

УДК 551.465:551.521

ПОВЕДЕНИЕ РАДИОЯРКОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ СИСТЕМЫ «ОКЕАН—АТМОСФЕРА» В УСЛОВИЯХ АКТИВНОСТИ СРЕДНЕШИРОТНЫХ И ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ

А. Г. Гранков, А. А. Мильшин, Е. П. Новичихин

Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН,
г. Фрязино Московской области, Россия

В статье анализируется поведение характеристик системы «океан—атмосфера» на основе данных прямых (контактных) и спутниковых радиометрических измерений. Рассмотрены общие признаки и особенности их динамики в средних широтах Северной Атлантики (в Норвежской, Ньюфаундлендской и Гольфстримской энергоактивных зонах), значительно влияющих на погодные условия в Европе, и в тропических широтах Атлантики (Мексиканский залив, район Багамских островов), являющихся источниками тропического циклогенезиса.

ВВЕДЕНИЕ

В статье проводится анализ изменчивости интенсивности собственного СВЧ излучения — яркостной температуры системы «океан—атмосфера», измеряемой с различных спутников Земли в районах активности среднеширотных и тропических циклонов. Приведены примеры взаимосвязи динамики яркостной температуры в участках СВЧ диапазона, используемых на современных спутниках, с изменчивостью различных параметров системы «океан—атмосфера» в характерном для существования циклонов синоптическом масштабе времени.

Стимулом для этой работы послужили результаты проведённых нами ранее исследований динамики яркостной температуры системы «океан—атмосфера» и её связи с вертикальными турбулентными потоками тепла на границе раздела океана и атмосферы на различных пространственных и временных масштабах в энергоактивных зонах Северной Атлантики, находящихся в русле течения Гольфстрим и Северно-Атлантического течения [1]. Наибольший интерес представляет Ньюфаундлендская энергоактивная зона Северной Атлантики, которая находится на границе тёплого течения Гольфстрим и холодного Лабрадорского течения и отличается сильной синоптической изменчивостью метеорологических, тепловых, а также радиационных характеристик системы «океан—атмосфера»; эта область Северной Атлантики постоянно подвергается воздействию североатлантических циклонов [2]. Данная область представляет интерес как для океанологов, которые проводили там регулярные судовые измерения (например, в рамках известных экспериментов НЬЮФАЭКС-88 и АТЛАНТЭКС-90), так и для специалистов по дистанционному зондированию, т. к. вариации яркостной температуры системы «океан—атмосфера» во время прохождения циклонов здесь значительны, и во много раз превышают погрешности измерений, обусловленные шумовой чувствительностью СВЧ радиометрических приёмников и их калибровкой. Важно и то, что такие эксперименты позволяют чётко совмещать данные спутниковых СВЧ радиометрических измерений и данные прямых (контактных) судовых измерений.

В работе впервые сравнивается динамика СВЧ излучения системы «океан—атмосфера» в районе среднеширотных циклонов в Северной Атлантике, изучение которых ведётся с 90-х годов, и в районе тропических циклонов, которые стали предметом наших исследований в последние несколько лет. Цель исследования — поиск общих свойств и различий в поведении СВЧ излучения системы «океан—атмосфера» при возбуждении системы среднеширотными и тропическими

циклонами на различных стадиях: приход (зарождение) циклона, его развитие, последствие (релаксация). Сравнительный анализ таких различных явлений обоснован, в частности, рассмотрением с единых позиций тропических циклонов (ураганов, тайфунов) и взрывных полярных циклонов в работе [3].

Отдельной задачей является исследование связи яркостной температуры излучения системы «океан—атмосфера» в различных участках СВЧ диапазона с характеристиками теплового баланса системы: вертикальными турбулентными потоками тепла и влаги в приводном слое атмосферы, интегральным содержанием явного тепла (энтальпией), а также скрытым (латентным) теплом, содержащимся в водяном паре атмосферы.

1. ПОВЕДЕНИЕ ЯРКОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ СИСТЕМЫ «ОКЕАН—АТМОСФЕРА» ПОД ВЛИЯНИЕМ СРЕДНЕШИРОТНЫХ ЦИКЛОНОВ В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ

1.1. Подход к решению задачи

Основные результаты получены на основе данных судовых экспериментов НЬЮФАЭКС-88 и АТЛАНТЭКС-90 в Ньюфаундлендской энергоактивной зоне Северной Атлантики и данных СВЧ радиометрических измерений, проведённых радиометром SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager) с метеорологического спутника США F08 серии DMSP (Defence Meteorological Satellite Program). Технические характеристики радиометра SSM/I приведены в статье [4].

Оба типа измерений были запланированы и выполнялись независимо в одно и то же время; целью данной работы является совмещение их результатов.

Судовые эксперименты НЬЮФАЭКС-88 и АТЛАНТЭКС-90 проводились на научно-исследовательских судах погоды «Виктор Бугаев», «Муссон» и «Волна» и являлись заключительными в изучении процессов крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы в Ньюфаундлендской энергоактивной зоне в рамках программы «Разрезы» [5]. Наиболее детально проанализированы фрагменты стационарных фаз экспериментов НЬЮФАЭКС-88 и АТЛАНТЭКС-90 суда были неподвижны, поскольку именно в эти периоды времени все суда погоды отмечали отклик параметров океана и атмосферы на прохождение мощных циклонов в этой области Северной Атлантики.

Из архива данных, накопленного за весь период наблюдений с судов погоды «Виктор Бугаев», «Муссон» и «Волна», нами использованы данные 3–21 марта 1988 года эксперимента НЬЮФАЭКС-88 и 4–21 апреля 1990 года эксперимента АТЛАНТЭКС-90. Эти фазы отличаются от остальных этапов следующими особенностями:

1) наибольшая периодичность и регулярность прямых (контактных) океанографических, метеорологических и аэрологических наблюдений в этот период;

2) возможность исследования в «чистом» виде временной динамики параметров океана и атмосферы благодаря фиксированному положению судов в определённых областях Ньюфаундлендской энергоактивной зоны.

Суда погоды в периоды проведения экспериментов НЬЮФАЭКС-88 и АТЛАНТЭКС-90 проводили измерения в трёх точках дельты Гольфстрима: на южной периферии основной струи Гольфстрима («Виктор Бугаев»), в южной ветви Гольфстрима («Муссон») и в восточной ветви Лабрадорского течения («Волна») [2]. Данная область океана характеризуется значительной синоптической изменчивостью параметров океана и атмосферы, что обусловлено близостью субполярного гидрологического фронта, образуемого холодным Лабрадорским течением и тёплым квазистационарным антициклоническим вихрем Гольфстрима. Кроме того, эта область отличает-

ся интенсивной горизонтальной циркуляцией атмосферы: примерно 50 % времени она подвержена воздействию мощных среднеширотных циклонов, сопровождающихся значительными изменениями полей температуры и влажности атмосферы, а также вариациями потоков явного и скрытого тепла [2].

