

УДК 551.46(261)

К МЕХАНИЗМУ ФОРМИРОВАНИЯ АНОМАЛИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ВЕРХНЕМ СЛОЕ СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ

© 2018 г. А. Б. Полонский¹, *, П. А. Сухонос¹, **¹Институт природно-технических систем, Севастополь, Россия

*e-mail: apolonsky5@mail.ru

**e-mail: pasukhonis@mail.ru

Поступила в редакцию 05.05.2015 г.

После доработки 27.12.2016 г.

Проводится анализ роли различных факторов, формирующих аномалии адвективного переноса тепла межгодового—десятилетнего масштаба в верхнем квазиоднородном слое Северной Атлантики по данным океанического ре-анализа ORA-S3 за 1959–2011 гг. Выявлены области, в которых аномалии горизонтальной адвекции тепла определяются изменениями интенсивности течений, вариациями температурных градиентов и их совместным влиянием. Показано, что вклад различных слагаемых, описывающих аномалии адвективного переноса тепла в верхнем квазиоднородном слое, в суммарные аномалии адвективного происхождения принципиально изменяется от одного течения Северной Атлантики к другому. В области Гольфстрима (после его отрыва от континентального склона) аномалии горизонтальной адвекции тепла в верхнем квазиоднородном слое обусловлены в основном колебаниями интенсивности течения, а в Гвианском течении и области Гольфстрима (до его отрыва) — вариациями горизонтальных температурных градиентов в верхнем квазиоднородном слое. В Лабрадорском течении оба этих механизма одного знака и примерно одинаковы по абсолютной величине. В Восточно-Гренландском течении они компенсируют друг друга. Вклад аномалий горизонтальных градиентов температуры, переносимых аномальными течениями, в формирование аномалий адвективного переноса тепла в верхнем слое Северной Атлантики в целом по акватории невелик. Исключение составляют области Североатлантического и Западно-Гренландского течений.

DOI: 10.1134/S003015741805012X

ВВЕДЕНИЕ

Аномалии температуры поверхности океана (АТПО) межгодового—десятилетнего масштаба оказывают значительное влияние на климатическую систему (см., например, [7]). Однако факторы, отвечающие за формирование аномалий поля температуры вод Северной Атлантики, эволюция этих аномалий и их влияние на крупномасштабные процессы в системе океан—атмосфера все еще остаются предметом широкой дискуссии. Одни авторы считают, что изменения концентрации атмосферных аэрозолей, которые влияют на облачность над акваторией океана и результирующие тепловые потоки, — важный фактор в генерации межгодовых АТПО [19]. Другие настаивают на том, что существенную роль в формировании аномалий температуры верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) играют вариации потерь скрытого тепла за счет изменчивости поля ветра и коротковолновой радиации [20]. Третьи указывают на ведущую роль меридиональной циркуляции Северной Атлантики в генерации аномалий температуры верхнего слоя океана [6]. Причем, по мне-

нию большинства авторов, на межгодовом масштабе атмосфера играет ведущую роль в формировании таких аномалий [7, 22, 30], а более долгопериодные изменения в поле температуры воды обусловлены адвекцией тепла течениями и горизонтальным перемешиванием (или, по терминологии некоторых авторов, макротурбулентностью) [3, 4, 8, 10]. Вместе с тем некоторые модельные исследования (например, [16, 29]) показывают, что долгоживущие аномалии, генерируемые в атмосфере, могут вызывать изменения термохалинной циркуляции в Северной Атлантике десятилетнего масштаба.

В настоящее время для выяснения причин, обуславливающих формирование температурных аномалий, используются регулярные данные о температуре воды и трехмерном поле течений за длительный период, содержащиеся в продуктах ре-анализов. В частности, анализ величин слагаемых уравнения теплового баланса ВКС, оцененных по этим данным для акватории Северной Атлантики, позволил определить степень влияния основных из перечисленных выше механизмов на

