

Анализ роли океана и атмосферы в их взаимодействии в зонах действия среднеширотных циклонов на основе спутниковых СВЧ-радиометрических и судовых измерений

А.Г. Гранков, А.А. Мильшин

*Фрязинская часть Института радиотехники и электроники РАН,
141190 г. Фрязино Московской обл., пл. Введенского
E-mail: agrankov@ms.ire.rssi.ru; amilshin@ms.ire.rssi.ru*

Приведены результаты анализа возможностей использования данных спутниковых СВЧ-радиометрических (микроволновых) измерений для изучения значимости (вклада) различных параметров атмосферы, определяющих интенсивность ее теплообмена с поверхностью океана в зонах действия среднеширотных циклонов. Рассмотрены, в первую очередь, те процессы в системе океан-атмосфера и их характеристики, которые, служат первоначальными источниками возмущений теплового баланса в системе и, одновременно, оказывают сильное влияние на интенсивность ее собственного СВЧ-излучения.

В работе использованы данные судового эксперимента АТЛАНТЭКС-90 с помощью НИСП "В. Бугаев", "Муссон" и "Волна" в Ньюфаундлендской энергоактивной зоне, ставшего заключительным в изучении процессов крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы в зонах Северной Атлантики, проведенного в рамках программы "Разрезы".

Проблема *первичности* роли океана (либо атмосферы) в их взаимодействии на различных пространственных и временных масштабах давно является важным предметом исследований для специалистов, работающих в области физики океана и атмосферы [1-4]. Эта проблема сама по себе сложна; еще более сложной задачей является использование данных спутниковых измерений для анализа вклада различных составляющих теплового и динамического взаимодействия в системе океан-атмосфера (СОА), поскольку интенсивность собственного радиотеплового (инфракрасного) излучения земной поверхности, измеряемого спутниковыми радиометрическими радиометрами соответственно, в СВЧ- и ИК-диапазонах, является лишь *косвенной* характеристикой тепловых процессов на границе раздела системы. На наш взгляд, для решения этой проблемы, наиболее эффективно могут быть использованы данные спутниковых СВЧ-радиометрических измерений, если их приурочить к хорошо изученным на протяжении последних десятилетий традиционными судовыми средствами энергоактивным зонам океанов (ЭАЗО). Например, такие известные энергоактивные зоны Северной Атлантики как Ньюфаундлендская, Норвежско-Гренландская, Гольфстримская ЭАЗО, влияющие на погодные изменения и климатические тенденции в Европе и на европейской территории в России, могут служить своего рода *полигонами* для тестирования возможностей изучения тепловых процессов на границе раздела океана и атмосферы, поскольку они характеризуются значительными контрастами тепловых и радиотепловых характеристик СОА. Интенсивные *горизонтальные* движения в атмосферном пограничном слое (АПС) в этих зонах в периоды активной циклонической деятельности резко и, что очень важно, *дружно* (практически, по всем горизонтам) меняют его тепловые свойства, изменяют тепловой баланс между поверхностью океана и атмосферой, и тем самым служат, источниками возбуждения (генерации) вертикальных тепловых потоков на границе раздела СОА. В то же время, это приводит к изменениям температурных и влажностных характеристик АПС (1000–1500м) - как раз в этом слое формируется поле собственного излучения СОА. Именно так можно объяснить *прямую* связь между часто наблюдаемыми в различных экспериментах СВЧ-излучательными характеристиками СОА и тепловыми потоками на границе раздела системы (см. рис.1).

2. Будем исходить в дальнейшем из установленного нами в [5] факта, что *крупномасштабные горизонтальные* вариации энергетических характеристик АПС $E_{\text{АПС}}$ (в виде потоков массы, тепла и влаги) служат источником возмущений *вертикальных* турбулентных тепловых потоков q_{hc} на границе раздела СОА и, *одновременно*, интенсивности собственного излучения системы (ее яркостной температуры T^*). Этот подход будем использовать здесь в *узком* смысле, когда области влияния источников тепловых и

