

УДК 551.465

АНАЛИЗ ПРЕДШТОРМОВЫХ СИТУАЦИЙ ВО ФЛОРИДСКОМ ПРОЛИВЕ И В ГОЛУБОЙ БУХТЕ ЧЕРНОГО МОРЯ

© 2014 г. А. Г. Гранков, С. В. Маречек, А. А. Мильшин, Е. П. Новичихин, Н. К. Шелобанова

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН Фрязинский филиал

141190 Фрязино, Московская обл., пл. Акад. Введенского, 1

E-mail: agrankov@inbox.ru

Поступила в редакцию 16.05.2012 г.

Рассмотрены особенности поведения тепловых и радиотепловых (СВЧ-излучательных) характеристик атмосферы в акваториях, контролируемых контактными и дистанционными средствами в предштормовых ситуациях. Объекты исследования: а) район станции SMKF1 (Sombrero Key) Флоридского пролива накануне прихода в этот район мощного тропического циклона Катрина в августе 2005 г.; б) Голубая бухта Черного моря (г. Геленджик, территория филиала Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН) в сентябре 2010 г. накануне интенсивного шторма. На основе метеорологических и спутниковых СВЧ-радиометрических данных проведено изучение общих и отличительных признаков в поведении температуры и влажности приводного воздуха, приповерхностных потоков явного и скрытого тепла, полного тепло- и влагосодержания атмосферы, а также СВЧ-излучательных характеристик системы “водная поверхность–атмосфера” в периоды времени, предшествующие приближению циклона Катрина к району станции SMKF1 и развития морского шторма в районе Голубой бухты. В обоих случаях в предштормовой период времени (несколько суток) наблюдался эффект “накачки” атмосферы энергией в виде скрытого тепла, содержащегося в водяном паре.

Ключевые слова: тропические циклоны, система “океан–атмосфера”, спутниковые СВЧ-радиометрические измерения, буйковые измерения, аккумуляция тепла.

DOI: 10.7868/S0002351514010052

1. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

В статье рассмотрены особенности поведения тепловых и радиотепловых (СВЧ-излучательных) характеристик атмосферы в акваториях, контролируемых контактными и дистанционными средствами в предштормовых ситуациях.

В одном случае исследовалась реакция системы “океан–атмосфера” (СОА) в период деятельности мощного тропического циклона (ТЦ) Катрина в августе 2005 г. во Флоридском проливе в районе буйковой станции SMKF1 (Sombrero Key). Проведен анализ синоптических вариаций следующих характеристик СОА в период времени 19–24 августа, предшествующий приходу ТЦ Катрина:

а) температуры и влажности воздуха в приводном 10-метровом слое в районе станции SMKF1 – результатов прямых метеорологических измерений;

б) полного влагосодержания атмосферы – результатов обработки спутниковых СВЧ-радиометрических измерений, и ее энтальпии;

в) вертикальных турбулентных потоков явного и скрытого тепла на границе раздела воды и воздуха;

г) интенсивности 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).

Источником информации о наземных данных является американский Центр – National Data Buoy Center NOAA (NDBC); в качестве источников дистанционных данных используются результаты регулярных измерений сканирующего многоканального радиометра AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer) американского метеорологического спутника EOS Aqua. Технические характеристики этого радиометра приведены в статье [1].

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-ра-

¹ Согласно классификации, принятой в NOAA, тропические циклоны до момента их прихода на территорию побережья США рассматриваются как океанские штормы

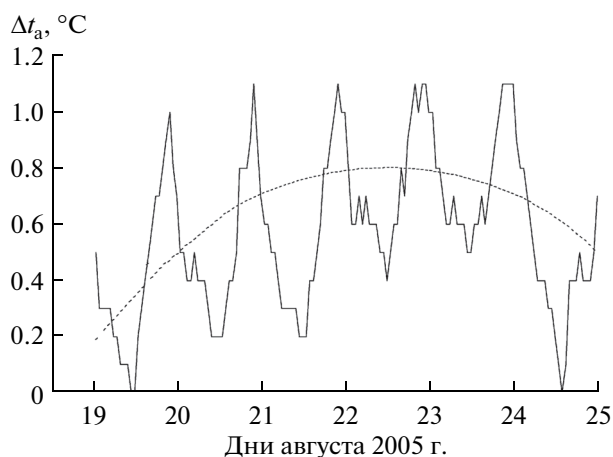


Рис. 1. Вариации температуры t_a приводного воздуха перед приходом ТЦ Катрина в район станции SMKf1 во Флоридском проливе. Пунктирная линия — аппроксимация оригинальных результатов полиномом 2-й степени.