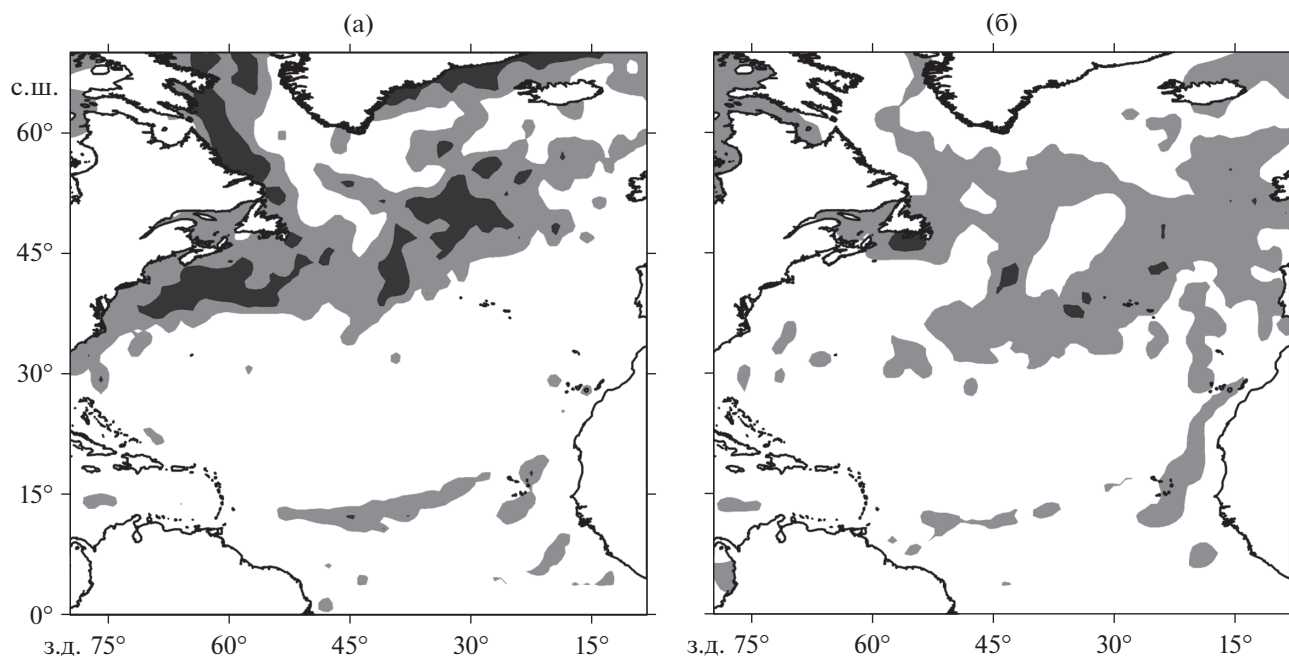


Рис. 1. Отношение (в %) дисперсии межгодовых вариаций суммарной горизонтальной адвекции тепла (а) и суммарных тепловых потоков на верхней границе ВКС (б) к дисперсии среднегодовой температуры ВКС за период 1959–2011 гг. Светло-серым цветом показаны величины более 20%, темно-серым – более 40%. Рисунок подготовлен в соответствии с результатами работы [9].

изменчивость среднегодового бюджета тепла в ВКС межгодового–десятилетнего масштаба [9]. В цитируемой работе показано, что вклад тепловых потоков на границе океан–атмосфера в бюджет тепла верхнего слоя океана на этом масштабе существенен во внутренних и восточных частях субтропического и субполярного круговоротов (рис. 1). Однако в окрестностях интенсивных течений низкочастотная изменчивость температуры ВКС определяется балансом адвективных переносов тепла и горизонтального турбулентного обмена, что в целом подтверждается результатами анализа архивных океанографических и гидрометеорологических данных [8], а также модельными расчетами [17]. При этом в тропических широтах баланс тепла квазистационарен и определяется вариациями вертикальной адвекции тепла и горизонтального перемешивания.

Уточненные оценки изменчивости ТПО за счет аномалий адвективного переноса тепла важны для понимания механизмов климатической изменчивости. Один из методов получения таких оценок заключается в количественном анализе распространения аномально теплых или холодных вод в верхнем слое океана. Время адвективного переноса определяется по величине запаздывания между временными рядами АТПО в отдаленных районах, оцениваемой с использованием взаимной корреляционной функции [14, 25, 32]. Недостаток такого подхода заключается в том, что вре-

менной сдвиг, соответствующий экстремуму корреляционной функции, не всегда может соответствовать времени адвекции АТПО океаническими течениями, поскольку величины АТПО определяются и другими механизмами (взаимодействием с атмосферой, вихревой динамикой и др.). Кроме этого, сама по себе высокая корреляционная связь не подразумевает наличие причинно-следственной взаимосвязи между рассматриваемыми временными рядами [33].

В работе [27] на основании архивных данных о ТПО и с использованием инверсного метода [28] оценены аномалии бюджета тепла ВКС в Северной Атлантике и скорости адвективных переносов АТПО для летнего сезона. Оказалось, что скорости перемещения тепловых аномалий, полученные в цитируемой работе для района Гольфстрима и Североатлантического течения, – порядка 10 см/с, т.е. существенно меньше, чем наблюдаемые скорости поверхностных течений. Причем часть аномалий переносится системой струйных течений в северо-восточном направлении, а часть рециркулирует в области распространения рингов Гольфстрима. Это подтверждает важную роль горизонтального турбулентного обмена в тепловом балансе верхнего слоя океана на анализируемых масштабах.

Согласно работе [5], генерация аномалий поля температуры ВКС может происходить за счет аномальных потоков, приходящих либо “сверху”

(вариации потоков скрытого и явного тепла), либо “сбоку” (перенос климатических градиентов поля температуры аномальными течениями), либо “снизу” (аномальное вовлечение нижележащих вод). При этом автор цитируемой работы считает крупномасштабную циркуляцию вод главным механизмом, перераспределяющим термические аномалии, а затухание аномалий, по его мнению, связано с горизонтальным перемешиванием и отрицательной обратной связью в системе океан–атмосфера. В работе [11] отмечается, что возникновение положительных аномалий температуры воды происходит при повышении интенсивности теплых течений. Однако, как показано в статье [21], адвекция средней температуры аномальными течениями не может быть единственным источником аномалий температуры поверхностных слоев океана.

Таким образом, опубликованы различные точки зрения на преобладающие механизмы генерации АТПО межгодового–десятилетнего масштаба, но значительная часть авторов настаивает на важности адвекции тепла в формировании наблюдаемой изменчивости характеристик ВКС на этом масштабе. Причем детальный анализ роли различных факторов в формировании аномалий адвективного переноса тепла в ВКС на межгодовых–десятилетних масштабах по однородным и длительным данным ре-анализа не выполнялся. Целью настоящей работы является анализ вклада различных механизмов, формирующих аномалии горизонтальной адвекции тепла в ВКС, на основе данных ре-анализа ORA-S3.

ДАнные И МЕТОДИКА ИХ ОБРАБОТКИ

В работе использованы среднемесячные данные о температуре верхнего слоя океана, зональной и меридиональной компонентах вектора скорости течений и глубине ВКС за период 1959–2011 гг. из океанического ре-анализа ORA-S3 [12]. Пространственное разрешение данных ре-анализа составляет $1^\circ \times 1^\circ$, а в экваториальной зоне ($\pm 10^\circ$ широты) – 0.3° в меридиональном направлении и 1° в зональном. На основании этих данных для каждого месяца рассчитывались: зональные (U) и меридиональные (V) составляющие вектора течений, зональные (T_X) и меридиональные (T_Y) градиенты температуры, а также зональная (UT_X) и меридиональная (VT_Y) адвекция тепла в пределах переменной по пространству и времени толщины ВКС. Суммарная горизонтальная адвекция тепла в ВКС определялась следующим образом:

$$V_H \cdot \text{grad}_H T = \sqrt{(UT_X)^2 + (VT_Y)^2}, \quad (1)$$

где V_H и $\text{grad}_H T$ – скорость течений и горизонтальный градиент температуры в ВКС соответственно.

