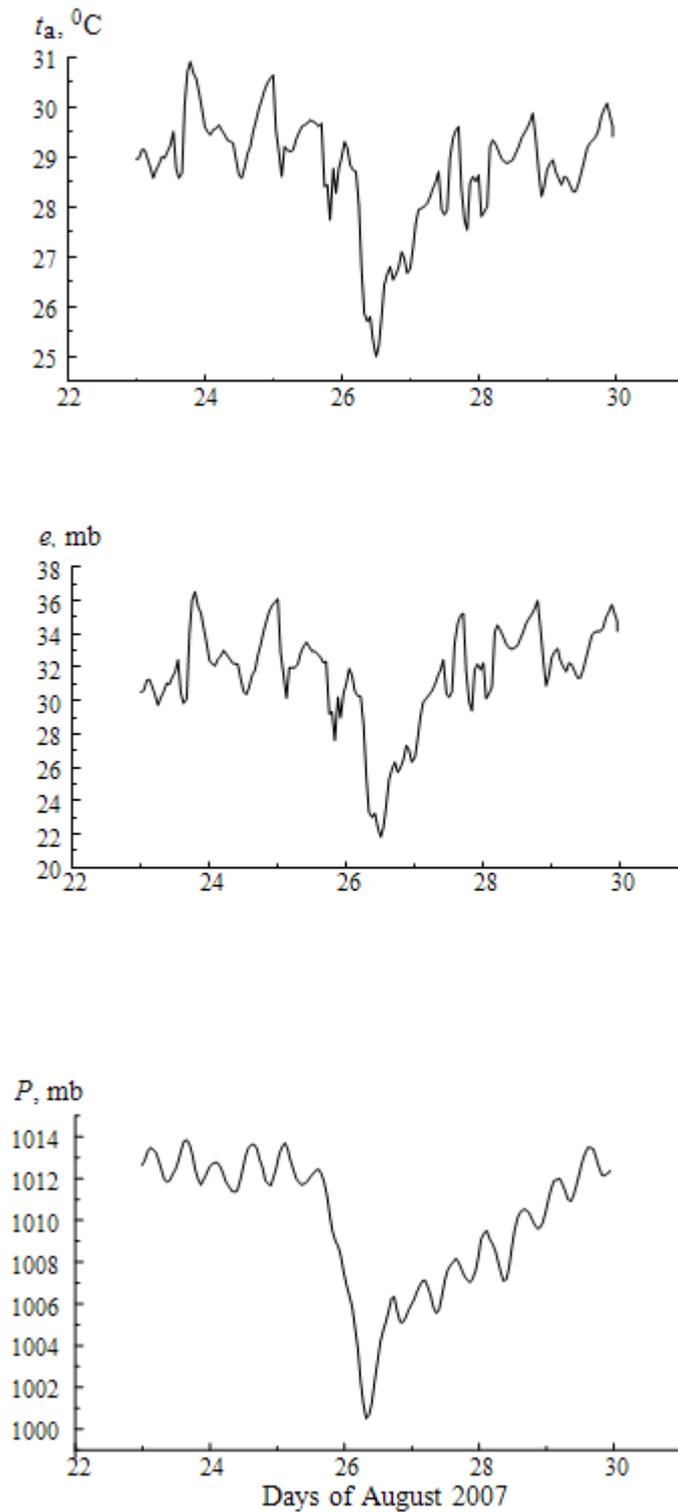


Рис. 7. Вариации температуры t_a , влажности e , давления P приводного воздуха в районе местоположения станции SMKF1 во Флоридском проливе на прохождение ТЦ Katrina в августе 2005 г.

На основе данных буйковых метеорологических измерений рассчитаны значения внутренней энергии (энтальпии) приводного слоя атмосферы в период с 21 по 31 августа 2005 г. Установлено, что ТЦ Katrina при прохождении точки

SMKF1 отбирает тепловую энергию у приводного слоя атмосферы, которая снижается по нашим оценкам примерно на 32500 Дж м^{-2} в этот период.

Динамика параметров, измеряемых со станции 42019 (ТЦ Humberto)

ТЦ Humberto, зародившийся в середине сентября 2007 г. в Мексиканском заливе, не был столь интенсивным как циклон Katrina, но он привлекателен в наших исследованиях тем, что область его зарождения совпала с местоположением буйковой станции 42019, расположенной в точке с координатами 27.91°с.ш. , 95.35°з.д. Это позволяет контролировать параметры приводного слоя атмосферы, а используя данные одновременных спутниковых СВЧ-радиометрических измерений, и в вышележащих ее слоях на различных стадиях формирования циклона Humberto. Эта точка в период формирования ТЦ Humberto согласно данным измерений станции 42019 характеризуется сильной изменчивостью параметров приводного слоя атмосферы: вариации температуры, влажности, давления воздуха и скорости ветра составляют 3°C , 8 мб, 5 мб и 7 м с^{-1} , соответственно.

Рис. 8 иллюстрирует вариации параметров t_a , e , P и V СОА в период 9-14 сентября 2007 г. со скользящим 3-х часовым усреднением исходных данных (144 ежечасные выборки для каждого из параметров) на стадии, предшествующей зарождению ТЦ Humberto (9-11 сентября), на стадии его возникновения (12 сентября), а также на стадии релаксации СОА после ухода циклона из района местоположения станции 42019 (13-14 сентября).

Вариации влажности приводного воздуха в период 9-14 сентября практически повторяют вариации приводной температуры; коэффициент корреляции между ними составляет 0.97. Давление приводного воздуха на стадии возникновения циклона (12 сентября) резко падает, а скорость ветра возрастает с задержкой на 5 часов, с учетом этой задержки коэффициент корреляции между вариациями параметров P и V достигает 0.91.

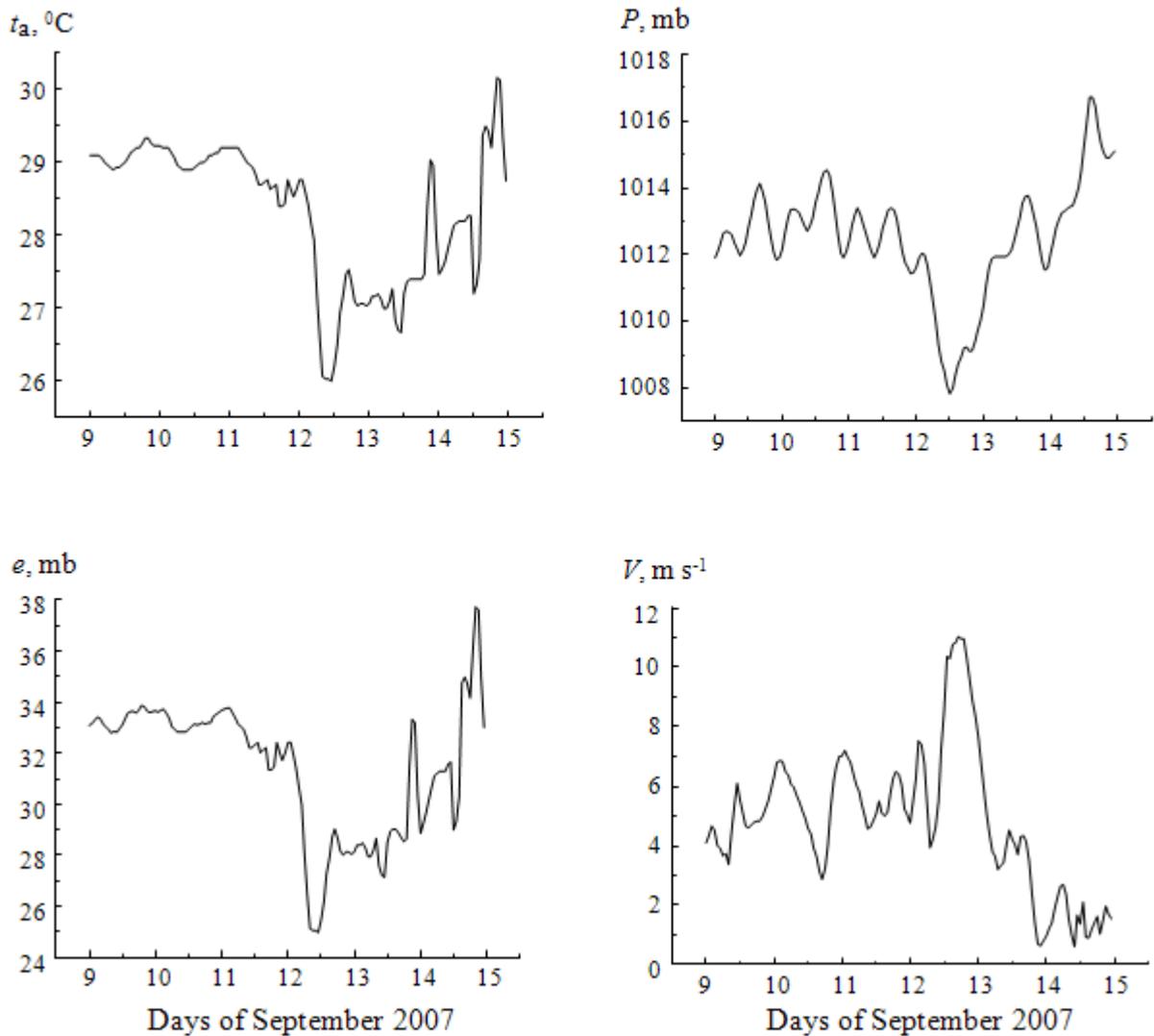


Рис. 8. Вариации температуры t_a , влажности e , давления P приводного воздуха и скорости приводного V ветра по данным измерений на станции 42019 в Мексиканском заливе во время зарождения ТЦ Humberto в сентябре 2007 г.