Для расчёта характеристик излучения системы «океан—атмосфера» на основе этих данных воспользуемся известной плоскостной моделью переноса излучения [6], согласно которой яркостная температура собственного СВЧ излучения системы при наблюдении в надир с высоты H складывается из трёх компонент (ограничимся случаем безоблачной атмосферы):

$$T_{\Sigma}^{\text{я}} = T_1^{\text{я}} + T_2^{\text{я}} + T_3^{\text{я}}. \quad (1)$$

Здесь $T_1^{\text{я}} = T_{\text{п}}^{\text{я}} \exp(-\tau_{\Sigma})$ — яркостная температура излучения поверхности океана, ослабленного атмосферой, а величина $T_{\text{п}}^{\text{я}}$ пропорциональна коэффициенту излучения водной поверхности и её термодинамической температуре $T_{\text{п}}$; $T_2^{\text{я}} = \int_0^H T(h) \gamma_{\Sigma}(h) \exp[\tau_{\Sigma}(h) - \tau_{\Sigma}(H)] dh$ — яркостная температура восходящего излучения атмосферы; $T_3^{\text{я}} = \exp[-\tau_{\Sigma}(H)] R \int_0^H T(h) \gamma_{\Sigma}(h) \exp[\tau_{\Sigma}(h) - \tau_{\Sigma}(H)] dh$ — яркостная температура нисходящего излучения атмосферы, переотражённого водной поверхностью; $T(z)$ — термодинамическая температура атмосферы на уровне z ; $\tau_{\Sigma}(h) = \int_0^h \gamma_{\Sigma}(z) dz$ — интегральное поглощение излучения в атмосфере, определяемое погонным поглощением γ_{Σ} и толщиной слоя z , отсчитываемого от поверхности океана ($z = 0$); R — коэффициент отражения нисходящего излучения атмосферы от водной поверхности.

С помощью данной модели переноса излучения численно проанализированы синоптические вариации яркостной температуры системы «океан—атмосфера» в диапазоне длин волн 0,5÷5 см за период стационарной фазы наблюдений с судов «Волна» (42,3° с. ш., 46° з. д.), «Муссон» (41,3° с. ш., 41° з. д.) и «Виктор Бугаев» (48,2° с. ш., 46° з. д.) в экспериментах НЬЮФАЭКС-88 и АТЛАНТЭКС-90. Для расчётов из архивных материалов выделены следующие необходимые параметры:

- 1) ежедневные значения температуры поверхности океана и скорости приводного ветра, необходимые для расчёта яркостной температуры поверхности океана;
- 2) относительная влажность (упругость водяного пара) и давление воздуха на 20 высотах в диапазоне 10÷16 000 м с 6-часовым временным интервалом для расчёта компонент собственного и переотражённого радиоизлучения атмосферы.

Рассмотрены следующие варианты для оценки вклада различных слоёв в излучение системы «океан—атмосфера» и их роли во взаимосвязи с тепловыми потоками на границе океана и атмосферы на синоптических пространственных и временных масштабах:

- 1) приёмники излучения (радиометры в миллиметровом и сантиметровом диапазонах длин волн) имеют антенны, ориентированные вниз, и находятся выше свободной атмосферы (слоя 0÷1 500 м) — соответствует случаю наблюдения со спутника Земли;
- 2) приёмники излучения имеют антенны, ориентированные вниз, и расположены на границе между свободной атмосферой и атмосферным пограничным слоем (слоем турбулентности) — реализуется при наблюдении с самолёта на высотах 1 000÷1 500 м над поверхностью океана;
- 3) близкорасположенные друг к другу приёмники излучения имеют антенны, ориентированные вверх и вниз, и находятся на расстоянии 10÷20 м от поверхности океана — соответствует случаю наблюдения с борта судна.

1.2. Результаты расчётов

На основе данных измерений с судов погоды «Виктор Бугаев», «Муссон» и «Волна», проведённых на стационарной фазе эксперимента АТЛАНТЭКС-90, выполнены расчёты максимальных значений вариаций (контрастов) яркостной температуры системы «океан—атмосфера», наблюдавшихся в Ньюфаундлендской энергоактивной зоне в апреле 1990 года (см. рис. 1). Среди участков спектра, использованных для расчёта яркостной температуры, выделяются длины волн $0,8 \div 1,6$ см в окрестности линии резонансного излучения (поглощения) водяного пара атмосферы; максимальный контраст яркостной температуры достигает здесь $40 \div 50$ К на длине волны 1,35 см (22,235 ГГц).

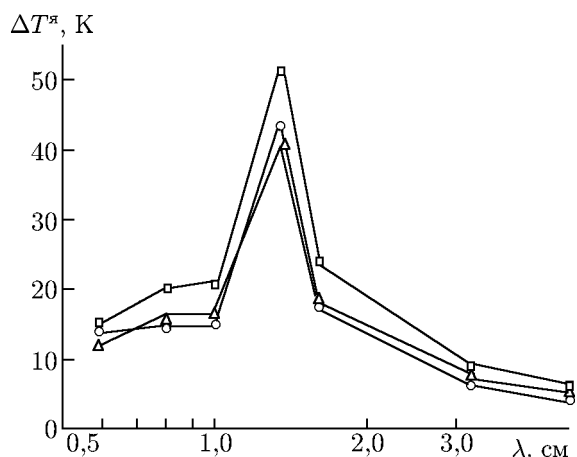


Рис. 1. Спектр яркостного контраста системы «океан—атмосфера» $\Delta T_{\text{я}}$ в диапазоне длин волн $0,5 \div 5$ см, вызванного прохождением циклона (8–13 апреля 1990 г.) в районах расположения судов «Виктор Бугаев» (кружки), «Муссон» (треугольники) и «Волна» (квадраты). Эксперимент АТЛАНТЭКС-90

но) q_e тепла [1, 2]; однако анализ данных судовых измерений в экспериментах НЬЮФАЭКС-88 и АТЛАНТЭКС-90 указывает на существенный вклад ветра [7].

По нашему мнению, диапазон резонансного поглощения радиоволн в водяном паре атмосферы (длина волны 1,35 см) играет особую роль при анализе теплового взаимодействия океана и атмосферы; именно эта СВЧ область будет в центре внимания при изучении влияния среднеширотных и тропических циклонов на характеристики системы «океан—атмосфера».

На рис. 2 представлены результаты расчётов яркостной температуры системы «океан—атмосфера» на длине волны 1,35 см и потоков суммарного тепла для судов «Виктор Бугаев», «Муссон» и «Волна» в Ньюфаундлендской энергоактивной зоне при прохождении мощного циклона 8–13 апреля 1990 года. Вариации яркостной температуры на длине волны 1,35 см представлены на фоне вариаций потоков суммарного тепла для того, чтобы подчеркнуть связь данных вариаций на синоптических масштабах времени, обусловленную прохождением среднеширотных циклонов. Как показано в [1], эта связь обусловлена интенсивным горизонтальным переносом тепла и влаги в атмосфере; данный фактор приводит к возмущениям температуры и влажности атмосферы и, как следствие, к изменению теплового потока на границе раздела океана и атмосферы и яркостной температуры излучения системы «океан—атмосфера».

В этом спектральном диапазоне наблюдается тесная связь между вариациями вертикальных турбулентных потоков суммарного (явного q_h и скрытого q_e) тепла $q_{he} = q_h + q_e$ на границе раздела океана и атмосферы, полученных по данным судовых измерений, и яркостной температурой $T_{\text{я}}$ на спутниковом, самолётном и корабельном уровнях в районах расположения судов «Виктор Бугаев», «Муссон» и «Волна».

Эта связь объясняется зависимостью яркостной температуры излучения системы «океан—атмосфера» от температуры и влажности приводного (10-метрового) слоя атмосферы в диапазоне радиоволн резонансного поглощения водяного пара ($\lambda \approx 1,35$ см), а также от температуры поверхности океана. Разность температур воды и воздуха является ключевой характеристикой системы «океан—атмосфера» при определении интенсивности тепло- и влагообмена в контактном слое системы (интенсивности граничных турбулентных потоков явного q_h и скрытого (латентного) q_e тепла).