Затем были получены среднегодовые и средне-многолетние величины путем усреднения за каждый год и за весь исследуемый период соответственно. Далее в узлах регулярной пространственной сетки производилось разделение адвективных переносов тепла на средние величины и аномалии по следующей методике.

Пусть горизонтальные градиенты температуры и компоненты вектора течений представляют собой сумму средней климатической величины ($\bar{\quad}$) и среднегодовых отклонений (\prime) от нее:

$$\begin{aligned} U &= \bar{U} + U', & V &= \bar{V} + V', \\ T_X &= \bar{T}_X + T'_X, & T_Y &= \bar{T}_Y + T'_Y. \end{aligned} \quad (2)$$

Тогда зональная и меридиональная адвекция тепла в ВКС примет следующий вид:

$$\begin{aligned} UT_X &= (\bar{U} + U') \cdot (\bar{T}_X + T'_X) = \\ &= \bar{U}\bar{T}_X + \bar{U}T'_X + U'\bar{T}_X + U'T'_X, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} VT_Y &= (\bar{V} + V') \cdot (\bar{T}_Y + T'_Y) = \\ &= \bar{V}\bar{T}_Y + \bar{V}T'_Y + V'\bar{T}_Y + V'T'_Y. \end{aligned} \quad (4)$$

Из (3) и (4) следует, что аномалии зональной и меридиональной адвекции тепла определяются суперпозицией следующих механизмов, ответственных за формирование аномалий температуры воды:

- 1) переносом аномальных градиентов температуры средним течением;
- 2) переносом климатических градиентов температуры аномальными течениями;
- 3) переносом аномалий градиента температуры аномальными течениями.

После этого по полученным временным рядам компонентов межгодовых аномалий зональной и меридиональной адвекции тепла вычислялась дисперсия для всей сеточной области. Затем определялось отношение дисперсии отдельных компонентов к полной дисперсии аномалий зональной и меридиональной адвекции тепла в ВКС. По величине указанного отношения для каждого слагаемого можно определить, преимущественно за счет каких факторов происходит формирование аномалий адвективных переносов тепла в ВКС межгодового–десятилетнего масштаба.

Для определения характерных временных масштабов изменчивости горизонтальной адвекции тепла ВКС в Северной Атлантике применялся стандартный спектральный анализ [1]. Перед проведением спектрального анализа из времен-

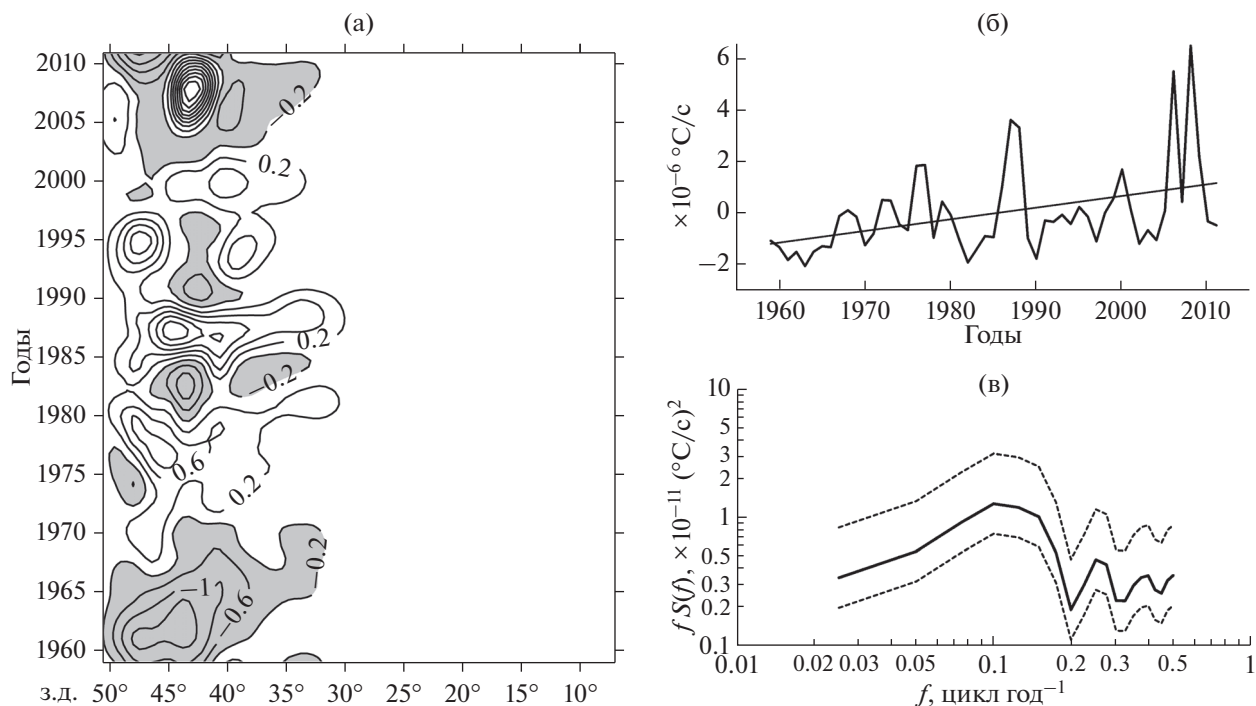


Рис. 2. Межгодовая изменчивость аномалий суммарной горизонтальной адвекции тепла в ВКС ($\times 10^{-6}$ °C/c) на 45° с.ш. за 1959–2011 гг. (а), временной ряд в точке с координатами 45° с.ш. 44° з.д. с линейным трендом (б) и его спектр после удаления линейного тренда (в). Области отрицательных аномалий на рис. 2а затемнены. Пунктирные линии на рис. 2в – 95% доверительные интервалы.