Нами рассчитаны значения энтальпии приводного слоя атмосферы в период с 9 по 14 сентября 2007 г.: из результатов расчетов следует, что в процессе возникновения ТЦ Humberto энтальпия приводного слоя атмосферы в районе станции 42019 снижается на 12500 Дж м^{-2} .

Поведение ТПО в районах деятельности ТЦ Katrina и Humberto

Выполнен анализ вариаций температуры поверхности океана во время прохождения ТЦ Katrina станции SMKF1 (22-31 августа 2005 г.) и в период формирования и развития ТЦ Humberto (8-16 сентября 2007 г.), а результаты представлены на рис. 9. Чтобы подчеркнуть характер поведения ТПО данные

буйковых измерений аппроксимированы с помощью штатного средства программы Origin - Sigmoidal (аппроксимация графиков скачкообразными функциями).

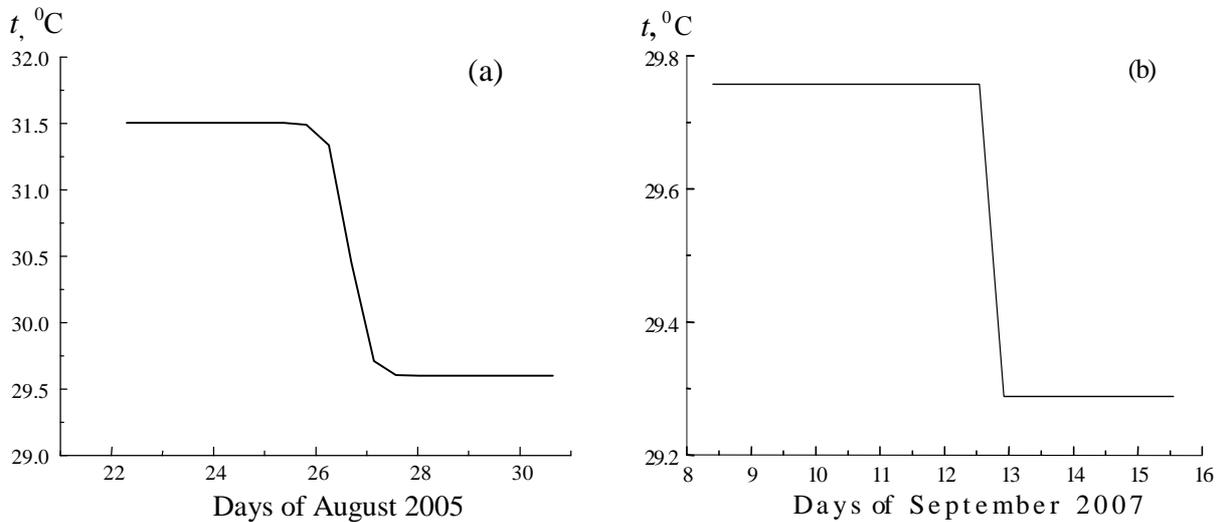


Рис. 9. Характер изменений ТПО в районах станции SMKF1 во время прохождения ТЦ Katrina (а) и станции 42019 в период формирования ТЦ Humberto (б)

Из рис. 9 следует, что скачок ТПО в районе станции SMKF1, обусловленный прохождением ТЦ Katrina, в несколько раз больше по сравнению со скачком ТПО, наблюдаемым при зарождении ТЦ Humberto, который характеризуется более слабой интенсивностью. Интересно, что в последнем случае переход от одного температурного режима к другому протекает значительно быстрее по сравнению со случаем ТЦ Katrina. В обоих случаях происходит отбор атмосферой тепловой энергии у поверхности океана, т.к. скачок ТПО отрицательный.

Динамика поверхностных потоков тепла, влаги и импульса

С помощью данных буйковых измерений температуры поверхности океана, температуры, давления воздуха и оценок его влажности, а также скорости ветра в приводном слое атмосферы рассчитаны значения потоков явного q_h , скрытого q_e тепла и импульса q_v на границе раздела воды и воздуха на основе распространенных в динамической метеорологии формул Глобального Аэродинамического метода (балк-формул) [3]. В соответствии с

ЭТИМ ПОДХОДОМ величины q_h , q_e и q_v характеризуются следующими соотношениями:

$$q_h = c_p \rho c_t (t - t_a) V; \quad (1)$$

$$q_e = L \rho (0.622/P) c_e (e - e_0) V, \quad (2)$$

$$q_v = \rho c_v V^2, \quad (3)$$

т.е. выражаются через следующие параметры СОА - температуру t_a , давление P , упругость водяного пара e воздуха и скорость ветра V в приводном воздухе, а также через температуру поверхности океана t и максимальную для данной величины ТПО влажность воздуха e_0 . В качестве коэффициентов пропорциональности в соотношениях (1) и (2) служат коэффициенты обмена теплом c_t (число Шмидта), влагой c_e (число Дальтона) и импульсом c_v (коэффициент сопротивления), а также удельная теплота испарения (L), удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении (c_p) и его плотность (ρ). Ниже приведены результаты расчетов потоков для станций SMKF1 и 42019 на основе данных буйковых измерений в этих районах Мексиканского залива.

Станция SMKF1

Результаты расчетов (с 3-х часовым сглаживанием) иллюстрируются на рис. 10, откуда видно что, в результате прохождения ТЦ Katrina через район станции SMKF1 происходит заметное снижение средних значений тепловых потоков - примерно на 20 Вт м^{-2} (с 30 до 10 Вт м^{-2}) для потоков явного тепла и на 150 Вт м^{-2} (с 350 до 200 Вт м^{-2}) для потоков скрытого тепла, что свидетельствует о *сглаживании* проходящим циклоном тепловых контрастов между поверхностью океана и приводным слоем атмосферы. Сам момент прохождения циклона мимо станции SMKF1 (полдень 26 августа) сопровождается положительным всплеском параметров q_h и q_e , величина которых достигает 80 и 500 Вт м^{-2} , соответственно, и совпадает по времени с минимальными значениями параметров t_a , e и P (см. рис. 7).

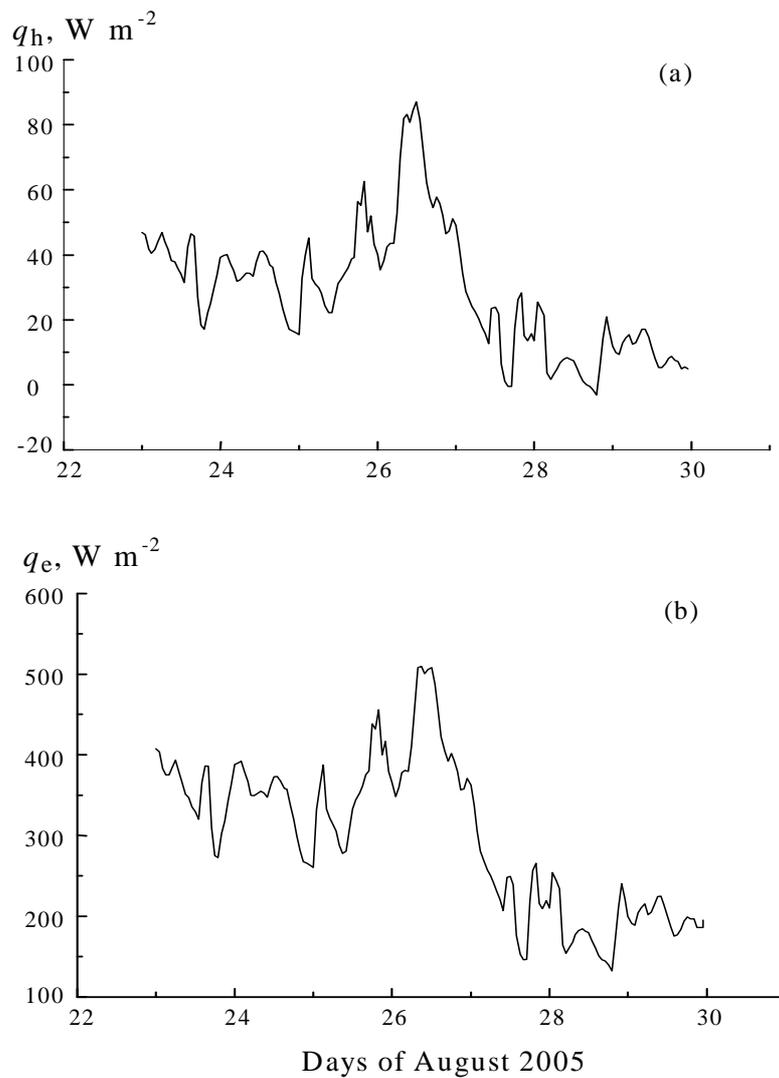


Рис. 10. Вариации потоков явного (а) и скрытого (б) тепла на поверхности океана в районе расположения станции SMKF1 в период прохождения ТЦ Katrina в сентябре 2007 г.

