

О МЕХАНИЗМАХ ФОРМИРОВАНИЯ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ СОБСТВЕННЫМ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЕМ СИСТЕМЫ ОКЕАН-АТМОСФЕРА И ТЕПЛОВЫМИ ПОТОКАМИ НА ЕЕ ГРАНИЦЕ

А.Г. Гранков, А.А. Мильшин

Институт радиотехники и электроники РАН,
141190, г. Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1
Тел.: (095)526-9150; E-mail: agrankov@ms.ire.rssi.ru, amilshin@ms.ire.rssi.ru

Представлены результаты анализа роли вертикального турбулентного и горизонтального адвективного переноса тепла и влаги в средних широтах в формировании взаимосвязи между интенсивностью собственного СВЧ-излучения (яркостной температурой) системы океан-атмосфера в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн, широко используемых на космических аппаратах дистанционного зондирования Земли. Основная задача исследования - какой из этих двух механизмов обеспечивает возможность использования яркостной температуры в качестве непосредственной характеристики интенсивности тепло- и влагообмена между океаном и атмосферой на синоптических масштабах времени без привлечения стандартных схем и формул расчетов тепловых потоков, используемых океанологами.

Введение

Разработка методов анализа взаимодействия океана и атмосферы являлась и является важным аспектом исследований с точки зрения таких международных программ как Всемирная программа исследований климата (ВПИК), Международная геосферно-биосферная программа (МГБП), Global Change Research Program, Earth Observing System (EOS), Climate Variability and Predictability (CLIVAR) [1-3]. Эти программы предусматривают значительную роль спутниковых средств регионального и глобального мониторинга Мирового океана, что определяется резким сокращением экспедиционных судовых исследований Мирового океана.

Актуальность данной тематики для национальных интересов России отражена в разделе 3 Федеральной целевой программы "Исследования природы Мирового океана", а также в разделе 10 "Создание единой общегосударственной системы информации об обстановке в Мировом океане". Эта фундаментальная проблема была сформулирована академиком Л.М. Бреховских в дополнение к выделенным ранее академиком Л.А. Зенкевичем проблемам, связанным с исследованиями истории Мирового океана, его ресурсов (потенциалов), ликвидацией загрязнений [4].

Основная проблема использования методов спутниковой радиометрии для анализа теплового взаимодействия между океаном и атмосферой связана с тем, что измеряемые с ИСЗ характеристики собственного излучения, как в СВЧ-, так и в ИК-диапазонах формируются не только в приводном, но и в вышележащих слоях атмосферы.

Более перспективным, и можно сказать, *вынужденным* (с учетом возможностей современной техники дистанционного зондирования) является подход к определению тепловых потоков, базирующийся на косвенной (статистической) взаимосвязи между интегральными (усредненными по высоте) значениями температуры и влажности атмосферы, вариации которых надежно регистрируются по данным спутниковых СВЧ- и ИК-радиометрических измерений в областях резонансного поглощения (излучения) молекулярного кислорода (~5мм) и водяного пара (1,35см), с температурой и влажностью нижних слоев атмосферы. Эта связь обусловлена существующим в приводном и пограничном слоях воздуха механизмом турбулентного перемешивания тепла и влаги, благодаря чему выполняются следующие два важных с точки зрения применимости дистанционных радиофизических методов условия): 1) параметры, влияющие на интенсивность теплового взаимодействия океана и атмосферы (температура поверхности воды, температура и влажность воздуха, скорость ветра и др.), непосредственно участвуют в формировании и трансформации излучения в указанных областях СВЧ-спектра как в приводном (10-20м), так и в вышележащих слоях атмосферы; 2) толщина слоев атмосферы, в котором формируется собственное СВЧ-излучение системы океан-атмосфера (СОА), близка в этих спектральных областях к толщине слоя турбулентности атмосферы (1000-1500м).

