

ГЛОБАЛЬНОЕ РАДИОТЕПЛОВОЕ ПОЛЕ СИСТЕМЫ ОКЕАН – АТМОСФЕРА

Н.М. Астафьева, М.Д. Раев, Е.А. Шарков

*Институт космических исследований РАН,
117997 Москва, Профсоюзная, 84/32*

E-mails: ast@iki.rssi.ru, esharkov@iki.rssi.ru, mraev@asp.iki.rssi.ru

Термодинамические процессы в системе океан – атмосфера формируются в результате процессов энергообмена и массопереноса, происходящих в широком диапазоне интенсивностей и с разными пространственными и временными масштабами. Сложность структуры характеризующих природные процессы геофизических параметров (метеорологических или климатических) и необходимость их измерений с определенным пространственным и временным разрешением определяет требования к приборам, производящим измерения, и к носителям, на которых они находятся.

В настоящее время существует широкий круг технических возможностей для получения данных наблюдений: развитая сеть метеостанций и метеозонды, корабли погоды и буйковые средства, самолеты, искусственные спутники Земли и другие. Получаемые с помощью этих носителей данные наблюдений имеют разную пространственную и временную дискретизацию и могут быть использованы для решения разных научных проблем.

Наши интересы связаны в основном с двумя тесно связанными проблемами: с проблемой изучения термодинамики наиболее влиятельных крупно- и мезомасштабных процессов в системе океан – атмосфера (крупномасштабные квазистационарные вихревые системы, явление Южное Колебание – Эль-Ниньо, тропический циклогенез и другие) и с проблемой изучения изменчивости климата планеты. Структурой наиболее влиятельных природных процессов определяются требования к данным натурных наблюдений – необходимы достаточно большая временная и пространственная протяженность, а также достаточно хорошая регулярность и плотность покрытия.

Современные ИК- и СВЧ-радиометрические приборы, установленные на искусственных спутниках Земли позволяют получать глобальные данные наблюдения радиоярких характеристик с достаточно хорошей временной регулярностью и пространственным разрешением. Радиометрические спутниковые данные могут быть использованы опосредованно – для восстановления основных количественных климатических характеристик на основе полуэмпирических формул, а также непосредственно в качестве прямых характеристик теплового и динамического взаимодействия в системе океан – атмосфера. Второй путь в настоящее время находится в начале своего развития и представляется нам наиболее перспективным.

Формирование глобальных радиотепловых полей системы океан – атмосфера на основе спутниковых данных представляет собой довольно сложную проблему. В настоящей работе для построения глобального радиотеплового поля планеты используются данные многоканальных радиометрических приборов SSM/I, установленных на космических аппаратах F10-F15 серии DMSP. Анимацию полученного глобального радиотеплового поля можно увидеть на сайте ИКИ РАН (<http://www.iki.rssi.ru>). Показаны некоторые возможности использования глобальных полей яркостной температуры для детального изучения процессов тепло-массообмена в системе океан – атмосфера, влияющих на общую циркуляцию атмосферы и принимающих участие в формировании климата планеты.

Введение

Актуальность исследований крупномасштабных термодинамических процессов в системе океан – атмосфера, а также годового хода, сезонной, межгодовой и долговременной изменчивости климата признана международным сообществом и подтверждается в ходе деятельности международных и федеральных программ изучения Мирового океана, атмосферы, гео- биосферы, а также изменчивости и прогнозируемости климата (ВПИК, МГБП, GCRP, EOS, CLIVAR и других).

Одним из наиболее важных факторов изменчивости климата являются крупномасштабные термодинамические взаимодействия в системе океан – атмосфера, эволюционирующие в широком диапазоне временных и пространственных масштабов. Обеспечить глобальные наблюдения климатических параметров с необходимыми для дальнейшего анализа пространственной частотой и временной регулярностью в настоящее время могут лишь приборы, установленные на искусственных спутниках Земли.

В последние годы накоплен определенный позитивный и негативный опыт использования спутниковой СВЧ- и ИК-радиометрии [см., например, 1, 2] для анализа характеристик теплового и динамического

взаимодействия океана и атмосферы на основе данных многоканальных радиометрических приборов, установленных на искусственных спутниках Земли: радиометров SSMR (ИСЗ NIMBUS 7) в СВЧ-диапазоне, SSM/I (ИСЗ DMSP) в СВЧ-диапазоне и AVHRR (ИСЗ NOAA) в ИК-диапазоне.