Станция 42019

Результаты расчетов для потоков явного, скрытого тепла и импульса (с 3-х часовым сглаживанием) представлены на рис. 11; здесь наблюдается отчетливый максимум одновременно для величин q_h , q_e и q_v , который приходится на полдень 12-го сентября 2007 г., что совпадает с данными наблюдений за развитием ТЦ Humberto наземными службами.

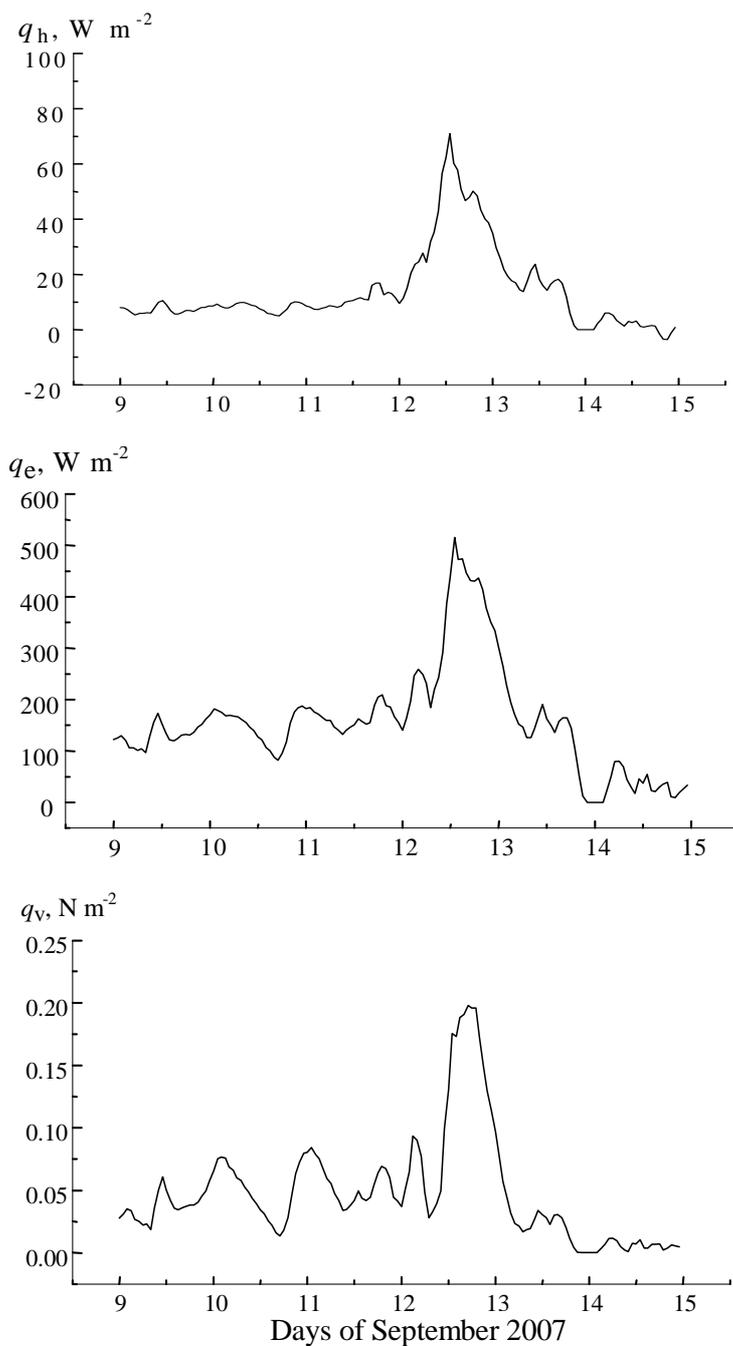


Рис. 11. Вариации потоков явного, скрытого тепла и импульса на поверхности океана в районе расположения станции 42019 в период зарождения ТЦ Humberto в сентябре 2007 г.

Средние значения потоков тепла и влаги на стадии, предшествующей появлению ТЦ Humberto (9-12 сентября), составляют $5 W m^{-2}$, $150 W m^{-2}$ и $0.05 N m^{-2}$, соответственно, а максимальные значения этих параметров во время его развития в полдень 12-го сентября достигают $75 W m^{-2}$, $530 W m^{-2}$ и $0.2 N m^{-2}$.

Интересно отметить, что максимальная величина потоков суммарного (явного+скрытого) тепла в районе станции 42019 ($\sim 600 \text{ Вт м}^{-2}$) близка к оценке, приводимой ак. Г.С. Голицыным для тропических широт [9]. Эта величина также сравнима с потоками суммарного тепла в Ньюфаунлендской энергоактивной зоне Северной Атлантики, подвергаемой регулярному воздействию мощных среднеширотных циклонов, и которые по данным экспериментов НЬЮФАЭКС-88 и АТЛАНТЭКС-90 достигали 800 Вт м^{-2} в марте 1988 г. и апреле 1990 г. [3].

Рис. 12 иллюстрирует вариации потоков тепла и влаги в период 17-20 сентября на стадии релаксации параметров СОА в районе станции 42019 после возникновения циклона Humberto и его ухода из этого района.

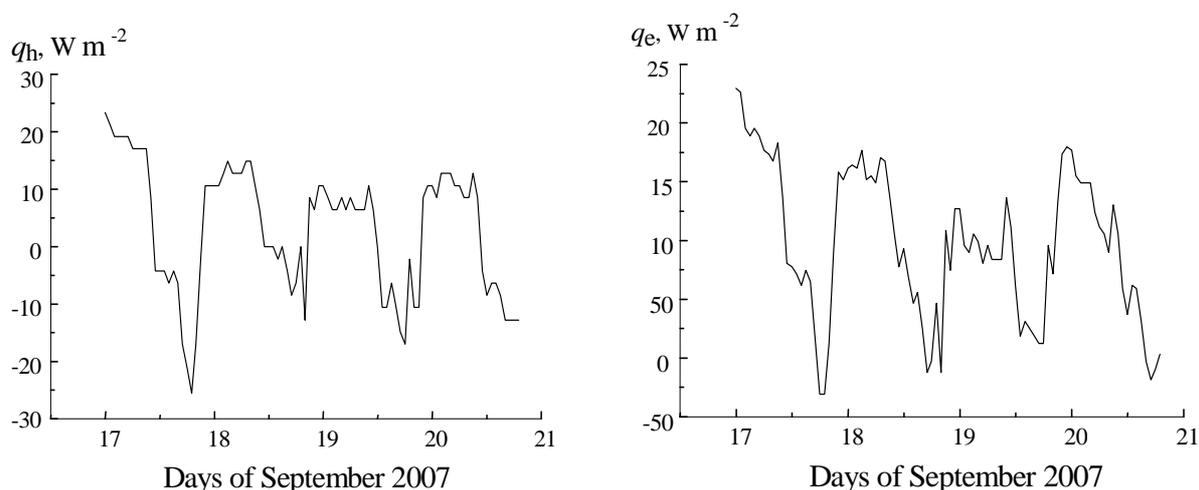


Рис. 12. Поведение потоков явного q_h и скрытого q_e тепла на поверхности океана в районе расположения станции 42019 после зарождения ТЦ Humberto

Из иллюстрации видно, что средние значения параметров q_h и q_e в несколько раз меньше их предельных значений, наблюдаемых в полдень 12-го сентября. Отмечается также интересная особенность - колебательный характер вариаций потоков тепла и влаги в этот промежуток времени с периодом колебаний близким к 24-м часам, т.е. к суточным циклам. При этом потоки явного тепла знакопеременны, т.е. процессы отдачи тепла поверхностью океана атмосфере чередуются с процессами отдачи тепла атмосферой поверхности океана, чего не наблюдается в период времени 9-12 сентября, предшествующий возникновению ТЦ Humberto (см. рис. 11). Этот эффект похож на эффект

возбуждения колебаний в высокочастотных резонансных системах, таких, например, как контурах ударного возбуждения в радиотехнике [10].

Динамика интегрального влагосодержания и энтальпии атмосферы

Методика определения температуры и влажности верхних слоев атмосферы на различных уровнях атмосферы

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 радиометрами SSM/I и AMSR-E значениями яркостной температуры COA и их модельными оценками. Параметр ρ характеризует объемную влажность воздуха, которая обычно используется в расчетах поглощения радиоволн в атмосфере, и которая однозначно связана с упругостью водяного пара e , чаще всего используемой как метеорологической характеристики атмосферы. Величины $t_a(0)$ и $\rho(0)$ являются условными обозначениями температуры и объемной влажности *приводного* 10-метрового слоя атмосферы.

Так как СВЧ-радиометры SSM/I и AMSR-E являются многоканальными измерительными системами, то данные их измерений *достаточны* для определения коэффициентов κ_t и κ_ρ , необходимых для восстановления зависимостей $t_a(h)$ и $\rho(h)$ над океанам.

Поскольку частота спутниковых СВЧ-радиометрических измерений значительно меньше частоты буйковых измерений, то при вычислении невязки между ними применяется линейная интерполяция данных радиометров SSM/I и AMSR-E.

