

О ЧЕМ ГОВОРIT СОБСТВЕННОЕ РАДИОТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ОКЕАНА?



А.Г. ГРАНКОВ,

доктор физико-математических наук

А.А. МИЛЬШИН,

старший научный сотрудник

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

DOI: 10.7868/50044394819010043

В глубинах Мирового океана протекают процессы, оказывающие влияние на природные (погодные) условия и жизнедеятельность людей: постоянно существуют и видоизменяются мощные течения, переносящие тепло к континентам; зарождаются и распространяются мощные ураганы; регулярно возникают температурные и тепловые аномалии на границе раздела с атмосферой.

Об этих явлениях, имеющих преимущественно тепловую природу, может рассказать радиотепловое (сверхвысокочастотное) излучение, сопровождающее эти явления; его измеряют с помощью спутниковых средств дистанционного зондирования Земли.

Основная проблема при изучении океана со спутников заключается в том, что поле восходящего СВЧ-излучения несет информацию не только о его поверхности и нижних слоях атмосферы, непосредственно участвующих в зарождении и развитии природных катаклизмов, но и о более ее высоких

слоях, которые могут искажать картину о процессах, наблюдаемую в нижних слоях.

В статье рассматривается подход к индикации и оценке интенсивности тепловых процессов на поверхности океана и в атмосфере, основанный на отзывчивости к ним восходящего СВЧ-излучения системы океан–атмосфера в спектральной области резонансного поглощения радиоволн в атмосферном водяном паре.

В статье рассматриваются примеры использования этой области СВЧ-диапазона для локализации и анализа областей, отличающихся высокой интенсивностью теплового взаимодействия океана и атмосферы (энергетических зон), слежением со спутников за динамикой гидрологических и атмосферных фронтов, контроля предвестников приближения тропических ураганов и морских штормов. Круг рассматриваемых примеров включает короткопериодические (синоптические) явления с временем жизни 5–7 суток, а также медленные процессы (периоды изменений составляют месяцы и годы).

ИЗ ИСТОРИИ СТАНОВЛЕНИЯ СПУТНИКОВОЙ СВЧ-РАДИОМЕТРИИ

Лишь немногие люди – в основном только специалисты в области радиопизики – имеют представление о том, что все окружающие нас предметы (в том числе и живые) являются естественными источниками радиотеплового излучения в диапазонах миллиметровых, сантиметровых и дециметровых длин волн.

На первый взгляд, возможность чувствовать и измерять это излучение мо-

жет показаться удивительной. В самом деле, в этой области спектра его интенсивность, описываемая формулой Релея–Джинса (“длинноволновым приближением” формулы Планка), заметно уменьшается с увеличением длины волны. Из этой формулы видно, что здесь, действительно, речь идет об очень слабых излучениях. При пере-

ходе, например, от длины волны ($\lambda = 10$ мкм) из хорошо известной нам в обыденной жизни области инфракрасного (теплового) излучения к длине волны ($\lambda = 10$ см) СВЧ-диапазона, интенсивность излучения уменьшается в 10^8 раз. Положение дел, однако, спасает то обстоятельство, что приборы, улавливающие и регистрирующие радиотепловое излучение – СВЧ-радиометры – облада-

ют значительно большей чувствительностью, чем приемники инфракрасного излучения (ИК-радиометры). Несложные оценки показывают, что минимальная обнаруживаемая мощность излучения природных сред для СВЧ-радиометров на 9 порядков ниже, чем для ИК-радиометров; таким образом, громадное преимущество в чувствительности первых с лихвой компенсирует уменьшение интенсивности принимаемого ими излучения, диктуемое формулой Релея–Джинса в этой области электромагнитного спектра, по сравнению с инфракрасной областью.

Радиотепловое излучение природных сред содержит информацию об их тепловых и других свойствах; это давно используется для изучения небесных тел с помощью радиотелескопов.

Идея измерять излучение поверхности Земли в СВЧ-диапазоне с околоземной орбиты получила развитие в 1960-х годах. Успешные эксперименты, про-

Радиотепловое излучение природных сред содержит информацию об их тепловых и других свойствах; это давно используется для изучения небесных тел с помощью радиотелескопов

веденные на спутниках “Космос-243” (1968 г.), “Космос-384” (1970 г.) и других (позже, в 1973 г., на американском ИСЗ “Нимбус-5”), заложили основу для развития нового направления дистанционного зондирования Земли – спутниковой СВЧ-радиометрии.