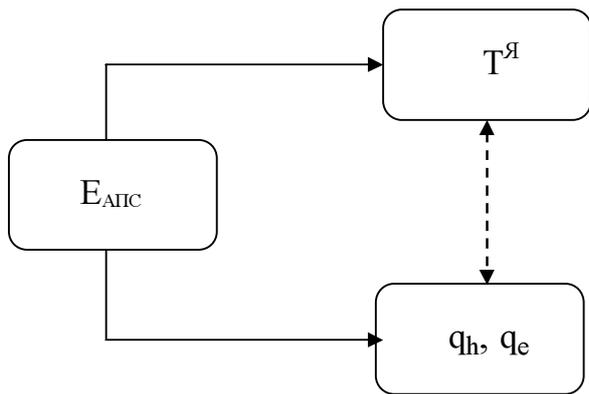


Рис. 1

динамических возмущений в СОА рассматриваются как *локальные* лишь в *точечных* областях океана, приуроченных, например, к координатам расположения судов погоды; данные измерений в этих точках можно сравнивать либо с результатами моделирования яркостной температуры СОА, рассчитанных на основе результатов судовых (океанографических, метеорологических и аэрологических) измерений, либо с данными спутниковых измерений.

В качестве количественного критерия (*приоритета*) того или иного параметра СОА по отношению к другим мы будем учитывать величину

его *опережения* во времени по отношению к вариациям других, а именно, будем оценивать этот параметр как *источник* возмущений в системе, а поведение других - как их *отклик* на воздействие источника.

3. В рамках этих представлений определим роль различных параметров СОА в формировании взаимосвязи между характеристиками собственного СВЧ-излучения системы и интенсивностью тепло- и влагообмена океана и атмосферы в *синоптическом* диапазоне временных масштабов. Для этой цели аппроксимируем среднесуточные потоки суммарного тепла q_{he} на стационарной фазе эксперимента АТЛАНТЭКС-90 их оценками, построенными в виде линейных комбинаций яркостной температуры СОА в различных участках спектра, и вычисленными на основе судовых измерений температуры поверхности океана $T_{п}$, скорости ветра V , температуры приводного воздуха T_a и общего влагосодержания атмосферы Q . При этом будем использовать методику поочередного *исключения* (нейтрализации) того или иного параметра СОА для выяснения его вклада одновременно в процессы теплообмена и излучения, а количественным критерием вклада будет служить величина невязки (расхождения) d между судовыми и спутниковыми оценками тепловых потоков (см. табл. 1).

Таблица 1. Величина ошибки аппроксимации потоков суммарного тепла как функции яркостной температуры СОА в диапазоне длин волн 5.6мм - 3.2см для различных радиационных моделей

| Длина волны, λ | Невязка, Вт/м ² | | | | |
|------------------------|----------------------------|-----------|-------|---------|-------|
| | d | $d T_{п}$ | $d V$ | $d T_a$ | $d Q$ |
| 5.6мм | 27.8 | 27.8 | 28.2 | 48.5 | 27.8 |
| 8мм | 26.6 | 26.8 | 27.3 | 27.0 | 37.8 |
| 1.35см | 27.0 | 27.2 | 28.4 | 27.5 | 35.9 |
| 1.6см | 26.1 | 26.3 | 27.8 | 26.5 | 35.9 |
| 3.2см | 34.2 | 34.2 | 30.2 | 34.3 | 39.4 |

Подробные сведения о судовых измерительных средствах и объеме выполненных измерений в этот период приведены в [4], отметим только, что измерения параметров, определяющих интенсивность тепло- и влагообмена между поверхностью океана и атмосферой проводились с частотой в 1 час, а частота аэрологических зондирований атмосферы, очень важная для корректных расчетов яркостной температуры СОА, составляла 6 часов.

Здесь (в таблице): d - учтены синоптические вариации всех основных параметров СОА ($T_{п}$, T_a , V , Q); $d T_{п}$ - исключено влияние температуры поверхности океана $T_{п}$; $d V$ - исключено влияние скорости приводного ветра V ; $d T_a$ - исключено влияние температуры приводного воздуха $T_a(0)$; $d Q$ - исключено влияние общего влагосодержания атмосферы Q .