С помощью зависимостей $t_a(h)$ и $\rho(h)$ рассчитывается погонное (послойное) и интегральное (полное) поглощение СВЧ-излучения в различных слоях атмосферы для всех спутниковых СВЧ-радиометрических каналов.

По этим данным вычисляются значения яркостной температуры COA с помощью известной плоско-слоистой модели собственного СВЧ-излучения

системы [1], в соответствии с которой, яркостная температура СОА складывается из 3-х компонент:

- яркостная температура восходящего излучения океана, ослабленного поглощением в атмосфере, которая зависит от температуры водной поверхности, скорости приводного ветра, определяющего степень, шероховатости водной поверхности, а также температурными и влажностными характеристиками атмосферы;
- яркостная температура восходящего излучения атмосферы, определяемая исключительно температурой и влажностью атмосферы в различных ее слоях;
- яркостная температура нисходящего излучения атмосферы, переотраженного от водной поверхности, которая зависит как от температурно-влажностных характеристик атмосферы, определяющих ее излучательные свойства, так и от температуры и ветрового состояния поверхности океана, определяющего ее отражательные свойства.

Яркостная температура восходящего излучения и коэффициент отражения поверхности океана зависят от термодинамической температуры его поверхности, степени шероховатости и интенсивности пенообразования, связанных со скоростью приводного ветра (ветра на высоте $h \sim 10$ м); их расчет выполнен с помощью СВЧ-радиационной модели, основанной на систематизации теоретических и экспериментальных данных, приведенных в [1]. Яркостная температура прямой и переотраженной компонент атмосферы определяется поглощением в водяном паре и молекулярном кислороде атмосферы, величина которого зависит от температуры, влажности, давления воздуха и их вертикального распределения; соответствующие оценки получены на основе приведенных в [1] соотношений. Эти модельные соотношения устойчивы, они повторяются на различных пространственно-временных масштабах в различных районах океана.

Величина невязки между модельными и измеренными оценками яркостной температуры СОА рассчитывается для спутниковых восходящих и нисходящих витков, попадающих в ячейки размером $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, центрированных

относительно станций SMKF1 и 42019 для следующих спектральных и поляризационных каналов радиометров SSM/I и AMSR-E:

а) 37 ГГц (0.81 см), 19 ГГц (1.58 см), вертикальная и горизонтальная поляризации; 22.235 ГГц (1.35 см), вертикальная поляризация (радиометр SSM/I);

б) 36.5 ГГц (0.82 см), 18.7 ГГц (1.6 см), 23.8 ГГц, (1.26 см) вертикальная и горизонтальная поляризации (радиометр AMSR-E).

Каналы 85 ГГц (SSM/I) и 89 ГГц (AMSR-E) при совместном анализе данных спутниковых и буйковых измерений не принимались во внимание, т.к. результаты их измерений сильно зависят от интенсивности осадков, которые не учитывались в модельных расчетах яркостной температуры COA. Также были исключены из рассмотрения данные измерений каналов 6.9 ГГц (4.35 см) и 10.65 ГГц (2.82 см) радиометра AMSR-E, несущих информацию преимущественно о характеристиках подстилающей поверхности, поскольку на данном этапе исследования упор сделан на поведение метеорологических параметров COA в периоды циклонической деятельности атмосферы.

Разработанная методика позволяет рассчитывать приближенно значения температуры и влажности атмосферы на различных горизонтах для оценки ее интегральных характеристик таких, например, как интегральное влагосодержание атмосферы (ИВА), энтальпия (теплосодержание), доступная потенциальная энергия атмосферы. Представляется, что именно интегральные характеристики атмосферы являются информативными для анализа динамики COA в зонах деятельности тропических циклонов, несмотря на то, что реальные вертикальные профили температуры и влажности воздуха могут заметно отличаться от экспоненциальных.

На основе буйковых данных о влажности воздуха в приводном слое воздуха и расчетных данных об этих параметрах в вышележащих слоях атмосферы рассчитано интегральное влагосодержание атмосферы в слое 10–10000 м (параметр Q), а также проведено сопоставление результатов расчетов параметра Q с его спутниковыми оценками, полученными с помощью

радиометра SSM/I в районе станции SMKF1 и радиометра AMSR-E в районе станции 42019.

Получены также расчетные оценки энтальпии атмосферы в различных ее слоях в районах деятельности ТЦ Katrina и Humberto.

Динамика ИВА в районе станции SMKF1

На рис. 13 представлены оценки вариаций ИВА в районе станции SMKF1 в период 1-30 августа 2005 г., вычисленные путем послойного интегрирования влажности воздуха на разных высотах на основе предложенного алгоритма, а также спутниковые оценки параметра Q , полученные по данным измерений радиометра SSM/I с помощью разработанного алгоритма.

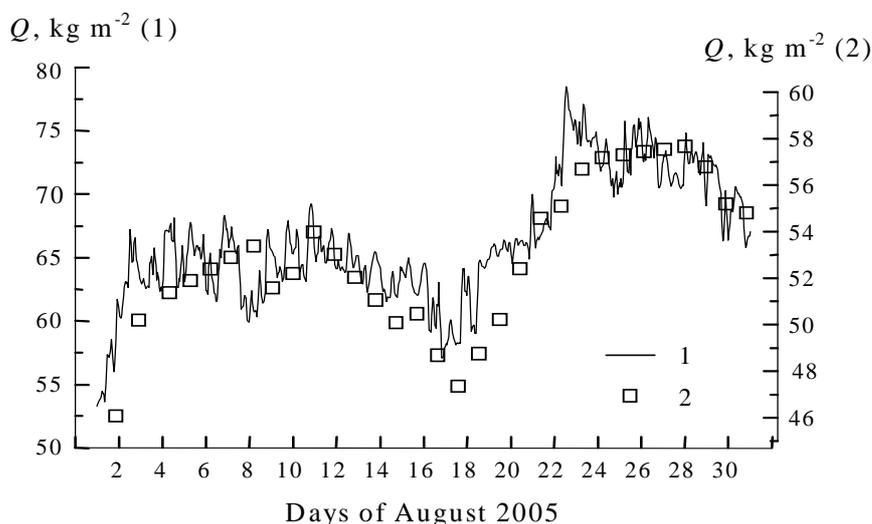


Рис. 13. Сопоставление оценок интегрального влагосодержания атмосферы Q в районе станции SMKF1: 1 - по данным расчета для слоя атмосферы 10–10000 м; 2 - по данным измерений спутникового радиометра SSM/I спутника DMSP F15

Наблюдаются значительные вариации параметра Q в данном районе Флоридского пролива с рядом локальных снижений (провалов) его величины; один из них совпадает по времени (в полдень 26 августа - время прохождения ТЦ Humberto станции SMKF1) с минимумами температуры, влажности и давления приводного воздуха (см. рис. 8) и максимумами потоков явного и скрытого тепла (см. рис. 11).

Различия между абсолютными значениями расчетных и спутниковых оценок параметра Q можно объяснить тем, что при моделировании яркостной

температуры COA не учитывались ее приращения, вызванные облачностью и осадками, фиксируемые спутниковым радиометром SSM/I. Немаловажную роль играет также нерегулярность зондирования района станции SMKF1. и наличие заметных пропусков (лакун) в спутниковых измерениях, что приводит к необходимости оперировать не только с данными фактических измерений радиометра AMSR-E, но и с результатами их интерполяции. Несмотря на это, отмечается хорошее согласие между *относительными* изменениями (вариациями) тех и других оценок, что существенно для обоснования разработанной методики определения температуры и влажности воздуха и, особенно, их изменчивости на различных горизонтах атмосферы в условиях зарождения (прохождения) тропических циклонов.

Динамика ИВА в районе станции 42019

Получены расчетные оценки ИВА в районе станции 42019 в период 6-15 сентября 2007 г., включающий этапы зарождения ТЦ Humberto и его возникновение, а также спутниковые оценки параметра Q (по данным измерений радиометра AMSR-E), а результаты представлены на рис. 14.