Существование корреляционных связей между температурными и влажностными характеристиками в различных слоях атмосферы, служит отправной точкой для использования современных спутниковых радиометрических методов при определении основных характеристик теплового взаимодействия океана и атмосферы - вертикальных турбулентных потоков явного q_h и скрытого q_e тепла на границе раздела СОА на основе так называемых *балк-формул*, полученных на основе аэродинамического метода (Global Bulk Aerodynamic Method).

В соответствии с этим подходом величины q_h и q_e характеризуются соотношениями [5]:

$$Q_h = c_p \rho C_T (T_n - T_a) |V|; \quad (1)$$

$$q_e = (0,622/P_a) C_E (e - e_0) |V|, \quad (2)$$

т.е. выражаются через следующие параметры СОА - температуру T_a , влажность (упругость водяного пара) e и модуль скорости ветра $|V|$ в приводном воздухе, а также через температуру поверхности океана T_n и максимальную для данного значения T_n 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 теплоемкость воздуха при постоянном давлении c_p и его плотность ρ .

Рамки аэродинамического метода допускают также простую параметризацию соотношений между интенсивностью механического (динамического) взаимодействия поверхности океана и атмосферы q_v - потоком количества движения (импульса) со скоростью приводного ветра V , где в качестве коэффициентов пропорциональности фигурируют плотность воздуха ρ и коэффициент сопротивления C_v :

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

Соотношения (1)-(3) позволяют оценивать не только "мгновенные", но и усредненные на значительных (например, среднемесячных) временных масштабах потоки тепла и импульса), используя в качестве исходных данных величины параметров T_n , T_a , e , V с соответствующим усреднением. Эта особенность делает привлекательным аэродинамический метод для усвоения спутниковых радиометрических измерений, особенно тех, которые несут *косвенную* информацию о температуре и влажности приводной атмосферы. На основе этого подхода получен ряд положительных результатов в области использования результатов спутниковых СВЧ- и ИК-радиометрических измерений для анализа тепловых потоков на границе раздела океана и атмосферы [6-8].

Иной путь заключается в использовании данных спутниковых СВЧ- и ИК-радиометрических измерений в качестве *прямых (непосредственных)* характеристик теплового и динамического взаимодействия океана и атмосферы. На целесообразность применения такого подхода указывалось в [9] при обсуждении требований к составу и точности спутниковых измерений для анализа составляющих теплового баланса на границе раздела океана и атмосферы в исследованиях по программе "Разрезы", в [10] в интересах решения задач численного предсказания погоды. В [11] показано, что интенсивность собственного излучения (яркостная температура) СОА в сантиметровом диапазоне длин волн может служить *прямой* характеристикой скорости обмена углекислым газом между приводным воздухом и водной поверхностью.

Этой цели посвящена и данная статья, в которой исследуется роль вертикального турбулентного и горизонтального адвективного механизмов переноса тепла в атмосферном пограничном слое (АПС) в средних широтах океана на основе результатов математического моделирования (в первом случае) и данных анализа одно-временных измерений с ИСЗ F-08 серии DMSP в Ньюфаундлендской энергоактивной зоне Северной Атлантики и судовых океанографических, метеорологических и аэрологических данных, полученных в рамках экспериментов НЬЮФАЭКС-88 и АТЛАНТЭКС-90 (во втором случае). Рассматриваемые процессы ограничены рамками синоптического диапазона временных масштабов, на который приходится основная часть энергии взаимодействия океана и атмосферы в средних широтах. Некоторые результаты и оценки, изложенные нами ранее в [12], дополнены новыми результатами, которые касаются, в первую очередь, влияния энергетики горизонтального переноса в АПС на яркостную температуру собственного излучения СОА.

