

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ОКЕАНА И ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ В 1975–2011 гг.

По данным судовых наблюдений ICOADS за 1975–2011 гг. рассчитывалась временная изменчивость температуры поверхности океана и потоков явного и скрытого тепла на акватории Северной Атлантики и в отдельных доменах, отвечающих субтропическому и субполярному круговоротам и течению Гольфстрим. Установлено, что в рассмотренном временном интервале наблюдается существенная междекадная изменчивость исследуемых характеристик, причём для большинства из них в 2000–2011 гг. отмечена стадия стабилизации на уровне, достигнутом к 2000 г. В субтропическом круговороте, Гольфстриме и в целом на акватории Северной Атлантики в изменчивости потоков скрытого тепла проявляется преобладающее влияние обусловленной адвективными течениями температуры поверхности океана. В субполярном круговороте, напротив, температура поверхности океана управляется формируемыми атмосферой потоками скрытого и явного тепла.

Ключевые слова: температура поверхности океана; потоки скрытого и явного тепла; Северная Атлантика.

Введение

В изменениях климата важную роль играют процессы взаимодействия океана и атмосферы. Так, установлены достаточно тесные связи между изменениями гидрометеорологических характеристик в Северной Атлантике и климата окружающих ее континентальных регионов [1. С. 193]. Известен также существенный вклад в климатическую изменчивость явления Эль-Ниньо – процессов потепления поверхности восточной тропической части Тихого океана [2. С. 181]. Атмосфера влияет на характеристики поверхностного слоя океана главным образом через воздействие ветра, изменяющего динамику и термодинамику верхнего слоя океана, и изменения в облачности, модулирующие радиационный баланс на поверхности океана. Обратное влияние океана на атмосферу осуществляется через турбулентные потоки тепла и влаги. Как отмечается в [3. С. 62], возмущение в поле температуры поверхности океана приводит к изменениям потоков скрытого и явного тепла и, тем самым, к воздействию на циркуляцию и облачность. Изменения в циркуляции могут проявляться не только в адвективной и конвективной составляющих переноса воздушных масс, но и в изменениях характеристик циклонов, зарождающихся над океанскими акваториями и смещающихся на территории континентов. Исходя из этого, исследование межгодовой изменчивости температуры поверхности океана, потоков явного и скрытого тепла имеет существенное значение для решения проблемы изменения климата.

Целью настоящей работы являлось изучение сезонной и межгодовой изменчивости температуры поверхности океана, тепловых потоков и их взаимных связей в Северной Атлантике в период глобального потепления 1975–2011 гг.

Исследованию взаимодействия атмосферы и океана в Северной Атлантике посвящено много публикаций. Расширенный обзор работ в этом направлении содержится, например, в монографиях [4. С. 88; 5. С. 78]. Отметим лишь некоторые работы, касающиеся темы нашего исследования. Аномалии среднегодовых температур поверхности океана (ТПО) в Северной Атлантике в 10°-х широтных полосах от экватора до 70° с. ш. во временном интервале 1900–

1987 гг. были вычислены в [6. С. 141]. Временной ход аномалий ТПО имеет свои особенности в каждой широтной полосе с общими признаками, заключающимися в потеплении в 1920–1940 гг. и похолодании между 1940–1970 гг. Уменьшение ТПО почти на всей акватории Северной Атлантики было установлено также в работе [7. С. 720] для временного интервала 1948–1972 гг. Рост среднегодовых температур с середины 1980-х до 2000 г. в Северной Атлантике выявлен в работе [8. С. 24]. Пространственное распределение зимних аномалий ТПО в Северной Атлантике характеризуется двумя главными модами изменчивости [9. С. 331]. Одна из них представляет собой триполь – три района аномалий: область вблизи юго-восточного побережья США, район восточнее п-ва Ньюфаундленд и район тропической восточной Атлантики. Монопольная мода представляет собой аномалию одного знака над Северной Атлантикой в целом [10. С. 1743], и она связана с мультидекадными возмущениями ТПО, в то время как трипольная мода соответствует годовым масштабам.

В [11. С. 1] была высказана гипотеза о том, что изменчивость ТПО в Северной Атлантике на годовых масштабах вызывается воздействием атмосферы, тогда как на больших временных масштабах она связана с изменчивостью океана. Воздействие атмосферы на океан в основном осуществляется ветром, который модулирует турбулентные потоки тепла с поверхности и изменяет экмановские течения. Потоки явного (Q_L) и скрытого (Q_S) тепла пропорциональны средней скорости ветра у поверхности и градиенту температуры в приземном слое воздуха для Q_S и градиенту влажности в том же слое для Q_L . Пространственное распределение среднегодовых значений этих потоков и их линейных трендов за 1948–1972 гг. рассмотрено в работе [7. С. 720]. Сделан вывод, что за этот временной промежуток наблюдался рост потоков явного тепла практически на всей акватории Северной Атлантики, особенно выраженный у северо-восточного побережья США и у западного побережья Скандинавии. Подобный характер имеет динамика потоков скрытого тепла, но с менее выраженными изменениями в отмеченных выше районах. Связи между месячными аномалиями потоков суммарного (явного и скрытого) тепла и аномалиями ТПО в Северной Ат-

лантике исследованы в работе [12. С. 859] за период 1946–1986 гг. Автор нашёл, что месячные аномалии потока и аномалии тенденций ТПО значимо коррелируют над большей частью океана и особенно выражены во внутритропических широтах в холодный сезон, когда положительная аномалия потока связана с отрицательной аномалией ТПО и наоборот. Для периода 1988–1999 гг. пространственная структура и временная изменчивость потоков явного и скрытого тепла в Атлантике исследовались в [13. С. 873]. Применяя в исследовании разные базы данных, авторы показали, что для области Северной Атлантики (от экватора до 45° с. ш.) во временном интервале 1988–1999 гг. рост ТПО воспроизводится данными, взятыми из разных источников, однако имеются расхождения в динамике потоков.

Исходные данные и методы анализа

Исследования временной изменчивости рассмотренных в работе величин выполнялись как для акватории Северной Атлантики в целом, так и для отдельных областей, представленных на рис. 1 и выделяющих регионы океана с различным характером океанской циркуляции. Регион 1 выделяет область субполярного круговорота, в которой океан циркулирует циклонически между 50° и 60° с. ш., ограниченную Северо-Атлантическим, Восточно-Гренландским, Западно-Гренландским и Лабрадорским течениями, а также течением Ирмингера. Регион 2 выделяет область субтропического круговорота, ограниченную Северным пассатным, западными пограничными Флоридским и Гольфстримом, Северо-Атлантическим и восточным пограничным Канарским течениями.

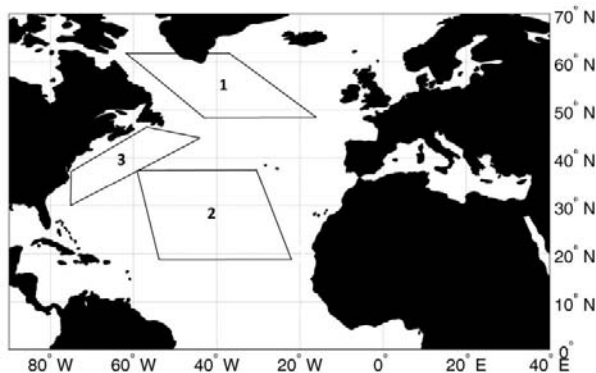


Рис. 1. Положение выделенных доменов на акватории Северной Атлантики: 1 – субполярный круговорот; 2 – субтропический круговорот; 3 – течение Гольфстрим

Циркуляция в обоих круговоротах вызвана ветровым воздействием Исландского и Азорского центров действия атмосферы. Регион 3 выделяет район течения Гольфстрим, циркуляция в котором вызвана различием в температуре и солёности в северных и южных широтах бассейна. В дальнейшем для удобства изложения словом *Гольфстрим* обозначается район течения Гольфстрим.