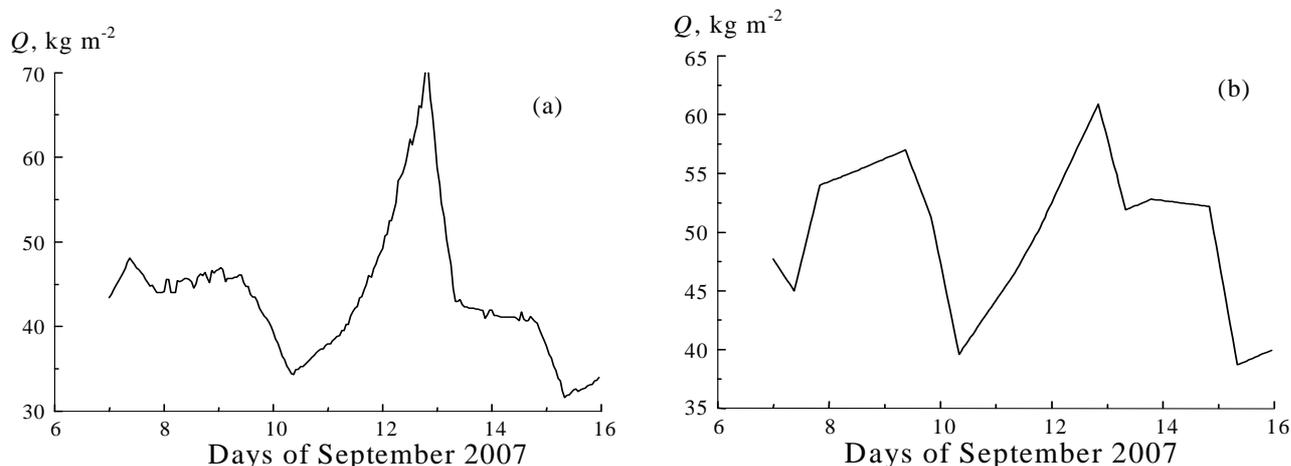


Рис. 14. Сопоставление спутниковых (1) и модельных (2) оценок интегрального влагосодержания атмосферы Q в районе станции 42019 после прохождения ТЦ Humberto

Из иллюстрации видно, что зарождение ТЦ Humberto сопровождается увеличением величины ИВА: максимум величины Q (в полдень 12 сентября) совпадает по времени с минимумами температуры, влажности и давления приводного воздуха, максимумом скорости ветра (рис. 8) и максимумами

потоков явного, скрытого тепла и импульса (рис. 11). Пик значений Q 12 сентября предшествует области повышенного влагосодержания атмосферы 7-9 сентября.

Получены спутниковые и модельные оценки параметра Q после ухода ТЦ Humberto из района станции 42019, результаты их сопоставления для промежутка времени 13-20 сентября представлены на рис. 15.

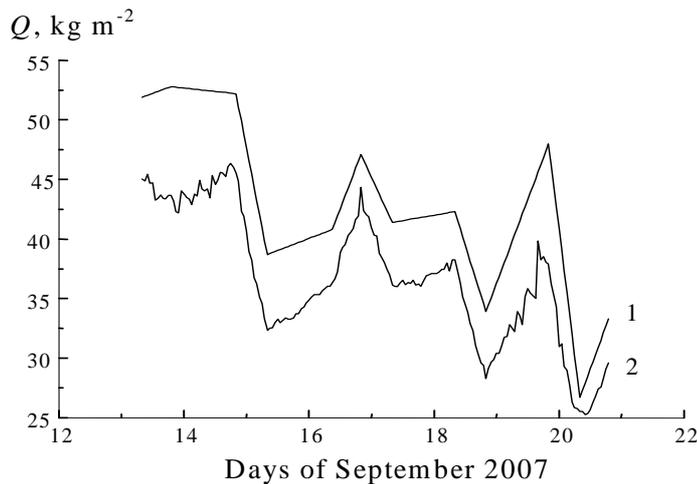


Рис. 15. Сопоставление спутниковых (1) и модельных (2) оценок интегрального влагосодержания атмосферы Q в районе станции 42019 после прохождения ТЦ Humberto

Из иллюстрации следует, что в этот период происходит снижение величины ИВА, которое, как и в случае поверхностных потоков тепла и влаги носит колебательный характер.

Динамика энтальпии атмосферы в районах станций SMKF1 и 42019

Проведены расчеты вариаций энтальпии (теплосодержания) различных слоев атмосферы в районах станций SMKF1 и 42019 в периоды деятельности ТЦ Katrina и Humberto. На рис. 16 приведены результаты расчетов энтальпии J_{10000} для слоя 10–10000 м, которые показывают, что во время прохождения ТЦ Katrina станции SMKF1 и зарождения ТЦ Humberto в районе станции 42019 происходит резкое снижение величины J_{10000} резонансного типа, сопровождаемое сильным увеличением вертикальных турбулентных потоков тепла и влаги на границе раздела океана и атмосферы.

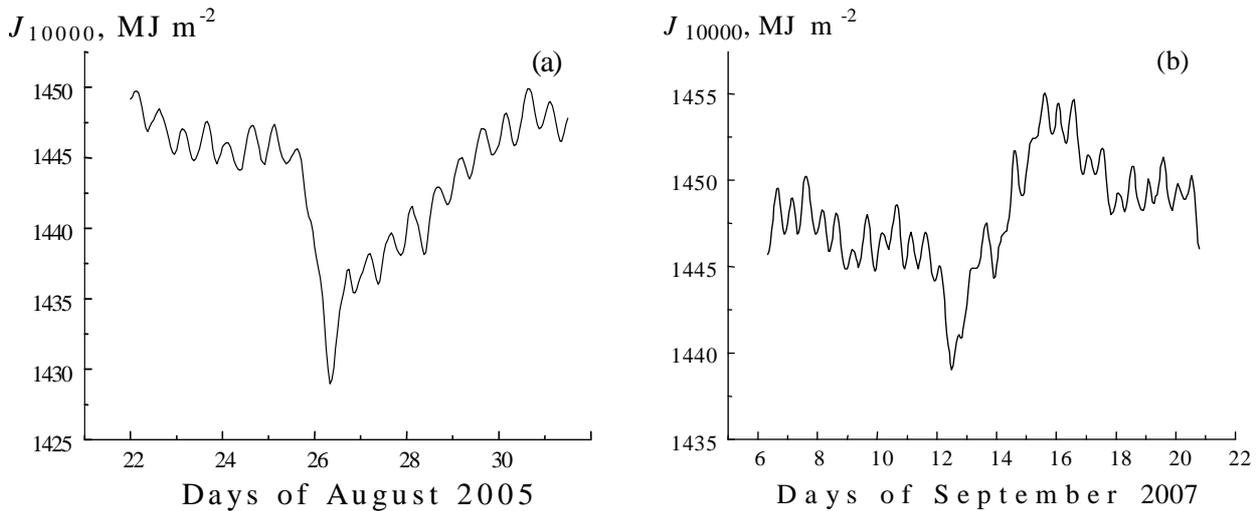


Рис. 16. Вариации энтальпии тропосферы J_{10000} во время прохождения ТЦ Katrina в районе станции SMKF1 (а) и зарождения ТЦ Humberto в районе станции 42019 (б)

Таким образом, в этих районах происходит отбор циклонами тепловой энергии у атмосферы; точно такой же эффект наблюдался и для среднеширотных циклонов в Ньюфаундлендской ЭАЗО Северной Атлантики в эксперименте АТЛАНТЭКС-90 [3].

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ТЕПЛОВЫХ И РАДИОТЕПЛОВЫХ (СВЧ) ХАРАКТЕРИСТИК АТМОСФЕРЫ В ПРЕДШТОРМОВЫХ СИТУАЦИЯХ ВО ФЛОРИДСКОМ ПРОЛИВЕ И В ГОЛУБОЙ БУХТЕ ЧЕРНОГО МОРЯ

Постановка задачи

В этом разделе рассмотрены особенности поведения тепловых и радиотепловых (СВЧ-излучательных) характеристик атмосферы в акваториях, контролируемых контактными и дистанционными средствами в предштормовых ситуациях в двух различных физико-географических районах.

В одном случае исследовалась реакция СОА в период деятельности ТЦ Katrina в августе 2005 г. во Флоридском проливе в районе станции SMKF1. Проведен анализ синоптических вариаций следующих характеристик СОА в период времени 19-24 августа, предшествующий приходу ТЦ Katrina.

а) температура и влажность воздуха в приводном 10-метровом слое в районе станции SMKF1 - результатов прямых метеорологических измерений;

б) интегральное влагосодержание атмосферы (ИВА) - результатов обработки спутниковых СВЧ-радиометрических измерений, и ее энтальпии;

в) вертикальные турбулентные потоки явного, скрытого и суммарного тепла на границе раздела воды и воздуха;

г) интенсивность собственного СВЧ-излучения (яркостной температуры) СОА, измеренной радиометром AMSR-E со спутника EOS Aqua в линии излучения (поглощения) водяного пара атмосферы на длине волны 1.26 см (частота 23.8 ГГц).

В другом случае, в Голубой бухте на Черном море (г. Геленджик, территория филиала Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН) проведены одновременные метеорологические и СВЧ-радиометрические исследования характеристик параметров атмосферы в период времени, предшествующий появлению интенсивного шторма. Измерения проводились в сентябре-октябре 2010 г. с помощью установленных на конце пирса метеорологических датчиков и ориентированного вверх, сканирующего по углу места и азимута радиометра, измеряющего интенсивность собственного СВЧ-излучения атмосферы на длине волны 1.35 см. Цели СВЧ-радиометрических измерений заключались в исследовании изменчивости параметров атмосферы в различных погодных условиях (в том числе, и в предштормовых условиях) и в отработке методики оценивания распределения водяного пара в атмосфере по высоте.

Одновременно, сотрудниками Института космических исследований РАН, Института физики атмосферы РАН и Южного отделения Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН с помощью приборов оптического, инфракрасного, миллиметрового и сантиметрового диапазонов и метеостанции исследовались параметры водной поверхности, а также характеристики приводного воздуха.

Из материалов черноморского эксперимента нами выделены данные наземных измерений температуры и влажности приводного воздуха, а также

яркостной температуры атмосферы в период времени 23-31 сентября, предшествующий приходу шторма.