ных рядов предварительно удалялись среднее значение и линейный тренд. Спектр рассчитывался по среднегодовым величинам за весь исследуемый период с использованием спектрального окна Тьюки. Длина корреляционной функции составляла 20 лет, что позволило обеспечить 7 степеней свободы. Доверительные интервалы рассчитывались с помощью χ^2 -распределения. Спектральные плотности приводятся в би-логарифмических координатах.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Пространственно-временные диаграммы аномалий адвективных переносов тепла в ВКС межгодового–десятилетнего масштаба позволяют выделить чередование положительных и отрицательных аномалий, приуроченных к основным течениям Северной Атлантики. В качестве примера на рис. 2а приведена долготно-временная диаграмма для аномалий суммарной горизонтальной адвекции тепла в ВКС на 45° с.ш., характеризующая межгодовую изменчивость адвективных переносов тепла в системе Гольфстрим–Североатлантическое течение. По пространственно-временной структуре аномалий можно заключить об интенсивном смещении оси течения на межгодовых масштабах. В этой области отмечается так-

же наибольшая дисперсия аномалий горизонтальной адвекции тепла в ВКС в Северной Атлантике. Временной ряд аномалий суммарной горизонтальной адвекции тепла в ВКС на 45° с.ш. и 44° з.д. характеризуется значимым (на 99% уровне) положительным линейным трендом, что можно интерпретировать как усиление переносов тепла в ВКС в системе Гольфстрим – Североатлантическое течение (рис. 2б). На это ранее указывалось в работах [2, 15]. При этом сообщалось и об увеличении расходов Гольфстрима. Спектральный анализ приведенного на рис. 2в ряда позволяет выделить на значимом уровне десятилетний масштаб изменчивости адвективных переносов и межгодовые колебания с периодами около 4 лет (рис. 2в). Причем амплитуда десятилетних колебаний соизмерима с величиной трендовой компоненты, оцененной по данным за весь анализируемый период.

Анализ отношения дисперсии отдельных компонентов к полной дисперсии аномалий зональной и меридиональной адвекции тепла в ВКС позволяет выделить области с преобладающим механизмом формирования аномалий адвективных переносов тепла в Северной Атлантике.

Аномалии зональной адвекции тепла в ВКС, связанные с вариациями зонального компонента вектора течений, важны на большей части аква-

тории Северной Атлантики. Отношение дисперсии этих аномалий к общей дисперсии зональной адвекции тепла превышает 50% в восточной части экваториальной области, в окрестности 10° с.ш., в центральной части субтропического и субполярного круговоротов, а также в области отрыва Гольфстрима от континентального склона и Лабрадорском течении (рис. 3а). Аномалии меридиональной адвекции тепла, обусловленные флуктуациями меридионального компонента скорости течений, вносят основной вклад (более 50%) в суммарную дисперсию аномалий меридиональной адвекции тепла в пассатной зоне, Лабрадорском течении и центральной части субполярного круговорота (рис. 3б).

Аномалии зональной адвекции тепла в ВКС, возникающие за счет аномальных градиентов температуры, характеризуются наибольшей дисперсией в Гвианском течении, области Гольфстрима (до его отрыва от континентального склона), в Северном пассатном течении и в Межпассатном противотечении (рис. 3в). Дисперсия аномалий меридиональной адвекции тепла в ВКС, вызванных изменениями меридионального градиента температуры, высока в центральных областях тропического и субтропического круговоротов. Её отношение к полной дисперсии аномалий меридиональной адвекции тепла составляет здесь более 50%. В Гвианском течении и области Гольфстрима до его отрыва от континентального склона вклад этого механизма в дисперсию аномалий меридиональной адвекции тепла превышает 80% (рис. 3г).

Отношение дисперсии аномалий зональной адвекции тепла в ВКС, сформированных аномалиями градиента температуры, переносимых аномальными течениями, к суммарной дисперсии аномалий зональной адвекции тепла невелико на большей части акватории Северной Атлантики. Исключение составляют центральная часть Экваториальной Атлантики (где доля этого механизма достигает 80%) и зоны рециркуляции Гольфстрима и Лабрадорского течения (до 50%) (рис. 3д). Отношение дисперсии аномалий меридиональных градиентов температуры ВКС, переносимых аномальными течениями, к общей дисперсии аномалий меридиональной адвекции тепла велико (более 50%) в области Североатлантического и Западно-Гренландского течений. На остальной части акватории Северной Атлантики отношение дисперсии этого компонента к полной дисперсии аномалий меридиональной адвекции тепла в ВКС невелико (рис. 3е).

Таким образом, аномалии горизонтальной адвекции тепла в ВКС в областях Гвианского течения и Гольфстрима до его отрыва от континентального склона в значительной степени формируются за счет вариаций градиентов температуры.

Аномалии горизонтальной адвекции тепла в ВКС в окрестности субполярного круговорота обусловлены в основном изменениями интенсивности течений. Величина аномалий горизонтального градиента температуры ВКС, переносимых аномальными течениями, в целом по акватории Северной Атлантики мала. Исключение составляют аномалии зональной адвекции тепла в центральной части Экваториальной Атлантики и аномалии меридиональной адвекции тепла в окрестностях Североатлантического и Западно-Гренландского течений.

