

Анализ роли водяного пара как характеристики теплового взаимодействия океана и атмосферы

А.Г. Гранков, А.А. Мильшин

Фрязинский филиал 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 связи интегрального влагосодержания атмосферы, оцениваемого с ИСЗ по данным СВЧ-радиометрических измерений в резонансной линии 1.35 см, с температурой и влажностью воздуха в приводном слое, определяющих интенсивность его теплообмена с в водной поверхностью океана, в различных зонах океана на различных временных масштабах. В работе использованы обзорные данные, а также данные судовых экспериментов НЬЮФАЭКС-88 и АТЛАНТЭКС-90 в Ньюфаундлендской энергоактивной зоне, ставших заключительными в исследованиях процессов крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы в энергоактивных зонах Северной Атлантики, проведенных в рамках программы "Разрезы". Выявлена тесная связь среднемесячных значений радиояркостной температуры, измеряемых на протяжении ряда лет в этих зонах радиометром SSM/I с метеорологических спутников DMSP и среднемесячными значениями тепловых потоков, известных из данных реанализа данных многолетних океанографических и метеорологических измерений.

Опыт использования спутниковых СВЧ-радиометрических методов для оценки содержания водяного пара в атмосфере

Этот опыт обширен – задачи оценки интегрального (полного) содержания водяного пара в земной тропосфере и восстановления его вертикальных профилей в различных физико-географических зонах океана по данным спутниковых ИК- и СВЧ-радиометрических измерений ставились и решались сразу же после начала спутниковых исследований Земли из космоса. И этот интерес не угасает у исследователей в этой области, судя по публикациям за последние десятилетия [1-5]. Решение этой задачи важно для изучения проблем климата Земли [6], учитывая, что традиционные (контактные, прямые) средства и методы наблюдений с судов или островных станций являются *нерегулярными* и *точечными* (в масштабах Мирового океана). С учетом этого опыта можно утверждать, что на основе данных спутниковых СВЧ-радиометрических измерений яркостной температуры системы океан-атмосфера (COA) в резонансной линии 22.235 ГГц (1.35 см) можно определять полное влагосодержание в тропосфере с точностью до 0.35 г см^{-2} в диапазоне изменений от 0 (полярные области Земли) до 7 г см^{-2} (экваториальные зоны океана). В современных спутниковых проектах, например, в проекте GCOM-W1 (Global Change Observation Mission) японского агентства по аэрокосмическим исследованиям (JAXA), предполагается довести этот показатель с помощью радиометра AMSR2 до 0.2 г см^{-2} [7].

Поскольку связь яркостной температуры COA (T^a) с полным влагосодержанием атмосферы (Q) является физически обоснованной (благодаря ярко выраженному эффекту резонансного поглощения радиоволн в водяном паре на длине волны 1.35 см и вследствие этого сравнительно слабому влиянию облачности и волнения водной поверхности), то можно легко установить связь между ними. Это известно из различных литературных источников, но мы все-таки приведем здесь в качестве примера результаты сопоставления этих параметров, полученные нами при анализе данных судовых аэрологических измерений параметра Q в ходе экспериментов НЬЮФАЭКС-88 и АТЛАНТЭКС-90 в Ньюфаундлендской энергоактивной зоне (ЭАЗО) Северной Атлантики и данных СВЧ-радиометрических измерений с ИСЗ F-08 серии DMSP – радиометра SSM/I (рис. 1). Идея совмещения тех и других данных этих экспериментов, проводившихся в конце 80-х годов СССР и США различными научными и промышленными организациями, родилась в ИРЭ

РАН благодаря опыту участия в многолетних научных программах в рамках экспериментов серии ИНТЕРКОСМОС в 80-е годы.