Отметим, что выбор указанных на рис. 1 регионов осуществлён субъективно на основе многочисленных опубликованных карт течений в Северной Атлантике.

В большей степени мы руководствовались схемой крупномасштабной циркуляции вод Северной Атлантики, приведённой в [4. С. 30] и [15. С. 3516] при выборе положения Гольфстрима. Точный выбор координат круговоротов и Гольфстрима не представляется возможным в силу их большой пространственно-временной изменчивости.

Координаты угловых точек выбранных районов приведены в табл. 1.

Таблица 1
Координаты угловых точек выбранных районов

1. Субполярный круговорот	2. Субтропический круговорот	3. Течение Гольфстрим
62° с. ш., 62° з. д.;	37° с. ш., 59° з. д.;	46° с. ш., 57° з. д.;
62° с. ш., 37° з. д.;	37° с. ш., 30° з. д.;	44° с. ш., 46° з. д.;
47° с. ш., 43° з. д.;	18° с. ш., 55° з. д.;	37° с. ш., 75° з. д.;
47° с. ш., 16° з. д.	18° с. ш., 22° з. д.	30° с. ш., 75° з. д.

Исследование гидрометеорологических величин в Северной Атлантике за период 1975–2011 гг., таких как температура поверхности океана (ТПО), потоки скрытого (Q_L) и явного (Q_S) тепла, проводилось по данным судовых наблюдений ICOADS (International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set) с пространственным разрешением $1^\circ \times 1^\circ$ и месячным временным разрешением. ICOADS – это наиболее полная база среднемесячных данных поверхности океана, охватывающая последние три века с пространственным разрешением $2^\circ \times 2^\circ$ для периода 1800–2011 гг. и с разрешением $1^\circ \times 1^\circ$ – для периода 1960–2011 гг. Данные судовых наблюдений ICOADS находятся в свободном доступе по адресу <http://icoads.noaa.gov/data.icoads.html>.

Исходные ряды сглаживались фильтром низких частот (ФНЧ). Операция заключалась в умножении спектра Фурье сигнала на некоторую функцию $W(\omega)$, называемую спектральным окном, с последующим конструированием «сглаженного» сигнала. В данной работе использовалось прямоугольное окно с шириной, равной 10 лет.

Погрешность расчёта гидрометеорологических величин определялась через среднеквадратическое отклонение, значимость которого оценивалась с помощью проверки нулевой гипотезы с уровнем значимости $\alpha = 0,05$.

При исследовании временной изменчивости рассматривались связи между климатическими величинами и климатообразующими факторами, такими как радиационные и циркуляционные, а также связь между самими факторами оценивалась с помощью методов корреляционного анализа. Коэффициенты линейного тренда определялись с помощью уравнения регрессии, а их значимость оценивалась по одностороннему t -тесту на уровне $\alpha = 0,1$.

Сезонная и межгодовая изменчивость температуры поверхности океана и потоков тепла

Сезонный ход температуры поверхности океана и потоков тепла, усреднённый по акватории Северной Атлантики и по периоду 1975–2011 гг., приведён в табл. 2.

Таблица 2

Сезонный ход температуры поверхности океана и потоков скрытого (Q_L) и явного (Q_S) тепла. Величины усреднены по акватории Северной Атлантики и по периоду 1975–2011 гг.

Месяц	ТПО, °C	Q_L , Вт/м ²	Q_S , Вт/м ²
1	14,59	85,91	24,64
2	14,1	77,31	20,27
3	14,12	67,16	12,6
4	14,76	55,89	3,91
5	16,05	48,3	-1,28
6	17,86	48,51	-2,86
7	19,74	49,93	-2,77
8	20,98	55,77	-1,01
9	20,59	67,81	3,11
10	19,07	79,85	10,02
11	17,25	90,01	18,86
12	15,69	91,64	24,3

В сезонном ходе (табл. 2) температура поверхности океана за период 1975–2011 гг. минимальна в феврале (ТПО = 14,1°C; $\sigma_{ТПО} = 0,6^\circ\text{C}$) и максимальна в августе (ТПО = 21°C; $\sigma_{ТПО} = 0,7^\circ\text{C}$).

В среднем по территории Северной Атлантики наибольший поток скрытого тепла наблюдается в зимний период с максимумом в декабре ($Q_L = 91,6 \text{ Вт/м}^2$; $\sigma_{Q_L} = 17 \text{ Вт/м}^2$). Наименьший поток скрытого тепла в среднем по территории Северной Атлантики отмечается в летний период года, с минимальным значением в мае ($Q_L = 48,3 \text{ Вт/м}^2$; $\sigma_{Q_L} = 14 \text{ Вт/м}^2$).

Наибольший поток явного тепла от поверхности океана наблюдается в зимний период в январе ($Q_S = 24,64 \text{ Вт/м}^2$; $\sigma_{Q_S} = 11 \text{ Вт/м}^2$), а минимальный в сентябре ($Q_S = 3,11 \text{ Вт/м}^2$; $\sigma_{Q_S} = 1,6 \text{ Вт/м}^2$). С мая по август поток явного тепла направлен от атмосферы в океан, с наибольшим значением в июне ($Q_S = -2,86 \text{ Вт/м}^2$; $\sigma_{Q_S} = 2 \text{ Вт/м}^2$).

На рис. 2 показана межгодовая изменчивость среднегодовых температур поверхности океана, усреднённых по всей акватории Северной Атлантики (а), по домену 2, отвечающему субтропическому круговороту (б), по домену 1, отвечающему субполярному круговороту (в), и по домену 3, отвечающему течению Гольфстрим (г). Тонкая линия даёт межгодовую изменчивость, жирная линия – результат сглаживания с помощью прямоугольного окна шириной 10 лет. В табл. 3 приведены линейные тренды температуры поверхности океана за 1975–2011 гг. как для акватории Северной Атлантики в целом, так и для отдельных доменов. Жирным шрифтом выделены тренды статистически значимые на уровне 0,1. Из табл. 3 видно, что наибольшие среднегодовые скорости потепления поверхности океана ($0,38^\circ\text{C}/10 \text{ лет}$) имеют место в субполярном круговороте. В сезонном ходе потепление заметно выше во втором полугодии, с максимумом в августе ($0,65^\circ\text{C}/10 \text{ лет}$).