диометрические исследования характеристик параметров атмосферы в период, 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 [2]. 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, так как ее размеры в несколько раз меньше величины пространственного разрешения этого канала радиометра AMSR-E.

С помощью перечисленных средств проведено изучение общих и отличительных признаков в поведении температуры и влажности приводного воздуха, приповерхностных потоков явного и скрытого тепла, полного влагосодержания и энтальпии атмосферы, а также СВЧ-излучательных характеристик COA в периоды времени, предшествующие приближению ТЦ Катрина к району станции SMKf1 и приходу морского шторма в район Голубой бухты.

2. ДИНАМИКА ХАРАКТЕРИСТИК COA В РАЙОНЕ СТАНЦИИ SMKf1

Температура, влажность приводного воздуха, влагосодержание атмосферы

В качестве опорной точки при анализе влияния ТЦ Катрина на параметры атмосферы используется станция SMKf1 (Sombrero Key) во Флоридском проливе (24.38° N, 81.07° W) из архива данных NDBC. Ближайшее расстояние между траекторией ТЦ Катрина и этой станцией составило ~120 км 26 августа 2005 г. в 12 часов дня, к этому моменту циклон прошел от места зарождения в районе Багамских островов расстояние около 800 км.

Объем исходных данных, полученных с помощью датчиков станции SMKf1 на стадии, предшествующей появлению ТЦ Катрина в районе станции SMKf1, составил 144 ежечасных выборки для температуры и влажности приводного слоя атмосферы.

На рис. 1 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 Катрина к району станции SMKf1 наблюдается нарастание температуры приводного воздуха: величина вариаций средних (аппроксимированных) значений параметра t_a в период с 19 по 23 августа достигает 0.5°C, причем суточный размах изменений этого параметра составляет 1°C, т.е. в полтора раза больше.

Рисунок 2 иллюстрирует поведение ряда характеристик атмосферы в районе станции SMKf1 в течение недельного промежутка времени, предшествующего приходу ТЦ Катрина (18—27 августа). На рис. 2а представлены расчетные оценки вариаций абсолютной влажности a приводного воздуха, которые получены на основе результатов обширных экспериментальных исследований связи упругости водяного пара с разностью темпе-

ратур воды и воздуха [3] в различных частях Мирового океана – прямые измерения влажности воздуха на буйковых станциях NOAA не предусмотрены. На рис. 2б и 2в приведены оценки вариаций полного влагосодержания атмосферы Q (рис. 2б), полученные по данным измерений радиометра AMSR-E спутника EOS Aqua с помощью известной методики [4], а также вариации яркостной температуры T^a (рис. 2в), измеренной в области резонансного поглощения водяного пара атмосферы 1.26 см.

Из рис. 2 видно, что в период времени, предшествующий приходу ТЦ Катрина в район станции SMKF1, имеет место монотонное возрастание влажности приводного воздуха на 3 г/м^3 , полного влагосодержания атмосферы на 11 кг/м^2 , а также яркостной температуры СОА на длине волны 1.26 см на 13 градусов Кельвина. Сравнение рис. 2б и 2в 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 $\Delta T_{1.26}^a / \Delta Q$ 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 $1.1\text{--}1.2 \text{ К}/(\text{кг/м}^2)$.

Потоки явного и скрытого тепла у поверхности океана

С помощью данных буйковых измерений температуры поверхности океана, температуры приводного воздуха и оценок его влажности, а также давления и скорости ветра в приводном слое атмосферы рассчитаны значения вертикальных турбулентных потоков явного q_h и скрытого q_e тепла для станции SMKF1 на границе раздела воды и воздуха на основе распространенных в динамической метеорологии балк-формул [5]. В соответствии с этим подходом величины q_h и q_e характеризуются следующими соотношениями:

$$q_h = c_p \rho c_t (t_n - t_a) V, \tag{1}$$

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

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_n 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) и влагой c_e (число Дальтона), а также удельная теплота испарения L , удельная теплоем-