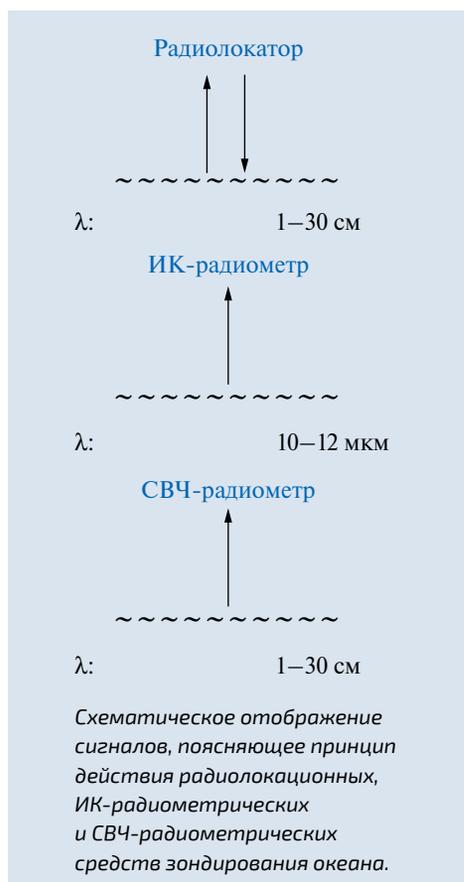
Результаты первого эксперимента на ИСЗ “Космос-243” продемонстрировали специалистам всего мира возможность применения СВЧ-радиометрических методов для восстановления картины пространственной и временной изменчивости температуры поверхности Мирового океана; водяного пара в атмосфере со спутников. Впечатляющими (результаты опубликованы на страницах профильных зарубежных журналов) стали полученные впервые, с помощью спутников Земли, меридиональные профили этих столь важных для океанологов и метеорологов параметров, о которых прежде можно было иметь представление лишь по отдельным судовым и буйковым измерениям. Эти пионерские данные, получаемые “быстрым росчерком пера” со спутников, позволили дополнить и обогатить сведения о таких спорадических и непредсказуемых районах в океане как штормовые зоны, области скопления облаков, районы активной деятельности ураганов. Появление спутников, оборудованных радиотехнической аппаратурой, позволяющей измерять собственное, радиотепловое излучение Земли, оценили специалисты в области океанологии, метеорологии и климатологии.

Сегодня СВЧ-радиометрические методы дистанционного зондирования Земли, наряду с ИК-радиометрическими и радиолокационными, заполняют нишу в арсенале современных средств зонди-

Результаты первого эксперимента на ИСЗ “Космос-243” продемонстрировали специалистам всего мира возможность применения СВЧ-радиометрических методов для восстановления картины пространственной и временной изменчивости температуры поверхности Мирового океана; водяного пара в атмосфере со спутников

рования нашей планеты из космоса. Оснащенные спутников СВЧ-радиометрическими системами, основанными на приеме собственного излучения земных покровов и атмосферы в диапазоне миллиметровых, сантиметровых и дециметровых длин волн, не предполагает установки “искусственных облучателей” Земли (применяемых в ра-

диолокаторах в том же диапазоне); поэтому они получили название систем пассивной радиолокации. Эти средства абсолютно безвредны для биологических



существ, они не могут нанести ущерба экологической среде; важное их свойство – “незаметность” в радиоэфире – высоко оценивается военными специалистами. Волны радиодиапазона слабо поглощаются и рассеиваются в облаках, в связи с этим спутниковые СВЧ-радиометрические методы зондирования Земли практически “всепогодны”, по сравнению с методами ИК-радиометрии.

Концепция использования данных СВЧ-радиометрических измерений, дающих представление об обобщенных характеристиках природной среды, получила развитие при изучении тепловых и динамических процессов на поверхности океана и в атмосфере с применением российских и американских метеорологических спутников

ное А.А. Григорьевым и М.И. Будыко; характеризует баланс тепла и влаги на Земле). Впоследствии этот вывод был подтвержден в результате многочисленных экспедиционных работ, проведенных в 1980-е и 1990-е гг. на территориях республик СССР (а позже и за рубежом): применялись методы дистанционного исследования земных покровов с помощью самолетов, верто-

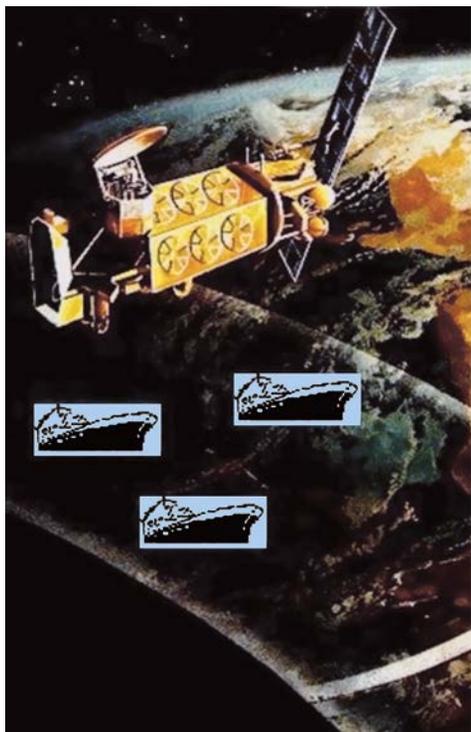
летов, мотодельтопланов, беспилотных аппаратов, оснащенных СВЧ-радиометрами.