Формализации и некоторые примеры связи собственного СВЧ-излучения СОА с тепловыми процессами

Схематически механизм формирования характеристик собственного электромагнитного излучения за счет восходящих (вертикальных) и адвективных (горизонтальных) потоков тепла иллюстрируется на рис.1. Электромагнитные потоки I , указанные на схеме, как показано в [12], наиболее тесно связаны с тепловыми процессами в СОА в участках электромагнитного спектра 8-12мкм теплового ИК-диапазона, а также в миллиметровой и сантиметровых областях радиотеплового (СВЧ)-диапазона. В рамках известной плоскостной модели излучения СОА можно оценивать интенсивность тех компонентов, которые могут быть выделены с помощью спутниковых (А), самолетных (Б) и судовых (В) средств. Заметим, что эти уровни наблюдений непосредственно связаны с границами раздела физических сред (слоев), отличающихся тепловыми и излучательными свойствами, такими как нижний квазиоднородный слой океана, атмосферный пограничный слой атмосферы, где происходит наиболее интенсивное перемешивание тепловой и механической энергии атмосферы, а также слой свободной атмосферы, расположенный выше границы АПС.

А. В этом случае интенсивность собственного излучения СОА при наблюдении со спутника Земли $I_{СП}$ складывается из интенсивности излучения свободной атмосферы I_A и интенсивности потока восходящего излучения пограничного слоя атмосферы на его верхней границе I_1^\uparrow , ослабленного в свободной атмосфере (множитель G_A):

$$I_{СП} = I_A + I_1^\uparrow G_A, \quad (4a)$$

где величина $I_1^\uparrow = I_1 + (I_1^\downarrow R + I_2) G_1$ - интенсивность потока восходящего излучения атмосферного пограничного слоя на его верхней границе; $I_1^\downarrow = I_1 + I_A$; G_1 - интенсивность потока нисходящего излучения АПС на его нижней границе; $I_1(G_1)$ - интенсивность интегрального излучения АПС; I_2 - интенсивность излучения водной поверхности; R - коэффициент отражения потока нисходящего излучения I_1^\downarrow от водной поверхности.

Б. При наблюдении с самолета (на верхней границе АПС) интенсивность собственного излучения СОА $I_{СМЛ}$ определяется исключительно величиной I_1^\uparrow :

$$I_{СМЛ} = I_1^\uparrow. \quad (4б)$$

В. При наблюдении с судна (на нижней границе АПС) интенсивность излучения СОА $I_{Суд}$ вычисляется следующим образом:

$$I_{Суд} = I_2 + I_1^\downarrow R. \quad (4в)$$

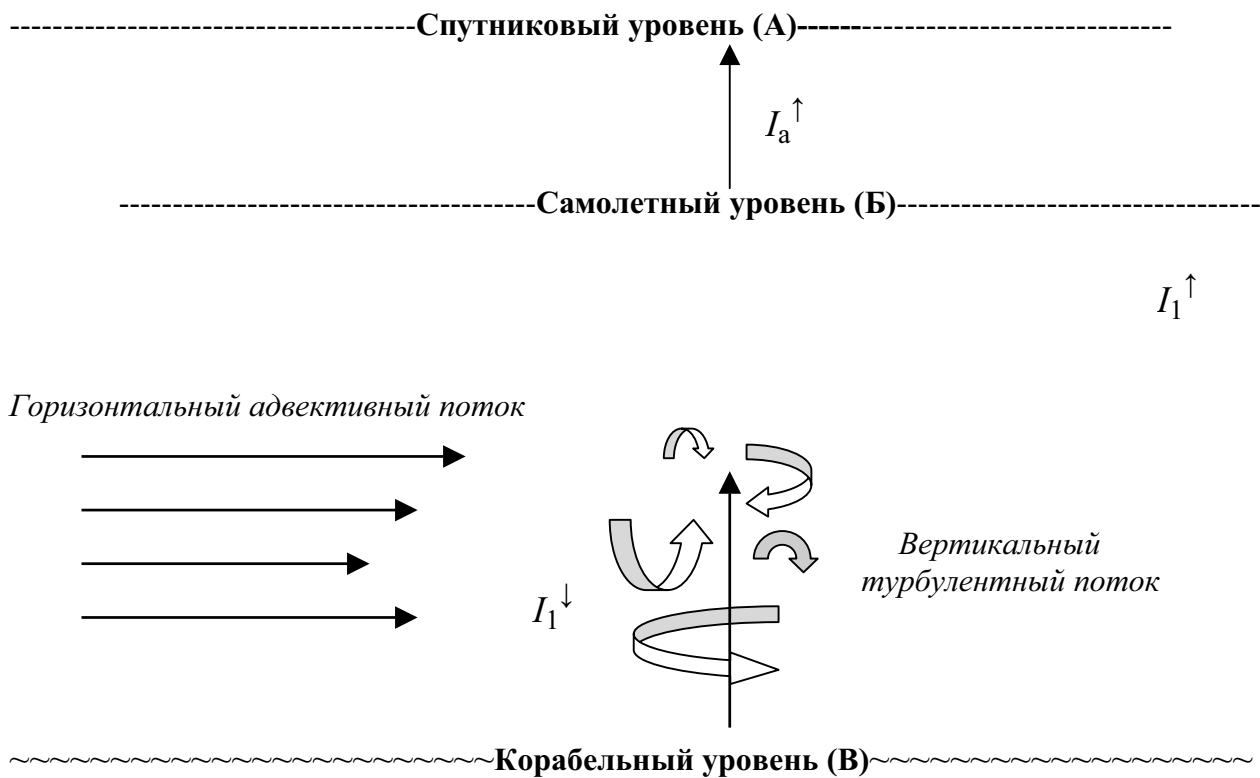


Рис. 1. Тепловые потоки в атмосфере, оказывающие влияние на интенсивность собственного радиотеплового (СВЧ) и теплового (ИК) излучения СОА при измерениях на различных уровнях

Более подробное описание методики расчета излучательных и тепловых характеристик СОА приведено в [12].

Проведено моделирование отклика собственного СВЧ-излучения СОА (на спутниковом уровне) на вариации интенсивности вертикальных турбулентных потоков тепла и влаги, обусловленные возмущением теплового равновесия между пограничными слоями океана и атмосферы в результате изменений интенсивности падающего потока коротковолновой (солнечной) радиации. Это возмущение сопровождается изменениями температуры ОПС, температуры и влажности АПС, т.е. тех параметров, которые вносят определяющий вклад в формирование и трансформацию как электромагнитных, так и тепловых потоков. Оценки этих параметров получены путем решения уравнений турбулентной диффузии для типичных для средних широт океана значений теплофизических характеристик воды и воздуха и вариаций коротковолнового потока [13]. На основе решений этих уравнений вычислены значения вариаций тепловых потоков (с помощью балк-формул (1) и (2)), а также вариации яркостной температуры СОА в различных участках СВЧ-диапазона (с помощью формулы 4а).

Моделирование динамики тепловых и электромагнитных потоков проведено для нескольких вариантов, отличающихся характером стока тепловой энергии от границы раздела океана и атмосферы к внешним границам АПС и ОПС и за их пределы: (I) тепло от границы раздела (интерфейса) СОА распространяется к внешней границе АПС и одновременно - к внешней границе ОПС; (II) сток тепла происходит только в сторону нижнего слоя океана; (III) сток тепла идет только в сторону свободной атмосферы (табл. 1).

Таблица 1. Контрасты характеристик СОА, обусловленные вертикальным переносом тепла и влаги (результаты моделирования)

Оцениваемые параметры СОА	Варианты распространения тепла от интерфейса к внешним границам СОА		
	I	II	III
Метеопараметры			
$\Delta T_a, ^\circ\text{C}$	-4,6	-2,3	-2,4
$\Delta e, \text{мб}$	-0,81	-0,26	-0,14
Тепловые потоки, Вт/м ²			
Δq_h	34,6	56,2	-38,4
Δq_e	61,4	86,5	-7,8
Δq_{he}	96,0	142,7	-46,2
Яркостная температура, градусы Кельвина			
$\Delta T^a_{5,7\text{мм}}$	-1,7	-0,85	-0,84
$\Delta T^a_{8\text{мм}}$	2,3	2,4	-0,07
$\Delta T^a_{1,35\text{см}}$	-2,4	-0,84	-0,58
$\Delta T^a_{1,6\text{см}}$	0,66	0,37	-0,21
$\Delta T^a_{3,2\text{см}}$	-1,4	-1,3	-0,17

Из результатов расчетов следует, что вариации яркостной температуры СОА, обусловленные вертикальным турбулентным переносом тепла при типичных для средних широт океана условий составляют лишь несколько градусов Кельвина, а вариации суммарных потоков тепла и влаги могут достигать 100-150 Вт/м².