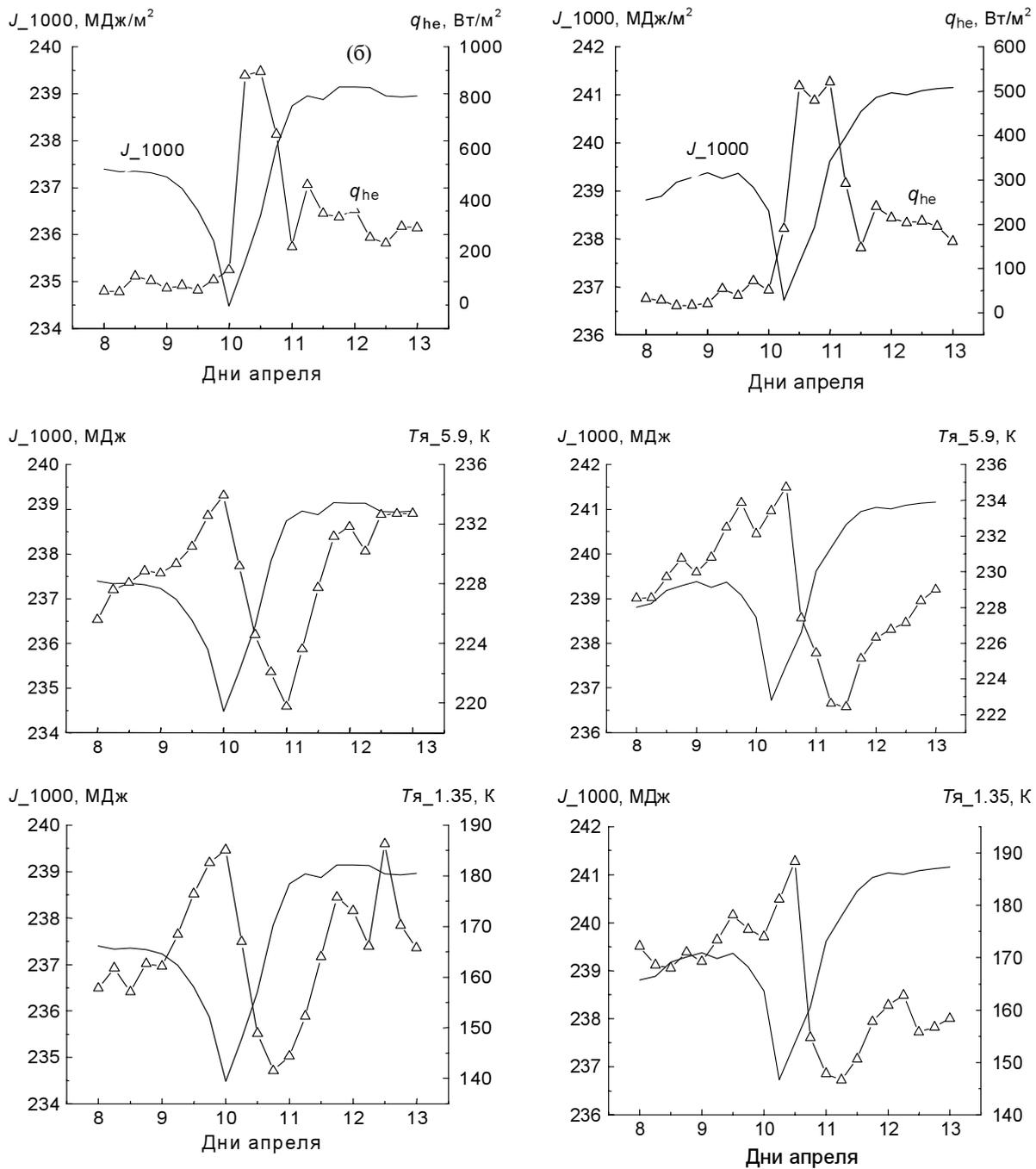


Рис. 2. Результаты анализа отклика потоков суммарного тепла q_{he} на границе СОА и яркостной температуры системы T^s (б) на длинах волн 5.9мм и 1.35см на изменения энтальпии АПС J_{1000} при прохождении циклона в районах местоположения НИСП "В.Бугаев" (а) и "Муссон" (б)

Результаты, приведенные в табл.1, указывают на важную роль атмосферных параметров, в первую очередь параметров, T_a и Q в формировании взаимосвязи между интенсивностью тепло- и влагообмена и собственным СВЧ-излучением СОА в синоптическом диапазоне временных масштабов, которая проявляется наиболее отчетливо в области резонансного поглощения молекулярного кислорода и линии водяного пара атмосферы. Этот вывод подтверждается также результатами исследования взаимосвязи яркостной температуры СОА T^s на длинах волн 5.9мм и 1.35см с теплосодержанием (энтальпией) АПС J_{1000} в слое 1000м и потоками суммарного тепла q_{he} в районах расположения НИСП "В. Бугаев", "Муссон" и "Волна" в период 8-13 апреля в Ньюфаундлендской ЭАЗО - на рис. 2 приведен пример для судов "В. Бугаев" (2а) и "Муссон" (2б). Из иллюстрации видно, что существует задержка на несколько часов

(доли суток) отклика потоков суммарного тепла на границе АПС и, одновременно, яркостной температуры СОА на вариации энтальпии АПС – именно такова *инерция* тепловых процессов в слоях атмосферы, происходящих за счет *горизонтальных* движений тепловых потоков в атмосфере, которые, формируют *вертикальные* тепловые и электромагнитные потоки энергии, наблюдаемые в средних широтах Северной Атлантики.