В дальнейшем концепция использования данных СВЧ-радиометрических измерений, дающих представление об обобщенных характеристиках природной среды, получила развитие при изучении тепловых и динамических процессов на поверхности океана и в атмосфере с применением российских и американских метеорологических спутников. Значительный импульс этим исследованиям придали идея авторов этой статьи о совмещении и сопоставлении результатов проведенных в нашей стране экспериментов (в Северной Атлантике; НЬЮ-ФАЭКС-88 и АТЛАНТЭКС-90) с данными, полученными с помощью американского метеорологического спутника “DMSP-5D2 F-08” Министерства обороны США, запущенного в июне 1987 г. (оснащен семиканальным четырехчастотным СВЧ-радиометрическим комплексом SSM/I – Scanning Sensor Microwave Imager). Организации Гидромета СССР проводили в течение 1988 и 1990 годов в рамках национальной программы “Разрезы” эксперименты на судах: исследовали

ДИАГНОСТИКА ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ОКЕАНА И В АТМОСФЕРЕ

В начале 1980-х гг. в Институте радиотехники и электроники РАН стала прорабатываться концепция использования данных, полученных с помощью спутниковых СВЧ-радиометрических измерений, не столько для измерения отдельных геофизических параметров природных объектов (температура, влажность, скорость ветра), сколько для определения их обобщенных характеристик, связанных, например, с переносом тепла и влаги на границе раздела различных природных сред. Сотрудники института Е.А. Реутов и А.М. Шутко теоретически установили существование прямой (непосредственной) связи между радиояркостной температурой и радиационным индексом сухости¹ (количественное понятие, введен-

¹ Реутов Е.А., Шутко А.М. О взаимосвязи яркостной температуры в радиодиапазоне с радиационным индексом сухости // Исследование Земли из космоса, 1987. N 6. С. 42–48.



Американский метеорологический ИСЗ "DMSP-5D2 F-08" выполняет СВЧ-радиометрическую съемку в районах проведения экспериментов НьюФАЭКС-88 и АТЛАНТЭКС-90 на научно-исследовательских судах "В. Бугаев", "Муссон" и "Волна" в Ньюфаундлендской зоне Северной Атлантики. Рисунок.

влияние энергоактивных зон океана на короткопериодические колебания климата; спутниковые измерения осуществлялись в соответствии с программой Министерства обороны США "DMSP" с помощью Defense Meteorological Satellite Program (метеоспутников оборонной программы). В декабре 1992 г. архивные данные, полученные с помощью спутников серии "DMSP", были рассекречены и стали доступны для научного сообщества.

В качестве "областей интересов" в этом исследовании были выбраны Гольфстримская, Ньюфаундлендская

и Норвежско-Гренландская зоны Северной Атлантики, находящиеся в русле течения Гольфстрим и его продолжения – Северно-Атлантического течения (несут тепло из нижних широт океана к берегам Европы). Эти области, называемые специалистами энергоактивными, привлекают их внимание сильной энергетикой теплового и динамического взаимодействия океана и атмосферы; они стали отличными природными полигонами для изучения "отклика" СВЧ-излучения на такие распространенные явления, как мощные среднеширотные циклоны. Здесь интенсивность потоков тепла, наблюдаемых на поверхности океана и в приводном слое атмосферы, может достигать гигантской мощности (до 2000 Вт/м^2)², что сопоставимо с тепловым эффектом, сопровождающим работу мощных бытовых электронагревательных приборов), а значительные всплески радиояркой температуры (до нескольких десятков градусов) превосходят диапазон естественных изменений многих природных объектов (например, широтная изменчивость температурного режима поверхности океана, сезонный нагрев земной поверхности, весеннее таяние ледников), проявляющихся в СВЧ-диапазоне.

Однако некоторые полученные данные плохо согласовывались с общими представлениями о формировании радиотеплового излучения и его связи с тепловыми процессами, происходящими в системе океан–атмосфера (COA). Согласно этим данным, восходящее собственное излучение COA содержит в себе информацию не только о приводном

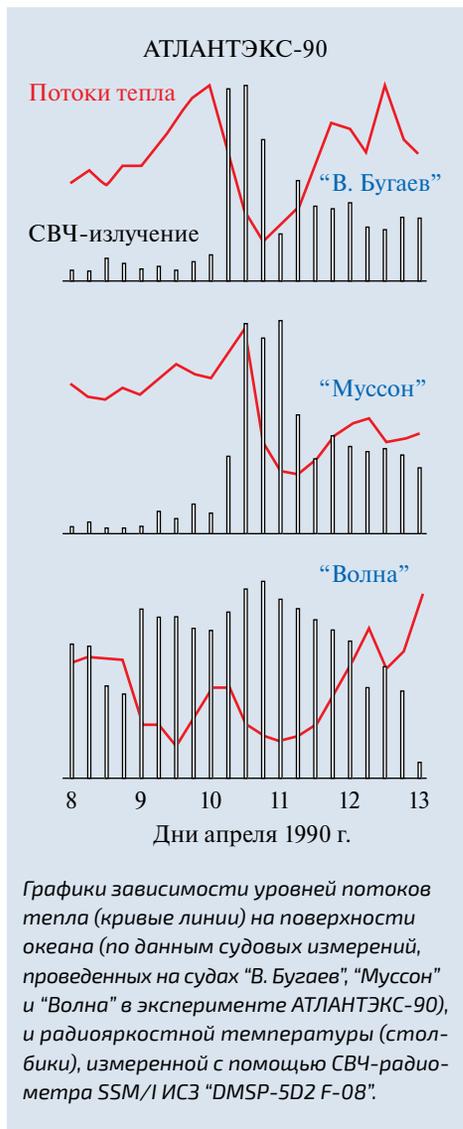
² Лаппо С.С., Гулев С.К., Рождественский А.Е. Крупномасштабное тепловое взаимодействие в системе океан–атмосфера и энергоактивные области Мирового океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1990.