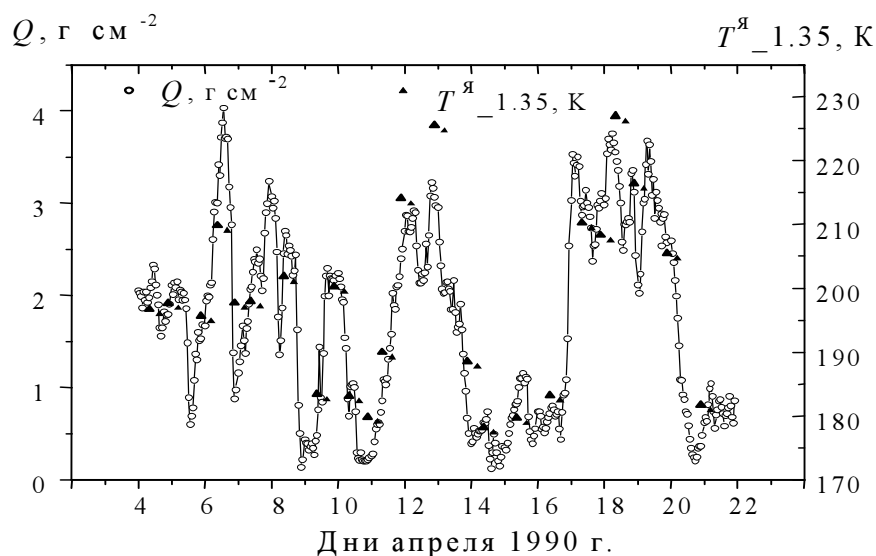


Рис. 1. Результаты сопоставления оценок общего влагосодержания атмосферы Q , полученных с помощью установленного на НИСП "Волна" и ориентированного вверх СВЧ-радиометра на частоте 22 ГГц, с яркостной температурой COA, измеренной со спутника SSM/I F-08 на той же частоте. Стационарная фаза эксперимента АТЛАНТЭКС-90 (апрель 1990 г.)

Пример, показанный на рис. 1, иллюстрирует эффективность использования резонансной линии 1.35 см атмосферы для определения общего влагосодержания атмосферы независимо от способа ее зондирования: либо корабельными, либо спутниковыми средствами.

Заметим, что результаты этих экспериментов, прежде всего, данные полевых измерений не теряют ценности и сейчас (десятилетия спустя), поскольку они проводились с периодичностью (1-6 часов), недоступной для спутниковых методов (~ 24 часа).

Связь водяного пара атмосферы с температурой и влажностью воздуха в приводном слое

Известно, что температура (T_a) и парциальное давление (упругость) водяного пара (e) приводного слоя атмосферы наряду с температурой поверхности океана играют ключевую роль в формировании вертикальных турбулентных потоков тепла и влаги на границе раздела COA [8]. Эти параметры, в отличие от интегрального влагосодержания атмосферы COA Q , оказывают лишь *косвенное* влияние на характеристики излучения атмосферы и всей системы в целом, т.к. яркостная температура COA определяется не только величинами T_a и e , но и их вертикальным распределением. Анализ взаимосвязи общего влагосодержания атмосферы с приводными значениями ее температуры и влажности временных масштабов представляет большой интерес с точки зрения применения дистанционных методов для анализа интенсивности тепло- и влагообмена между океаном и атмосферой на различных временных масштабах, прежде всего на сезонных и синоптических.

Предпосылкой для совместного анализа параметров e , T_a и Q является наличие корреляционных взаимосвязей между ними, обусловленных процессами вертикальной диффузии, а также горизонтального (адвективного) переноса явного тепла и водяного пара в различных слоях атмосферы [9].

Четкая регрессионная связь между общим влагосодержанием атмосферы и приводными значениями влажности и температуры воздуха наблюдается при определенном их временном и пространственном усреднении. В качестве примера на рис. 2 приведены результаты сопоставления среднемесячных значений параметров Q , e , T_a в 5-ти градусных квадратах - фрагментах Норвеж-

ско-Гренландской, Ньюфаундлендской и Гольфстримской ЭАЗО Северной Атлантики, полученные с помощью многолетних архивных океанографических и метеорологических данных [9].