4. Из представленных на рис. 2 результатов следует, что контрасты яркостной температуры СОА в районе проведения эксперимента АТЛАНТЭКС-90, характеризующимся интенсивной горизонтальной циркуляцией атмосферы (в частности, сильными *адвективными* потоками тепла и влаги), значительно превышают вариации яркостной температуры СОА, обусловленные процессами *вертикального* переноса тепла и влаги, которые согласно теоретическим оценкам составляют всего несколько градусов Кельвина [5]. Основываясь на данных [4], мы можем объяснить этот факт резкой сменой холодных масс воздуха более теплыми (либо, наоборот) в АПС за счет *интенсивного горизонтального* переноса тепла и влаги, что обуславливает возбуждение с некоторой задержкой во времени как вертикальных турбулентных тепловых так и, одновременно, электромагнитных потоков в СОА, вариации которых отчетливо регистрируются спутниковыми СВЧ-радиометрами в резонансных областях поглощения радиоволн в областях водяного пара и молекулярного кислорода атмосферы.

5. Об этой закономерности свидетельствуют также следующие примеры.

А. Результаты сопоставления кинетической энергии горизонтальных потоков движения в АПС и яркостной температуры СОА в зонах циклонической деятельности океана.

Данные, приведенные на рис. 3, свидетельствуют о том, что в средних широтах Северной Атлантики доминирующим фактором формирования характеристик собственного СВЧ-излучения в энергоактивных зонах СОА и определяющим их связь с тепловыми потоками на границе раздела системы, служит интенсивный *горизонтальный* перенос энергии в атмосфере, обусловленный среднеширотными циклонами. 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 определения самих характеристик горизонтального переноса тепла в атмосфере как *первичного* фактора, определяющего энергетику системы океан-атмосфера.

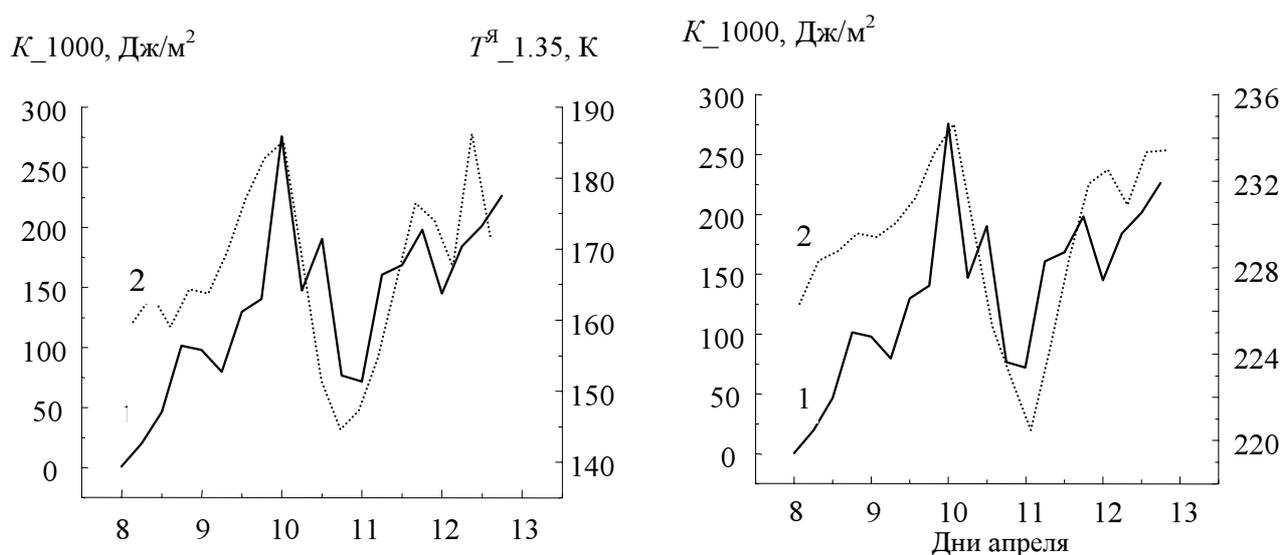


Рис. 3. Результаты сопоставления вариаций кинетической энергии потоков движения в АПС (1) и яркостной температуры СОА (2) в период прохождения циклона 8-13 апреля 1990г. в районе местоположения НИСП "В. Бугаев"

Б. Результаты анализа реакции яркостной температуры СОА на прохождение среднеширотных циклонов.