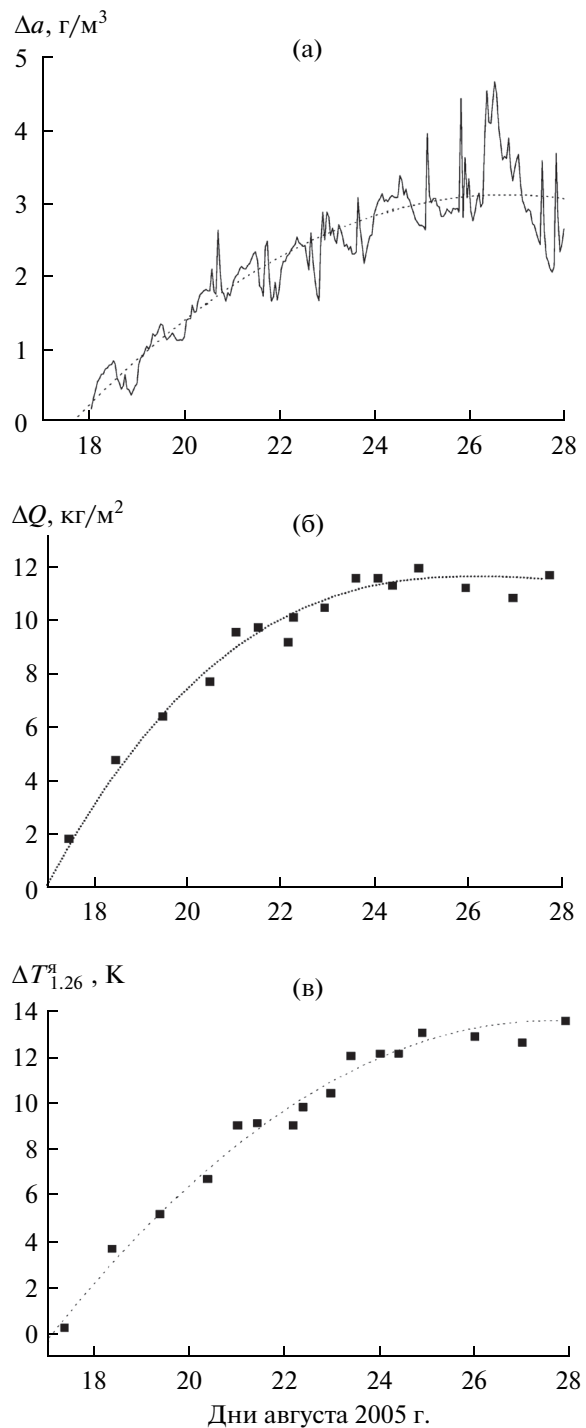


Рис. 2. Вариации абсолютной влажности приводного воздуха a (а), интегрального влагосодержания атмосферы Q (б) и яркостной температуры системы “океан–атмосфера” T^a , измеренной радиометром AMSR-E на длине 1.26 см (вертикальная поляризация) в период приближения ТЦ Катрина к станции SMKF1. Пунктирные линии – аппроксимации оригинальных результатов полиномами 2-й степени.