слое атмосферы, участвующем в теплообмене с поверхностью океана, но и о более высоких ее слоях (то есть лишь косвенно характеризует тепловые свойства системы на ее границе).

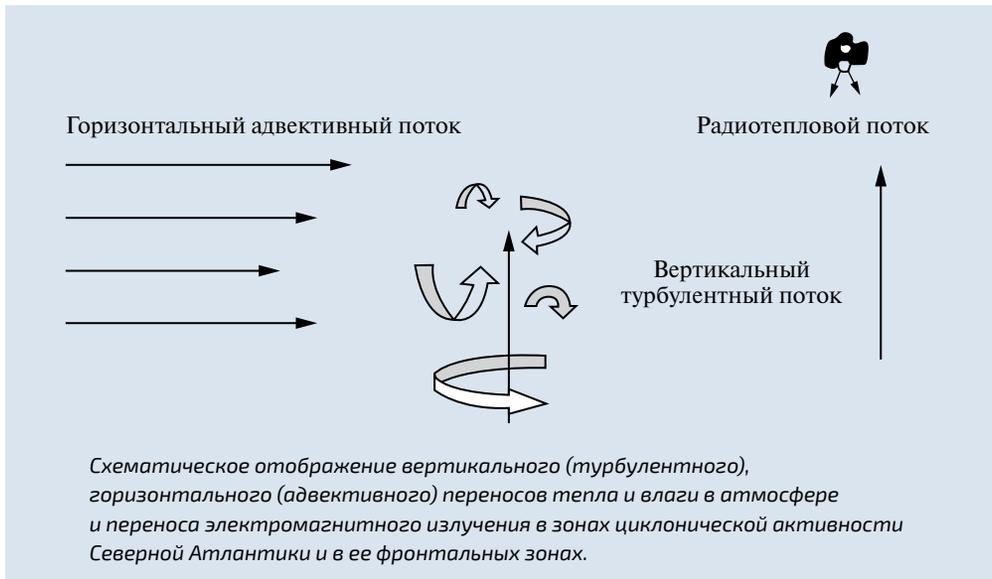
Первый же результат совмещения данных, полученных с помощью спутниковых и судовых измерений, указал на наличие тесной взаимосвязи между яркостной температурой СОА в спектральной области поглощения радиоволн в водяном паре атмосферы и вертикальными турбулентными потоками явного и скрытого тепла на поверхности океана в приводном слое атмосферы (0–10 м). К тому же было замечено, что контрасты интенсивности радиотеплового излучения СОА, наблюдаемые со спутника, на порядок выше их расчетных оценок, получаемых в результате учета одних только эффектов вертикального (турбулентного) переноса тепла в атмосфере. Этот феномен, как выяснилось, обусловлен существованием горизонтального (адвективного) переноса тепла и влаги в атмосфере в зонах циклонической активности, а также во фронтальных зонах Северной Атлантики³.

Под действием интенсивных горизонтальных движений в разных слоях атмосферы (в приводном и вышележащих слоях) происходят быстрые изменения ее температурных и влажностных характеристик, что приводит к изменениям в формировании вертикальных турбулентных потоков тепла и влаги в атмосфере (в том числе и у поверхности океана). Такие “сдвиги” в тепловом режиме атмосферы (как показали данные, полученные

³ Гранков А.Г., Реснянский Ю.Д., Новичихин Е.П., Мильшин А.А. Моделирование отклика собственного СВЧ-излучения системы “океан–атмосфера” на горизонтальный перенос тепла в атмосферном пограничном слое // Метеорология и гидрология, 2014. N 2. С. 33–44.



в ходе экспериментов НЬЮФАЭКС-88 и АТЛАНТЭКС-90), сопровождаются всплесками общего влагосодержания атмосферы и радиояркостной температурой СОА в области резонансного поглощения радиоволн в водяном паре атмосферы, центральная линия которой соответствует длине волны 1,35 см (частоте излучения 22, 235 ГГц), а ее границы находятся в пределах спектрального интервала 1–1,6 см. Данная



модель формирования процессов теплообмена между океаном и атмосферой объясняет существование непосредственной связи между поверхностными тепловыми потоками и радиотепловым излучением системы океан–атмосфера в этой области СВЧ-диапазона.

Построенные на основе данной модели расчетные оценки радиояркостной температуры системы океан–атмосфера находятся в хорошем соответствии со спутниковыми данными – как в спокойных, так и циклонических районах океана. Радиояркостная температура СОА в области резонансного поглощения радиоволн водяным паром атмосферы тесно связана с вертикальными турбулентными потоками явного и скрытого тепла на поверхности океана в “пленочном” (от 0 до 10 м) приводном слое атмосферы.