Анализ временных рядов отдельных компонентов аномальной горизонтальной адвекции тепла в ВКС в интенсивных течениях показал следующее. После отрыва Гольфстрима от континентального склона и в Восточно-Гренландском течении аномалии зональной адвекции тепла практически полностью определяют изменения температуры ВКС. Большая часть амплитуды межгодовых—десятилетних аномалий адвекции тепла в этой области Гольфстрима обусловлена флуктуациями интенсивности течения. При этом (меньшие по абсолютной величине) аномалии адвекции тепла, вызванные вариациями градиента температуры, совпадают с ними по знаку (рис. 4а). Значение коэффициента корреляции между временными рядами этих аномалий составляет 0.83. В Восточно-Гренландском течении межгодовые аномалии зональной адвекции тепла, сформированные переносом аномальных градиентов температуры и флуктуациями скорости течения, имеют разные знаки и компенсируют друг друга (рис. 4б). Величина коэффициента корреляции между временными рядами этих аномалий составляет -0.53. При этом амплитуда аномалий зональной адвекции тепла, обусловленных вариациями скорости Восточно-Гренландского течения, превышает соответствующую величину аномалий адвекции тепла, связанных с изменениями градиента температуры. Этот факт и обуславливает преобладающую роль изменений интенсивности Восточно-Гренландского течения в генерации аномалий зональной адвекции тепла ВКС здесь. Такая ситуация может наблюдаться, когда положительной аномалии градиента температуры сопутствует ослабление интенсивности течения и наоборот.

В Лабрадорском и Гвианском течениях большая часть изменений температуры ВКС вызвана меридиональной адвекцией тепла. В Лабрадорском течении межгодовые—десятилетние аномалии меридиональной адвекции тепла, обусловленные вариациями градиентов температуры, и аномалии адвекции тепла, генерируемые за счет флуктуаций интенсивности течения, хорошо согласованы (величина коэффициента корреляции составляет 0.53) (рис. 4в). В Гвианском течении большая часть амплитуды аномалий меридио-

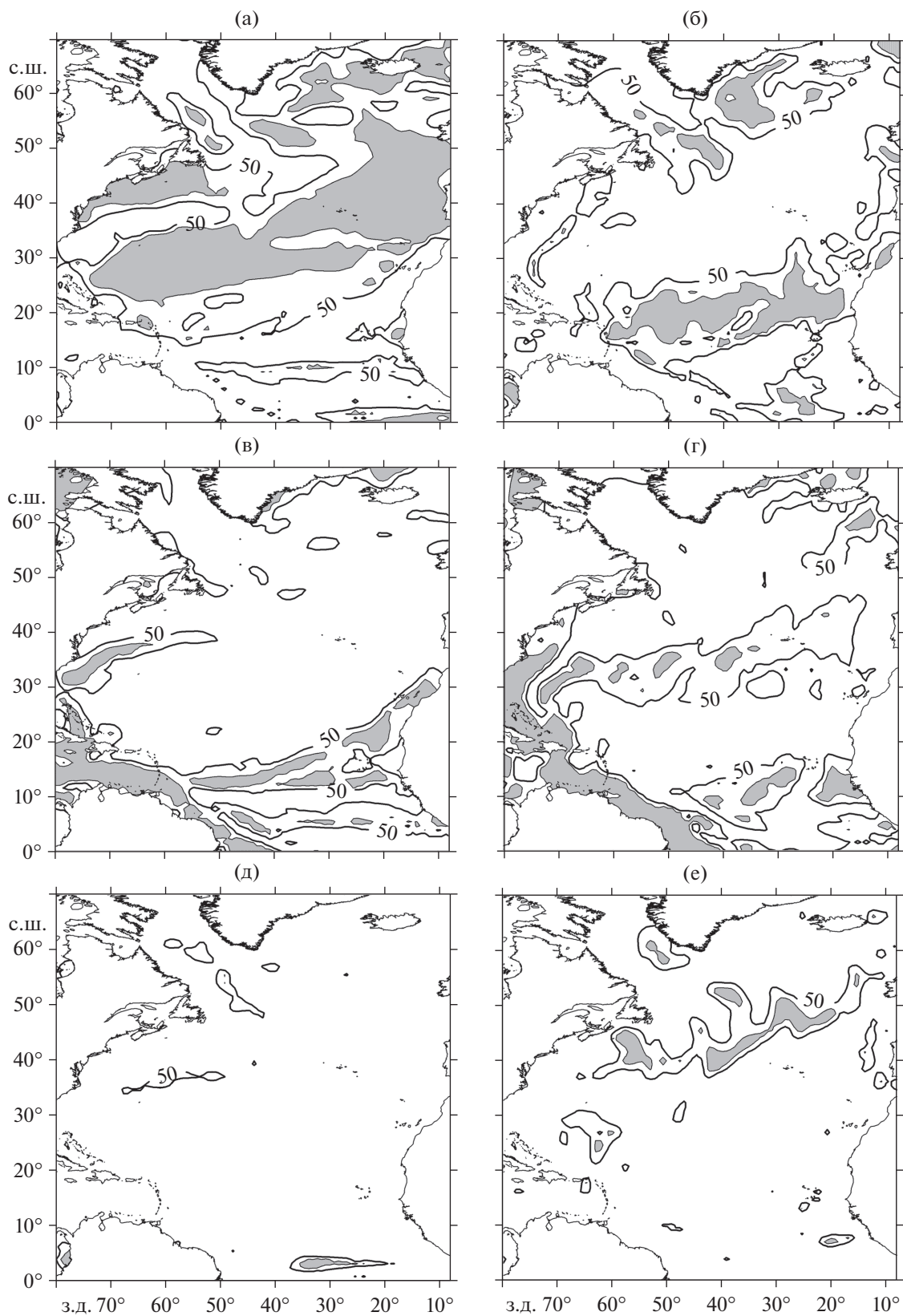


Рис. 3. Отношение (в %) дисперсии аномалий адвекции тепла в ВКС, переносящих средний градиент температуры аномальными течениями (а, б), аномалии градиента температуры средними течениями (в, г) и аномалии градиента температуры аномальными течениями (д, е) к суммарной дисперсии аномалий зонального (а, в, д) и меридионального (б, г, е) компонентов горизонтальной адвекции тепла. Показана изолиния 50%. Величины более 80% затемнены.