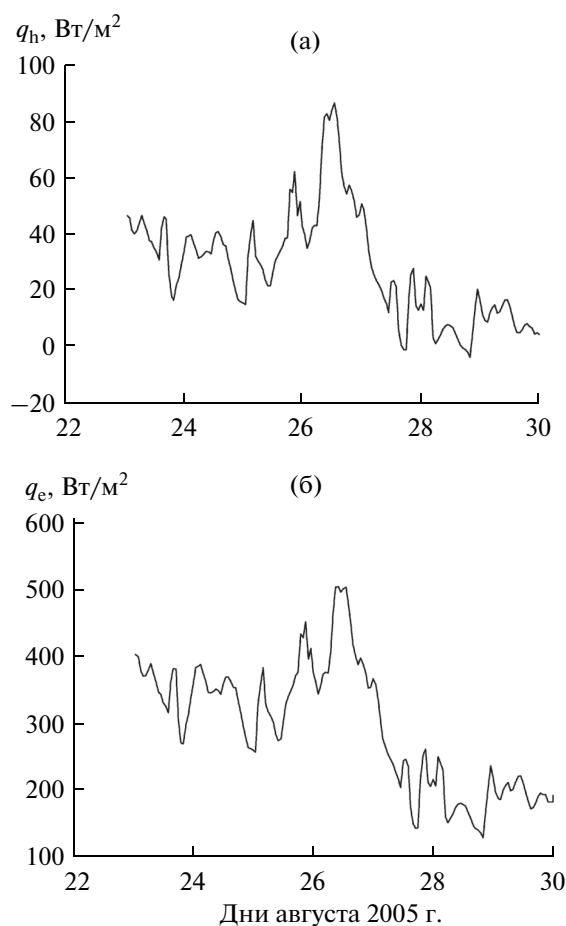


Рис. 3. Вариации потоков явного (а) и скрытого (б) тепла на поверхности океана в районе расположения станции SMKF1 в период прохождения ТЦ Катрина в сентябре 2007 г.

кость воздуха при постоянном давлении c_p и его плотность ρ .

Результаты расчетов потоков явного и скрытого тепла (с 3-х часовым сглаживанием) иллюстрируются на рис. 3, откуда видно что в результате прохождения ТЦ Катрина через район станции SMKF1 происходит заметное снижение средних значений тепловых потоков – примерно на 20 W/m^2 (с 30 до 10 W/m^2) для потоков явного тепла и на 150 W/m^2 (с 350 до 200 W/m^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 W/m^2 соответственно.

Интересно отметить, что максимальная величина потоков суммарного (явного + скрытого) тепла в районе станции SMKF1 ($\sim 600 W/m^2$) близка к оцен-

ке, приводимой Г.С. Голицыным для тропических широт [6]. Эта величина также сравнима с потоками суммарного тепла в Ньюфаундлендской энергоактивной зоне Северной Атлантики, подвергнутой регулярному воздействию мощных среднеширотных циклонов, и которые по данным экспериментов НЬЮФАЭКС-88 и АТЛАНТЭКС-90 достигали 800 W/m^2 в марте 1988 г. и апреле 1990 г. [7].

Энтальпия атмосферы

На основе данных буйковых метеорологических измерений с помощью методики, изложенной в [8], нами рассчитаны значения энтальпии (теплосодержания) приводного слоя атмосферы в период с 21 по 31 августа 2005 г. Установлено, что в процессе приближения ТЦ Катрина к району станции SMKF1 пролива в этот период происходит накопление энтальпии водяного пара в приводном слое атмосферы, удельная величина которой возрастает примерно на 14.7 $КДж/м^2$.

В приближении политропной атмосферы с учетом величины вертикального градиента температуры воздуха $-6.5^\circ C/км$ и величины приращения интегрального содержания водяного пара в тропосфере перед приходом ТЦ Катрина (см. рис. 2в) рассчитано приращение удельного теплосодержания атмосферы в слое 0–10000 м, которое в период 21–31 августа составило примерно 5500 $КДж/м^2$.

3. ДИНАМИКА ХАРАКТЕРИСТИК АТМОСФЕРЫ В ЧЕРНОМОРСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

СВЧ-радиометрические измерения

В сентябре 2010 г. в Голубой бухте в районе Геленджика на экспериментальной базе южного филиала ИО 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.

Важной частью измерительного комплекса являлась сканирующая платформа с установленной на ней аппаратурой, включая СВЧ-радиометр, действующий на длине волны 1.35 см.

Платформа 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.

На рис. 4 приведены измеренные значения радиояркостной температуры атмосферы на длине