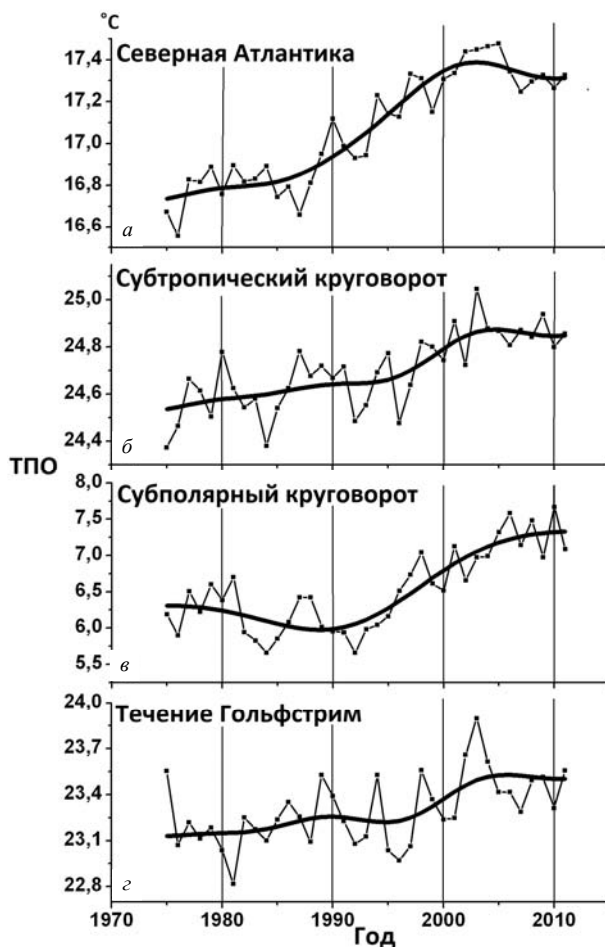


Рис. 2. Межгодовая изменчивость температуры поверхности океана: а – средней по Северной Атлантике; б – средней по домену 2; в – средней по домену 1; г – средней по домену 3

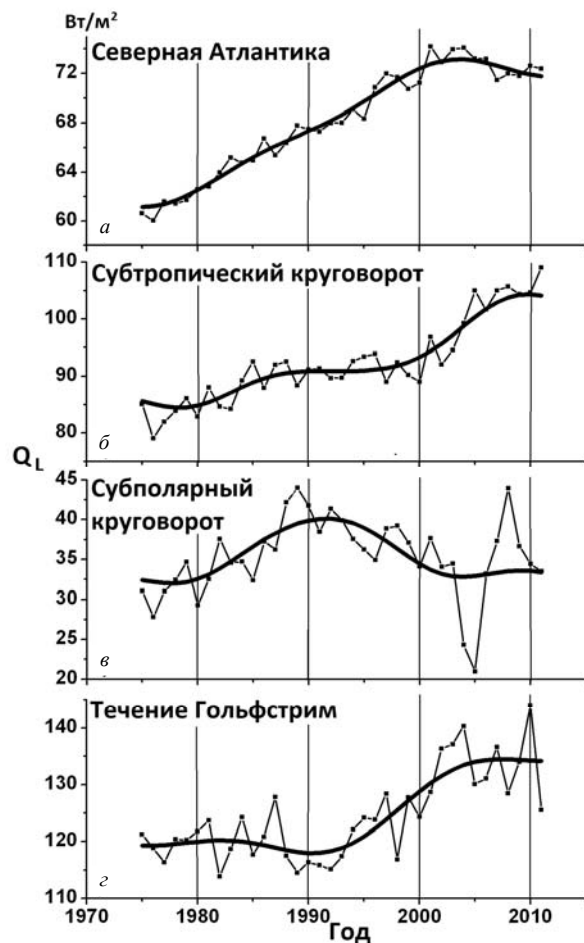


Рис. 3. Межгодовая изменчивость потока скрытого тепла: а – среднего по Северной Атлантике; б – среднего по домену 2; в – среднего по домену 1; г – среднего по домену 3

Линейные тренды температуры поверхности океана (°C/10 лет) для всей акватории Северной Атлантики и для её отдельных доменов

Месяц	Субтропический Круговорот (домен 2)	Субполярный Круговорот (домен 1)	Течение Гольфстрим (домен 3)	Северная Атлантика
1	0,05	0,37	0,16	0,19
2	0,07	0,21	0,09	0,20
3	0,02	0,32	0,05	0,16
4	0,07	0,20	0,10	0,19
5	0,08	0,13	0,07	0,26
6	0,13	0,28	0,13	0,27
7	0,16	0,47	0,16	0,25
8	0,17	0,65	0,14	0,26
9	0,14	0,49	0,12	0,20
10	0,15	0,52	0,12	0,22
11	0,11	0,44	0,05	0,22
12	0,09	0,41	0,09	0,19
Год	0,11	0,38	0,10	0,22

Среднегодовая температура в субтропическом круговороте повышалась с заметно меньшей скоростью (0,11°C/10 лет). В этом потеплении доминировала вторая половина года, с максимальной скоростью потепления в августе (0,17°C/10 лет). Наименьший рост среднегодовых температур отмечается в Гольфстриме (0,10°C/10 лет), с максимальной скоростью потепления в январе и июле (0,16°C/10 лет). В целом по акватории Северной Атлантики тренд повышения среднегодовой температуры составил 0,22°C/10 лет, с максимальными положительными трендами (0,25–0,27°C/10 лет) в летний период, хотя сезонные различия выражены слабее, чем в отдельных доменах.

Для того чтобы оценить вклад доменов в формирование температуры поверхности океана в Северной Атлантике был выполнен регрессионный анализ, в котором предиктантом была температура поверхности океана на всей акватории, а предикторами – температуры в отдельных доменах. Предварительно были рассчитаны коэффициенты корреляции температур между отдельными доменами. Для среднегодовых температур они составили 0,29 между Гольфстримом и субтропическим круговоротом, –0,23 между Гольфстримом и субполярным круговоротом и –0,12 между субтропическим и субполярным круговоротами. Для выбранного в работе временного периода (36 лет) наблюдаются низкие значения коэффициентов корреляции, что позволяет говорить о статистической независимости предикторов. Результаты регрессионного анализа показывают, что доминирующий вклад (59%) в изменчивость температуры Северной Атлантики вносит субполярный круговорот, далее следуют течение Гольфстрим (26%) и субтропический круговорот (15%). Однако линейные тренды не передают всех особенностей изменчивости температуры поверхности океана в Северной Атлантике. Из рис. 2, а–в видно, что имеет место хорошо выраженная междекадная изменчивость.

Сглаженная кривая на рис. 2, а позволила установить, что в интервале 1975–1980 гг. среднегодовая температура на всей территории увеличилась только на 0,1°C, соответствуя началу перехода от похолодания от середины 50-х гг. до начала 70-х гг. XX столетия [8. С. 24] к потеплению с середины 70-х гг. Далее в интервале 1980–1990 гг. наблюдается умеренное (+0,2°C) потепление, а в интервале 1990–

2000 гг. – сильное (+0,4°C) потепление. Однако в интервале 2000–2011 гг. процесс потепления остановился и наблюдается даже небольшое (–0,1°C) похолодание. В обоих круговоротах и в Гольфстриме тенденция к стабилизации температуры наблюдается после 2005 г.

Рассмотрим теперь динамику потоков скрытого (Q_L) и явного (Q_S) тепла. Для расчета этих потоков были использованы известные балк-формулы [17. С. 654]:

$$Q_L = \rho L C_e w (q_{sea} - q_{air}), \quad (1)$$

$$Q_S = \rho C_p C_h w (T_{PO} - T_{air}), \quad (2)$$

где ρ – плотность воздуха; C_p – удельная теплоёмкость воздуха при постоянном давлении; L – скрытая теплота испарения; C_h и C_e – коэффициенты турбулентного обмена; w , T_{air} , q_{air} – скалярная скорость ветра, температура и удельная влажность на высоте 10 м; T_{PO} , q_{sea} – температура и удельная влажность на поверхности океана.