Радиояркостная температура СОА в области резонансного поглощения радиоволн водяным паром атмосферы тесно связана с вертикальными турбулентными потоками явного и скрытого тепла на поверхности океана в “пленочном” приводном слое атмосферы

Анализ результатов экспериментов, полученных в ходе экспериментов НЬЮ-ФАЭКС-88 и АТЛАНТЭКС-90 и совмещенных с ними данных с ИСЗ “DMSP-5D2 F-08”, подтвердил возможность использования характеристик поля собственного СВЧ-излучения СОА в области резонансного поглощения радиоволн в водяном паре атмосферы в качестве непосредственных (прямых) характеристик тепловых процессов, наблюдаемых на поверхности океана⁴. В конце 1990-х гг. эти исследования

были продолжены в Институте радиотехники и электроники РАН в рамках реализации совместного проекта

⁴ Гранков А.Г., Мильшин А.А., Шелобанова Н.К. Яркостная температура собственного СВЧ-излучения как прямая характеристика теплового и динамического взаимодействия океана и атмосферы // Радиотехника и электроника, 2017. Т. 62. N 1. С. 17–25.



Буйковая станция SMKF1 наблюдательной сети NOAA для измерения температуры поверхности океана, температуры, влажности воздуха и скорости ветра в приводном слое воздуха во Флоридском проливе в Мексиканском заливе.

российского (госкорпорация “Роскосмос”) и американского (NASA) космических агентств по применению СВЧ-радиометрических измерений с помощью комплекса аппаратуры, установленной на модуле “Природа” российской орбитальной станции “Мир”, на американских спутниках F-10 – F-13 серии “DMSP” и на отечественном спутнике “Метеор-ЗМ” № 1.

Позже полезные результаты были получены в Голубой бухте на территории Черноморского филиала Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН с помощью уникальных измерительных средств, созданных в Институте океанологии, Институте физики атмосферы РАН, Институте космических исследований РАН и в Институте радиотехники и электроники (ИРЭ) РАН. С самого начала работ на сотрудничество в этом научном направлении был нацелен Центр космических полетов им. Дж. Маршалла NASA, предоставивший ИРЭ РАН архивные данные многолетних спутниковых СВЧ-радиометрических измерений (изображений) различных характеристик поверхности Земли и атмосферы с помощью амери-

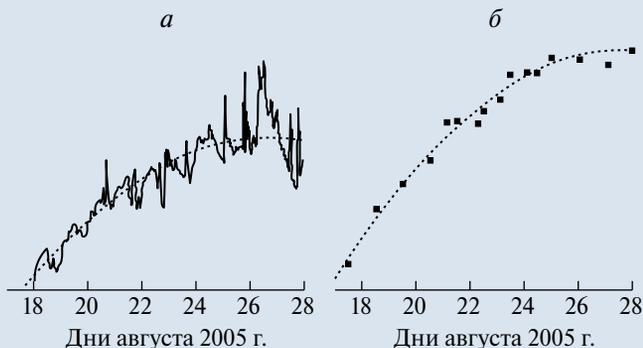
канских спутников серии “DMSP”. Благодаря обнаруженному свойству “радиовидимости” тепловых процессов, наблюдаемых на поверхности океана со спутников, область резонансного поглощения радиоволн в водяном паре атмосферы находилась в центре внимания этих исследований⁵. Ниже рассмотрены некоторые примеры использования данных спутниковых измерений в этой области СВЧ-диапазона для анализа тепловых и динамических процессов на поверхности океана и в атмосфере.

ПРИБЛИЖЕНИЕ УРАГАНОВ И МОРСКИХ ШТОРМОВ

С помощью спутниковых СВЧ-радиометрических средств обнаружена тесная связь между изменчивостью радиояркостной температурой COA и метеорологическими характеристиками атмосферы в акваториях Мирового океана в период, когда они находятся в “ожидании прихода” мощных ураганов и морских штормов.

Например, в августе 2005 г. во Флоридском проливе Мексиканского залива в районе расположения буйковой станции SMKF1, входящей в состав наблюдательной сети Национального управления океанических и атмосферных исследований США (NOAA), исследовали реакцию метеорологических и аэрологических характеристик атмосферы на приближение мощного тропического циклона Катрина (Katrina): измеряли влажность воздуха в приводном слое и общего влагосодержания атмосферы; их оценку производили по данным измерений

⁵ Grankov A.G., Milshin A.A. Microwave Radiation of the Ocean-Atmosphere: Boundary Heat and Dynamic Interaction, Second Edition, Springer. 2016.



Графики нарастания приводной влажности воздуха (по данным станции SMKF1 (а) и яркостной температуры системы океан–атмосфера на длине волны 1,26 см (на основании данных, полученных с помощью радиометра AMSR-E ИСЗ “Aqua” (б) в августе 2005 г. Кривыми показан постепенный рост показателей.

радиояркостной температуры системы океан–атмосфера на длине волны 1,26 см с помощью многоканального СВЧ-радиометра AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer) океанографического спутника “Aqua” (запущен 4 мая 2002 г. по программе NASA “EOS”; Earth Observing System – система наблюдения Земли; ЗиВ, 2003, № 6, с. 98).

В сентябре–октябре 2010 г. в Голубой бухте Черного моря (г. Геленджик, территория филиала Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН) в период, предшествующий появлению интенсивного шторма, проводились измерения влажности приводного воздуха и общего влагосодержания атмосферы с помощью установленных на конце пирса метеорологических датчиков и данных измерений радиометра AMSR-E спутника “Aqua”. В обоих случаях в течение 6–7 дней до начала штормовых возмущений наблюдался эффект “накачки” атмосферы энергией в виде скрытого тепла, содержащегося в водяном паре.