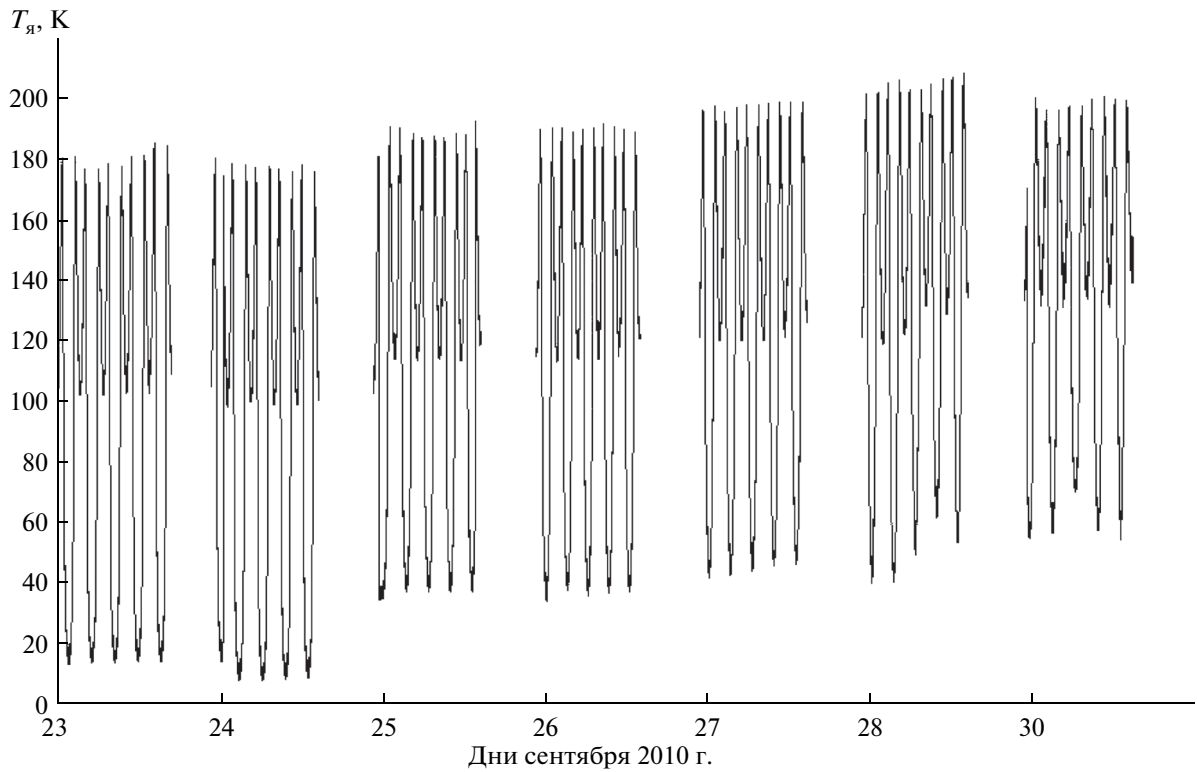


Рис. 4. Яркостная температура T^y вертикальных сканов атмосферы на длине волны 1.35 см в дни, предшествующие шторму в Голубой бухте.

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.). Как видно из иллюстрации, в этот период наблюдалось нарастание минимальных и максимальных значений яркостной температуры, зарегистрированных при положениях поворотной платформы 0 и 90 градусов соответственно.

Рисунок 5 иллюстрирует зависимости яркостной температуры атмосферы на длине волны 1.35 см от величины отклонения угла от зенита. Эта величина тесно связана с полным влагосодержанием атмосферы и отчетливо демонстрирует эффект накопления водяного пара в атмосфере в предштормовой период.

Отметим, что приведенные на рис. 4 и 5 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.

Согласно результатам расчетов в этот период происходило накопление тепла в водяном паре приводного слоя атмосферы; величина удельного теплосодержания которого возросла примерно на 61 КДж/Дж/м². Столь сильное приращение тепло-

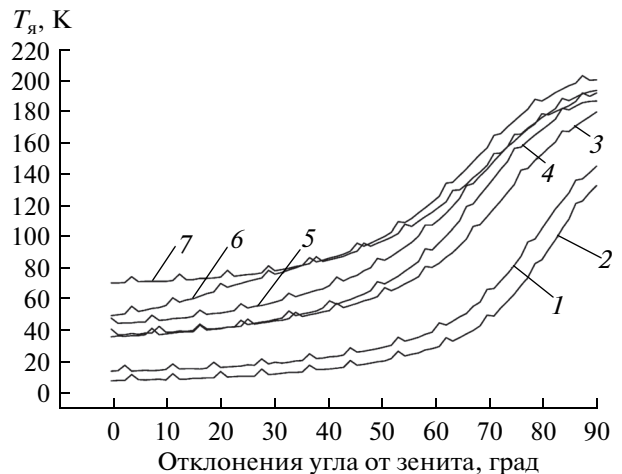


Рис. 5. Угловая зависимость яркостной температуры атмосферы T^y на длине волны 1.35 см для дней сентября в предштормовой период в Голубой бухте. Кривые с номерами от 1 до 7 соответствуют датам от 23 до 30 сентября.