В то же время, как свидетельствуют результаты судовых экспериментов НЬЮФАЭКС-88 и АТЛАНТ-ЭКС-90 в средних широтах Северной Атлантики, а также данные одновременных измерений СВЧ-радиометра SSM/I спутника F-08 (DMSP), максимальные значения вариаций тепловых потоков и яркостной температуры варьируют в различных районах от 1500 до 1800 Вт/м² и от 50 до 90 градусов Кельвина, соответственно (табл. 2), что более чем на порядок превышает их оценки, полученные для предыдущего случая. Анализ данных метеорологических и, особенно, аэрологических измерений участвовавших в экспериментах научных судов погоды "Виктор Бугаев", "Муссон" и "Волна", показал, что эта особенность связана с существованием мощных адвективных потоков тепла и влаги в тропосфере, в том числе и в АПС, который играет важную роль в формировании тепловых потоков и одновременно, яркостной температуры СОА.

Например, нами установлено, что вариации энтальпии (теплосодержания) АПС, существующие за счет адвекции тепла в атмосфере, оказывают значительное влияние на изменчивость тепловых потоков на границе раздела океана и атмосферы в синоптическом диапазоне временных масштабов. Эта закономерность наиболее отчетливо проявляется в периоды циклонической деятельности атмосферы (рис. 2), когда температурные и влажностные характеристики АПС претерпевают сильные и резкие изменения.

Рис. 3 иллюстрирует тесную связь между кинетической энергией движения горизонтальных потоков на уровне 1000м, который соответствует в средних широтах верхней границе АПС, модельными оценками яркостной температуры СОА в участках спектра 1,35см и 5,9мм. Величина кинетической энергии K рассчитывается по данным судовых аэрологических измерений: $K = 1/2 \rho V^2$ (ρ - плотность воздуха, V - скорость ветра на уровне 1000м. Эту связь, на наш взгляд, можно объяснить влиянием интенсивности крупномасштабных горизонтальных движений в атмосфере на ее температурные и влажностные характеристики, на которые, как известно, четко реагирует яркостная температура собственного излучения СОА в линии поглощения водяного пара и в области поглощения молекулярного кислорода атмосферы.

Таблица 2. Контрасты характеристик СОА в зонах Северной Атлантики с интенсивным горизонтальным переносом тепла (по данным судовых метеорологических измерений с НИСП “В. Бугаев”, “Муссон” и “Волна” и одновременных СВЧ-радиометрических измерений с ИСЗ F-08)

Измеряемые параметры	“Виктор Бугаев”		“Муссон”		“Волна”	
	НФ-88	А-90	НФ-88	А-90	НФ-88	А-90
Метеопараметры						
$\Delta T_a, ^\circ\text{C}$	11,2	12,7	15,0	8,5	15,5	9,9
$\Delta e, \text{мб}$	12,3	13,0	13,8	12,3	11,7	8,5
$V, \text{м/с}$	24,6	18,5	24,8	18,2	27,1	18,6
Тепловые потоки, Вт/м^2						
Δq_h	490	495	620	252	750	221
Δq_e	1205	738	1190	598	829	200
Δq_{he}	1695	1233	1810	850	1579	421
Яркостная температура, градусы Кельвина						
$\Delta T^r_{0.35\text{см, ВП}}$	46,6	73,5	72,0	55,1	78,2	87,8
$\Delta T^r_{0.81\text{см, ВП}}$	26,0	34,5	33,6	31,5	33,6	32,3
$\Delta T^r_{0.81, ГП}$	56,3	63,9	78,8	64,2	67,5	71,5
$\Delta T^r_{1.35\text{см, ВП}}$	33,6	42,5	40,4	36,9	37,9	48,7
$\Delta T^r_{1.55\text{см, ВП}}$	25,1	26,6	29,5	25,8	24,3	30,2
$\Delta T^r_{1.55\text{см, ГП}}$	45,7	49,4	62,8	45,7	45,8	59,9