Два качественно различающихся подхода применяются при использовании радиометрических спутниковых данных: опосредованное использование и прямое. *Опосредованное использование*: спутниковые данные используются для восстановления количественных климатических характеристик на основе косвенных связей между интегральными (по высоте) радиометрическими измерениями в разных участках спектра и конкретными климатическими характеристиками (температура, влажность) или на основе полуэмпирических формул, например, балк-формул [3], использующих существование корреляционных связей между температурой и влажностью в разных слоях атмосферы. Следует отметить, что условия получения полуэмпирических формул ставят под сомнение их применение на синоптических масштабах и в областях больших градиентов (например, в зонах фронтов или циклонов). Однако, если опосредованное использование спутниковых данных для анализа изменчивости динамических процессов на синоптических масштабах можно признать проблематичным, то на масштабах среднемесячных, сезонных и больших это безусловно вполне оправдано.

Прямое использование: в последнее время радиометрические спутниковые данные все чаще используются непосредственно в качестве прямых характеристик теплового и динамического взаимодействия океана и атмосферы. Так, например, в [4] показана тесная связь между сезонной динамикой среднемесячных значений яркостной температуры и разностью температур поверхности океана и приводной атмосферы – явное преимущество спутниковых данных перед отдельным измерением температур поверхности океана и приводной атмосферы дистанционными методами для получения их разности, что приводит к заметным потерям точности. Путь прямого использования радиометрических спутниковых данных представляется нам наиболее перспективным. Его действенность, что очень существенно, подтверждается и на синоптических масштабах [5] в ситуациях, когда формализация самих процессов становится затруднительной (фронтальные зоны, циклоны и другие области больших градиентов).

Глобальное радиотепловое поле системы океан – атмосфера

Данные дистанционного зондирования обычно усваиваются в виде локальных (точечных) измерений. И гораздо реже в форме картин или полей их пространственных и временных измерений, поскольку это сопряжено с большими техническими трудностями.

В то же время, природные процессы, которые могут оказать существенное воздействие на транспортные и диссипативные свойства атмосферы и влиять на формирование климата планеты, имеют довольно большую пространственную протяженность, достаточно длительны и характеризуются сложной пространственно-временной структурой. Для выявления общих закономерностей наиболее влиятельных термодинамических процессов в системе океан – атмосфера и понимания физических механизмов, ими управляющих, необходим анализ параметров (данных наблюдений), представительных характеризующих их энергетику и динамику. Очевидно, что для адекватного изучения пространственной структуры и временной изменчивости интересующих нас процессов данные наблюдений должны быть представлены в виде полей с достаточными пространственным разрешением, протяженностью и временной регулярностью.

Наблюдения за пространственно-временной структурой характеристик системы океан – атмосфера в виде полей достаточно большой протяженности проводятся современными ИК- и СВЧ-радиометрическими приборами, установленными на искусственных спутниках Земли. В настоящей работе для построения глобального радиотеплового поля системы океан – атмосфера используются данные многоканальных радиометрических приборов SSM/I, установленных на космических аппаратах F10-F15 серии метеорологических спутников DMSP.

В этом разделе мы коротко опишем структуру используемых спутниковых данных и принципы построения глобального радиотеплового поля планеты. Более подробно структура спутниковых данных приборов SSM/I описана в статье, представленной в этом же сборнике [6].

Формирование глобального радиотеплового поля планеты

Космические аппараты серии DMSP с радиометрическими приборами SSM/I на борту были запущены в рамках спутниковой метеорологической программы Defense Meteorological Satellite Program (<http://dmsp.ngdc.noaa.gov/dmsp.html>) министерства обороны США. Долговременный мониторинг Земли в рамках программы DMSP имеет своей целью обеспечение вооруженных сил США глобальной метеорологической, океанографической и солнечно-геофизической оперативной информацией. Поставляемые метеорологическими спутниками серии DMSP радиометрические данные были рассекречены в 1992 г. и стали общедоступными для гражданского и научного сообщества. В настоящей статье используются данные, на-

копленные в формируемой электронной базе данных ИКИ РАН [6], содержащей на настоящий момент информации за период с 1995 по 2001 гг.