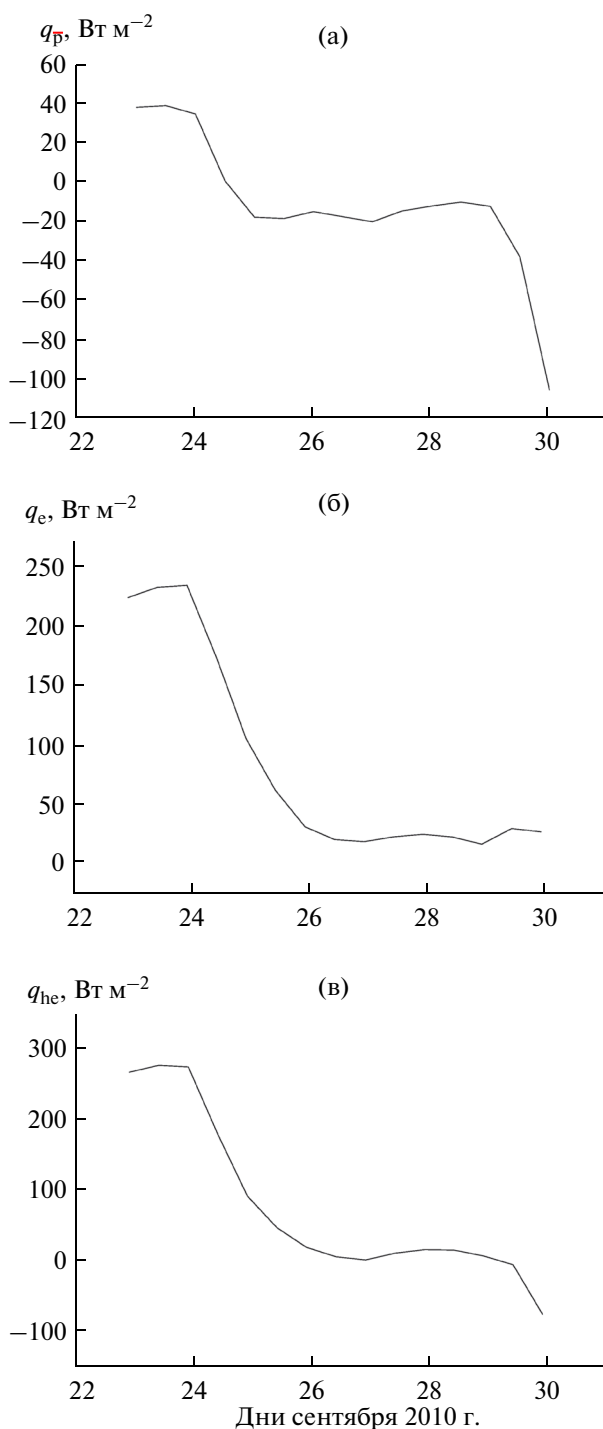


Рис. 6. Вариации потоков явного q_p , скрытого q_e и суммарного q_{he} тепла в предштормовой период в Голубой бухте.

содержания 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 превы-

шали вариации этих параметров в районе станции SMKF1 во время приближения ТЦ Катрина.

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. 6. 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. Из сравнения рис. 3 и рис. 6 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 Катрина к станции SMKF1, а перепад величины потока скрытого тепла несколько меньше.

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, так как 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° N , 38° E .

На рис. 7 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 только используются выборки, соответствующие измерениям в надир.

Из иллюстрации видно сходство характера реакции температуры и влажности приводного воздуха на пирсе, а также яркостных температур COA в резонансной области поглощения радиоволн в водяном паре атмосферы, независимо от способа