В данном случае мы оценим связь модельных оценок яркостной температуры T^a , в участках спектра $\lambda = 0.59$ и 1.35см , рассчитанными на основе данных океанографических, метеорологических и аэрологических измерений, и оценками тепловых потоков $q_{\text{не}}$, полученных с НИСП "В.Бугаев" и "Муссон" в эксперименте АТЛАНТЭКС-90 в период прохождения мощного среднеширотного циклона (8-13 апреля 1990г.). Теоретически искомая зависимость описывается уравнением Дюамеля (разновидностью классического уравнения Вольтерра 1-го рода типа свертки):

$$T_a(t) = \int_0^t q(\tau)r(t-\tau)d\tau$$

Здесь мы приведем, полученные в [7] некоторые оценки степени консервативности АПС, т.е. временной задержки отклика яркостной температуры СОА, на возмущения ее тепловых свойств в синоптическом диапазоне временных масштабов в районах местоположения НИСП "В.Бугаев" и "Муссон", следуя развитому в [6] алгоритму аналитической аппроксимации для определения функции отклика $r(t)$ из этого уравнения (см. рис.4).

Основным результатом этого анализа является подтверждение установленного в [5] факта задержки отклика яркостной температуры на 12-18 часов по отношению к вариациям тепловых потоков в районах прохождения среднеширотных циклонов.

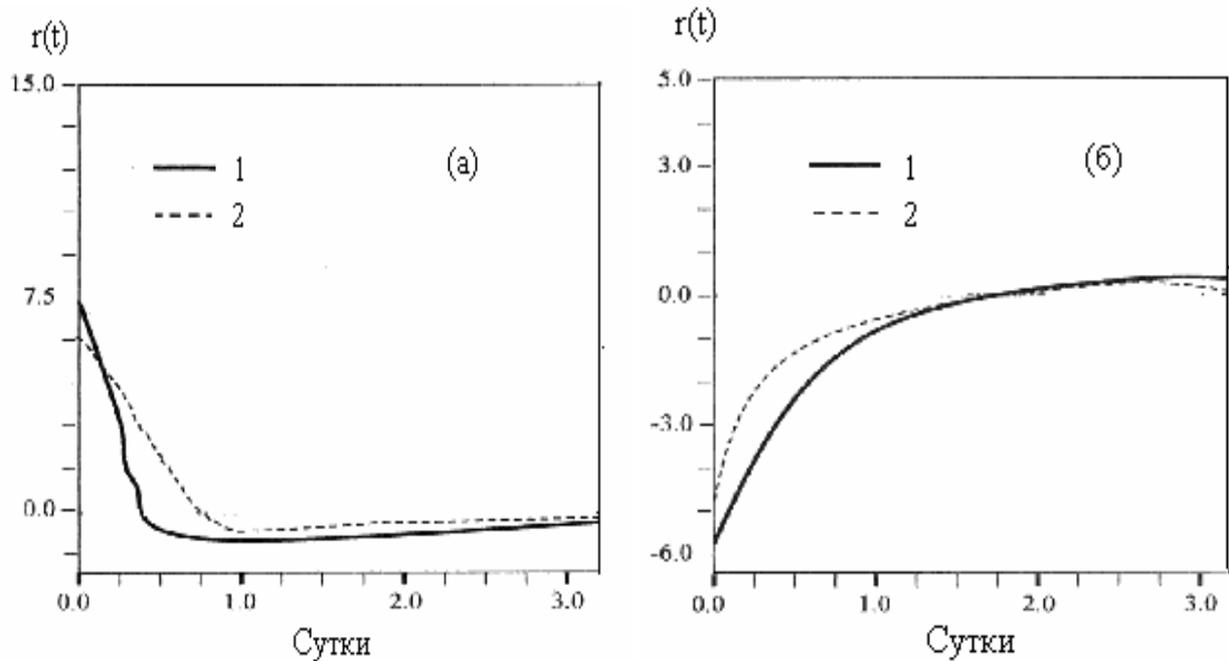


Рис. 4. Расчет функции отклика яркостной температуры СОА $r(t)$, к вертикальным турбулентным тепловым потокам суммарного тепла $q_{\text{не}}$ (размерность - $\text{К}\left(\text{Вт}/\text{м}^2\right)^{-1} \text{сут}^{-1}$) при измерениях с судов: "В. Бугаев" (а) и "Муссон" (б)