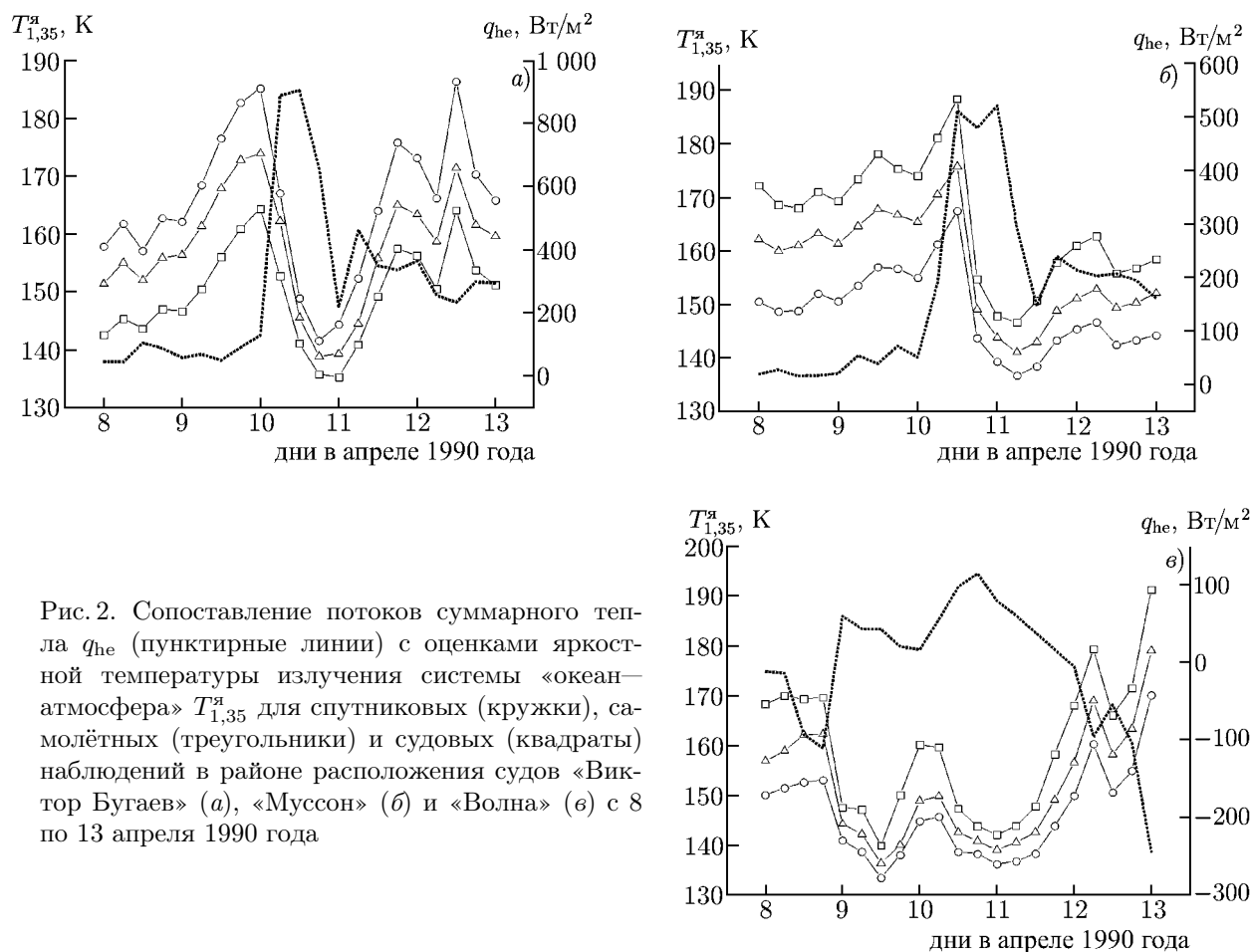


Рис. 2. Сопоставление потоков суммарного тепла q_{he} (пунктирные линии) с оценками яркостной температуры излучения системы «океан—атмосфера» $T^я_{1,35}$ для спутниковых (кружки), самолётных (треугольники) и судовых (квадраты) наблюдений в районе расположения судов «Виктор Бугаев» (а), «Муссон» (б) и «Волна» (в) с 8 по 13 апреля 1990 года

Из рис. 2 видно, что увеличение теплового потока q_{he} приводит к снижению яркостной температуры $T^я$ собственного СВЧ излучения системы «океан—атмосфера». Вариации яркостной температуры в этот период составляют в среднем $15 \div 20$ К на длине волны излучения 5,9 мм и $30 \div 40$ К на длине волны 1,35 см; также отмечается задержка на 6–12 ч отклика яркостной температуры излучения системы «океан—атмосфера» на изменения тепловых потоков. Характер отклика яркостной температуры на тепловой поток через границу практически не зависит от того, где проводятся измерения: в приводном слое атмосферы, на верхней границе атмосферного пограничного слоя или в свободной атмосфере; яркостная температура излучения системы «океан—атмосфера» в этих случаях различается лишь по абсолютной величине: чем выше уровень наблюдения, тем больше температура $T^я$.

1.3. Сопоставление результатов моделирования яркостной температуры излучения системы «океан—атмосфера» и данных спутниковых измерений

Проведено сопоставление результатов моделирования яркостной температуры излучения системы «океан—атмосфера» для случая вертикального наблюдения (в надир) в районах нахождения судов «Виктор Бугаев», «Муссон» и «Волна» в период стационарных фаз экспериментов НЬЮФАЭКС-88 и АТЛАНТЭКС-90 и данных синхронных СВЧ измерений радиометра SSM/I. С этой целью из многолетних спутниковых архивов MSFC (Marshall Space Flight Center) выделены фрагменты, соответствующие моментам спутниковой съёмки Северной Атлантики в районах