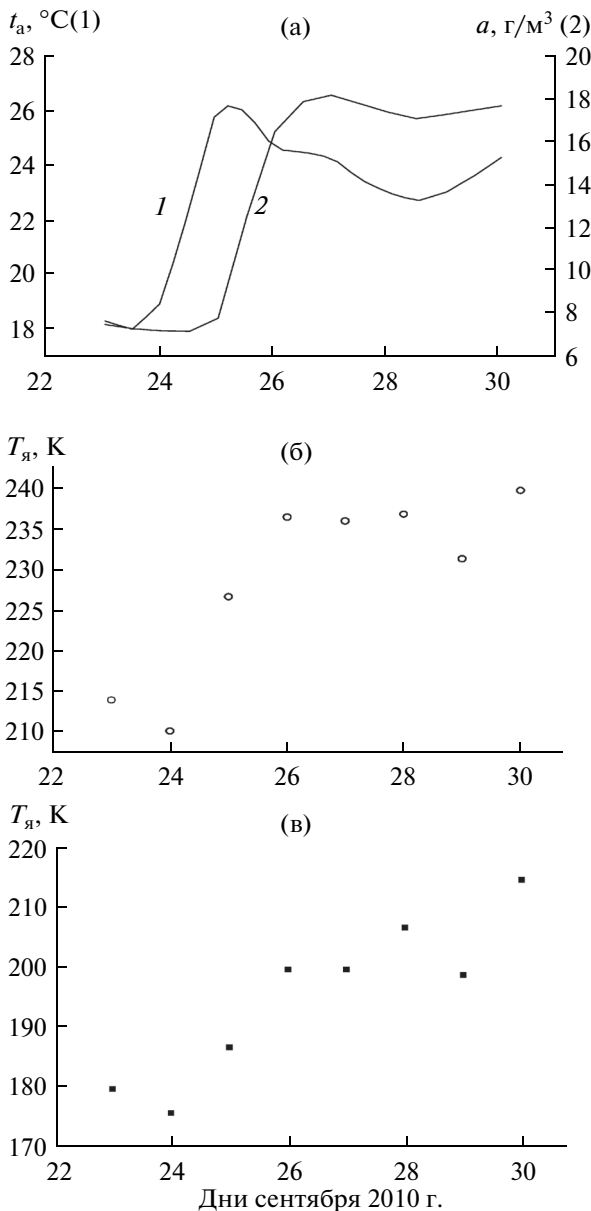


Рис. 7. Вариации тепловых и радиотепловых характеристик атмосферы в период, предшествующий шторму в Голубой бухте: а – температуры (1) и влажности (2) приводного воздуха, б – яркостной температуры СОА на длине волны 1.26 см, измеренной спутниковым радиометром AMSR-E, в – яркостной температуры СОА, измеренной с пирса СВЧ-радиометром на длине волны 1.35 см.

спутниковых СВЧ-радиометрических измерений (сверху или снизу).

4. ВЫВОДЫ

Приведенные в статье результаты сравнительного анализа динамики температуры и влажности приводного воздуха, приповерхностных потоков явного и скрытого тепла, полного влагосодержа-

ния и энтальпии атмосферы, а также СВЧ-излучательных характеристик СОА в периоды времени, предшествующие приближению ТЦ Катрина к району станции SMKFI 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 Катрина к району станции SMKFI и приходу морского шторма в район Голубой бухты.

2. 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 полного 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 [9] 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, 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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. № 48. P. 173–183.

2. *Маречек С.В., Ермаков Д.М., Смирнов М.Т.* Накопление пара в атмосфере в период угрозы зарождения или прохождения штормов и ураганов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. М.: ИКИ РАН, 2011. 199 с.
3. *Снопков В.Г.* Расчет влажности воздуха над морем по разности температуры вода-воздух // Метеорология и гидрология. 1980. № 2. С. 109–111.
4. *Alishouse J.C., Snyder S.A., Vongsatorn J., Ferrado R.R.* Determination of oceanic total precipitate water from the SSM/I // J. Geophys. Res. 1990. V. 28. № 5. P. 811–816.
5. *Лаппо С.С., Гулев С.К., Рождественский А.Е.* Крупномасштабное тепловое взаимодействие в системе океан-атмосфера и энергоактивные области Мирового океана. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 336 с.
6. *Голицын Г.С.* Ураганы, полярные и тропические, их энергия и размеры, количественный критерий возникновения // Изв. РАН. Физика океана и атмосферы. 2008. Т. 44. № 5. С. 579–590.
7. *Арманд Н.А., Гранков А.Г., Мильшин А.А. и др.* Использование данных одновременных спутниковых СВЧ-радиометрических и судовых измерений для исследования процессов взаимодействия океана и атмосферы в Северной Атлантике // Океанология. 2004. Т. 44. № 1. С. 49–61.
8. *Линус Н.З.* Доступная потенциальная энергия в атмосфере и ее превращение в кинетическую энергию // Метеорология и гидрология. 1982. № 4. С. 106–114.
9. *Шарков Е.А., Шрамков Я.Н., Покровская И.В.* Повышенное содержание водяного пара в атмосфере тропических широт как необходимое условие генезиса тропических циклонов // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 2. С. 73–82.