Далее мы будем использовать для входящих в (1) и (2) разностей обозначения:

$$\Delta q = q_{sea} - q_{air} \quad \text{и} \quad \Delta T = T_{PO} - T_{air}.$$

На рис. 3 показана межгодовая изменчивость потоков скрытого тепла как на всей акватории (а), так и в отдельных доменах (б–г), а в табл. 4 – характеристики линейных трендов. Как и для температуры, мы выполнили регрессионный анализ вклада потока скрытого тепла от отдельных доменов на поток на акватории Северной Атлантики. Оказалось, что вклад субтропического круговорота составляет 57%, субполярного – 27% и течения Гольфстрим – 16%. При этом коэффициенты корреляции потоков между доменами не превышают 0,3, что позволяет говорить о независимости предикторов. Следовательно, доминирующим источником скрытого тепла в Северной Атлантике является субтропический круговорот. Для Северной Атлантики в целом для интервала 1975–1990 гг. характерен практически линейный рост потока от 62 до 72 Вт/м², т.е. для этого временного интервала междекадная изменчивость отсутствует. На этом фоне выделяется декада 2000–2011 гг., в течение которой среднегодовой поток скрытого тепла уменьшился на 1,38 Вт/м². Из рис. 2, б–г следует, что максимальные среднегодовые потоки скрытого тепла наблюдаются в Гольфстриме, несколько меньшие – в субтропическом круговороте и минимальные – в субполярном круговороте. В субтропиче-

ском круговороте изменчивость потоков сходна с изменчивостью на всей акватории, а стабилизация потоков наблюдается после 2005 г.

Существенная междекадная изменчивость наблюдается в субполярном круговороте и в Гольфстриме. В 1990 г. в первом из них наблюдается максимум потоков, а во втором – минимум, однако в 2000–2011 гг. потоки в этих доменах стабилизируются.

Представленные в табл. 4 линейные тренды потоков скрытого тепла (статистически значимые тренды выделены жирным шрифтом) свидетельствуют о достаточно однородном росте потоков во все сезоны года на всей акватории Северной Атлантики и в субтропическом круговороте. В субполярном круговороте, как следует из рис. 3, в, линейные тренды не отражают изменчивость потоков. В Гольфстриме во все сезоны тренды положительные, однако они статистически значимы, в основном, во втором полугодии.

Межгодовая изменчивость среднегодовых потоков явного тепла представлена на рис. 4. Сравнение хода сглаженных кривых на рис. 3 и 4 позволяет говорить об их сходстве, поэтому некоторые авторы [12. С. 859] принимают суммарные потоки скрытого и явного тепла как характеристику взаимодействия океана и атмосферы. Основная разница проявляется в величинах потоков и их относительной роли в различных данных. Регрессионный анализ вклада потоков явного тепла от отдельных доменов в поток на всей акватории Северной Атлантики выявил, что 43% изменчивости вносит субполярный круговорот, 32% – течение Гольфстрим и 25% – субтропический круговорот, причём коэффициенты

корреляции между предикторами не превышают 0,3. Низкие коэффициенты корреляции позволяют говорить о том, что предикторы независимы. Из рис. 4 видно, что наибольшие потоки явного тепла наблюдаются в субполярном круговороте и в Гольфстриме, а в субтропическом круговороте они минимальны.

Междекадная изменчивость потоков явного тепла на акватории Северной Атлантики в целом проявляется в большей степени, чем для потоков скрытого тепла. Здесь явно выражен минимум в начале 1990-х гг., отсутствующий в потоках скрытого тепла. Для интервала 2000–2011 гг. стабилизация потоков выражена для Северной Атлантики в целом, а также в субтропическом круговороте и в Гольфстриме. В субполярном круговороте в этот временной интервал проявляется тенденция к снижению потоков.

Месячные и среднегодовой линейные тренды потоков явного тепла приведены в табл. 5. Для субтропического круговорота видна устойчивая тенденция к усилению потоков как для отдельных месяцев, так и для года в целом. В субполярном круговороте наблюдается обратная картина, хотя большинство отрицательных месячных трендов, как и среднегодовой, являются статистически незначимыми. Наименьшая изменчивость потоков явного тепла, оцениваемая по линейным трендам, проявляется в Гольфстриме. Для Северной Атлантики в целом можно говорить о статистически значимом увеличении ($0,29 \text{ Вт/м}^2/10 \text{ лет}$) потоков явного тепла, обусловленном положительными трендами месяцев второго полугодия.

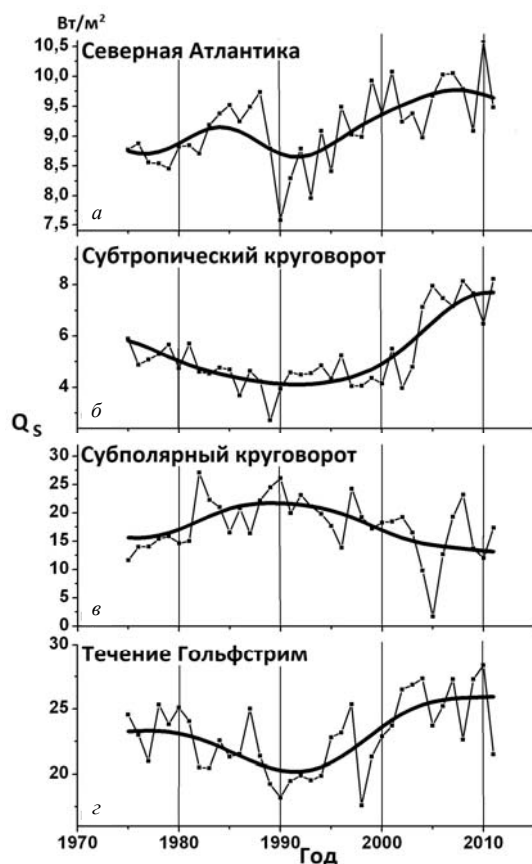


Рис. 4. Межгодовая изменчивость потока явного тепла: а – средней по Северной Атлантике; б – средней по домену 2; в – средней по домену 1; г – средней по домену 3

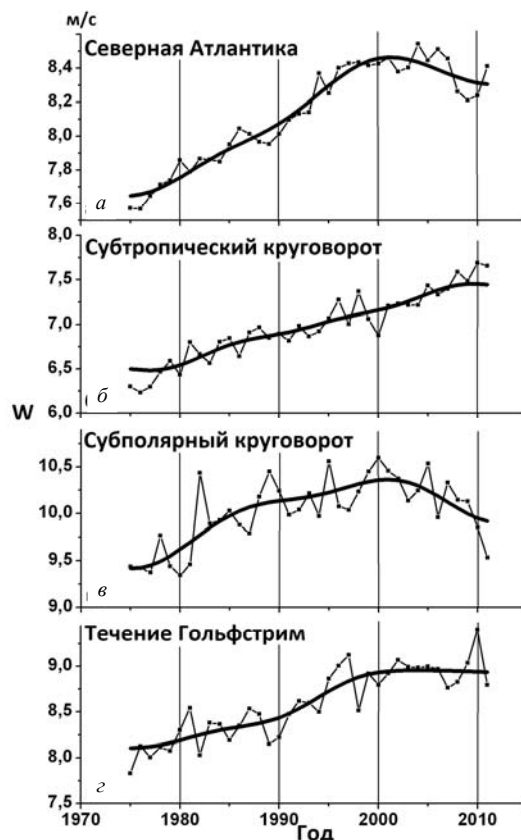


Рис. 5. Усреднённый по территории среднегодовой скалярный ветер на уровне 10 м: а – среднего по Северной Атлантике; б – среднего по домену 2; в – среднего по домену 1; г – среднего по домену 3