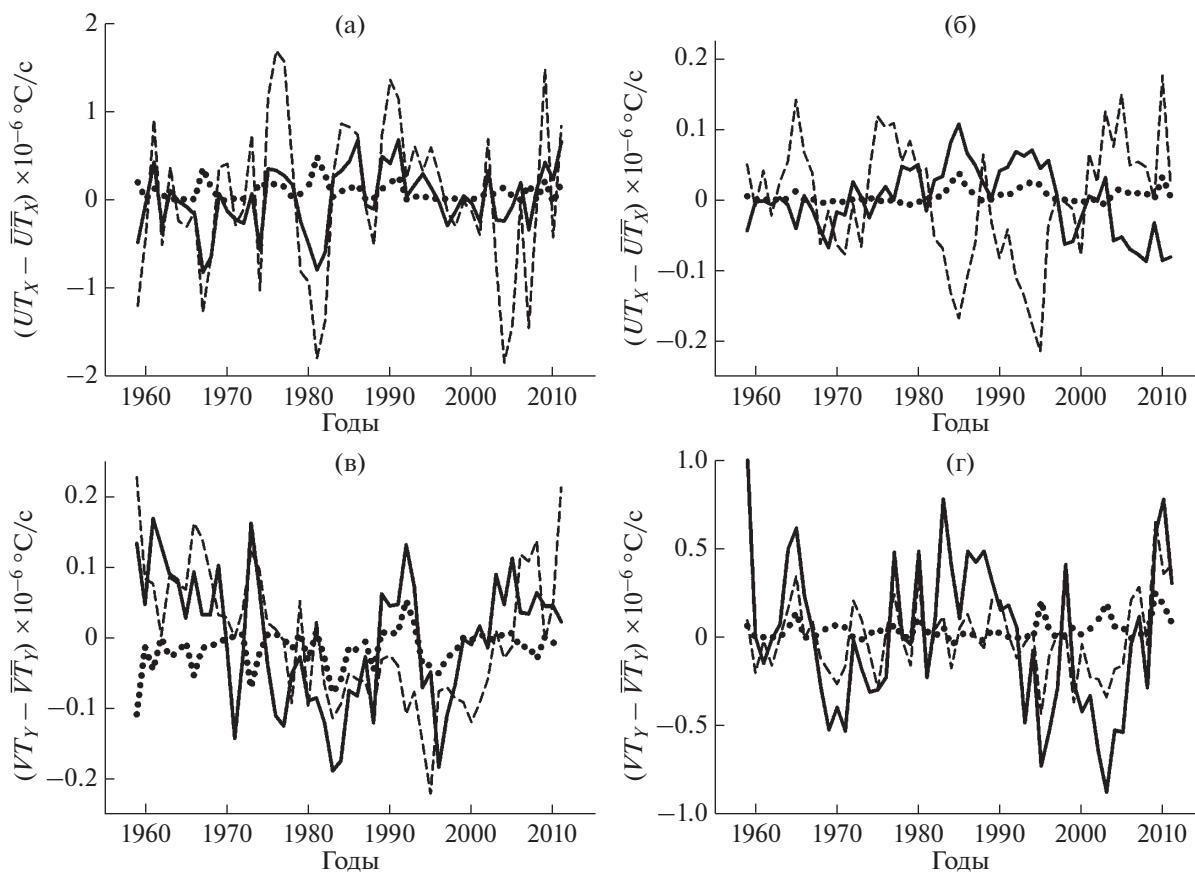


Рис. 4. Временные ряды компонентов аномалий зональной адвекции тепла в Гольфстриме (42° с.ш. 57° з.д.) (а) и Восточно-Гренландском течении (65° с.ш. 30° з.д.) (б), меридиональной адвекции тепла в Лабрадорском (51° с.ш. 54° з.д.) (в) и Гвианском (10° с.ш. 60° з.д.) (г) течениях. Сплошная линия — перенос аномалий градиента температуры средним течением ($\bar{U}'T'_X, \bar{V}'T'_Y$); пунктир — перенос климатических градиентов температуры аномальными течениями ($U'\bar{T}_X, V'\bar{T}_Y$); точками показан перенос аномалий градиента температуры аномальными течениями ($U'T'_X, V'T'_Y$).

нальной адвекции тепла в ВКС обусловлена в основном изменениями градиентов температуры. При этом аномалии меридиональной адвекции, вызванные флуктуациями скорости течения, согласованы с ними по знаку (значение коэффициента корреляции составляет 0.70), но меньше по величине (рис. 4г). Временные ряды аномалий горизонтального градиента температуры, переносимых аномальными течениями, характеризуются незначительной межгодовой—десятилетней изменчивостью. В целом этот компонент аномалий адвекции тепла не оказывает значительного влияния на генерацию аномалий горизонтальной адвекции тепла в ВКС в рассматриваемых течениях.

Таким образом, анализ показал, что в разных частях Северной Атлантики аномалии горизонтальной адвекции тепла в ВКС межгодового—десятилетнего масштаба формируются под влиянием различных механизмов.