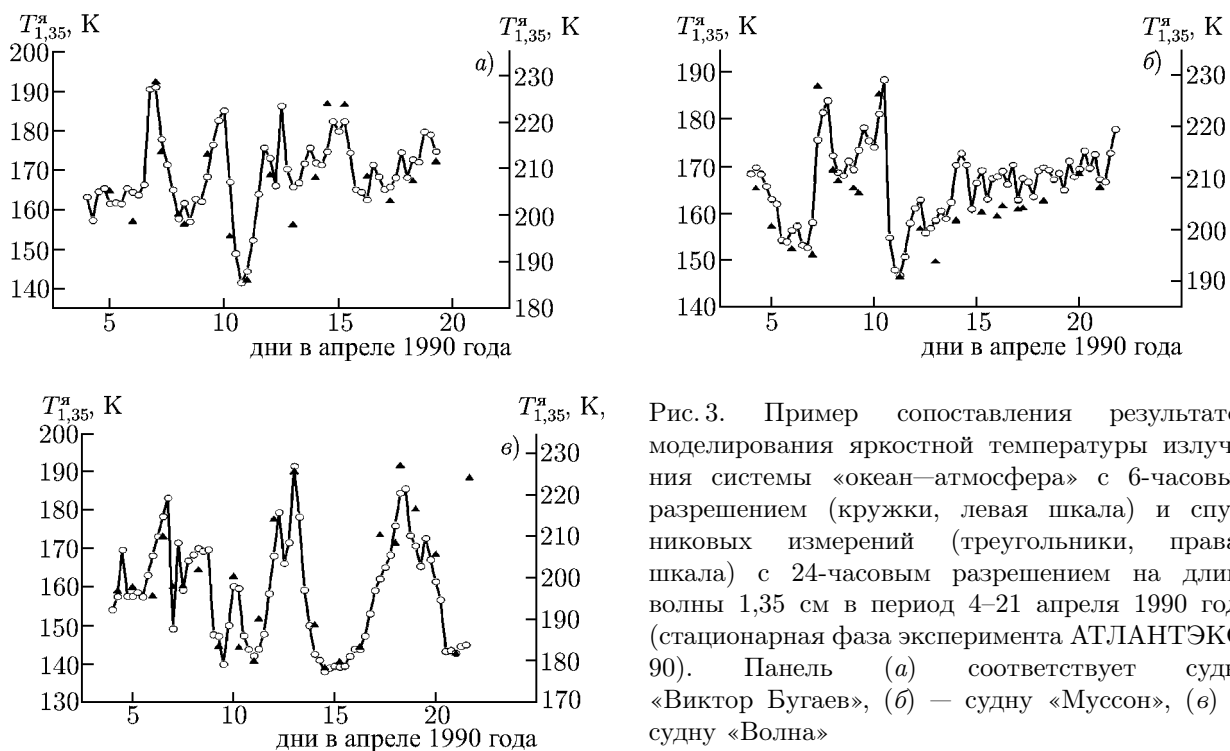


Рис. 3. Пример сопоставления результатов моделирования яркостной температуры излучения системы «океан—атмосфера» с 6-часовым разрешением (кружки, левая шкала) и спутниковых измерений (треугольники, правая шкала) с 24-часовым разрешением на длине волны 1,35 см в период 4–21 апреля 1990 года (стационарная фаза эксперимента АТЛАНТЭКС-90). Панель (а) соответствует судну «Виктор Бугаев», (б) — судну «Муссон», (в) — судну «Волна»

расположения судов «Виктор Бугаев», «Муссон» и «Волна» с 3 по 23 марта 1988 года и с 4 по 21 апреля 1990 года; в результате установлено, что сеансы съёмки указанных районов приходятся либо на утреннее (08:00÷09:00 UT), либо на вечернее (21:00÷22:30 UT) время, а их периодичность составляет в среднем 24 час.

Максимальные вариации (контрасты) яркостной температуры для различных каналов радиометра SSM/I, зафиксированные на стационарных фазах экспериментов НЬЮФАЭКС-88 и АТЛАНТЭКС-90 в районах расположения судов «Виктор Бугаев», «Муссон» и «Волна», хорошо согласуются с результатами моделирования. Яркостный контраст излучения системы «океан—атмосфера» в Ньюфаундлендской энергоактивной зоне колеблется от 30 до 90 К; поскольку погрешность измерений радиометра SSM/I составляет $1\div 3$ К, то данный прибор может служить эффективным инструментом для анализа процессов теплового взаимодействия океана и атмосферы в синоптическом диапазоне временных масштабов.

На рис. 3 сопоставлены модельные оценки яркостной температуры излучения системы «океан—атмосфера» на длине волны 1,35 см с временным разрешением, определяемым частотой аэрологического зондирования атмосферы (4 раза в сутки), и данные радиометра SSM/I спутника F08 с частотой примерно 1 раз в сутки.

Коэффициент корреляции r между расчётными значениями вариаций яркостной температуры излучения системы «океан—атмосфера» и их экспериментальными оценками на длине волны 1,35 см для судов погоды «Виктор Бугаев», «Муссон» и «Волна» варьируются от 0,89 до 0,91. Различие оценок абсолютной яркостной температуры обусловлено тем, что расчёты яркостной температуры излучения системы «океан—атмосфера» выполнены для случая вертикального спутникового зондирования, в то время как направление зондирования радиометра SSM/I отклонено на 53° относительно вертикали.

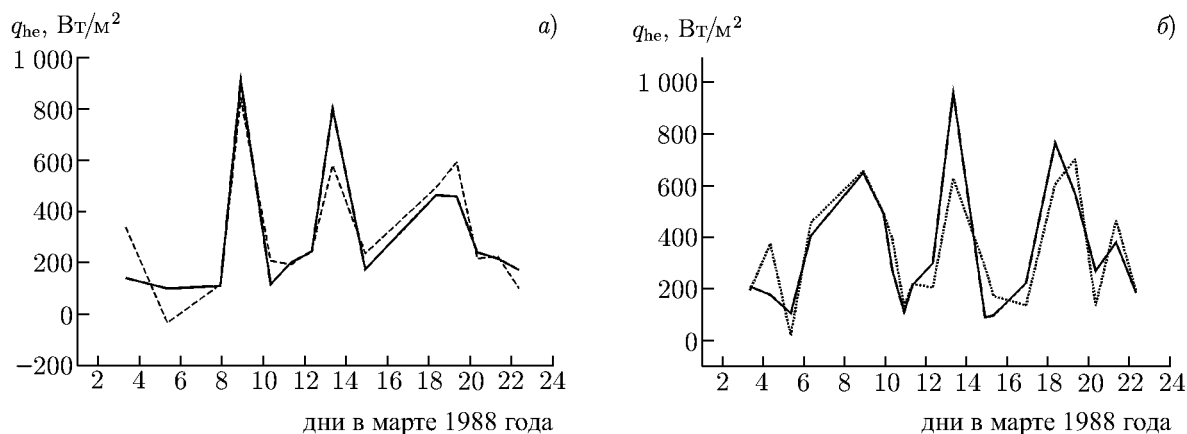


Рис. 4. Прямые (судовые) оценки потоков суммарного тепла q_{he} (сплошные линии) и спутниковые СВЧ радиометрические оценки потока q_{he} по данным измерений радиометра SSM/I (пунктирные линии) в районе расположения судов «Муссон» (а) и «Виктор Бугаев» (б). Среднеквадратичное расхождение между оценками потока для района расположения судна «Муссон» равно 121 Вт/м^2 , для судна «Виктор Бугаев» — 143 Вт/м^2 (эксперимент НЬЮФАЭКС-88)

1.4. Сопоставление спутниковых измерений яркостной температуры излучения системы «океан—атмосфера» и судовых оценок потоков тепла

На рис. 4 показаны результаты линейного регрессионного анализа синоптических вариаций яркостной температуры излучения системы «океан—атмосфера», измеренной радиометром SSM/I с метеорологического спутника F08, и потоков суммарного (явного и скрытого) тепла, зарегистрированных в судовом эксперименте НЬЮФАЭКС-88.

При построении рис. 4 использовались линейные регрессии между яркостными температурами излучения системы «океан—атмосфера», измеренными со спутника F08 на частотах 22,2 и 19,55 ГГц, и данными прямых (метеорологических) измерений с судов «Муссон» и «Виктор Бугаев». Коэффициенты корреляции r между измеренными потоками суммарного тепла q_{he} и их спутниковыми СВЧ радиометрическими оценками достигают 0,85 для судна «Виктор Бугаев» и 0,91 для судна «Муссон».

Подобное сравнение проводилось и для данных судовых измерений на стационарной фазе эксперимента АТЛАНТЭКС-90 в апреле 1990 года. Установлено, что коэффициенты корреляции r между измеренными потоками суммарного тепла q_{he} и их спутниковыми СВЧ радиометрическими оценками достигают 0,85 для судна «Виктор Бугаев», 0,73 для «Муссона» и 0,84 для «Волны». Отношение среднеквадратичной невязки σ_{he} между потоками, зафиксированными в судовых измерениях, и их дистанционными оценками к максимальным значениям естественных вариаций потоков колеблется от 12 % («Волна») до 19 % («Муссон»).

Таким образом, несмотря на значительные различия процессов теплового взаимодействия океана и атмосферы в исследованных нами районах Ньюфаундлендской энергоактивной зоны Северной Атлантики везде отмечается хорошее качественное и количественное согласие между судовыми и спутниковыми оценками потока q_{he} .