Семиканальные четырехчастотные СВЧ-радиометрические комплексы SSM/I (Special Sensor Microwave / Imager), установленные на спутниках этой серии, принимают линейно поляризованное излучение на частотах 19,35; 22,24; 37,0 и 85,5 ГГц. На частоте 22,24 ГГц измеряется только вертикально поляризованное излучение; на остальных – и горизонтально и вертикально поляризованное.

Искусственные спутники Земли серии DMSP позволяют получать данные наблюдения радиоярких характеристик в виде полей (подспутниковых полос) с достаточно хорошей временной регулярностью и пространственным разрешением. Спутники серии DMSP имеют солнечно-синхронную близкую к полярной низкую круговую орбиту. Параметры орбиты таковы: наклонение $98,8^\circ$, высота около 850 км и период 102 мин. Каждый спутник серии совершает 14,2 витка в сутки. Глобальное покрытие Земли осуществляется примерно за трое суток, неполное – за сутки. Подспутниковые дорожки повторяются приблизительно 2 раза в месяц – каждые 16 суток. Ширина полосы обзора приборов составляет 1400 км, размер элемента разрешения на поверхности Земли зависит от диапазона прибора и широты и варьируется в пределах от 12,5 до 25 км. Общая погрешность определения координат элемента разрешения достигает 20–30 км и снижается до 5 км (иногда до 2 км) при использовании специальной коррекции.

Для построения глобального радиотеплового поля системы океан – атмосфера использованы предварительно обработанные данные [6] в формате GRID, представляющие собой радиояркую температуру, пересчитанную на земную поверхность с шагом $0,5 \times 0,5$ градусов. Специфика траекторий аппаратов этой серии такова, что они не полностью покрывают поверхность планеты за сутки. В результате покрытие оказывается даже чрезмерно густым на высоких широтах, но оставляет довольно большие пробелы (лакуны) на средних широтах и, особенно, в приэкваториальной области.

Радиотепловые поля, построенные по данным одного из аппаратов примерно за сутки при прямом и обратном проходах спутника, имеют вид, показанный на рис. 1 (здесь и на следующих рисунках глобальные радиотепловые поля представлены в меркаторской проекции). Кроме стандартных лагун, обусловленных особенностями траектории спутника (зачерненные области на картине в левой стороне рисунка), потеря информации происходит также и вследствие сбоя передающей или приемной аппаратуры, что можно видеть на картине в правой стороне рис. 1, полученной в менее удачный день. Лакуны, образовавшиеся вследствие сбоя аппаратуры, бывают и гораздо более обширными, чем показанные здесь.

Лакуны необходимо заполнять данными, что довольно сложно, если учесть, что спутники проходят над интересующими нас областями планеты в разное время и смотрят на них под разными углами, а процессы в атмосфере довольно динамичны. Разработанные нами методики обработки спутниковых данных позволили построить глобальные радиотепловые поля (два полных глобальных поля в сутки), используя для дополнения данные всех космических аппаратов F10-F15 серии DMSP.

На рис. 2 представлено глобальное радиотепловое поле, полученное по данным многоканального радиометра SSM/I от 28 апреля 2001 г. на частоте 19,35 ГГц. В нижней части рисунка показан цветовой клин, цветовая радиотемпературная шкала в градусах Кельвина. Для удобства разворот по экватору в 360° дополнен 120-ю градусами. Это дает возможность изучать структуру атмосферных процессов над акваторией каждого из океанов планеты полностью. Отметим, что даже в том масштабе, в котором представлено глобальное поле на рисунке, легко различаются квазистационарные крупномасштабные структуры системы океан – атмосфера.

На основе полученных глобальных радиотепловых полей нами создана анимация (см. в Интернете на сайте ИКИ РАН – <http://www.iki.rssi.ru>). На каждом кадре фильма представлены данные двух каналов: 19,35 ГГц (вверху) и 22,24 или 85,5 ГГц (внизу) с цветовой радиотемпературной шкалой в градусах Кельвина между ними (один из таких кадров показан на рис. 3). В фильме даны краткие необходимые пояснения.

Анимация позволяет наблюдать процессы, происходящие в системе океан – атмосфера, в динамике в течение длительных отрезков времени. Легко наблюдать подробную структуру атмосферных процессов в широком диапазоне масштабов – от сотен километров (структура тропического циклона) до планетарных масштабов квазистационарных атмосферных структур (основные депрессии, южный тропик, основные энергоактивные зоны).