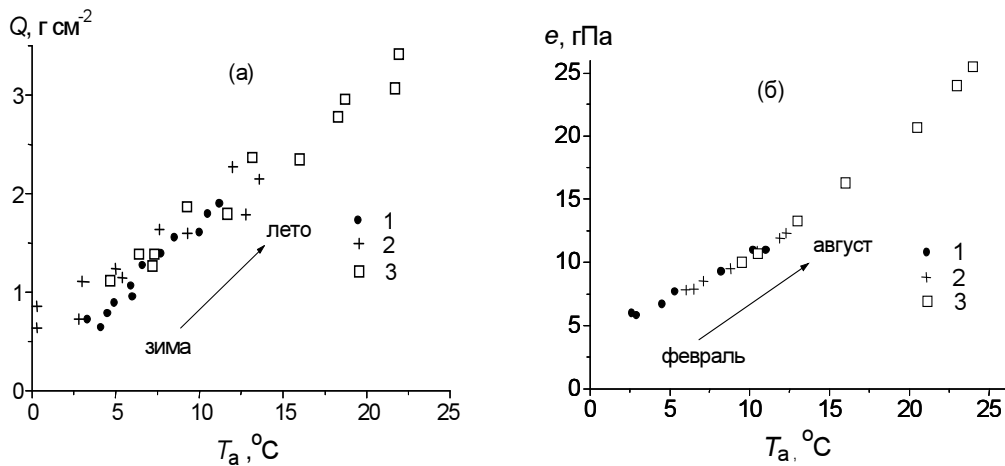


Рис. 2. Взаимосвязь среднемесячных (многолетних) значений параметров Q и T_a в период январь-декабрь (а) и параметрами e и T_a в период февраль-август (б) в Норвежско-Гренландской (1), Ньюфаундлендской (2) и Гольфстримской (3) ЭАЗО

Результаты экспериментов НЬЮФАЭКС-88 (с ноября 1987 г. по апрель 1988 г.) и АТЛАНТЭКС-90 (с ноября 1989 г. по июнь 1990 г.) по изучению взаимодействия океана и атмосферы в Ньюфаундлендской ЭАЗО Северной Атлантики [10, 11] дают обширный материал для исследования взаимосвязи между синоптическими вариациями параметров Q , e , T_a в средних широтах океана. Из всего архива экспериментальных данных использованы преимущественно данные стационарных фаз экспериментов (март 1988 г. и апрель 1990 г.), полученные на научно-исследовательских судах погоды (НИСП) "Виктор Бугаев", "Волна" и "Муссон", находящихся в эти периоды в неподвижном положении, и включающие более 2000 метеорологических наблюдений в приводной атмосфере с 1-часовым разрешением и более 400 аэрологических (радиозондовых) наблюдений в интервале высот от 10 до 16000 метров на 20 уровнях с 6-часовым разрешением, а также более 2000 измерений общего влагосодержания атмосферы с 15-20-минутным разрешением с НИСП "Волна" при помощи СВЧ-радиометров 1.35 см и 0.8 см ориентированных антеннами вверх (в эксперименте АТЛАНТЭКС-90).

С помощью этих наблюдений показано, что связь между синоптическими вариациями общего влагосодержания атмосферы, полученных по данным СВЧ-радиометрического зондирования, с вариациями температуры и влажности приводного воздуха, известных из метеорологических данных, является весьма жесткой (рис. 3).