Замеченное явление может оказаться полезным при разработке методов прогнозирования темпов и сроков приближения тропических циклонов (штормовых зон) к той или иной области океана (побережья), где их появление регулярно и ожидаемо.

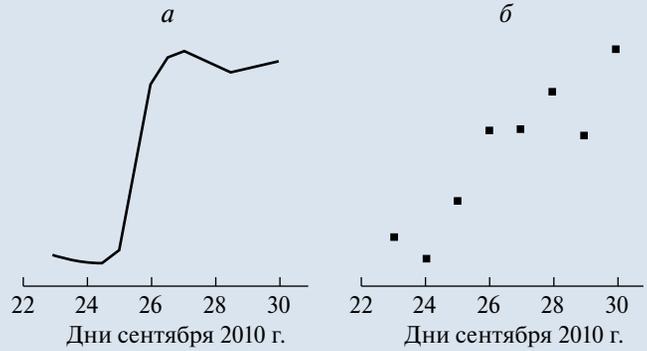


Пирс с установленным комплексом метеорологических датчиков и приемной аппаратуры в Голубой бухте Черного моря (г. Геленджик). Филиал Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, сентябрь 2010 г.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТРОПИЧЕСКИХ УРАГАНОВ И АТМОСФЕРНЫХ ФРОНТОВ В ОКЕАНЕ

С помощью данных регулярных спутниковых измерений радиояркостной температуры системы океан–атмосфера в резонансной области поглощения радиоволн в водяном паре атмосферы можно исследовать пространственную и временную динамику распространения тропических ураганов и атмосферных фронтов в океане. Результаты

Графики нарастания приводной влажности воздуха (по данным СВЧ-измерений, выполненных в сентябре 2010 г. с пирса в Голубой бухте Черного моря (а) и яркостной температуры системы поверхность моря–атмосфера (данные получены с помощью радиометра AMSR-E спутника "Aqua" (б)). Наблюдается одновременное повышение влажности приводного воздуха и радиояркостной температуры в указанных районах.



измерений с помощью радиометра AMSR-E ИСЗ "Aqua" яркостной температуры COA в этом диапазоне радиоволн иллюстрируют распространение тропического циклона Катрина от района его зарождения (Багамские острова) к южному побережью США (штат Луизиана) в период с 24 по 30 августа 2005 г. Появление урагана Катрина в той или иной области Мексиканского залива сопровождается всплесками яркостной температуры COA на длине волны 1,26 см; их природа объясняется накоплением водяного пара в атмосфере в периоды времени, предшествующие приходу урагана.

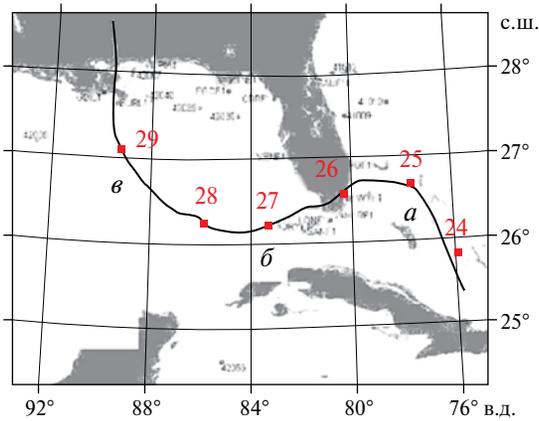
Перемещения фронтальных атмосферных зон в океане также отчетливо фиксируются по данным спутниковых СВЧ-радиометрических измерений в области поглощения радиоволн в водяном паре атмосферы. По результатам этих спутниковых измерений можно судить о направлении движения атмосферных фронтов и скорости перемещения.

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ В ЭНЕРГОАКТИВНЫХ ЗОНАХ СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ

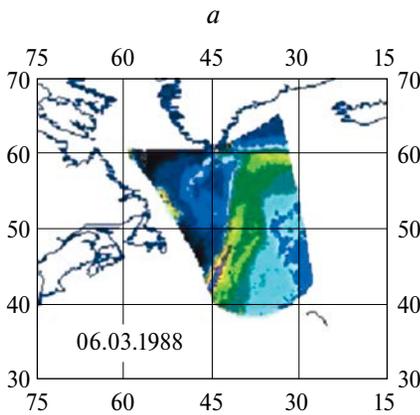
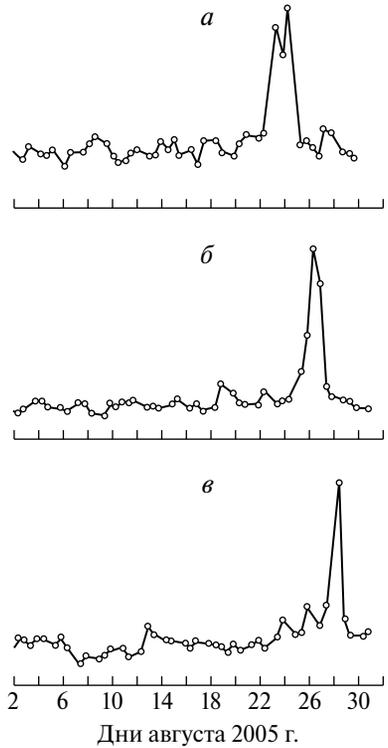
Преыдушие примеры иллюстрируют применение спутниковых СВЧ-радиометрических методов для локализа-

ции тепловых процессов на поверхности океана и в атмосфере, существующих в синоптическом диапазоне временных масштабов (5–7 суток).