На наш взгляд, кроме сугубо научного интереса такая анимация может быть полезна и в педагогическом аспекте. Любому человеку, интересующемуся планетой, частью которой он является, будь то школе или в естественнонаучном вузе, анимация, демонстрирующая детальную структуру и эволюцию термодинамических процессов в атмосфере нашей планеты не по кусочкам, а целиком, очень наглядно, будет чрезвычайно интересна.

Возможности использования полученных радиотепловых полей для исследования термодинамических процессов в системе океан – атмосфера

Анализу возможностей использования спутниковых радиометрических данных для оценки характеристик термодинамических процессов в системе океан – атмосфера посвящено большое количество работ. Приведем лишь некоторые из имеющихся в литературе оценок [1, 2]. Среднеквадратичная погрешность определения среднемесячных потоков тепла на квадратах океана 2×2 градусов или 5×5 градусов по выборочным данным перечисленных выше искусственных спутников Земли, составляет приблизительно 10 %, т. е. порядка $15\text{--}30 \text{ Вт/м}^2$ при максимальных среднемесячных значениях потоков тепла порядка $150\text{--}250 \text{ Вт/м}^2$. Среднемесячные значения температуры поверхности океана и ее сезонные вариации могут быть определены с использованием данных спутниковых СВЧ-радиометрических измерений с точностью $0,5\text{--}0,6 \text{ }^\circ\text{C}$. Может быть такая точность не слишком хороша для оперативных целей, однако, она представляет большой интерес для климатических исследований.

Радиометрические приборы SSM/I предоставляют радиотепловые поля со следующими параметрами:

Частота, ГГц	Длина волны, см	Физические параметры
19,35	1,58	видимая поверхность (океана, облачных структур)
22,24	1,35	влагозапас
37,00	0,81	водозапас и видимая поверхность
85,50	0,35	водозапас

Данные каналов радиометров SSM/I могут быть использованы для определения яркостной температуры, скорости ветра, влагосодержания (интегрального) атмосферы над Мировым океаном, водозапаса облачных структур и зон интенсивного выпадения осадков, оценки потоков тепла и импульса.

Температура поверхности Мирового океана – одна из важнейших характеристик климатической системы

Одними из важнейших характеристик термодинамического режима климатической системы являются облачность и температура поверхности океана [7, 8]. Эти параметры связаны с яркостной температурой в окне прозрачности на частоте 19,35 ГГц (1,58 см), одной из частот многоканального радиометра SSM/I и характеризуют видимую поверхность (облачные структуры и поверхность Мирового океана).

Влияние Мирового океана на крупномасштабные термодинамические процессы и формирование климата планеты огромно. Из всей массы солнечной энергии атмосфера усваивает 25 %, а поверхность Земли – 75 %. До поверхности материков и поверхности Мирового океана доходит в среднем одинаково, однако, поглощается по-разному. Вода поглощает на 25–50 % тепла больше, чем суша на тех же широтах. В результате Мировой океан усваивает в 4,4 раза больше суммарной энергии, чем суша.

Кроме того, все тепло, накопленное сушей летом, расходуется зимой. Мировой океан поглощает основную часть солнечного тепла, накапливает его и перераспределяет в своей толще, обеспечивая стабильность природных условий на планете. Поглощая излишки тепла и восполняя его расходование, океаносфера смягчает климат планеты – так, например, в широтном переносе тепла от экваториальных областей в полярные доли Мирового океана и атмосферы приблизительно равны.

В непосредственный теплообмен с атмосферой вовлечен лишь поверхностный тонкий слой Мирового океана, толщиной 10–50 м. В нем содержится всего порядка 4 % тепла, запасенного Мировым океаном. Однако, доля этих четырех процентов в общем тепловом балансе планеты значительна – порядка 75 %. Океан непрерывно поддерживает энергоснабжение атмосферы во всех масштабах: локальном, региональном и планетарном. Пространственно-временная структура и изменчивость этого энергоснабжения отражается на циркуляционных процессах в атмосфере и является важной составляющей климатической системы.

Температура поверхности океана определяется, в основном, атмосферными факторами и процессами двух типов в Мировом океане:

- внутренние процессы в океане, происходящие на глубинах до нескольких сотен метров;
 - процессы в относительно тонком поверхностном слое океана, толщиной 10–50 м.
- Разделить вклад этих факторов в изменчивость температуры поверхности океана в тех случаях, когда они действуют вместе, довольно затруднительно [9].