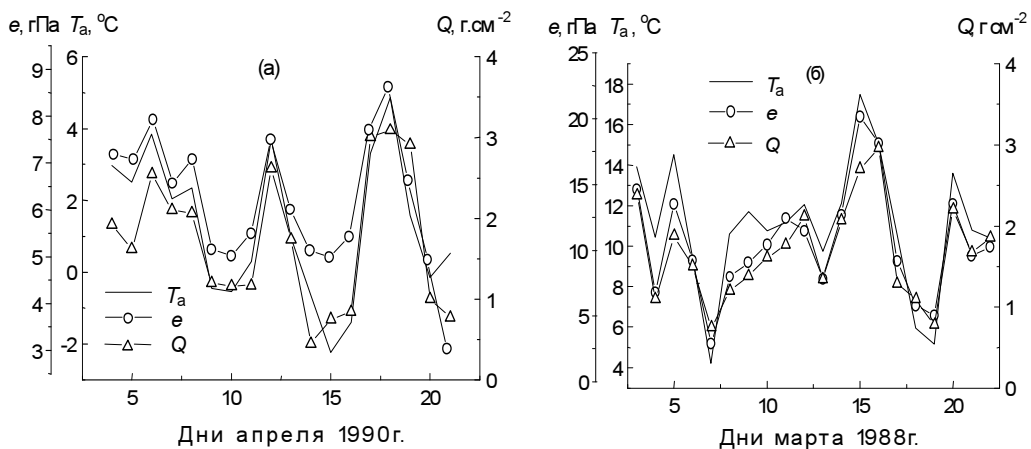


Рис. 3. Взаимосвязь среднесуточных значений параметров e , T_a и Q на стационарных фазах экспериментов АТЛАНТЭКС-90 по данным наблюдений с НИСП "Волна" (а) и НЬЮФАЭКС-88 с НИСП "Муссон" (б)

Исследование взаимосвязи вариаций общего влагосодержания атмосферы с приводными значениями влажности и температуры воздуха на *мезометеорологических* (часовых, суточных) масштабах представляет большой интерес с точки зрения понимания и интерпретации этих процессов на синоптических и сезонных масштабах.

Некоторые результаты анализа связи суточных вариаций параметров Q , e , T_a для ряда фрагментов, отличающихся сильной изменчивостью этих параметров представлены на рис. 4.

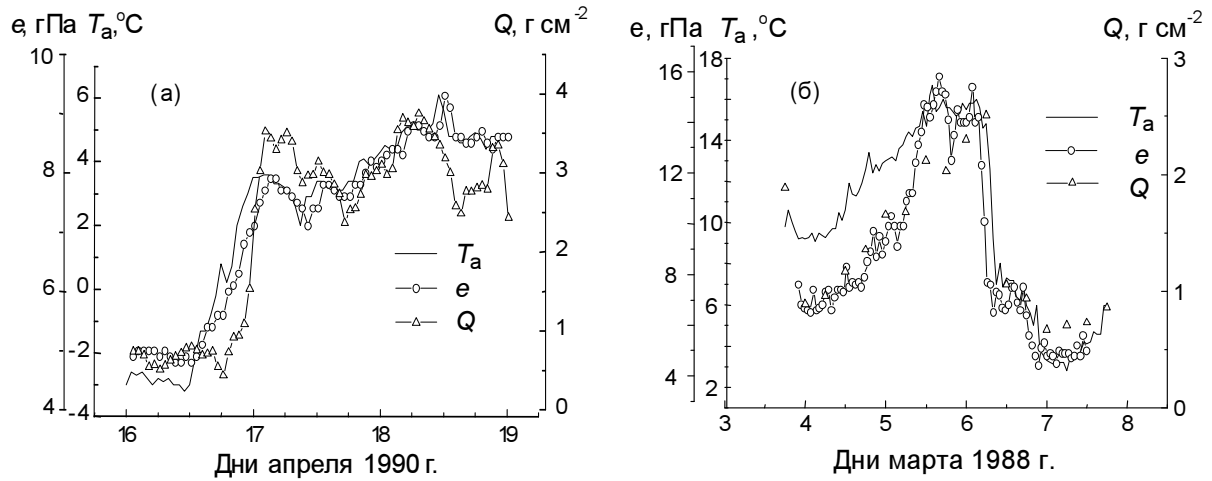


Рис. 4. Взаимосвязь суточных вариаций параметров e , T_a и Q : а) АТЛАНТЭКС-90, НИСП "Волна", 16-18 апреля 1990 г. - результаты сопоставления ежедневных значений e , T_a и значений Q , усредненных по 15-20-минутным выборкам (по данным измерений судовых СВЧ-радиометров); б) НЬЮФАЭКС-88, НИСП "Муссон", 3-8 марта 1988 г. - результаты сопоставления ежедневных значений e , T_a и 6-часовых выборок параметра Q

Результаты анализа свидетельствуют о том, что тесную связь между общим влагосодержанием, приводной влажностью и температурой приводной атмосферы можно наблюдать и на суточных интервалах.