Линейные тренды потока скрытого тепла ($\text{Вт}/\text{м}^2/10$ лет) для всей акватории Северной Атлантики и для её отдельных доменов

Месяц	Субтропический Круговорот (домен 2)	Субполярный Круговорот (домен 1)	Течение Гольфстрим (домен 3)	Северная Атлантика
1	5,80	0,32	2,64	4,29
2	5,90	1,33	6,44	4,12
3	6,46	0,51	4,32	3,04
4	4,31	0,50	2,36	2,56
5	5,66	-0,83	5,37	3,08
6	4,11	0,91	3,87	3,04
7	6,69	0,13	3,67	4,02
8	7,58	0,52	3,90	3,95
9	7,58	1,30	6,41	4,64
10	7,13	-0,38	7,44	4,66
11	6,85	0,94	8,34	3,73
12	8,95	0,46	4,27	4,79
Год	6,24	1,02	4,84	3,96

Для того, чтобы понять механизмы изменчивости тепловых потоков, рассмотрим временную изменчивость входящих в формулы (1) и (2) градиентов влажности Δq и температуры ΔT в приводном слое атмосферы и

временную изменчивость среднего по территории скалярного ветра W . Для Δq и ΔT результаты представлены на рис. 6, а для W – на рис. 5. Сравнение этих кривых с рис. 3, 4 позволяет сделать некоторые заключения.

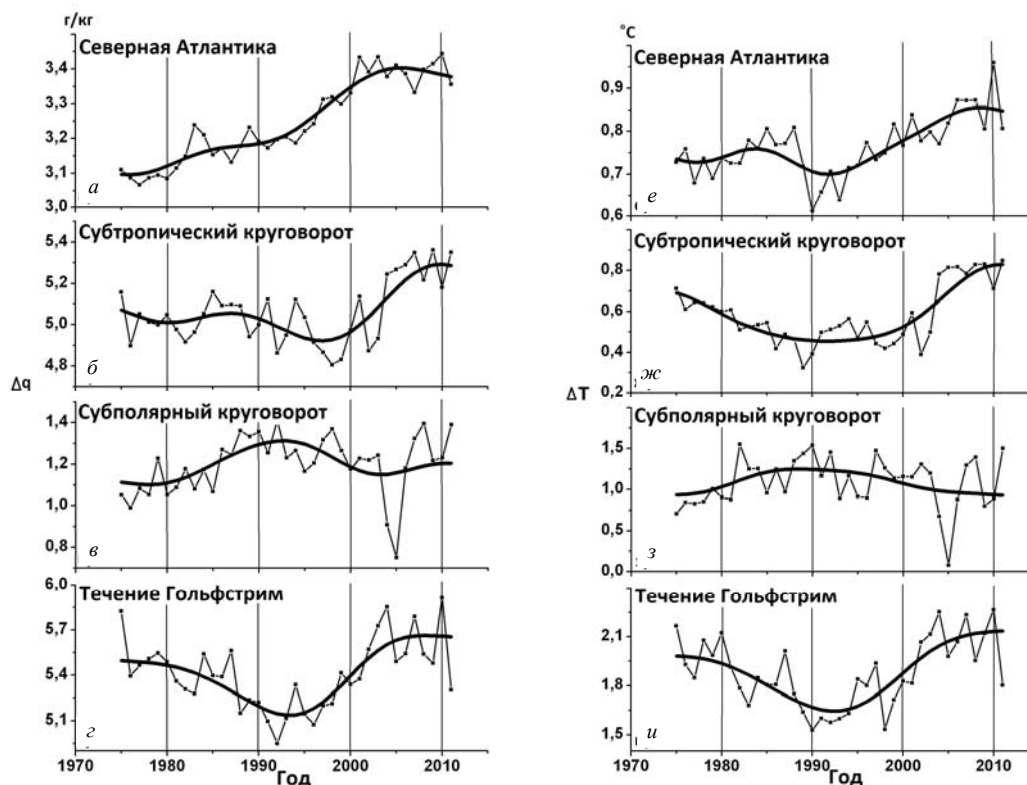


Рис. 6. Разности удельных влажностей воздуха (a–г) и температур (e–и) в Северной Атлантике и отдельных доменах

Линейные тренды потока явного тепла ($\text{Вт}/\text{м}^2/10$ лет) для всей акватории Северной Атлантики и для её отдельных доменов

Месяц	Субтропический Круговорот (домен 2)	Субполярный Круговорот (домен 1)	Течение Гольфстрим (домен 3)	Северная Атлантика
1	0,74	-1,91	0,60	0,26
2	0,72	-0,40	2,92	-0,11
3	1,12	-4,48	0,95	-0,04
4	0,40	-0,63	-0,06	-0,28
5	0,60	0,28	1,03	0,47
6	0,36	1,08	0,50	0,33
7	0,53	1,52	0,32	0,51
8	0,53	0,85	0,39	0,60
9	0,46	0,56	0,28	0,44
10	0,77	-0,71	1,03	0,54
11	0,81	-0,31	2,27	0,20
12	1,11	-0,84	1,01	0,66

Год	0,64	-0,30	0,83	0,29
-----	------	-------	------	------

Для акватории Северной Атлантики в целом в межгодовой ход потоков скрытого тепла (рис. 3, *а*) вносят вклад как градиент удельной влажности (рис. 6, *а*), так и скалярный ветер (рис. 5, *а*), причём оба этих фактора вносят вклад в замедление и даже некоторый спад теплового потока в 2000–2011 гг.

В субтропическом круговороте почти линейный рост потока скрытого тепла (рис. 3, *б*) соответствует подобному же росту скалярного ветра (рис. 5, *б*), однако минимум в градиенте удельной влажности в конце 1990-х гг. (рис. 6, *б*) не вносит заметного вклада в ход потока тепла, так что в этом временном промежутке прирост скорости ветра компенсирует спад в градиенте удельной влажности. Для декады 2000–2011 гг. стабилизация потока скрытого тепла после 2005 г. обусловлена стабилизацией градиента влажности, скорость ветра в этой декаде продолжает расти.

В субполярном круговороте, как это следует из рис. 3, *в* и 6, *в*, изменчивость потока скрытого тепла обусловлена изменчивостью градиента удельной влажности. Рост этих характеристик до 1990 г. и последующий спад объясняются динамикой интенсивности субполярного круговорота. До 1990 г. он интенсифицировался, а после 1990 г. ослаблялся [18. Т. 304. С. 555]. Это ослабление связывается как с ослаблением термохалинной циркуляции [19. С. 655; 20. С. L24606], так и с переходом в середине 1930-х гг. индекса NAO в отрицательную фазу [21. С. 661]. В Гольфстриме (рис. 3, *г*, 6, *г*) поток скрытого тепла и градиента удельной влажности находятся в противофазе с аналогичными потоками в субполярном круговороте, однако здесь также проявляется заметная роль градиента удельной влажности в управлении потоком тепла.

В субполярном круговороте и в Гольфстриме в декаду 2000–2011 гг. происходит стабилизация потоков скрытого тепла и градиентов удельной влажности, а в Гольфстриме кроме того стабилизируется ветер. В субполярном круговороте ветер в эту декаду снижается.