Роль задержки отклика яркостной температуры СОА на вариации тепловых потоков также иллюстрируют приведенные в табл. 2 результаты регрессионного анализа между временными рядами параметров T^a на длинах волн 0.59 и 1.35см и параметром $q_{\text{не}}$ для судна "Муссон" - значения коэффициентов корреляции R и невязки d между ними.

Таблица 2. Влияние сдвига Δt между временными рядами яркостной температуры СОА на волнах 0.59 см (1), и 1.35 см (2) и тепловых потоков на корреляцию R и невязку d (НИСП "Муссон")

| Сдвиг Δt , часы | 0 | 6 | 12 | 18 |
|--------------------------------------|------|------|------|-------|
| Корреляция R (1) | 0.25 | 0.67 | 0.86 | 0.84 |
| Корреляция R (2) | 0.34 | 0.74 | 0.85 | 0.71 |
| Невязка d , Вт м ⁻² (1) | 160 | 124 | 85 | 98.7 |
| Невязка d , Вт м ⁻² (2) | 157 | 113 | 93 | 127.3 |

6. Приведенные данные, оформленные в тезисном виде, сами за себя говорят об основных результатах, которые мы хотели бы сформулировать в этой статье. Часть их приведена в [5], однако, здесь хочется отметить следующие особенности, свойственные *синоптическим* временным масштабам:

1) в Северной Атлантике *горизонтальные* атмосферные движения в атмосфере, вызванные среднеширотными циклонами, определяют энергетику АПС и, одновременно, яркостную температуру СОА, измеряемую в резонансной области поглощения (излучения) молекулярного кислорода ~ 5 мм и резонансной линии водяного пара 1.35см;

2) задержки отклика яркостной температуры СОА в этих спектральных областях на прохождение среднеширотных циклонов Северной Атлантики свидетельствуют о важной роли как самой атмосферы во взаимодействии с поверхностью океана (как физической субстанции) так и яркостной температуры атмосферы (как количественного индикатора взаимодействия);

3) даже незначительное (на 1-2 часа) смещение при сопоставлении временных рядов параметров T^a и q_{hc} может исказить результаты анализа их взаимосвязи на синоптических масштабах; поэтому, учет этого фактора важен для *валидации* спутниковых СВЧ-радиометрических оценок тепловых потоков, полученных на основе данных судовых измерений.

Литература

1. Барнетт Т.П. Роль океанов в глобальной климатической системе. В кн.: Изменения климата (ред. Дж. Гриббин), Ленинград, Гидрометеиздат, 1980, с. 209-237.
2. Марчук Г.И., Дымников В.П., Курбаткин Г.П., Саркисян А.С. Роль океана в короткопериодных колебаниях климата и программа "РАЗРЕЗЫ" // Итоги науки и техники. Атмосфера, океан, космос – программа "Разрезы". Т. 6 - ВИНТИ, 1986. с. 6-29.
3. Лаппо С.С., Гулев С.К., Рождественский А.Е. Крупномасштабное тепловое взаимодействие в системе океан-атмосфера и энергоактивные зоны мирового океана. Л.: Гидрометеиздат, 1990, 336с.
4. Гулев С.К., Колинко, Лаппо С.С. Синоптическое взаимодействие океана и атмосферы в средних широтах. С.-Петербург, 1994, 320с.
5. Гранков А.Г., Мильшин А.А. Взаимосвязь радиоизлучения системы океан-атмосфера с тепловыми и динамическими процессами на границе раздела. М.: Физматлит, 2004, 168с.
6. Гуцин Ю.Г., Гранков А.Г., Лопашов Н.В. Метод синтеза оптимальных линейных цепей фильтрующего типа: Межвузовский Тематический Научный Сборник ЛЭТИ, Вып. 1 (Вопросы обработки сигналов): Изд.: Ленинград, 1976, с.21-23.
7. Гранков А.Г., Мильшин А.А., Солдатов В.Ю. Анализ радиояркостного отклика системы океан-атмосфера на вариации поверхностных тепловых потоков: Труды международного симпозиума "Инженерная экология-2005". Москва, 2005, с.27-31.