ОБСУЖДЕНИЕ

Наличие высокоамплитудных десятилетних колебаний суммарной горизонтальной адвекции тепла в ВКС в динамической системе “Гольфстрим — Североатлантическое течение” подтверждает решающую роль адвективного переноса тепла в генерации десятилетней изменчивости в Северной Атлантике [6]. Проведенный ранее анализ данных наблюдений за ТПО в Северной Атлантике также показал адвективный характер распространения АТПО десятилетнего масштаба из южной части Гольфстрима в субполярный круговорот [25, 32]. Этот вывод подтверждается и результатами численного моделирования, в том числе и с использованием океанических моделей с относительно низким пространственным разрешением [18, 23, 24, 26]. Таким образом, данные ре-анализа подтверждают полученные в приведенных работах результаты.

Как отмечено в работе [11], усиление северо-восточного и юго-восточного пассатов, приводя-

щее к повышению скорости пассатных течений, не должно способствовать образованию положительных аномалий в Гольфстриме из-за сокращения времени пребывания вод в пассатной зоне и дополнительных потерь тепла на испарение. В то же время усиление пассатов, по мнению автора цитируемой работы, не приведет также и к отрицательным аномалиям температуры из-за малой величины аномалий температуры в этой области. Этот вывод подтверждается нашими результатами. Действительно, окрестность Северного пассатного течения – один из регионов Северной Атлантики, в которых важную роль в формировании аномалий температуры ВКС межгодового–десятилетнего масштаба играют аномалии потоков тепла на поверхности океана. При этом сами аномалии ТПО по абсолютной величине невелики по сравнению с аномалиями ТПО в окрестности Гольфстрима [9].

Модельные исследования [13, 31] показали, что главный компонент меридиональной адвекции тепла в центральной части Тропической Атлантики обусловлен вариациями градиента ТПО. Вместе с тем, авторы работы [20] показали, что в Тропической Атлантике величины аномалий меридиональной адвекции тепла, обусловленные как флуктуациями градиента ТПО, так и изменениями интенсивности скорости течений, соизмеримы между собой. Некоторое несоответствие результатов этих работ, вероятно, вызвано тем, что авторы работы [20] анализировали межгодовую изменчивость ТПО по относительно коротким рядам, что не позволило им на значимом уровне описать энергонесущие периоды изменчивости. В настоящей работе получено, что дисперсия аномалий меридиональной адвекции тепла в ВКС, обусловленных вариациями градиента температуры, в тропических широтах за рассматриваемый период значительно превышает дисперсию остальных компонент аномалий меридиональной адвекции тепла (рис. 3г). Это подтверждает выводы работ [13, 31].

В работе [17] получено, что в области Гольфстрима к востоку от 60° з.д. аномалии горизонтальной адвекции тепла, связанные с флуктуациями интенсивности течения и вариациями градиента температуры, сравнимы по величине. Вместе с тем к западу от 60° з.д. преобладают аномалии адвективного переноса тепла, обусловленные изменчивостью температурных градиентов. Некоторое несоответствие наших результатов с полученными в приведенной работе может быть обусловлено недостаточно точным воспроизведением скоростей пограничных течений в океаническом ре-анализе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ роли различных факторов в генерации межгодовых–десятилетних аномалий горизонтальной адвекции тепла в ВКС в Северной Атлантике по данным океанического ре-анализа ORA-S3 за 1959–2011 гг. позволил заключить следующее.

На фоне долговременного усиления адвективного переноса аномалий температуры ВКС из южной части Гольфстрима в субполярный круговорот выделяются аномалии горизонтальной адвекции тепла межгодового масштаба с периодами около 4-х лет.

Выявлены области, в которых межгодовые–десятилетние аномалии горизонтальной адвекции тепла в ВКС определяются изменениями интенсивности течений. Для зональной адвекции тепла к ним относятся внутренние части субтропического и субполярного круговоротов, области Лабрадорского течения и Гольфстрима после отрыва течения от континентального склона. Для меридиональной адвекции тепла – это пассатная зона и область субполярного круговорота. Области, в которых межгодовые–десятилетние аномалии горизонтальной адвекции тепла в ВКС определяются вариациями градиентов температуры, приурочены к окрестностям Гвианского течения и Гольфстрима (до места его отрыва от континентального склона). Амплитуда аномалий горизонтального градиента температуры ВКС, переносимых аномальными течениями, на большей части акватории Северной Атлантики мала. Исключение составляют аномалии зональной адвекции тепла в центральной части Экваториальной Атлантики и меридиональной адвекции тепла в окрестностях Североатлантического и Западно-Гренландского течений.

Межгодовые–десятилетние аномалии адвективного переноса тепла в интенсивных течениях Северной Атлантики формируются различными механизмами. Аномалии зональной адвекции тепла после отрыва Гольфстрима от континентального склона в основном обусловлены флуктуациями интенсивности течения. В Восточно-Гренландском течении аномалии зональной адвекции тепла, сформированные переносом аномальных градиентов температуры и изменениями скорости течения, имеют разные знаки и компенсируют друг друга. В Лабрадорском течении оба эти компонента аномалий меридиональной адвекции тепла одинаковы по знаку и близки по абсолютной величине. В Гвианском течении большая часть амплитуды аномалий меридиональной адвекции тепла в ВКС обусловлена вариациями градиентов температуры. Аномалии горизонтального градиента температуры, переносимые аномальными течениями, не оказывают значительного влияния на генерацию межгодо-

вых аномалий горизонтальной адвекции тепла в ВКС в рассматриваемых течениях.