Полное влагосодержание атмосферы как характеристика теплообмена между океаном и атмосферой на синоптических масштабах времени

Выполнен анализ возможности реконструкции используемых океанологами и метеорологами формул теплообмена [8] в виде комбинаций лишь тех параметров СОА, которые непосредственно связаны с характеристиками собственного СВЧ-излучения, измеряемыми со спутников. В основу анализа положены данные, полученные с НИСП "Волна" на стационарной фазе эксперимента АТЛАНТЭКС-90. В частности, исследована возможность использования в этих формулах величины общего влагосодержания атмосферы вместо температуры приводного воздуха, играющего важную роль при определении тепловых потоков, учитывая их тесную связь на синоптических масштабах времени (см. рис. 3, 4). С этой целью проведено сопоставление оценок потоков явного тепла q_h , которые в классических формулах теплообмена определяются через температуру поверхности океана T_n , скорость приводного ветра V и температуру приводного воздуха T_a (1) и приближенных оценок q_h^* , вычисленными путем сочетания параметров T_n и V с параметром Q для их среднесуточных значений в виде следующих соотношений:

$$q_h = c_0 + c_1 T_n V + c_2 T_a V; \quad (1)$$

$$q_h^* = c_0 + c_1 T_n V + c_2 Q V, \quad (2)$$

где коэффициенты c_0 , c_1 , c_2 определяются методом наименьших квадратов путем минимизации невязки (среднеквадратической разности) значений q_h и q_h^* , вычисленных с помощью параметри-

заций (1) и (2) для всего ансамбля данных измерений параметров T_p , V , T_a и Q с НИСП "Волна" в период 4-21 апреля 1990 г.

Параметризация (2), имеет сходный с (1) облик и отличается лишь заменой параметра T_a на параметр Q .

Основной результат проведенного анализа заключается в тесной связи значений оценок q_h из формулы (1) со значениями q_h^* , рассчитанными с помощью формулы (2) (рис. 5).

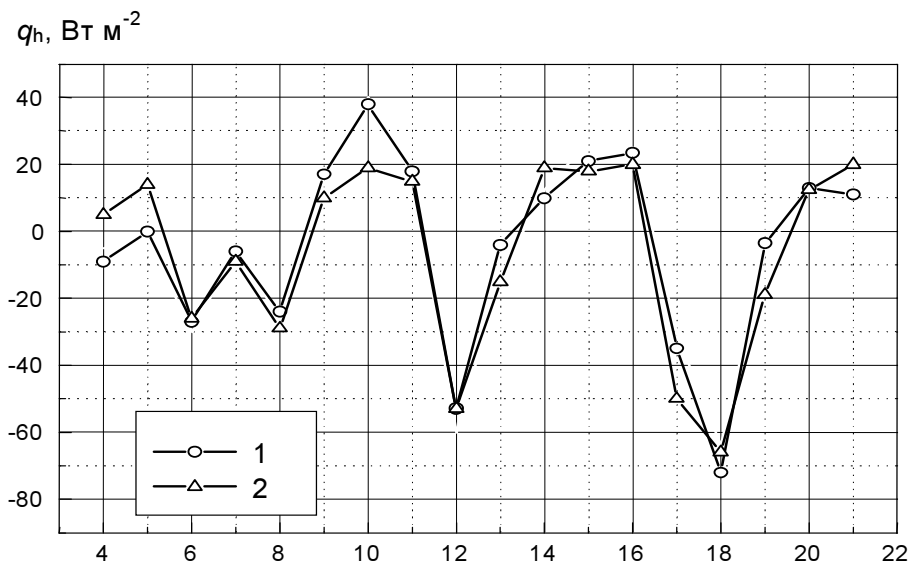


Рис. 5. Оценки потоков явного тепла q_h , вычисленные с помощью параметризаций (1) и (2)

Радиояркостьная температура в линии водяного пара 1.35 см атмосферы как непосредственная характеристика тепловых потоков на климатических масштабах

В этом исследовании использованы архивные данные измерений радиометра SSM/ F-08, F-10, F-11, F-12 и F-13 серии DMSP за период с 1988 по 1996 гг., полученные из Маршалльского центра космических полетов (MSFC) - первичные телеметрические данные в форматах SSM и HDF (более 200 Гбайт информации в заархивированном виде). Для определения яркостных температур COA для каждого канала радиометра выполнено преобразование телеметрических данных в значения антенных температур на основе абсолютной калибровки параметров антенно-фидерного тракта и коэффициента усиления радиометра. Затем проведено преобразование антенных температур в яркостные температуры COA путем параметризации интегрального уравнения сглаживания с учетом реальных параметров антенной системы [9].