2. ПОВЕДЕНИЕ ЯРКОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ СИСТЕМЫ ОКЕАН—АТМОСФЕРА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ В МЕКСИКАНСКОМ ЗАЛИВЕ

2.1. Исходные данные

В данном разделе представлены результаты исследования изменчивости характеристик системы «океан—атмосфера» в Мексиканском заливе в районе буйковой станции 42019 в периоды времени, предшествующие зарождению и развитию тропического циклона «Умберто» и угасанию его последствий в этом районе в сентябре 2007 года, а также результаты анализа реакции системы «океан—атмосфера» на прохождение мощного тропического циклона «Катрина» в августе 2005 года во Флоридском проливе в районе буйковой станции SMK F1 (Sombrero Key).

Для интерпретации поведения яркостной температуры системы «океан—атмосфера» в эти периоды использованы следующие данные и оценки:

1) ежечасные буйковые измерения температуры поверхности океана, температуры, влажности и давления воздуха, скорости ветра в приводном 10-метровом слое в районах станций SMK F1 и 42019;

2) оценки вертикальных турбулентных потоков явного и скрытого тепла и импульса на границе раздела воды и воздуха, рассчитанные по данным станций SMK F1 и 42019 с помощью формул тепло- и влагообмена, приведённых в [2].

3) спутниковые СВЧ радиометрические оценки полного (интегрального) содержания водяного пара в слое 0÷16 000 м атмосферы в районах станций SMK F1 и 42019.

4) оценки теплосодержания (энтальпии) атмосферы в районах станций SMK F1 и 42019, рассчитанные на основе буйковых метеорологических измерений с помощью методики [8].

Источником информации о наземных данных является National Data Buoy Center NOAA (NDBC) [9]. В качестве источников спутниковых данных используются результаты регулярных измерений СВЧ радиометров SSM/I метеорологического спутника F15 DMSP и AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer) спутника EOS Aqua. Технические характеристики этих радиометров и их возможности приведены в работах [4] и [10] соответственно.

Обширная сеть метеорологических станций NOAA (в частности, станций, расположенных в Мексиканском заливе и в экваториальном поясе Тихого океана) обеспечивает измерения только параметров поверхности океана и приводного слоя атмосферы. Метеорологические средства наблюдений этих станций не могут дать сведения о вертикальном распределении температуры и влажности воздуха в атмосфере. Эта задача может быть решена, например, с использованием измерений многоканального СВЧ радиометра SSMIS (Special Sensor Microwave Imager/Sounder) спутников DMSP F16 и F17; его технические данные и возможности изложены в работе [11]. Помимо функции сканера этот прибор выполняет и функцию зонда, позволяющего определять температуру и влажность атмосферы на различных высотах. Однако периодичность зондирования этих характеристик атмосферы (примерно 1 раз в сутки) недостаточна для изучения таких быстропеременных процессов, как тропические циклоны, характеристики которых могут существенно изменяться в течение нескольких часов. К тому же эти данные не всегда могут быть доступными для интересующих нас акваторий и периодов времени, предшествующих возникновению и развитию тропического циклона именно там, где известны другие сведения.

Поэтому на данном этапе исследований тропических циклонов мы ограничимся анализом временной динамики измеряемой со спутника Земли яркостной температуры системы «океан—атмосфера» в районах активности тропических циклонов «Умберто» и «Катрина», опираясь на данные буйковых измерений метеопараметров приводного слоя атмосферы в этих районах.

2.2. Особенности поведения яркостной температуры системы «океан—атмосфера» при зарождении и развитии тропического циклона «Умберто»

2.2.1. Реакция яркостной температура системы «океан—атмосфера» на зарождение тропического циклона «Умберто»

Уникальной особенностью тропического циклона «Умберто» является совпадение места его зарождения и развития с координатами наблюдательной станции 42019 ($27,91^\circ$ с. ш., $95,35^\circ$ з. д.) в Мексиканском заливе в сентябре 2007 года (аналогичные примеры нам неизвестны). В этом случае мы можем наблюдать этот тропический циклон на основе данных одновременных дистанционных (спутниковых) СВЧ радиометрических и прямых (контактных) метеорологических измерений не только в период времени, предшествующий его появлению, но и на последующих стадиях возникновения циклона, а также его ухода из области зарождения.

Выполнен анализ реакции яркостной температуры на зарождение тропического циклона «Умберто» (9–15 сентября 2007 года) в диапазоне резонансного поглощения радиоволн в водяном паре атмосферы $0,8 \div 1,6$ см, используемой радиометрами AMSR-E спутника EOS Aqua и SSM/I спутника F15 DMSP. В качестве иллюстрации на рис. 5 представлены данные измерений СВЧ радиометра AMSR-E спутника EOS Aqua на длине волны 1,26 см (23,81 ГГц).

В период зарождения тропического циклона «Умберто» 12–13 сентября 2007 года в районе станции 42019 наблюдалось сильное уменьшение приводных значений температуры, влажности и давления воздуха; их контрасты составили 3°C , 8 и 5 мбар соответственно, что обусловило значительное снижение поглощения радиоволн в атмосфере и «провал» яркостной температуры излучения системы «океан—атмосфера» в области миллиметровых и сантиметровых волн, иллюстрируемый на рис. 5. При этом имеет место «взрывной» отрицательный скачок температуры излучения поверхности океана, обозначающий отбор тепловой энергии в атмосферу от поверхности океана.

Этот эффект сопровождается увеличением потоков явного и скрытого тепла на границе раздела океана и атмосферы, совпадающим по времени со снижением яркостной температуры излучения системы во время возникновения тропического циклона «Умберто». Рассчитанные нами по известным формулам тепло- и влагообмена между поверхностью океана и атмосферой [2] потоки явного и скрытого тепла на стадии, предшествующей появлению тропического циклона «Умберто» (9–12 сентября 2007 года), составили 5 и 150 Вт/м^2 соответственно, максимальные значения этих потоков во время развития циклона в полдень 12 сентября достигали 75 и 530 Вт/м^2 . Чувствительность яркостной температуры излучения системы «океан—атмосфера» при измерениях со спутника к вариациям потоков суммарного (явного и скрытого) тепла в период зарождения тропического циклона «Умберто» составила около $-0,1 \text{ К/(Вт} \cdot \text{м}^{-2})$. Для сравнения, этот показатель в тёплых водах Ньюфаундлендской энергоактивной зоны Северной Атлантики (в русле

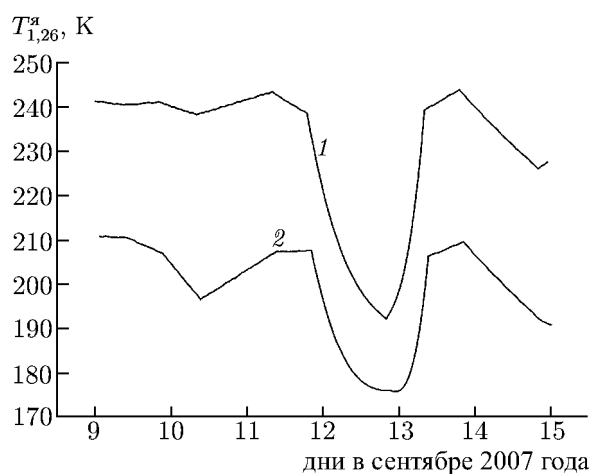


Рис. 5. Измеренная радиометром AMSR-E спутника EOS Aqua яркостная температура излучения системы «океан—атмосфера» $T^{\text{я}}$ на длине волны 1,26 см для вертикальной (1) и горизонтальной (2) поляризации в период зарождения тропического циклона «Умберто»

теплого течения Гольфстрим) в период приближения атлантических циклонов варьируется от $-0,06$ до $-0,09$ К/(Вт·м⁻²). Отметим важный результат, полученный в [3], который показывает, что для возникновения тропического циклона главное значение имеет не температура поверхности океана, а превышение потоком тепловой энергии от океана в атмосферу определённого порогового значения, что следует считать необходимым фактором тропического генезиса.