Аномалии температуры поверхности океана, возникающие вследствие процессов тепло-массообмена во внутренних и поверхностных областях океана не очень велики. Внутренние термодинамические процессы захватывают верхнюю толщу океана вплоть до 500 метров и более (их горизонтальный масштаб на порядок меньше – это фронты и области адвекции, например); сформированные ими аномалии температуры поверхности океана составляют $1\text{--}3 \text{ }^\circ\text{C}$. Крупномасштабное взаимодействие атмосферы с океаном, приводящее к изменениям температуры в тонком поверхностном слое океана, наиболее эффективно на

масштабах 500–1000 км и приводит к аномалиям температуры поверхности океана составляющим не более, чем несколько градусов.

Точность получения значений полей яркостной температуры с помощью радиометров SSM/I позволяет надеяться на плодотворное использование данных канала 19,35 ГГц для анализа крупномасштабной структуры полей температуры поверхности океана.

Изменение термодинамических условий на поверхности Мирового океана сопровождается атмосферными возмущениями и непосредственно влияет на циркуляционные процессы в атмосфере. Подробный анализ радиотепловых полей позволит продвинуться в понимании пространственно-временной динамики крупномасштабных процессов теплообмена между океаном и атмосферой.

Яркостная температура и общее влагосодержание атмосферы

Одним из характерных параметров системы океан – атмосфера и климатической системы планеты является общее влагосодержание атмосферы, обозначаемое обычно буквой Q . Общее влагосодержание атмосферы является интегральным параметром и характеризует процессы тепло- влагообмена в системе в целом. В водяном паре в виде скрытого тепла сосредоточена значительная доля общего тепла системы. Кроме того, параметр Q тесно связан с яркостной температурой в резонансной линии излучения водяного пара атмосферы (1,35 см). Вариации яркостной температуры на частоте 22,24 ГГц (1,35 см) четко фиксируются при наблюдениях со спутников серии метеорологических спутников DMSP многоканальным радиометром SSM/I.

Анализ параметра Q оказывается продуктивным на разных временных масштабах. При анализе среднемесячных значений параметра Q замечены индивидуальные зависимости в разных физико-географических зонах и четко выраженные сезонные вариации параметра. Представляется перспективным анализ межгодовой изменчивости параметра, что представляет большой интерес для проблемы изменчивости климата. Анализ параметра Q на синоптических масштабах выявил жесткую связь между синоптическими вариациями общего влагосодержания атмосферы (спутниковые данные) и вариациями температуры и влажности приводного воздуха (метеорологические измерения) [1].

Это показывает правомерность использования параметра Q , полученного при спутниковых СВЧ-радиометрических измерениях для количественных оценок не только на внутригодовых (среднемесячных, сезонных) и больших (межгодовых) масштабах, но и на короткопериодных синоптических и мезометеорологических.

Отметим, что параметр Q обычно тесно связан с температурой и влажностью приводного слоя воздуха, но при резких процессах перестройки атмосферы (фронтальных или циклонических, например) параметр Q он запаздывает и следует за изменениями приводных параметров воздуха с задержкой на несколько часов. Время адаптации температурных и влажностных характеристик системы к внешнему притоку тепла оценивается примерно в сутки. Эти факты необходимо учитывать при исследовании короткопериодных процессов (на синоптических и мезометеорологических временных масштабах).

Исследования связи яркостной температуры в СВЧ-диапазоне на границе пограничного слоя и в свободной атмосфере с потоками явного и скрытого тепла на границе раздела океана и атмосферы показали, что наиболее важную роль играют области резонансного поглощения в молекулярном кислороде (5 мм) и водяном паре (1,35 см). СВЧ-радиометрические измерения с искусственных спутников Земли в этих областях поглощения могут служить количественной оценкой не только температуры, влажности и потоков тепла на границе раздела океана и атмосферы, но и энергетических и циркуляционных характеристик атмосферного пограничного слоя в синоптическом диапазоне. Отметим, что яркостные контрасты за счет горизонтальных движений (адвекции) тепла и влаги на порядок превышают эффект вертикального переноса в пограничном слое.

Таким образом, сказанное выше свидетельствует о важной роли параметра Q (общее влагосодержание атмосферы) и необходимости систематического анализа данных канала 22,24 ГГц для исследования структуры процессов теплообмена в системе океан – атмосфера.