Позже эти ряды данных были дополнены результатами измерений радиометром AMSR-E спутника EOS Aqua на длине волны 1.26 см (23.8 ГГц) в области моря, примыкающей непосредственно к Голубой бухте. Использование спутниковых данных для акватории самой бухты не представляется возможным, т.к. ее размеры в несколько раз меньше величины пространственного разрешения этого канала радиометра AMSR-E.

С помощью этих средств проведено изучение общих и отличительных признаков в поведении температуры и влажности приводного воздуха, поверхностных потоков явного и скрытого тепла, полного влагосодержания и энтальпии атмосферы, а также СВЧ-излучательных характеристик СОА в периоды времени, предшествующие приближению ТЦ Katrina к району станции SMKF1 и приходу морского шторма в район Голубой бухты.

Динамика характеристик СОА в районе станции SMKF1 накануне приближения ТЦ Katrina

В качестве опорной точки при анализе влияния ТЦ Катрина на параметры атмосферы используется станция SMKF1 (Sombro Key) во Флоридском проливе (24.38°с.ш., 81.07°з.д.) из арсенала данных NDBC.

Обнаружен эффект тепловой "накачки" атмосферы (т.е. аккумуляции скрытого тепла) в атмосферном водяном паре в период времени, предшествующий приближению циклона Katrina к станции SMKF1, который выражается в *постоянном* нарастании значений термодинамических параметров атмосферы - температуры и влажности воздуха, а также яркостной температуры СОА в линии резонансного поглощения радиоволн 1.35 см (22.235 ГГц) (рис. 17). На этом рисунке представлены вариации температуры приводного воздуха в период с 19 по 24 августа 2005 г., зарегистрированные датчиками станции SMKF1. Чередующиеся пики (максимумы и минимумы) этого параметра отражают его *суточные* колебания. Из иллюстрации видно, что

по мере приближения ТЦ Katrina к району станции SMKF1 наблюдается нарастание температуры приводного воздуха: величина вариаций средних (аппроксимированных) значений параметра t_a в период с 19 по 23 сентября достигает 0.5°C , причем суточный размах изменений этого параметра составляет около 1°C .

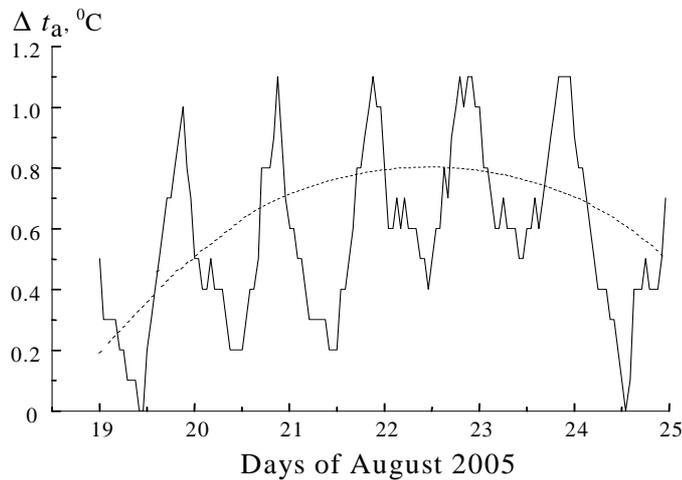


Рис. 17. Вариации температуры t_a приводного воздуха перед приходом ТЦ Katrina в район станции SMKF1 во Флоридском проливе. Пунктирная линия - аппроксимация оригинальных результатов полиномом 2-ой степени

Рис. 18 иллюстрирует поведение влажностных (а, б) и яркостных (в) характеристик атмосферы в районе станции SMKF1 в течение недельного промежутка времени, предшествующего приходу ТЦ Katrina (18-27 сентября). На рис. 18а представлены расчетные оценки вариаций абсолютной влажности a приводного воздуха, которые получены на основе результатов обширных экспериментальных исследований связи упругости водяного пара с разностью температур воды и воздуха [8] в различных частях Мирового океана - прямые измерения влажности воздуха на буйковых станциях NOAA не предусмотрены. На рис 18б и 18в представлены оценки вариаций ИВА - параметра Q (18б), полученные по данным измерений радиометра AMSR-E спутника EOS Aqua с помощью известной методики [11], а также вариации яркостной температуры $T^Я$ (18в), измеренной в области резонансного поглощения водяного пара атмосферы 1.26 см.

Из иллюстрации видно, что в период времени, предшествующий приходу ТЦ Katrina в район станции SMKF1, наблюдается монотонное возрастание абсолютной влажности приводного воздуха (a) на 3 г м^{-3} , ИВА - параметра Q на 11 кг м^{-2} , а также яркостной температуры T^a СОА на длине волны 1.26 см на 13 градусов Кельвина.

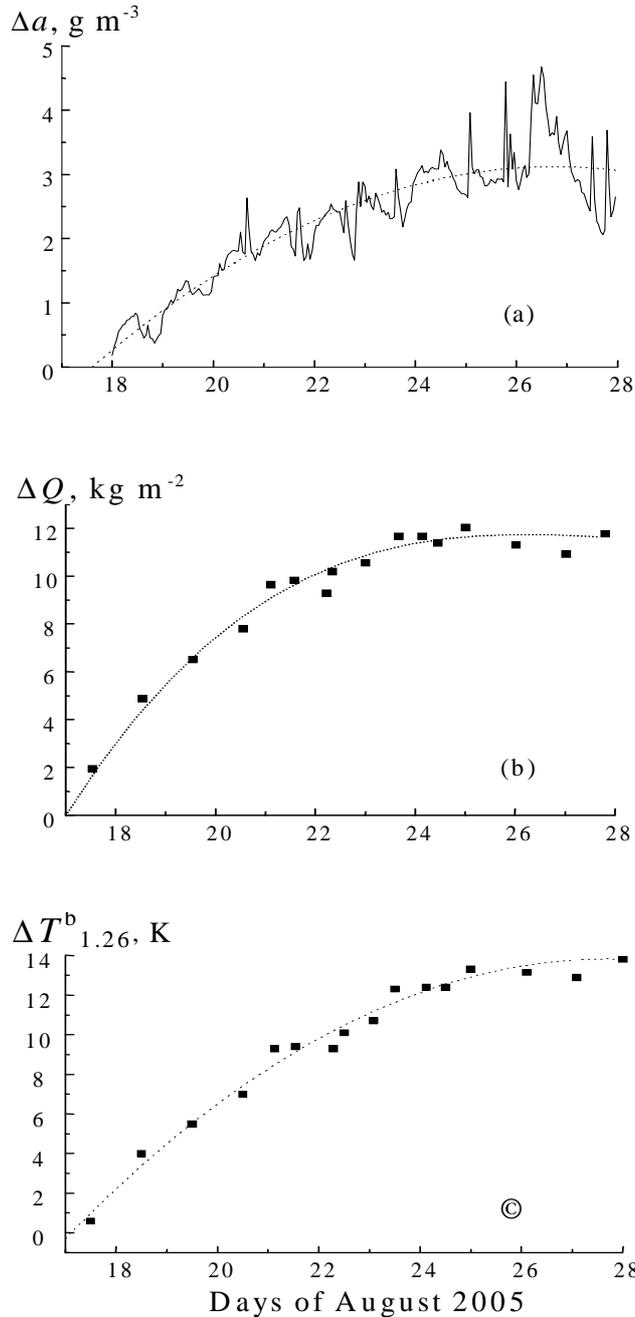


Рис. 18. Вариации абсолютной влажности приводного воздуха a (а), интегрального влагосодержания атмосферы Q (б) и яркостной температуры системы "океан-атмосфера" T^a , измеренной радиометром AMSR-E на длине 1.26 см (вертикальная поляризация) в период приближения ТЦ Katrina к станции SMKF1. Пунктирные линии - аппроксимации

оригинальных результатов полиномами 2-ой степени

Сравнение рис. 18б и 18в подтверждает широко известный факт о тесной связи между яркостной температурой СОА в области резонансного поглощения радиоволн в водяном паре атмосферы и полным влагосодержанием атмосферы; величина чувствительности интенсивности собственного СВЧ-излучения СОА к вариациям полного влагосодержания атмосферы $\Delta T_{1.26}^{\text{Я}}/\Delta Q$ близка к ее теоретическому значению, которое составляет на длине волны 1.35 см (центральная линия резонансного поглощения радиоволн в водяном паре) в тропических широтах океана 1.1–1.2 К/(кг м⁻²).

Черноморский эксперимент

СВЧ-радиометрические измерения

В сентябре 2010 г. в Голубой бухте в районе Геленджика на экспериментальной базе южного филиала Института Океанологии им. П.П. Ширшова РАН были проведены комплексные измерения метеорологических и СВЧ-излучательных характеристик атмосферы в период, предшествующий появлению интенсивного шторма. Приборы измерительного комплекса располагались на конце пирса, длина которого составляет примерно 200 м, а глубина моря в месте расположения измерительного комплекса равна 7 м (см. рис. 19, 20).



Рис. 19. Общий вид измерительного комплекса



Рис. 20. Внешний вид сканирующего СВЧ-радиометра (слева).