По данным СВЧ измерений радиометра AMSR-E получены оценки интегрального содержания водяного пара в атмосфере в районе станции 42019 с помощью известного алгоритма [12]; показано, что в период зарождения тропического циклона «Умберто» наблюдался скачок этой характеристики на 15 кг/м².

По данным расчётов на основе метеорологических измерений со станции 42019, энтальпия в приводном (0÷10 м) слое атмосферы снизилась на 14,7 кДж/м². Таким образом, в период зарождения тропического циклона «Умберто» тепловая энергия в атмосфере убывала; точно такой же эффект наблюдался и для среднеширотных циклонов в экспериментах НЬЮФАЭКС-88 и АТЛАНТЭКС-90 в Ньюфаундлендской энергоактивной зоне, где, согласно расчётам на основе аэрологических данных, энтальпия атмосферного пограничного слоя (0÷1000 м) снизилась на 2,5÷3 МДж/м².

Для ответа на вопрос, являются ли эти явления следствием прихода в область зарождения «Умберто» холодных и влажных масс воздуха и нарушения теплового баланса между океаном и атмосферой (или они вызваны другими причинами), необходимо в дальнейшем изучить картину горизонтального переноса тепла и влаги в атмосфере в прилегающих районах океана.

2.2.2. Поведение тепловых потоков в контактном слое системы «океан—атмосфера» после ухода тропического циклона «Умберто» из района зарождения

Анализируя результаты измерений яркостной температуры системы «океан—атмосфера» в районе станции 42019, мы заметили колебания яркостной температуры в диапазоне резонансного поглощения радиоволн в водяном паре атмосферы после того, как тропический циклон «Умберто» покинул этот район Мексиканского залива и ушёл к южному побережью США. Поскольку ранее мы обнаружили устойчивую связь между синоптическими вариациями яркостной температуры и интенсивностью тепло- и влагообмена на границе раздела океана и атмосферы в Северной Атлантике в районах, подверженных воздействию среднеширотных циклонов (см., например, рис. 4), то имеет смысл исследовать вариации потоков явного и скрытого тепла на

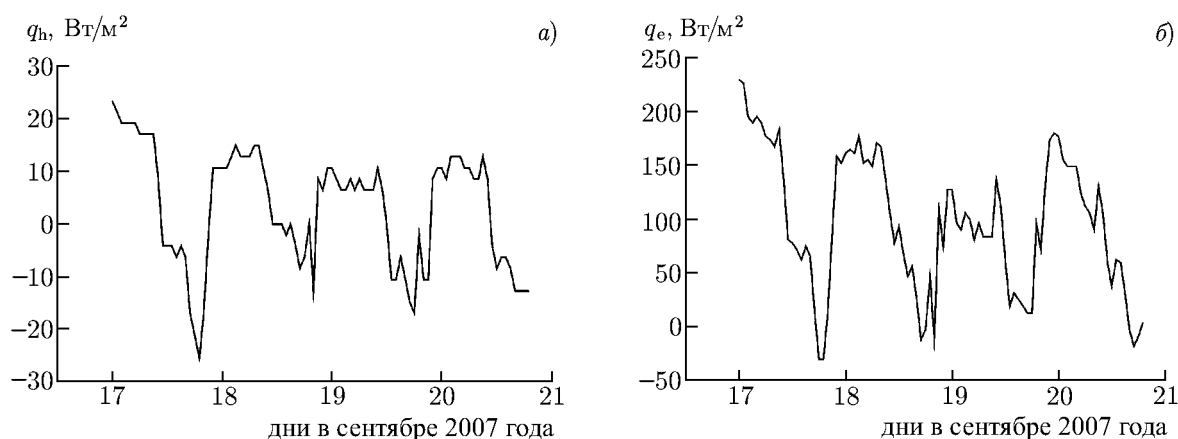


Рис. 6. Вариации потоков явного q_h (а) и скрытого q_e (б) тепла на поверхности океана в районе расположения станции 42019 после ухода тропического циклона «Умберто» из района его зарождения

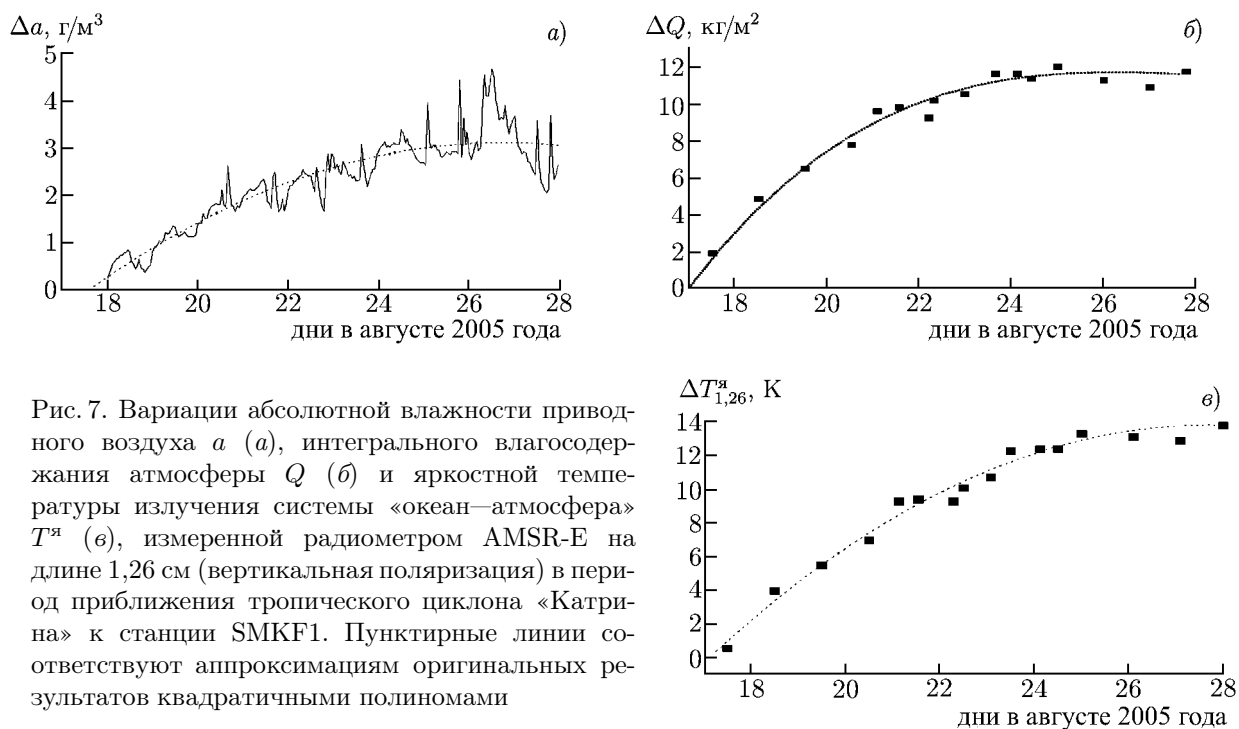


Рис. 7. Вариации абсолютной влажности приводного воздуха a (а), интегрального влагосодержания атмосферы Q (б) и яркостной температуры излучения системы «океан—атмосфера» $T^{\text{я}}$ (в), измеренной радиометром AMSR-E на длине 1,26 см (вертикальная поляризация) в период приближения тропического циклона «Катрина» к станции SMKF1. Пунктирные линии соответствуют аппроксимациям оригинальных результатов квадратичными полиномами

границе раздела океана и атмосферы в период 17–20 сентября 2007 года в районе станции 42019 после ухода из этого района тропического циклона «Умберто». Результаты этого исследования представлены на рис. 6.