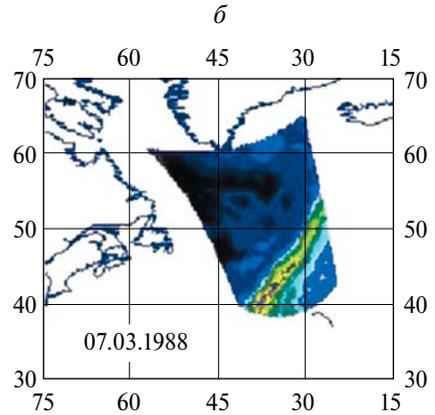
Данные долговременных спутниковых СВЧ-радиометрических измерений (на протяжении сезонов, в течение нескольких лет) в резонансной области поглощения радиоволн водяными парами атмосферы позволяют оценивать изменчивость климатически значимых параметров системы океан–атмосфера: среднемесячных потоков тепла и влаги на границе раздела системы в течение года (от месяца к месяцу) и нескольких лет (от года к году). Об этом свидетельствуют, например, результаты сопоставления среднемесячных значений потоков суммарного (явного и скрытого) тепла из архива NCEP/NCAR – National Centers for Environmental Prediction/ National Center for Atmospheric Research) с результатами измерений среднемесячных значений радиояркостной температуры COA в области резонансного поглощения радиоволн водяным паром атмосферы (на длине волны 1,35 см), выполненных в 1988–1994 гг. в Норвежско-Гренландской, Ньюфаундлендской и Гольфстримской энергоактивных зонах Северной Атлантики с помощью американских метеорологических спутников F-10 – F-13 серии "DMSP".



Карта движения тропического урагана Катрина 24–29 августа 2005 г. (слева). Графики вариаций яркостной температуры в системе океан–атмосфера ($\lambda = 1,26$ см), измеренные с помощью радиометра AMSR-E ИСЗ “Аква” в различных точках траектории продвижения урагана от очага его возникновения – к южному побережью США: а) 26° с.ш., 78° з.д.; б) 25° с.ш., 83° з.д.; в) 27° с.ш., 89° з.д. (справа). Наблюдается перемещение всплесков яркостной температуры, совпадающее с траекторией распространения урагана.



8ч утра 7 марта

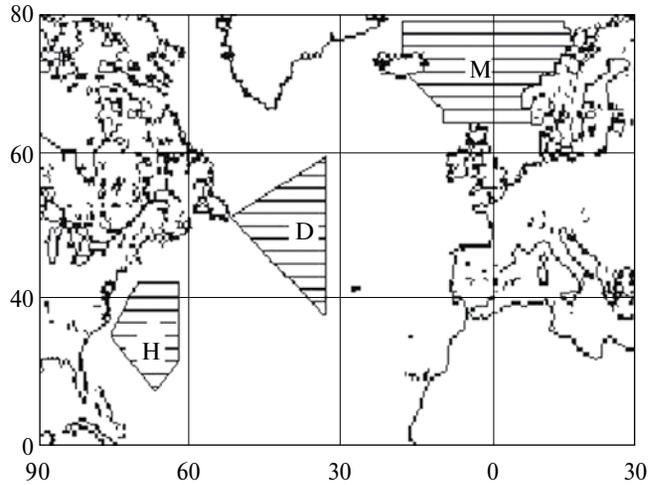


8ч утра 8 марта



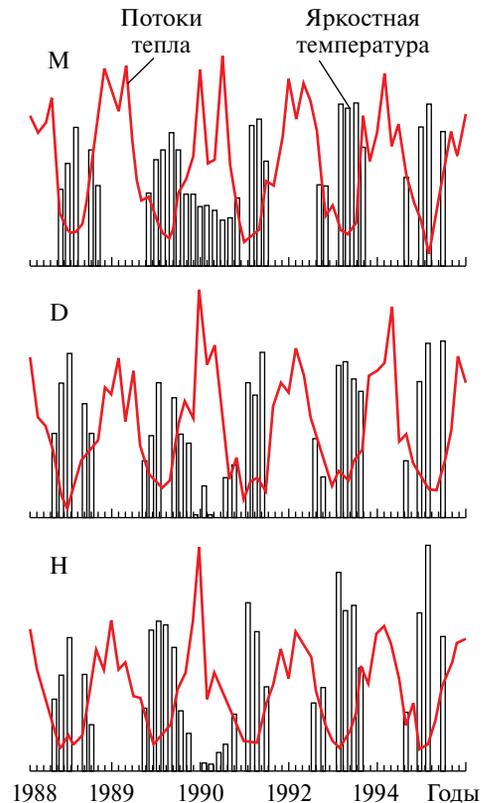
Пространственные распределения радиояркостной температуры системы океан–атмосфера ($\lambda = 1,35$ см) по данным, полученным с помощью ИСЗ “DMSP-5D2 F-08” (США) в районе субполярного гидрологического фронта в Северной Атлантике в период прохождения среднеширотного атлантического циклона в марте 1988 г., в ходе эксперимента НЬЮФАЭК-88: а) 8 ч утра 7 марта; б) 8 ч утра 8 марта. Из данных наблюдений следует, что атмосферные массы перемещались в направлении Азорских островов со скоростью примерно 30 км/ч.