Обсуждение результатов и выводы

В этом разделе мы рассмотрим взаимосвязи температуры поверхности океана и потоков тепла на поверхности. Для акватории Северной Атлантики в целом в период 1976–2000 гг. наблюдается близкий к линейному рост температуры поверхности океана (рис. 2, *а*). Близкое к этому поведение наблюдается для потока скрытого тепла (рис. 3, *а*) и скалярного ветра (рис. 5, *а*). Из физических соображений следовало бы ожидать, что рост доминирующего по величине теплового потока от поверхности – потока скрытого тепла, должен был бы приводить к уменьшению температуры поверхности океана, однако это не наблюдается. Здесь можно сослаться на работу [22. С. 527], в которой для поверхности свободного от морского льда глобального океана во временном интервале 1981–2005 гг. также приводятся одновременно возрастающие температура поверхности и поток скрытого тепла. Выше мы отметили, что в изменчивость потока скрытого тепла на всей акватории Се-

верной Атлантики преобладающий вклад вносит субтропический круговорот. Сопоставление рис. 2, *б*, 3, *б* с рис. 2, *а*, 3, *а* показывает подобие поведения температуры и потоков тепла в Северной Атлантике и в субтропическом круговороте. Сходное поведение этих двух характеристик может быть объяснено, если допустить, что как в субтропическом круговороте, так и в целом на акватории Северной Атлантики потоки скрытого тепла в рассматриваемый временной интервал управляются температурой поверхности океана, обусловленной циркуляцией и теплосодержанием его поверхностного слоя.

В ряде работ [12. С. 859; 23. С. 373] установлено, что во внетропической зоне Северной Атлантики на сезонных и годовых масштабах имеет место отрицательная обратная связь между температурой поверхности и тепловыми потоками, т.е. последние демпфируют аномалии температуры. В то же время отмечается [24. С. 2310], что такая связь характерна для тех регионов, где средние поверхностные течения не велики. В нашем случае такая связь отчётливо проявляется в субполярном круговороте. Здесь инициируемый ростом градиентов температуры и влажности (рис. 6, *в*, 3) рост тепловых потоков (рис. 3, *в*, 4, *в*) в 1990 г. привёл к понижению температуры поверхности океана (рис. 2, *в*). Что касается Гольфстрима, то здесь имеет место положительная обратная связь, т.е. вызванная адвекцией изменчивость температуры ведёт за собой изменения в потоках тепла (рис. 2, *г*, 3, *г*, 4, *г*). Отметим, что для Гольфстрима подобие в температуре и потоках не столь очевидно, как для субтропического круговорота. Так, минимальные значения потоков тепла в 1990 г. не привели к существенному увеличению температуры поверхности океана. В работе [25. С. 2361] показано, что в 1986–1989 гг. экмановская и геострофическая изменчивость дают значимый вклад в изменчивость температуры в Гольфстриме. В [26. С. 1214] из модельных исследований установлено, что доминирующим членом теплосодержания верхнего слоя океана в районе Гольфстрима 30°–45° с. ш., 40°–75° з. д. в 1992–1999 гг. является адвекция за счёт геострофических течений, а потоки тепла ведут себя так, что положительной аномалии теплосодержания отвечает больший сток тепла в атмосферу.

Физические механизмы формирования декадной и междекадная изменчивости интенсивно исследуются, однако окончательные выводы пока не получены [27. С. 73; 28. С. 2854; 29. С. 831]. Однако, как отмечается в [30. С. 439], достигнут консенсус в том, что долговременные изменения в термохалинной циркуляции играют ключевую роль в формировании пространственной и временной структуры температуры поверхности океана.

Таким образом, в 1975–2011 гг. в Северной Атлантике температура поверхности океана и потоки тепла у поверхности испытывают существенную междекадную изменчивость. Эти характеристики демонстрируют в 2000–2011 гг. стадию стабилизации на уровне, достигнутом к 2000 г., присущую также для подобных характеристик глобального океана.

В субтропическом круговороте, Гольфстриме и в целом на акватории Северной Атлантики в характере поведения потоков скрытого тепла заметно преобладающее влияние обусловленной адвективными течениями температуры поверхности океана.

В субполярном круговороте, напротив, температура поверхности океана управляется формируемыми атмосферой потоками скрытого и явного тепла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gillett N.P., Graof H.F., Osborn T.J. Climate change and North Atlantic Oscillation // The North Atlantic Oscillation. Climate Significance and Environmental Impact. Geophysical Monograph 134. AGU. Washington, DC, 2003. P. 193–209.
2. Bronnimann S., Hoxli E., Casty C., Panting A., Luterbacher J. ENSO influence on Europe during the last centuries // Clim. Dyn. 2007. V. 28. P. 181–197.
3. Физические основы климата и его моделирования. Труды международной научной конференции, организованной ВМО и МСНС при поддержке Программы ООН по окружающей среде (Стокгольм, 29 июля – 10 августа 1974 г.). Л.: Гидрометеиздат, 1977. 271 с.
4. Ланно 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.
5. Гулев С.К., Калинин А.В., Ланно С.С. Синоптическое взаимодействие океана и атмосферы в средних широтах. СПб.: Гидрометеиздат, 1994. 320 с.
6. Kushnir Y. Interdecadal variations in North Atlantic sea surface temperature and associated atmospheric conditions // J. Climate. 1994. Vol. 7. P. 141–157.
7. Bunker A.F. Trends of variables and energy fluxes over the Atlantic ocean from 1948 to 1972 // Monthly weather review. 1980. Vol. 108. P. 720–732.
8. Покровский О.М. Изменение температуры поверхности океана в Северной Атлантике и колебания климата Европы // Исследования земли из космоса. 2005. № 4. С. 24–34.
9. Wu L., Liu Z. North Atlantic decadal variability: air-sea coupling, oceanic memory, and potential northern hemisphere resonance // J. Climate. 2005. Vol. 18. P. 331–349.
10. Deser C., Blackmon M.L. Surface Climate Variations over the North Atlantic Ocean during Winter: 1900 – 1989 // J. Climate. 1993. Vol. 6. P. 1743–1753.
11. Bjerknes J. Atlantic air-sea interaction // In Advances in Geophysics. 1964. Vol. 10. P. 1–82.
12. Cayan D.R. Latent and sensible heat flux anomalies over the northern ocean: driving the sea surface temperature // J. Phys. Oceanogr. 1992. V. 22. P. 859–881.
13. Yu L., Weller R.A., Sun B. Improving latent and sensible heat flux estimates for the Atlantic Ocean (1988–1999) // J. Climate. 2004. V. 17. P. 873–893.
14. Сарафанов А.А. Циркуляция и термохалинные характеристики вод субарктической Атлантики: среднее состояние и изменения в масштабе десятилетий: автореф. дис. ... д-ра географ. наук. М., 2013. 50 с.
15. Frankignoul C., Gaillardet H., Coetlogon, Gulf Stream. Variability and Ocean – Atmosphere Interactions // J. Phys. Oceanogr. 2001. Vol. 31. P. 3516–3529.
16. Diaz H.F., Murnane R.J., Eischeid J.K. Changes in the air – sea temperature difference of the North Atlantic for the past 50 years // AMS ANNUAL MEETINGS 2006. 18th conference, climate variability and change. P. 1–8.
17. Berry D.I., Kent E.C. A New Air-Sea Interaction Gridded Dataset from ICOADS with Uncertainty Estimates // Bull. AM. Met. Soc. 2009. Vol. 90, № 5. P. 645–656.
18. Hakkinen S., Rhines P.B. Decline of Subpolar North Atlantic Circulation During the 1990s. Science 304 555 (2004); DOI: 10.1126 / science.1094917.
19. Bryden H.L., Longworth H.R., Cunningham S.A. Slowing of the Atlantic meridional overturning circulation at 25°N // Nature. 2005. № 438. P. 655–657.
20. Send U., Landkhorst M., Konzov T. Observation of decadal change in the Atlantic meridional overturning circulation using 10 years of continuous transport data // Geophys. Res. Lett. 2011. V. 38. L. 240b doi: 10.1029 / 2011 GL 049801.
21. Li J.P., Wang J.X.L. A new North Atlantic OSCILLATION INDEX AND ITS VARIABILITY // Adv. Atmos. Sci. 2003. № 20. P. 661–676.
22. Yu L., Weller R.A. Objectively ANALYZED Air – Sea Heat Fluxes for the Global Ice-Free Oceans (1981–2005) // Bull. Am. Met. Soc. 2007. Vol. 88, № 4. P. 527–539.
23. Frankignoul C., Kestenoz E., Botzet M., Carril A.F., Drange H., Pardaens A., Terray L., Sutton R. An intercomparison between the surface heat flux feedback in life coupled modes, COADS and the NCEP reanalysis // Climat Dynamics. 2004. № 22 (4). P. 373–388.
24. Frankignoul C., Czaja A., Heveder K. Air – Sea Feedback in the North Atlantic and Surface Boundary Condition for Ocean Models // J. Climate. 1998. Vol. 11, № 9. P. 2310–2334.
25. Kelly K. A., Qiu B. Heat flux estimates for the western North Atlantic. Part II. The upper-ocean heat balance // J. Phys. Oceanogr. 1995. № 25. P. 2361–2373.
26. Dong S., Kelly K.A. Heat Budget in the Gulf Stream Region: The Important of Heat Storage and Advection // J. Phys. Oceanogr. 2004. Vol. 34. P. 1214–1231.
27. Полонский А.Б., Кузьмин А.С. Об изменчивости десятилетних колебаний гидрометеорологических величин в Северной Атлантике // Метеорология и гидрология. 2000. № 9. С. 73–88.
28. Seager R., Kushnir Y., Visbeck M., Naik N., Miller J., Kranmann G., Cullen H. Causes of Atlantic Ocean Climate variability between 1958 and 1998 // J. Climate. 2000. Vol. 13. P. 2845–2862.
29. Grotzner A., Latif M., Barnett T.P. A Decadal Climate Cycle in the North Atlantic Ocean as Simulated by the FCHO Coupled GCM // J. Climate. 1998. Vol. 11. P. 831–847.
30. Polyakov I.V., Alexeev V.A., Bhatt U.S., Polyakova E.I., Zhang X. North Atlantic warming: patterns of long-term trend and multidecadal variability // Clim. Dyn. 2010. Vol. 34. P. 439–457.