Помимо данных Маршалльского центра в работе использованы дополнительно архивы за 1997-1998 гг., переданные Центром программных исследований Росавиакосмоса в виде среднесуточных значений яркостной температуры COA с пространственным разрешением $0.5 \times 0.5^\circ$ в формате HDF.

На следующем этапе из глобального массива яркостных температур выделены фрагменты, соответствующие "областям интересов", которыми в нашем случае являются акватории Северной Атлантики, занимаемые Норвежско-Гренландской, Ньюфаундлендской и Гольфстримской ЭА-ЗО). Далее сформированы ряды ежесуточных и среднемесячных значений яркостной температуры в период с 1988 по 1998 гг. для тех витков спутников DMSP, которые проходят через более локальные области (квадраты $0.5 \times 0.5^\circ$), центры которых совмещены с судами погоды М (MIKE – 66° с.ш., 2° в.д.), D (DELTA – 44° с.ш., 41° з.д.) и Н (HOTEL – 38° с.ш., 71° з.д.).

В работе использован также архив NCEP/NCAR, включающий данные многолетних наблюдений в таких областях как океанография, климат и погода, гидрология и гляциология, биогеохимия и др.; выборочные материалы этого архива за период 1982-1994 гг. предоставлены Институтом океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Из архивных данных выделены фрагменты, приуроченные к областям М, D и H и определены (непосредственно, либо путем интерполяции) значения различных параметров СОА, включая потоки суммарного (явного+скрытого) тепла q_{he} .

Результаты исследования представлены на рис. 6, откуда видно, что существует *прямая* связь между радиояркостной температурой СОА на длине волны 1.35 см, определяемой преимущественно интегральным содержанием водяного пара в атмосфере.