Рисунок 6 демонстрирует колебания потоков явного и скрытого тепла в этот промежуток времени с суточным периодом и формой, близкой к меандру. При этом поток q_h знакопеременен, т. е. процессы отдачи явного тепла поверхностью океана атмосфере чередуются с процессами отдачи тепла атмосферой поверхности океана, чего не наблюдается в период времени 9–12 сентября 2007 года, предшествующий возникновению тропического циклона «Умберто». Этот эффект похож на эффект возбуждения колебаний и их затухания в высокодобротных резонансных системах, таких, например, как контуры ударного возбуждения в радиотехнике [13].

2.3. Особенности поведения яркостной температуры системы «океан—атмосфера» при распространении тропического циклона «Катрина» в Мексиканском заливе

2.3.1. Эффект аккумуляции тепла в водяном паре атмосферы в районе станции SMKF1 накануне прихода тропического циклона «Катрина»

Обнаружен эффект аккумуляции (накопления) скрытого тепла в водяном паре атмосферы в течение нескольких суток при приближении тропического циклона «Катрина» к станции SMKF1 (Sombrero Key) во Флоридском проливе ($24,38^\circ$ с. ш., $81,07^\circ$ з. д.). Этот эффект выражается в постоянном нарастании температуры и абсолютной влажности воздуха в приводном слое атмосферы, а также яркостной температуры излучения системы «океан—атмосфера» в линии резонансного поглощения радиоволн 1,35 см (22,235 ГГц).

Рисунок 7 иллюстрирует поведение влажностных (а, б) и радиационных (в) характеристик атмосферы в районе станции SMKF1 в течение недели, предшествующей приходу тропического

циклона «Катрина» (18–27 сентября 2005 года).

Из рис. 7 видно, что в период времени, предшествующий приходу тропического циклона «Катрина» в район станции SMKf1, наблюдается монотонное возрастание абсолютной влажности приводного воздуха a на 3 г/м^3 , интегрального содержания водяного пара в атмосфере Q на 11 кг/м^2 , а также яркостной температуры излучения системы «океан—атмосфера» $T^{\text{я}}$ на длине волны $1,26 \text{ см}$ на 13 К .

На основе данных буйковых метеорологических измерений с помощью методики, изложенной в работе [8], рассчитана энтальпия (теплосодержание) приводного слоя атмосферы в период с 21 по 31 августа 2005 года. Установлено, что в процессе приближения тропического циклона «Катрина» к району станции SMKf1 происходит накопление энтальпии водяного пара в приводном слое атмосферы по удельной величины примерно $14,7 \text{ кДж/м}^2$.

2.3.2. Пространственно-временная динамика яркостной температуры излучения системы «океан—атмосфера» вдоль трассы распространения тропического циклона «Катрина»

Исследована пространственно-временная изменчивость яркостной температуры излучения системы «океан—атмосфера» в Мексиканском заливе вдоль трассы распространения тропического циклона «Катрина» от района его зарождения (Багамские острова) к южному побережью США (штат Луизиана) в период 24–30 августа 2005 года. Проведён анализ временной изменчивости яркостной температуры, измеренной радиометром AMSR-E спутника EOS Aqua в диапазоне резонансного поглощения радиоволн в водяном паре атмосферы ($0,82 \div 1,60 \text{ см}$) для горизонтальной и вертикальной поляризаций в ряде фиксированных точек трассы во время их прохождения циклоном. На рис. 8 приведены результаты измерений яркостной температуры излучения системы «океан—атмосфера» на длине волны $1,26 \text{ см}$ для горизонтальной поляризации в августе 2005 года для этих точек трассы распространения тропического циклона «Катрина». Поведение яркостной температуры излучения системы «океан—атмосфера» в спектральной области $0,82 \div 1,60 \text{ см}$ для вертикальной и горизонтальной поляризаций сходны, но во втором случае вариации яркостной температуры на $40 \div 50 \%$ больше.

Из рис. 8 видно, что появление тропического циклона «Катрина» в той или иной области Мексиканского залива сопровождается резким всплеском яркостной температуры системы «океан—атмосфера» на длине волны $1,26 \text{ см}$. Природа появления всплесков яркостной температуры на этой длине волны объясняется резонансным поглощением радиоволн в водяном паре атмосферы, подобная картина наблюдается также на длинах волн $0,82 \text{ см}$ и $1,6 \text{ см}$ для обеих поляризаций.

В каждом случае всплеску яркостной температуры предшествует постепенное (в течение 5–6 суток) её нарастание, которое объясняется накоплением водяного пара в атмосфере в периоды времени, предшествующие приходу циклона. С помощью алгоритма [12] установлено, что в эти периоды полное содержание водяного пара в атмосфере возрастает с $40 \div 45$ до $55 \div 60 \text{ кг/м}^2$.

Аналогичный эффект наблюдался в Ньюфаундлендской энергоактивной зоне Северной Атлантики (эксперименты НЬЮФАЭКС-88 и АТЛАНТЭКС-90), где положительные приращения этого параметра атмосферы, зафиксированные с судов «Виктор Бугаев» и «Муссон», составляли $10 \div 15 \text{ кг/м}^2$ в периоды, предшествующие приходу мощных циклонов.

Замеченное явление может оказаться полезным при разработке методов прогнозирования темпов и сроков приближения тропических циклонов к той или иной области океана, где их появление является регулярным и ожидаемым.