Статья представлена научной редакцией «Науки о Земле» 18 апреля 2014 г.

THE VARIABILITY OF THE SEA SURFACE TEMPERATURE AND THE HEAT FLUXES OVER THE NORTH ATLANTIC FROM 1975 TO 2011

Tomsk State University Journal. No. 385 (2014), 187–196. DOI: 10.17223/15617793/385/33

Moraru Evgenia I., Loginov Sergey V., Ippolitov Ivan I. Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IMCES SB RAS) (Tomsk, RF). Email: janey@sibmail.com

Keywords: sea surface temperature; latent and sensible heat fluxes; North Atlantic.

The interaction of the ocean and atmosphere plays an important role in the climate change. In the review of this paper we demonstrated the main relationships of the ocean-atmosphere system. For example, the atmosphere influences the characteristics of the surface ocean level, mainly, through the impact of wind, which changes the dynamic of the upper ocean level, and through the change of the cloud cover. The ocean influences the atmosphere through the turbulent fluxes of heat and moisture. The change of the sea surface temperature leads to the change of the latent and sensible heat fluxes, thereby, leads to the impact on the circulation and cloudiness. The circulation changes may occur not only in the advective and convective components of the air masses transport, but also in the changes of the cyclone characteristics which are formed over the ocean waters and continental areas. The purpose of this paper was studying the seasonal and interannual variability of the sea surface temperature, heat fluxes and their relationships over the North Atlantic for the period of the global warming from 1975 to 2011. The investigation of the hydro-meteorological variables over the North Atlantic, such as the sea surface temperature, latent and sensible heat fluxes based on the ship observation data ICOADS (International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set) with the spatial resolution $1^\circ \times 1^\circ$ and monthly temporal resolution from 1960 – 2011. Calculation error of the investigated variables was determined through the standard deviation. The significance of the standard deviation was evaluated by verifying of the null hypothesis with the significance level $\alpha = 0.05$. To study the temporal variability we calculated the relationships between the investigated variables based on the methods of the correlation analyses. Linear trend coefficients were determined by the regression equation with the significance level $\alpha = 0.1$. Based on the ship observation data ICOADS from 1975 to 2011 we calculated the temporal variability of the sea surface temperature and the sensible and latent heat fluxes over the North Atlantic and the separate domains such as the subtropical and subpolar gyres, and the Gulf Stream current. It was established that for the period of 1975 – 2011 a significant interdecadal variability of the investigate variables is observed. For the period 2000 – 2011 the stabilization stage of this data is observed. In the subtropical gyre, the Gulf Stream and over the entire North Atlantic the sea surface temperature influences the variability of the latent heat flux. In the subpolar gyre, in contrast, the sensible and latent heat fluxes impact the change of the sea surface temperature.