ВП (ГП) - вертикальная (горизонтальная) поляризация

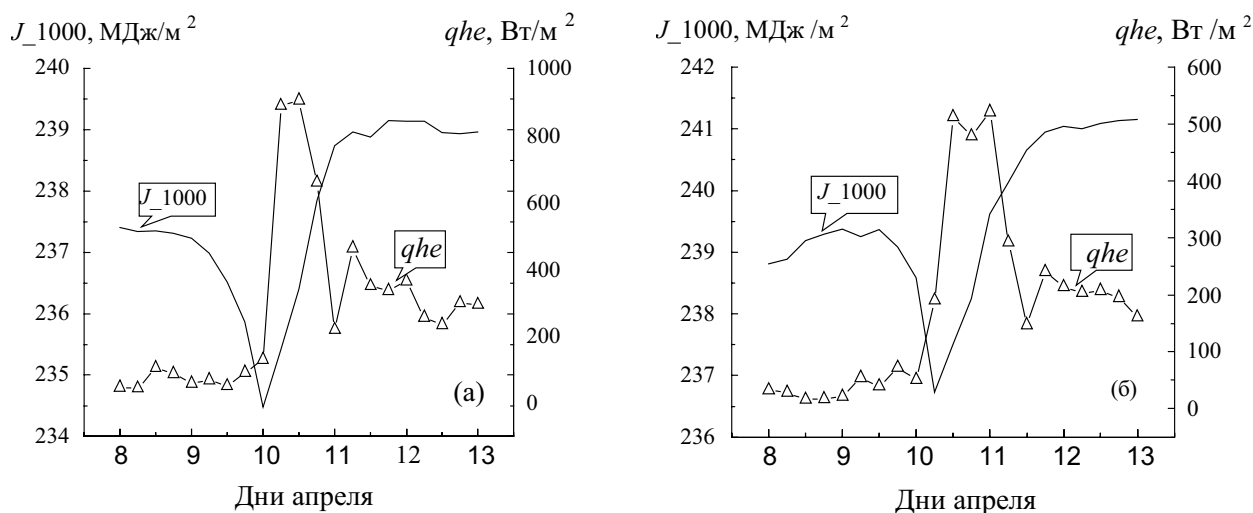


Рис. 2. Результаты сопоставления потоков суммарного тепла и энthalпии АПС в период прохождения циклона 8-13 апреля 1990 г. в районах местоположения НИСП “В. Бугаев” (а) и “Муссон” (б).

Таким образом, приведенные результаты свидетельствуют о том, что в средних широтах доминирующим фактором формирования характеристик собственного СВЧ-излучения СОА и определяющим их связь с тепловыми потоками на границе раздела системы, является *горизонтальный* перенос тепла в атмосфере. Из этого также следует, что существует принципиальная возможность использования данных спутниковых СВЧ-радиометрических измерений для анализа не только граничных значений тепловых потоков, но и для характеристик горизонтального переноса тепла в атмосфере как *первичного фактора, определяющего энергетику системы океан-атмосфера*.