Сезонная и межгодовая динамика, синоптический и мезометеорологический масштаб

Проблема изменчивости климата является нерешенной проблемой, имеющей фундаментальное научное и огромное практическое значение. Сезонная и межгодовая изменчивость отдельных элементов системы океан атмосфера, таких как крупномасштабные квазистационарные структуры или энергоактивные зоны, – одна из важных составляющих этой проблемы. Так, например, крупномасштабные квазистационарные структуры, циклонические и антициклонические, играют заметную роль в широтном (полярном) переносе, чем сглаживают широтные градиенты и смягчают климат.

В целях изучения долговременных изменений разработано программное обеспечение по выделению данных для определенных областей, задаваемых географическими координатами. В качестве примера

на рис. 4 показано изменение радиотепловых характеристик в течение 2001 г. в энергоактивных зонах Атлантического океана – Норвежская зона и Тихого океана – Алеутская зона. Разница уровня температуры между зонами и выраженный годовой ход в Алеутской зоне свидетельствуют о качественных различиях между энергоактивными зонами, расположенными практически на одной широте, но в разных океанах.

Важным фактором климатической системы являются процессы тропической зоны. Такие, например, как Южное Колебание – Эль-Ниньо и глобальный тропический циклогенез. На рис. 5 показана детальная картина крупномасштабного «выброса» поля водяного пара, привязанного к системе тропического циклона, из тропической зоны в средние широты. Подобный «выброс» является по существу одним из элементов глобального полярного переноса тепловой энергии из тропиков в полярные области. Детальный анализ элементов полярного переноса и всего явления как целого представляет собой важнейшую проблему глобальной циркуляции атмосферы Земли.

На рис. 6 показаны последовательные картины эволюции того же тропического циклона в диапазонах видимой поверхности и водяного пара.

Отметим, что программное обеспечение по выделению данных для определенных областей, задаваемых географическими координатами, использовалось также в целях дистанционного зондирования глобальных и региональных характеристик снежного покрова, в том числе для определения границы снеготаяния. Для нескольких точек, в которых расположены наземные гляциологические станции, сформированы ряды многолетних данных непрерывных наблюдений, полученных с помощью многоканальных радиометрических приборов SSM/I.

Заключение

Проблема изменчивости климата является одной из нерешенных проблем, имеющих не только фундаментальное научное, но и огромное практическое значение. Комплексный анализ данных наблюдений за характеристиками климатической системы не только в виде точечных измерений, но в виде полей – важная составляющая в изучении пространственно-временной структуры наиболее влиятельных процессов энерго- массообмена, приводящих к изменениям глобальной циркуляции, глобальных процессов переноса и всей климатической системы в целом. Роль ИК- и СВЧ-радиометрических приборов, установленных на искусственных спутниках Земли в измерении климатических параметров в виде полей с достаточным пространственным разрешением и временной регулярностью является основной.

Анализ СВЧ-данных, поставляемых многоканальными радиометрами SSM/I, установленными на метеорологических спутниках серии DMSP, позволит продвинуться в понимании природы термодинамических процессов, приводящих к изменениям климата. Важными характеристиками термодинамического режима климатической системы являются облачность и температура поверхности Мирового океана, тесно связанные с яркостной температурой на частоте 19,35 ГГц, одной из частот многоканального радиометра SSM/I. Общее влагосодержание атмосферы, являющееся интегральным параметром и характеризующее процессы тепловлагообмена в системе океан – атмосфера в целом, тесно связано с яркостной температурой в резонансной линии излучения водяного пара атмосферы, вариации которой четко фиксируются многоканальным радиометром SSM/I на частоте 22,24 ГГц.

Оценки показывают правомерность использования спутниковых СВЧ-радиотепловых полей, для изучения термодинамических процессов в системе океан – атмосфера на короткопериодных (синоптических и мезометеорологических), внутригодовых (среднемесячных, сезонных) и бóльших (межгодовых) временных масштабах.

В заключение авторы выражают огромную благодарность Наталии Юрьевне Комаровой за помощь в работе над статьей и прекрасное оформление иллюстративного материала.