REFERENCES

1. Gillett N.P., Graof H.F., Osborn T.J. *Climate change and North Atlantic Oscillation*. In: Hurrell J.W. et al. (eds.) *The North Atlantic Oscillation. Climate Significance and Environmental Impact*. Geophysical Monograph 134. AGU. Washington, DC, 2003, pp. 193-209. DOI:10.1029/134GM09
2. Bronnimann S., Xoplaki E., Casty C., Panting A., Luterbacher J. ENSO influence on Europe during the last centuries. *Clim. Dyn.*, 2007, vol. 28, pp.181-197. DOI: 10.1007/s00382-006-0175-z
3. *Fizicheskie osnovy klimata i ego modelirovaniya. Trudy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, organizovannoy VMO i MSNS pri podderzhke Programmy OON po okruzhayushchey srede (Stokgol'm, 29 iyulya-10 avgusta 1974 g.)* [physical basis of climate and climate modeling. Proceedings of the International scientific conference organized by WMO and ICSU, with support of the United Nations Environment Programme (Stockholm, July 29-August 10, 1974)]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1977. 271p.
4. Lappo S.S., Gulev S.K., Rozhdestvenskiy A.E. *Krupnomasshtabnoe teplovoe vzaimodeystvie v sisteme okean-atmosfera i energoaktivnye oblasti mirovogo okeana* [Large-scale thermal interaction in the ocean-atmosphere system and energy active regions of the world ocean]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1990. 336 p.
5. Gulev S.K., Kalinko A.V., Lappo S.S. *Sinopticheskoe vzaimodeystvie okeana i atmosfery v srednikh shirotakh* [Synoptic interaction between the ocean and atmosphere in the middle latitudes]. St. Petersburg: Gidrometeoizdat Publ., 1994. 320 p.
6. Kushnir Y. Interdecadal variations in North Atlantic sea surface temperature and associated atmospheric conditions. *J. Climate*, 1994, vol. 7, pp. 141-157. DOI: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(1994\)007<0141:IVINAS>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(1994)007<0141:IVINAS>2.0.CO;2)
7. Bunker A.F. Trends of variables and energy fluxes over the Atlantic ocean from 1948 to 1972 in *Monthly weather review*, 1980. v. 108. pp. 720-732. DOI: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1980\)108<0720:TOVAEF>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1980)108<0720:TOVAEF>2.0.CO;2)
8. Pokrovskiy O.M. *Izmenenie temperatury poverkhnosti okeana v Severnoy Atlantike i kolebaniya klimata Evropy* [Change of the temperature of the ocean surface in the North Atlantic and climate variability in Europe]. *Issledovaniya zemli iz kosmosa*, 2005, no. 4, pp. 24-34.
9. Wu L., Liu Z. North Atlantic decadal variability: air-sea coupling, oceanic memory, and potential northern hemisphere resonance. *J. Climate*, 2005, vol. 18, pp 331-349. DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-3264.1>
10. Deser C., Blackmon M.L. Surface Climate Variations over the North Atlantic Ocean during Winter: 1900-1989. *J. Climate*, 1993, vol. 6, pp. 1743-1753. DOI: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006<1743:SCVOTN>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006<1743:SCVOTN>2.0.CO;2)
11. Bjerknes, J. Atlantic air-sea interaction. In *Advances in Geophysics*, 1964, vol. 10, pp. 1-82. DOI: 10.1016/S0065-2687(08)60005-9
12. Cayan D.R. Latent and sensible heat flux anomalies over the northern ocean: driving the sea surface temperature. *J. Phys. Oceanogr.*, 1992, vol. 22, pp. 859 – 881. DOI: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0485\(1992\)022<0859:LASHFA>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0485(1992)022<0859:LASHFA>2.0.CO;2)
13. Yu L., Weller R.A., Sun B. Improving latent and sensible heat flux estimates for the Atlantic Ocean (1988–1999). *J. Climate*, 2004, vol. 17, pp. 873 - 393. DOI: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<0373:ILASHF>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<0373:ILASHF>2.0.CO;2)
14. Sarafanov A.A. *Tsirkulyatsiya i termokhalinnye kharakteristiki vod subarkticheskogo Atlantiki: srednee sostoyanie i izmeneniya v masshtabe desyatiletiy*. Avtoreferat diss. d-ra geogr. nauk [Circulation and thermohaline characteristics of water of the Sub-Arctic Atlantic: average state and changes in the scale of decades. Abstract of Geography Dr. Diss.]. Moscow, 2013. 50 p.
15. Frankignoul C., de Coetlogon G., Joyce T.M., Dong Sh. Gulf Stream Variability and Ocean-Atmosphere Interactions. *J. Phys. Oceanogr.*, 2001, vol. 31. pp. 3516-3529. DOI: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0485\(2002\)031<3516:GSVAOA>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0485(2002)031<3516:GSVAOA>2.0.CO;2)
16. Diaz H.F., Murnane R.J., Eischeid J.K. Changes in the air-sea temperature difference of the North Atlantic for the past 50 years. *AMS ANNUAL MEETINGS 2006. 18th conference, climate variability and change*, 2006, p. 1-8.
17. Berry D.I., Kent E.C. A New Air-Sea Interaction Gridded Dataset from ICOADS with Uncertainty Estimates. *Bull. Am. Met. Soc.*, 2009, vol. 90, issue 5, pp. 645-656. DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/2008BAMS2639.1>
18. Hakkinen S., Rhines P.B. Decline of Subpolar North Atlantic Circulation During the 1990s. *Science*, 2004, vol. 304, pp. 555-559. DOI: 10.1126/science.1094917.
19. Bryden H.L., Longworth H.R., Cunningham S.A. Slowing of the Atlantic meridional overturning circulation at 25°N. *Nature*, 2005, vol. 436. pp. 655-657. DOI: 10.1038/nature03929
20. Send U., Landkhorst M., Konzov T. Observation of decadal change in the Atlantic meridional overturning circulation using 10 years of continuous transport data. *Geophys. Res. Lett.*, 2011, vol. 38, issue 24. DOI: 10.1029/2011GL 049801
21. Li J.P., Wang J.X.L. A new North Atlantic Oscillation index and its variability. *Adv. Atmos. Sci.*, 2003, vol. 20, issue 5, pp. 661-676. DOI: 10.1007/BF02915394
22. Yu L., Weller R.A. Objectively Analyzed Air–Sea Heat Fluxes for the Global Ice-Free Oceans (1981-2005). *Bull. Am. Met. Soc.*, 2007. vol. 88, issue 4, pp. 527-539. DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-88-4-527>

23. Frankignoul C., Kestenoz E., Botzet M., Carril A.F., Drange H., Pardaens A., Terray L., Sutton R. An intercomparison between the surface heat flux feedback in life coupled modes, COADS and the NCEP reanalysis. *Climate Dynamics*, 2004, vol. 22 (4), pp. 373-388. DOI: 10.1007/s00382-003-0388-3
24. Frankignoul C., Czaja A., Heveder K. Air–Sea Feedback in the North Atlantic and Surface Boundary Condition for Ocean Models. *J. Climate*, 1998, vol. 11, issue 9, pp. 2310-2334. DOI: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(1998\)011<2310:ASFITN>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(1998)011<2310:ASFITN>2.0.CO;2)
25. Kelly K.A., Qiu B. Heat flux estimates for the western North Atlantic. Part II. The upper-ocean heat balance // *J. Phys. Oceanogr.*, 1995, vol. 25, pp. 2361-2373. DOI: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0485\(1995\)025<2361:HFEFTW>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0485(1995)025<2361:HFEFTW>2.0.CO;2)
26. Dong S., Kelly K.A., Heat Budget in the Gulf Stream Region: The Important of Heat Storage and Advection. *J. Phys. Oceanogr.*, 2004, vol. 34, pp. 1214-1231. DOI: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0485\(2004\)034<1214:HBITGS>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0485(2004)034<1214:HBITGS>2.0.CO;2)
27. Polonskiy A.B., Kuz'min A.S. Ob izmenchivosti desyatiletnikh kolebaniy gidrometeorologicheskikh velichin v Severnoy Atlantike [The variability of decadal oscillations of meteorological variables in the North Atlantic]. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2000, no. 9, pp. 73-88.
28. Seager R., Kyshnir Y., Visbeck M., Naik N., Miller J., Kranmann G., Cullen H. Causes of Atlantic Ocean Climate variability between 1958 and 1998. *J. Climate*, 2000, vol. 13, pp. 2845-2862. DOI: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<2845:COAOCV>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<2845:COAOCV>2.0.CO;2)
29. Grotzner A., Latif M., Barnett T.P. A Decadal Climate Cycle in the North Atlantic Ocean as Simulated by the FCHO Coupled GCM. *J. Climate*, 1998, vol. 11, pp. 831-847. DOI: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(1998\)011<0831:ADCCIT>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(1998)011<0831:ADCCIT>2.0.CO;2)
30. Polyakov I.V., Alexeev V.A., Bhatt U.S., Polyakova E.I., Zhang X. North Atlantic warming: patterns of long-term trend and multidecadal variability. *Clim. Dyn.*, 2010, vol. 34, pp. 439-457. DOI: 10.1007/s00382-008-0522-3

Received: 18 April 2014