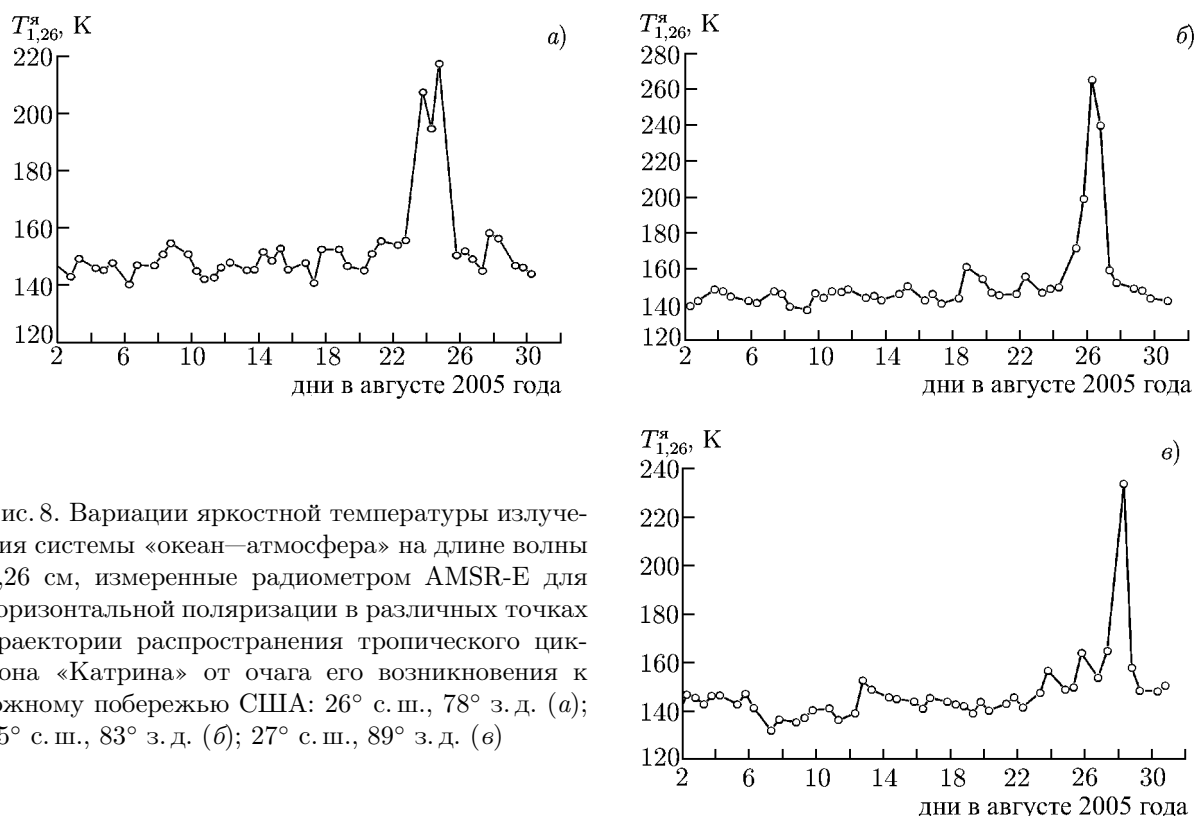


Рис. 8. Вариации яркостной температуры излучения системы «океан—атмосфера» на длине волны 1,26 см, измеренные радиометром AMSR-E для горизонтальной поляризации в различных точках траектории распространения тропического циклона «Катрина» от очага его возникновения к южному побережью США: 26° с. ш., 78° з. д. (а); 25° с. ш., 83° з. д. (б); 27° с. ш., 89° з. д. (в)

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интенсивность собственного СВЧ излучения системы «океан—атмосфера», измеряемая со спутников Земли в диапазоне длин волн резонансного поглощения водяного пара атмосферы ($0,8 \div 1,6$ см), является количественной характеристикой интенсивности теплового взаимодействия океана и атмосферы в энергоактивных зонах Северной Атлантики (вертикальных турбулентных потоков явного и скрытого тепла на границе раздела системы). Этот эффект обусловлен естественным возбуждением тепловых потоков на границе раздела океана и атмосферы и, одновременно, изменением измеряемой со спутника яркостной температуры за счёт горизонтального переноса тепла и влаги в атмосфере, обусловленным активностью среднеширотных атлантических циклонов.

Этот же эффект наблюдается и в тропических широтах океана, где зарождаются тропические ураганы, которые вызывают сильный отклик системы «океан—атмосфера» в диапазоне резонансного поглощения радиоволн водяным паром атмосферы. На основе данного эффекта нами выявлены следующие явления: 1) колебания яркостной температуры излучения системы «океан—атмосфера» и потоков явного и скрытого тепла после ухода циклона «Умберто» из области его зарождения, контролируемой станцией 42019, т. е. на стадии релаксации системы «океан—атмосфера»; 2) аккумуляция тепловой энергии в системе «океан—атмосфера» в периоды, предшествующие зарождению (либо прохождению) тропических циклонов на примере циклона «Катрина».

Для выявления указанных эффектов важную роль сыграли данные СВЧ радиометрических измерений со спутников DMSP (радиометр SSM/I) и EOS Aqua (радиометр AMSR-E). На примере тропических циклонов «Катрина» и «Умберто» показано, что циклоны отбирают тепловую энергию у атмосферы и поверхности океана. Этот отбор приводит к сильным возмущениям

температуры, влажности, давления воздуха и скорости ветра в приводном слое атмосферы и сопровождается резким снижением энтальпии атмосферы и значительным ростом вертикальных турбулентных потоков явного и скрытого тепла у поверхности океана.

Результаты нашего исследования подтверждают роль полного содержания водяного пара в атмосфере (эта характеристика легко доступна для мониторинга современными спутниковыми СВЧ радиометрическими средствами) на стадиях, предшествующих развитию штормов в океане. Последние исследования [14] показывают, что регулярный контроль именно этой характеристики является важным и необходимым элементом для изучения проблемы формирования тропических циклонов.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности прямого использования данных спутниковых СВЧ радиометрических измерений, которые зависят от температурных и влажностных характеристик различных слоёв атмосферы, для анализа процессов в тонком (по сравнению со спутниковыми пространственными масштабами) приводном слое атмосферы.

В работе использованы результаты, полученные при поддержке РФФИ (грант 94-05-16234а) и МНТЦ (грант 3827), а также по контракту NAS15-10110 между Роскосмосом и НАСА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гранков А. Г., Мильшин А. А. Взаимосвязь радиоизлучения системы океан—атмосфера с тепловыми и динамическими процессами на границе раздела. М.: Физматлит, 2004. 168 с.
2. Лаппо С. С., Гулев С. К., Рождественский А. Е. Крупномасштабное тепловое взаимодействие в системе океан—атмосфера и энергоактивные области Мирового океана. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 336 с.
3. Голицын Г. С. // Изв. РАН. Физика океана и атмосферы. 2008. Т. 44, № 5. С. 579.
4. Hollinger P. H., Peirce J. L., Poe G. A. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1990. V. 28. P. 781.
5. Марчук Г. И., Дымников В. П., Курбаткин Г. П., Саркисян А. С. // Итоги науки и техники. Атмосфера, океан, космос. 1986. Т. 6. С. 6.
6. Башаринов А. Е., Гурвич А. С., Егоров С. Т. Радиоизлучение Земли как планеты. М.: Наука, 1974. 188 с.
7. Гранков А. Г. // Исследование Земли из космоса. 2011. № 4. С. 1.
8. Пинус Н. З. // Метеорология и гидрология. 1982. № 4. С. 106.
9. <http://www.ndbc.noaa.gov>.
10. Kawanishi T., Sezai T., Ito Y., et al. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2003. No. 48. P. 173.
11. Kunkee D., Boucher D., Poe G., Swadley S. // Geosci. Remote Sensing Symp. 2006. P. 101.
12. Alishouse J. C., Snyder S. A., Vongsatorn J., Ferrado R. R. // J. Geophys. Res. 1990. V. 28, No. 5. P. 811.
13. Харкевич А. А. Основы радиотехники. М.: Физматлит, 2007. 512 с.
14. Шарков Е. А., Шрамков Я. Н., Покровская И. В. // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 2. С. 73.

Поступила в редакцию 2 апреля 2013 г.; принята в печать 31 октября 2013 г.

**BEHAVIOR OF THE BRIGHTNESS TEMPERATURE
OF THE OCEAN–ATMOSPHERE SYSTEM UNDER CONDITIONS
OF MIDLATITUDE AND TROPICAL CYCLONE ACTIVITY**

A. G. Grankov, A. A. Mil'shin, and E. P. Novichikhin

We analyze the behavior of the ocean–atmosphere system characteristics based on direct (contact) and satellite microwave radiometric measurements. Some similar and distinctive features of their dynamics in the mid-latitudes of the North Atlantic (in its Norwegian, Newfoundland, and Gulf-Stream energy-active zones), which significantly affect the weather conditions in Europe, and in the tropical latitudes of the North Atlantic (the Gulf of Mexico and the Bahamas area), which are the sources of the tropical cyclogenesis, are considered.