Литература

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. Sharkov E.A. Passive microwave remote sensing of the Earth physical foundations. Berlin, London etc.: Springer/PRAXIS, 2003. 612 p.
3. Лапто 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.
4. Гранков А.Г., Усов П.П. Взаимосвязь среднемесячных разностей температуры воды и воздуха с характеристиками теплового излучения в СВЧ- и ИК-диапазонах // Метеорология и гидрология. 1994. № 6. С. 79–89.
5. Гранков А.Г., Мильшин А.А., Петренко Б.З. Радиотепловое излучение как характеристика теплового взаимодействия океана и атмосферы на сезонных и синоптических масштабах // Докл. АН. 1999. Т. 467. № 5. С. 680–683.

6. *Ермаков Д.М., Раев М.Д., Сулов А.И., Шарков Е.А.* Электронная база многолетних данных глобального радиотеплового поля системы океан – атмосфера в контексте задач исследования вариаций климата планеты и атмосферных катастроф // В настоящем сборнике.
7. *Кондратьев К.Я.* Глобальный климат. СПб.: Наука, 1992. 359 с.
8. *Монин А.С.* Теоретические основы геофизической гидродинамики. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 420 с.
9. *Бышев В.И., Нейман В.Г., Позднякова Т.Г., Романов Ю.А.* Новые данные о термодинамическом режиме климатической системы в северном полушарии // Докл. АН. 2001. Т. 381. № 4. С. 539–544.

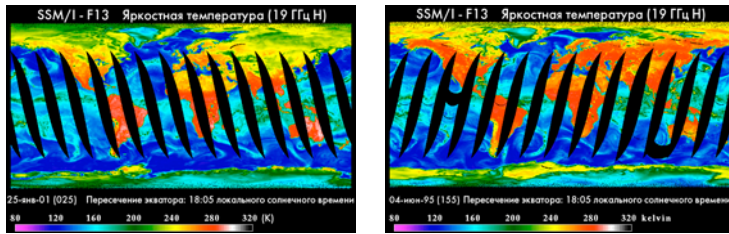


Рис. 1. Типичные картины радиотеплового поля, построенные по данным одного из спутников метеорологической серии DMSP в течение суток (частота 19,35 ГГц)

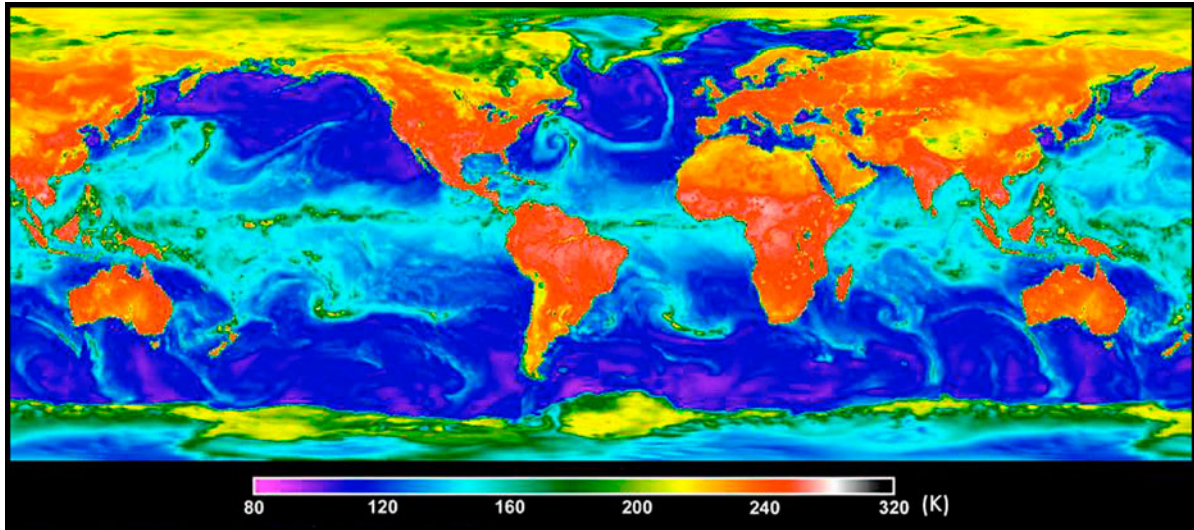


Рис. 2. Глобальное радиотепловое поле системы океан – атмосфера на частоте 19,35 ГГц, полученное весной северного полушария (28 апреля 2001 г.)