Карта расположения Норвежско-Гренландской (М), Ньюфаундлендской (D) и Гольфстримской (Н) энергоактивных зон Северной Атлантики.

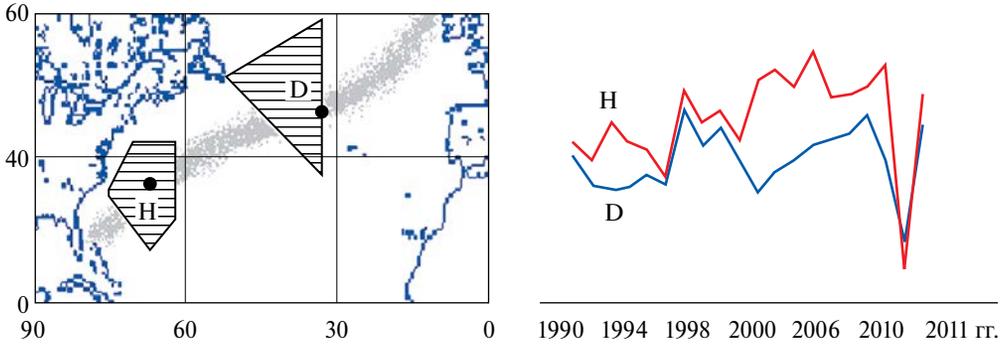


О тесной связи тепловых процессов с их СВЧ-излучательными характеристиками в этих областях Северной Атлантики на указанных временных масштабах говорят результаты их линейного регрессионного анализа – высокая корреляция между ними. Данные долговременных спутниковых СВЧ-радиометрических измерений могут служить для оценки сезонной динамики (наблюдений в течение года) теплового режима системы океан–атмосфера для обнаружения его изменений, обусловленных не только естественными, но и техногенными причинами, и их оценки. В результате случившегося в апреле 2010 года аварийного разлива нефти в нефтедобывающих районах Мексиканского залива у истоков течения Гольфстрим появился уникальный

материал для исследования аварийных ситуаций такого рода с помощью спутниковых СВЧ-радиометрических методов.



Графики вариаций среднемесячных значений тепловых потоков (архивные данные NCEP/NCAR) и данные измерений радиояркой температуры на длине волны 1,35 см. Измерения выполнены со спутников "DMSP" F-10 – F-13 в 1988–1994 гг. в Норвежско-Гренландской (М), Ньюфаундлендской (D) и Гольфстримской (H) энергоактивных областях Северной Атлантики.



Карта течения Гольфстрим и энергоактивные области (H) и (D) на его пути (слева). График динамики изменений общего содержания водяного пара в атмосфере и его особенности в 2010 г. (справа). Отмечается значительное снижение среднегодовых значений общего содержания водяного пара в атмосфере в Ньюфаундлендской (D) и Гольфстримской (H) областях после начала нефтяных разливов в мае 2010 г.

На основе данных измерений радиояркой температуры СОА на длине волны 1,26 см, полученных со спутника “Aqua”, обнаружено значительное снижение общего содержания водяного пара в атмосфере в Гольфстримской и Ньюфаундлендской энергетически активных зонах Северной Атлантики после распространения нефтяных разливов в эти зоны. Возникновение этого явления можно объяснить снижением испарения влаги с поверхности океана из-за поверхностных нефтяных пленок в области разливов и уменьшением переноса тепла в другие области, находящиеся в русле течения Гольфстрим.

Рассмотренные примеры показывают широкие возможности спутникового СВЧ-радиометрического метода анализа тепловых процессов, происходящих на поверхности океана и в атмосфере на основе данных измерений интенсивности собственного радиотеплового излучения в области резонансного поглощения радиоволн в во-

дяном паре атмосферы (в диапазоне длин волн 1–1,6 см). Действенность метода обусловлена тем обстоятельством, что атмосферный водяной пар является участником (субстанцией) в тепловом взаимодействии атмосферы с поверхностью океана и одновременно служит его надежным количественным индикатором в этой области. Собственное СВЧ-излучение атмосферного водяного пара, измеряемое со спутников Земли, дает отчетливые сигналы об изменениях, происходящих во фронтальных, штормовых и циклонических зонах в океане; они проявляются в виде всплесков радиояркой температуры системы океан–атмосфера.

Собственное СВЧ-излучение атмосферного водяного пара, измеряемое со спутников Земли, дает отчетливые сигналы об изменениях, происходящих во фронтальных, штормовых и циклонических зонах в океане

Возникает вопрос: коль скоро в полях собственного радиотеплового излучения океана и атмосферы присутствуют “отпечатки” процессов и явлений, происходящих в поверхностном слое океана и в атмосфере, – нельзя ли рассматривать их как неотъемлемое свойство (атрибут)

системы океан–атмосфера? Подобно привычному для широкого круга специалистов факту: интенсивность восходящего излучения системы океан–атмосферы в ИК-диапазоне является одной

из естественных характеристик радиационного баланса системы. По мнению авторов, дальнейшие исследования позволят дать ответ на этот вопрос в ближайшее время.