Такие исследования на этой экспериментальной базе проводятся регулярно (ежегодно) при участии различных научных организаций России и Украины, но в 2010 г. мы включили впервые со стороны ИРЭ РАН в состав измерительных средств СВЧ-радиометр, действующий в линии поглощения радиоволн 1.35 см (частота 22.235 ГГц), разработанный и изготовленный в НПО "Вега" (г. Москва) по тематике гранта МНТЦ №3827 "Разработка технологий диагностики зарождения тропических ураганов в океане на основе методов дистанционного зондирования".

Поворотная платформа для установки СВЧ-радиометра была закреплена на металлической ферме длиной 5 м. Обзор верхней полусферы осуществлялся путем ее сканирования с плавным изменением угла от зенита до надира и обратно для ряда фиксированных направлений по углу места.

Нами проведено сопоставление динамики температуры и влажности приводного воздуха в предштормовой ситуации), измеренных метеорологическими датчиками на пирсе с результатами одновременных наземных СВЧ-радиометрических измерений, радиометром, действующим на длине волны 1.35 см (разработанным и изготовленным в НПО ВЕГА), а также с данными измерений радиометра AMSR-E спутника EOS Aqua на длине волны 1.26 см (23.8 ГГц) в области моря, примыкающей непосредственно к Голубой бухте со стороны моря.

Значения яркостной температуры атмосферы на длине волны 1.35 см для сканов в вертикальной плоскости в период 23-30 сентября, предшествующий появлению шторма в Голубой бухте (эпицентр циклона прошел над измерительным комплексом 1 октября 2010 г.) монотонно возрастают: как ее минимальные, так и максимальные значения, зарегистрированные при положениях поворотной платформы 0 и 90 градусов, соответственно.

Рис. 21 иллюстрирует зависимости яркостной температуры атмосферы на длине волны 1.35 см от величины отклонения угла от зенита. Эта величина тесно связана с интегральным влагосодержанием атмосферы и отчетливо демонстрирует эффект накопления водяного пара в атмосфере в предштормовой период.

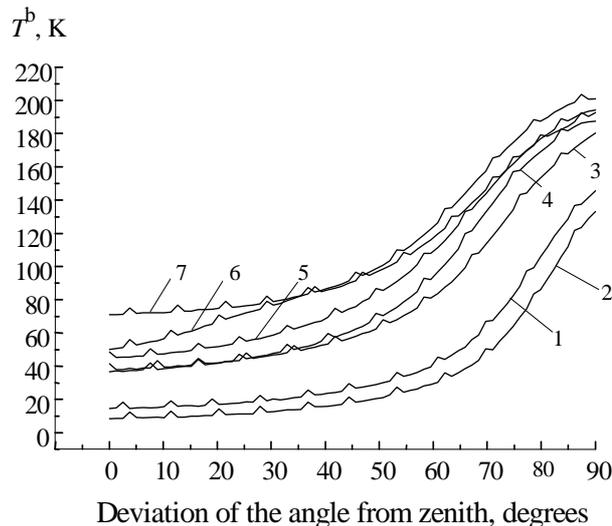


Рис. 21. Угловая зависимость яркостной температуры атмосферы T^a на длине волны 1.35 см для дней сентября в предштормовой период в Голубой бухте. Кривые с номерами от 1 до 7 соответствуют датам от 23 до 30 сентября

Отметим, что приведенные на рис. 21 результаты хорошо соответствуют классическим представлениям об угловых зависимостях яркостной температуры атмосферы.

Тепловые характеристики приводного воздуха

Результаты метеорологических измерений на пирсе показали, что в течение нескольких суток, предшествующих приходу шторма в район Голубой бухты, наблюдалось повышение температуры и влажности приводного воздуха.

С помощью балк-формул (1) и (2) на основе данных контактных измерений температуры воды и воздуха, а также скорости приводного ветра рассчитаны вертикальные потоки явного, скрытого и суммарного тепла, а результаты приведены на рис. 22.

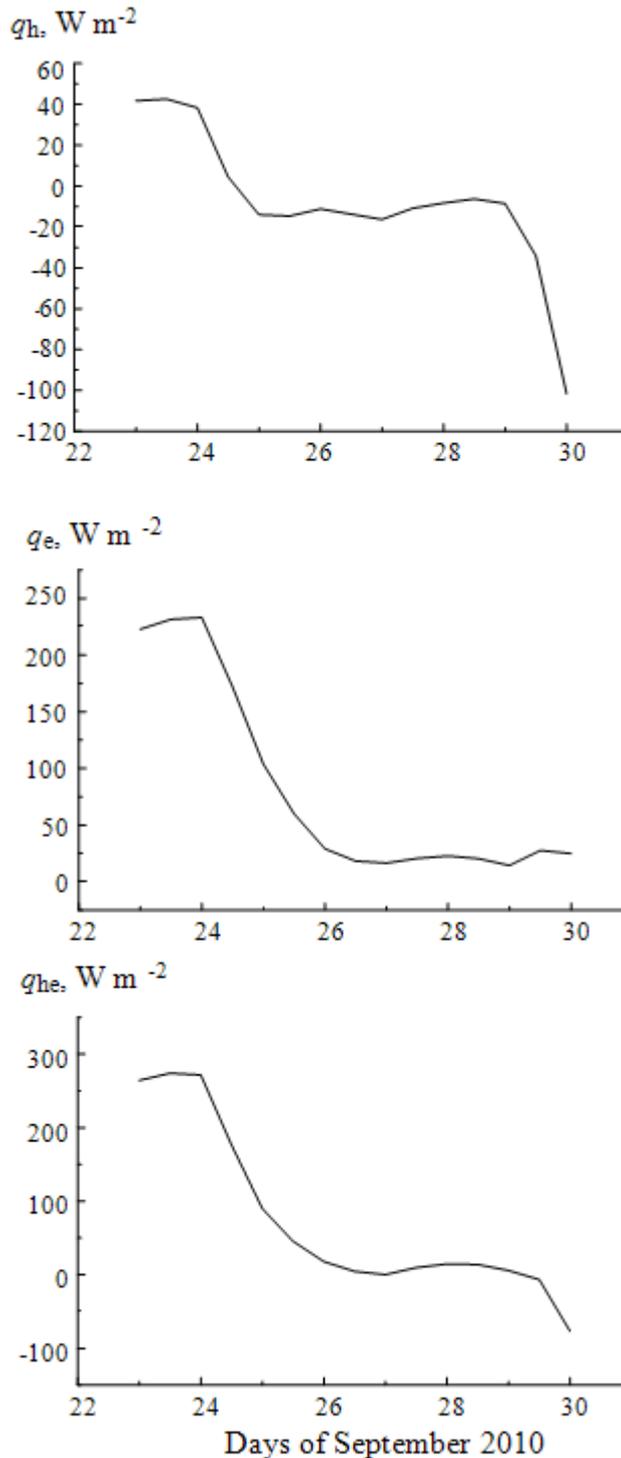


Рис. 22. Вариации потоков явного q_h , скрытого q_e и суммарного q_{he} тепла в предштормовой период в Голубой бухте

Согласно результатам расчетов в этот период происходило накопление тепла в водяном паре приводного слоя атмосферы; величина удельного теплосодержания которого возросла примерно на 61 КДж м^{-2} . Столь сильное приращение теплосодержания водяного пара приводной атмосферы по сравнению с предштормовой ситуацией во Флоридском проливе в августе 2005 г. (14.7 КДж м^{-2}) объясняется тем, что вариации температуры и влажности приводного воздуха в Голубой бухте в период приближения шторма значительно превышали вариации этих параметров в районе станции SMKF1 во время приближения ТЦ Katrina.

Результаты комплексных наблюдений в районе Голубой бухты

Проведено сопоставление динамики температуры и влажности приводного воздуха, измеренных метеорологическими датчиками на пирсе, с результатами одновременных измерений радиометром AMSR-E спутника EOS Aqua на длине волны 1.26 см (23.8 ГГц) в области моря, примыкающей непосредственно к Голубой бухте со стороны моря. Сравнение данных спутниковых измерений яркостной температуры COA над самой Голубой бухтой было бы некорректным, т.к. размеры бухты в несколько раз меньше величины пространственного разрешения канала 1.26 см радиометра AMSR-E. Размеры выбранной области соответствуют спутниковому "пятну", линейные размеры которого на длине волны 1.26 см составляют $40 \times 60 \text{ км}$; координаты центра области - $44^\circ \text{ с.ш.}, 38^\circ \text{ в.д.}$

На рис. 23 иллюстрируются результаты сопоставления температуры (1) и влажности (2) приводного воздуха (а), яркостной температуры COA, измеренной радиометром AMSR-E на длине волны 1.26 см (б) и яркостной температурой, измеренной с пирса сканирующим СВЧ-радиометром на длине волны 1.35 см (в). В последнем случае из всех сканов используются выборки, соответствующие только измерениям в надир.

Из иллюстрации видно, что по мере приближения шторма происходило снижение величины потока явного тепла с 40 до -100 Вт м⁻² и скрытого тепла с 225 до 10 Вт м⁻². Таким образом, в предштормовой период водная поверхность отдавала тепло приводному воздуху, а примерно за сутки до прихода шторма в Голубую бухту характер теплообмена между водой и воздухом сменился на *противоположный*.