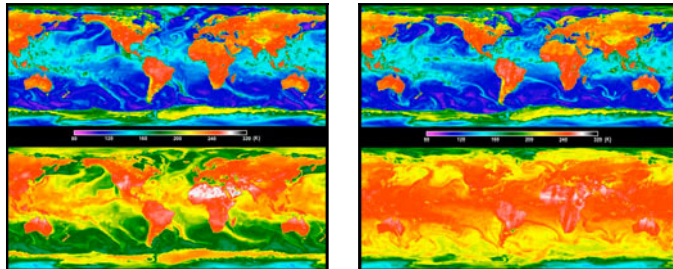


Рис. 3. Кадры анимационного фильма: в кадре слева – данные, полученные на частотах 19,35 и 22,24 ГГц, справа – на частотах 19,35 и 85,5 ГГц, в середине каждого кадра показана цветовая радиотемпературная шкала в градусах Кельвина

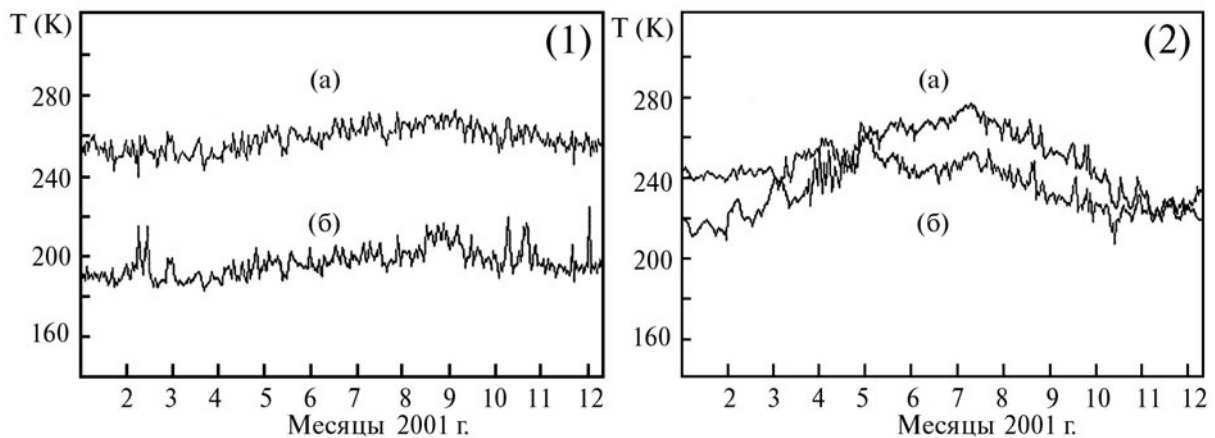


Рис. 4. Изменение радиотепловых характеристик в областях Норвежской (1) и Алеутской (2) энергоактивных зон: (а) – влагозапас, (б) – видимая поверхность

Рис. 5. Спутниковое изображение тропического циклона, полученное радиометрами SSM/I на разных частотах

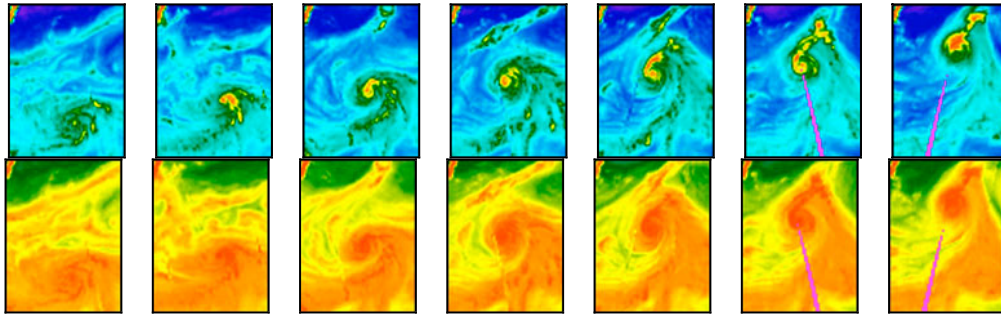
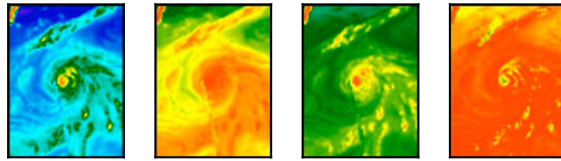


Рис. 6. Спутниковое изображение того же тропического циклона в динамике на частотах 19,35 (вверху) и 22,24 ГГц