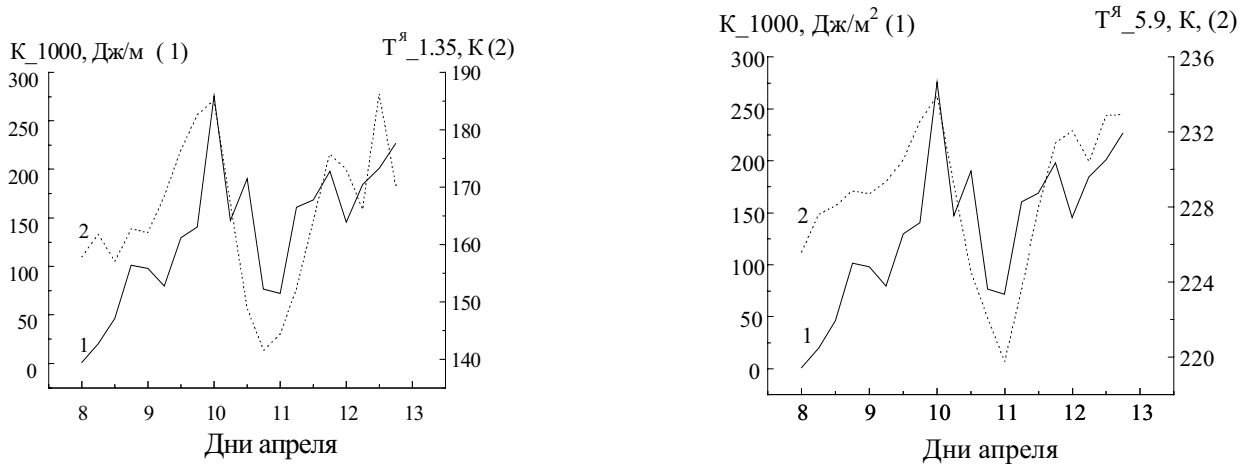


Рис. 3. Результаты сопоставления кинетической энергии потоков движения в АПС и яркостной температуры в период прохождения циклона 8-13 апреля 1990г. в районе местоположения НИСП "В. Бугаев".

Литература

1. Лапто С.С., Арманд Н.А., Волков А.М. и др. О концепции развития космической океанологии в России на 1996-2015 гг. // Исследование Земли из космоса, 1997. №2. С. 70-80.
2. Кондратьев К.Я. Состояние и перспективы разработок в США по проблематике глобальных изменений // Исследование Земли из космоса. 1999, №1. С. 122-128.
3. CLIVAR Initial Implementation Plan. World Climate Research Programme. CLIVAR Scientific Steering Group. 1998, WCRP No.103, WMO/TD No.869, ICPO. No.14.
4. Израэль Ю.А. Науки о Земле на рубеже веков: науки об атмосфере и гидросфере // Метеорология и гидрология, 1999. №5. С. 18-31.
5. 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.
6. Schulz J, Mejwerk J, Ewald S, Schlüssel P. Evaluation of satellite-derived latent heat fluxes // Journal of Climate, Nov. 1997. V.10. P. 2782-2795.
7. Гранков А.Г., Мильшин А.А., Петренко Б.З. Радиотепловое излучение как характеристика теплового взаимодействия океана и атмосферы на сезонных и синоптических масштабах // Доклады АН, 1999. Т. 367. №5. С. 680-683.
8. Liu W.T. Moisture and latent heat flux variabilities in the tropical Pacific derived from satellite data // Journal. of Geophysical Researches, 1988. V. 93. №6. P. 6749-6760.
9. Дымников В.П., Коротков Г.К., Галин В.Я. Требования к составу и точности спутниковой информации в исследованиях по программе "Разрезы" // Итоги науки и техники, Атмосфера, океан, космос - программа "Разрезы". Т. 3. М.: ВИНТИ. 1984. 35 с.
10. Eyre J.R., Lorence A.C. Direct use of satellite sounding radiances in numerical weather prediction // Meteorological Magazine, 1989. V. 118. P. 13-16.
11. Латишин В.В., Рагулин И.Г. Скорость газообмена между воздухом и морем по данным СВЧ-радиометров // Метеорология и гидрология, 1989. №3. С. 113-115.
12. Гранков А.Г., Мильшин А.А. Взаимосвязь радиоизлучения системы океан-атмосфера с тепловыми и динамическими процессами на границе раздела // М.: Наука-Физмалит, 2004. 166 с.
13. Гранков А.Г., Реснянский Ю.Д. Моделирование отклика собственного излучения системы океан-атмосфера на возмущение теплового равновесия на ее границе // Метеорология и гидрология, 1997. №11. С. 78-89.