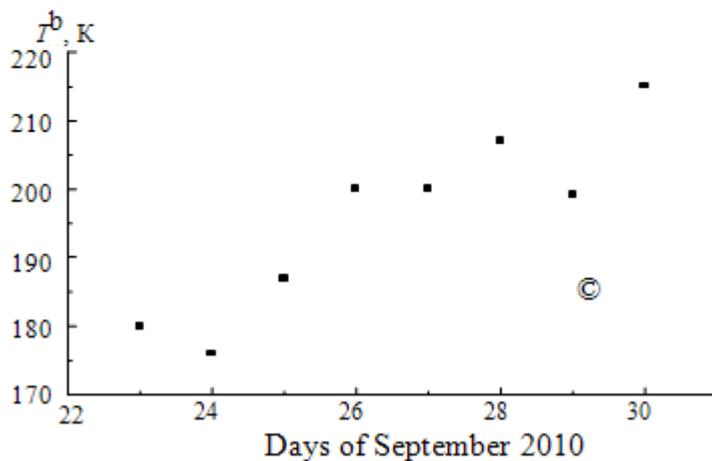
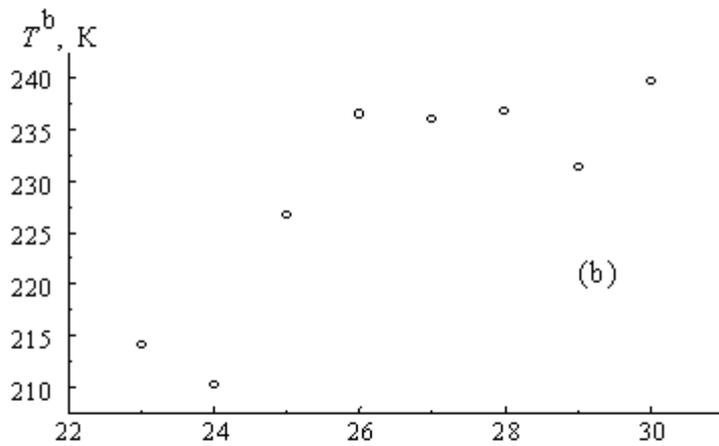
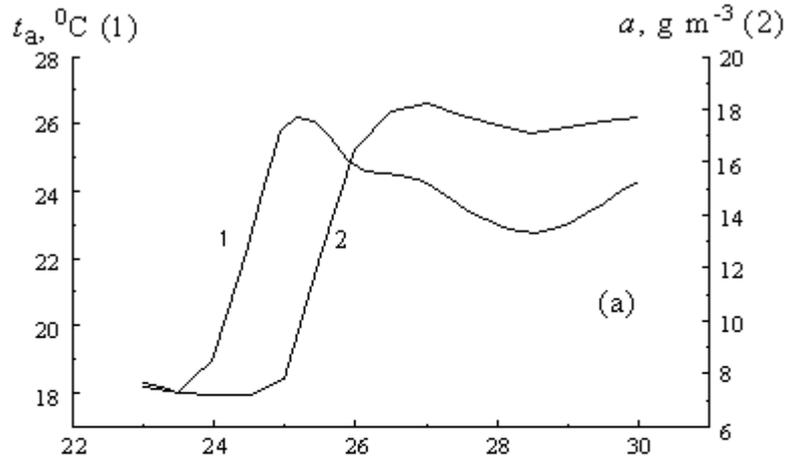


Рис. 23. Вариации температуры (1) и абсолютной влажности (2) приводного воздуха в период, предшествующий шторму в Голубой бухте (а), а также яркостной температуры СОА на длине волны 1.26 см, измеренной спутниковым радиометром AMSR-E (б), яркостной температуры СОА, измеренной с пирса СВЧ-радиометром на длине волны 1.35 см (в).

Из сравнения рис. 10 и рис. 22 следует, что перепад величины потока явного тепла в предштормовой период в Голубой бухте, в 2 раза превышает соответствующую величину, зафиксированную во Флоридском проливе во время приближения ТЦ Katrina к станции SMKF1, а перепад величины потока скрытого тепла несколько меньше.

Из иллюстраций также видно сходство характера реакции температуры и влажности приводного воздуха на пирсе, а также яркостных температур СОА в резонансной области поглощения радиоволн в водяном паре атмосферы, независимо от способа спутниковых СВЧ-радиометрических измерений (из космоса или с морской поверхности).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в статье результаты сравнительного анализа динамики температуры и влажности приводного воздуха, поверхностных потоков явного и скрытого тепла, полного влагосодержания и энтальпии атмосферы, а также СВЧ-излучательных характеристик СОА в периоды времени, предшествующие приближению ТЦ Katrina к району станции SMKF1 во Флоридском проливе (конец августа 2005 г.) и приходу морского шторма в район Голубой бухты в Черном море (конец сентября 2010 г.) позволяют сделать следующие выводы.

1. Наблюдаются сходные признаки в поведении этих характеристик СОА – монотонное возрастание температуры и влажности приводного воздуха, полного влагосодержания и энтальпии атмосферы, а также яркостной температуры СОА и снижение интенсивности тепло- и влагообмена между водной поверхностью и атмосферой в периоды времени, предшествующие приближению ТЦ Katrina к району станции SMKF1 и приходу морского шторма в район Голубой бухты.

2. В обоих случаях в предштормовой период времени (в течение нескольких суток) наблюдается эффект “накачки” атмосферы энергией в виде

скрытого тепла, содержащегося в водяном паре, который отчетливо регистрируется как метеорологическими датчиками, так и спутниковыми СВЧ-радиометрическими средствами.

3. Полученные в черноморском эксперименте данные СВЧ-радиометрических измерений в области резонансного поглощения радиоволн в водяном паре атмосферы - наземные и спутниковые - хорошо согласуются между собой и могут в равной степени служить полезным инструментом для контроля изменчивости полного влагосодержания атмосферы в предштормовых ситуациях.

Результаты нашего исследования подтверждают роль интегрального содержания водяного пара в атмосфере (легко доступного для мониторинга этой характеристики современными спутниковыми СВЧ-радиометрическими средствами) на стадиях, предшествующих развитию штормовых ситуаций в океане и на море. Последние исследования [12] показывают, что регулярный контроль именно этой характеристики является важным и необходимым условием при изучении проблемы генезиса тропических циклонов.

Важную роль в нашем исследовании сыграл грант МНТЦ №3827 (2008-2011 гг.), целью которого было развитие технологий диагностики зарождения тропических ураганов в океане на основе методов дистанционного зондирования и математического моделирования. В частности, на средства этого гранта в Концерне Радиостроения "Вега" был изготовлен СВЧ-радиометр, работающий на длине волны 1.35 см (22.235 ГГц), использованный в черноморском эксперименте.

Проведению экспедиционных работ в Голубой бухте способствовали гранты РФФИ №08-05-00890-а, №09-02-00780-а, №10-02-10019-к, №10-05-10054-к, а также грант МНТЦ №3827.

Литература

1. А.Е. Башаринов, А.С. Гурвич, С.Т. Егоров. Радиоизлучение Земли как планеты. М.: Наука. 1974. 188 с.

2. СВЧ-радиометрия земной и водной поверхностей: от теории к практике. Под ред. А.М. Шутко и Ю.В. Гуляева. Академическое издательство им. проф. М. Дринова, София, 2012 г. (в печати).
3. С.С. Лаппо, С.К. Гулев, А.Е. Рождественский. Крупномасштабное тепловое взаимодействие в системе океан-атмосфера и энергоактивные области Мирового океана. Л.: Гидрометеиздат. 1990. 336 с.
4. А.Г. Гранков, А.А. Мильшин. Взаимосвязь радиоизлучения системы океан-атмосфера с тепловыми и динамическими процессами на границе раздела. М.: Физматлит, 2004, 168 с.
5. Special Sensor Microwave Imager (SSM/I). Users Guide. Marshall Space Flight Center (MSFC). Distributed Active Archive Center.
6. T. Kawanishi, T. Sezai T, Ito et al. The advanced microwave scanning radiometer for the Earth Observing System (AMSR-E), NASDA's contribution to the EOS for global energy and water cycle studies. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 2003, no. 48, pp. 173-183.
7. D. Kunkee, D. Boucher, G. Poe. and S. Swadley. Evaluation of the Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) Special Microwave Imager Sounder (SSMIS). Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2006, pp. 101-104.
8. В.Г. Снопков. Расчет влажности воздуха на морем по разности температуры вода-воздух // Метеорология и гидрология. 1980. №2. С. 109-111.
9. Г.С. Голицын. Ураганы, полярные и тропические, их энергия и размеры, количественный критерий возникновения // Изв. РАН. Физика океана и атмосферы. 2008. Т.44. №5. С. 579-590.
10. А.А. Харкевич А.А. Основы радиотехники (3-е издание). М.: Физматлит. 2007. 512 с.
11. J.C. Alishouse, S.A. Snyder, J. Vongsatorn and R.R. Ferrado. Determination of oceanic total precipitate water from the SSM/I. J. Geophys. Res., 1990, vol. 28, no. 5, pp. 811-816.

12. Е.А. Шарков., Я.Н. Шрамков., И.В. Покровская. Повышенное содержание водяного пара в атмосфере тропических широт как необходимое условие генезиса тропических циклонов // Исслед. Земли из космоса, 2012, №2, С. 73-82.