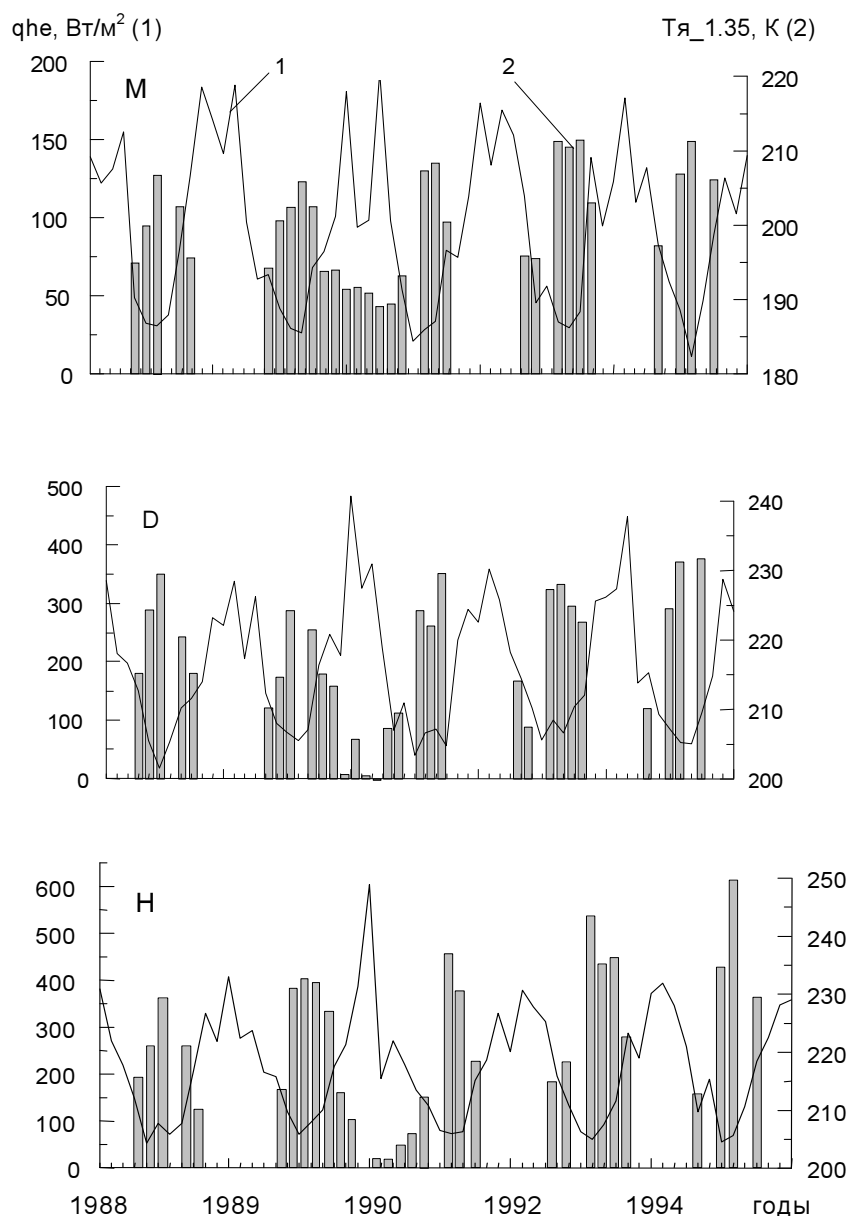


Рис. 6. Результаты сопоставления среднемесячных значений потоков суммарного тепла q_{he} (1) и яркостной температуры $T^a_{1.35}$ (2) для точек М, D, H Северной Атлантики с 1988 по 1994 гг.

Таким образом, интегральное влагосодержание атмосферы, благодаря его тесной связи с температурой и влажностью приводного воздуха является надежным количественным индикатором интенсивности теплообмена на границе раздела океана и атмосферы в широком диапазоне временных масштабов – от синоптических до сезонных и климатических. По крайней мере, мы можем это утверждать применительно к энергоактивным зонам Северной Атлантики.

Литература

1. *Raschke E. and Bandeen W.R.* A quasi-global analysis of tropospheric water-vapour content from TIROS IV radiation data // *J. Appl. Met.* 1967, V. 6. No.3, 468-481.
2. *Staelin D.H. et al.* Remote sensing of atmospheric water vapor and liquid water with the Nimbus 5 microwave spectrometer // *J. Appl. Meteor.*, 1976. V. 15, 1204-1214.
3. *Кондратьев К.Я., Григорьев Ал.А., Рабинович Ю.А., Шульгина Е.М.* Метеорологическое зондирование подстилающей поверхности. Под ред. К.Я. Кондратьева. Л.: Гидрометеоиздат, 1979, 247с.
4. *Степаненко В.Д., Щукин Г.Г., Бобылев Л.П., Матросов С.Ю.* Радиотеплокация в метеорологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 228с.
5. *Schulz J, Meijwerk J, Ewald S, and Schlusser P.* Evaluation of satellite-derived latent heat fluxes // *J. of Climate.* Nov. 1997. V.10, 2782-2795.
6. *Изменения климата* (под ред. Дж. Гриббина). Л., Гидрометеоиздат, 1980. 360 с.
7. *Global Change Observation Mission: AMSR2 on GCOM-W1 - Algorithm, Validation, and Application.* Issued: January 18, 2008. Earth Observation Research Center, Japan Aerospace Exploration Agency.
8. *Латто С.С., Гулев С.К., Рождественский А.Е.* Крупномасштабное тепловое взаимодействие в системе океан-атмосфера и энергоактивные области Мирового океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 336 с.
9. *Гранков А.Г., Мильшин А.А.* Взаимосвязь радиоизлучения системы океан-атмосфера с тепловыми и динамическими процессами на границе раздела. М.: Физматлит, 2004. 168 с.
10. *Латто С.С., Озмидов Р.Р., Волков Ю.А. и др.* Эксперимент "Разрезы-НЬЮФАЭКС-88" // *Метеорология и гидрология*, 1989. №9. 67-76.
11. *Гулев С.К., Иванов Ю.А., Колинко А.В. и др.* Эксперимент "АТЛАНТЭКС-90" // *Метеорология и гидрология*, 1992. №5. С. 51-61.