Авторы благодарят рецензента за доброжелательную и конструктивную критику первого варианта работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дженкинс Г., Ваттс Д.* Спектральный анализ и его приложения. Вып. 1. М.: Мир, 1971. 316 с.
2. *Джиганшин Г.Ф., Полонский А.Б.* Низкочастотная изменчивость расходов Гольфстрима: описание и механизмы // Морск. гидрофиз. журнал. 2009. № 3. С. 30–49.
3. *Колесников А.Г., Исаев И.Л., Исаева Л.С. и др.* К вопросу о макроструктуре температурного поля поверхности океана // Тр. МГИ АН УССР. 1966. Т. 35. С. 3–12.
4. *Корт В.Г.* О крупномасштабном взаимодействии океана и атмосферы // Океанология. 1970. Т. 10. № 2. С. 222–240.
5. Динамика и прогноз крупномасштабных аномалий температуры поверхности океана. Статистический подход / Питербург Л.И. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 198 с.; ISBN 5-286-00116-5.
6. *Полонский А.Б.* О междесятилетней изменчивости в системе океан-атмосфера // Метеорология и гидрология. 1998. № 5. С. 55–64.
7. *Полонский А.Б.* Роль океана в изменениях климата. К.: Наукова думка, 2008. 184 с.
8. *Полонский А.Б., Кузьмин А.С.* Об изменчивости десятилетних колебаний гидрометеорологических величин в Северной Атлантике // Метеорология и гидрология. 2000. № 9. С. 73–88.
9. *Полонский А.Б., Сухонос П.А.* Оценка составляющих теплового баланса верхнего квазиоднородного слоя в Северной Атлантике // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2016. Т. 52. № 6. С. 729–739.
10. *Стоммел Г.* Гольфстрим: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1963. 227 с.
11. *Суховой В.Ф.* Изменчивость гидрологических условий Атлантического океана. К.: Наукова думка, 1977. 215 с.
12. *Balmaseda M.A., Vidard A., Anderson D.L.T.* The ECMWF Ocean Analysis System: ORA-S3 // Mon. Wea. Rev. 2008. V. 136. № 8. P. 3018–3034. doi 10.1175/2008MWR2433.1
13. *Chang P., Ji L., Saravanan R.* A hybrid coupled model study of tropical Atlantic variability // J. Climate. 2001. V. 14. № 3. P. 361–390.
14. *Chepurin G.A., Carton J.A.* Subarctic and Arctic sea surface temperature and its relation to ocean heat content 1982–2010 // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. № C06019. doi 10.1029/2011JC007770
15. *Curry R.G., McCartney M.S.* Ocean gyre circulation changes associated with the North Atlantic Oscillation // J. Phys. Oceanogr. 2001. V. 31. № 12. P. 3374–3400.
16. *Delworth T.L., Greatbatch R.J.* Multidecadal thermohaline circulation variability driven by atmospheric surface flux forcing // J. Climate. 2000. V. 13. № 9. P. 1481–1495.
17. *Dong S., Kelly K.A.* Heat budget in the Gulf Stream region: The importance of heat storage and advection // J. Phys. Oceanogr. 2004. V. 34. № 5. P. 1214–1231.
18. *Eden C., Willebrand J.* Mechanism of interannual to decadal variability of the North Atlantic circulation // J. Climate. 2001. V. 14. № 10. P. 2266–2280.
19. *Evan A.T., Vimont D.J., Heidinger A.K. et al.* The role of aerosols in the evolution of tropical North Atlantic Ocean temperature anomalies // Science. 2009. V. 324. № 5928. P. 778–781. doi 10.1126/science.1167404
20. *Foltz G.R., McPhaden M.J.* The role of oceanic heat advection in the evolution of Tropical North and South Atlantic SST anomalies // J. Climate. 2006. V. 19. № 23. P. 6122–6138.
21. *Grötzner A., Latif M., Barnett T.P.* A decadal climate cycle in the North Atlantic Ocean as simulated by the ECHO coupled GCM // J. Climate. 1998. V. 11. № 5. P. 831–847.
22. *Gulev S.K., Latif M., Keenlyside N. et al.* North Atlantic Ocean control on surface heat flux on multidecadal timescales // Nature. 2013. V. 499. № 7459. P. 464–467. doi 10.1038/nature12268
23. *Hakkinen S.* Decadal air–sea interaction in the North Atlantic based on observations and modeling results // J. Climate. 2000. V. 13. № 6. P. 1195–1219.
24. *Halliwel Jr. G.R.* Simulation of North Atlantic decadal/multidecadal winter SST anomalies driven by basin-scale atmospheric circulation anomalies // J. Phys. Oceanogr. 1998. V. 28. № 1. P. 5–21.
25. *Hansen D.V., Bezdek H.F.* On the nature of decadal anomalies in North Atlantic sea surface temperature // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. № C4. P. 8749–8758.
26. *Krahmann G., Visbeck M., Reverdin G.* Formation and propagation of temperature anomalies along the North Atlantic Current // J. Phys. Oceanogr. 2001. V. 31. № 5. P. 1287–1303.
27. *Ostrovskii A.G., Font J.* Advection and dissipation rates in the upper ocean mixed layer heat anomaly budget over the North Atlantic in summer // J. Geophys. Res.: Oceans. 2003. V. 108. № C12. doi 10.1029/2003JC001967
28. *Piterbarg L.I., Ostrovskii A.G.* Advection and Diffusion in Random Media, Implications for Sea Surface Temperature Anomalies. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht-Boston-London, 1997. 330 p.
29. *Power S.B., Tseitkin F., Dix M. et al.* Stochastic variability at the air-sea interface on decadal timescales // Geophys. Res. Lett. 1995. V. 22. № 19. P. 2593–2596.
30. *Roberts C.D., Waters J., Peterson K.A. et al.* Atmosphere drives recent interannual variability of the Atlantic meridional overturning circulation at 26.5° N // Geophys. Res. Lett. 2013. V. 40. № 19. P. 5164–5170. doi 10.1002/grl.50930
31. *Seager R., Kushnir Y., Chang P. et al.* Looking for the role of the ocean in tropical Atlantic decadal climate variability // J. Climate. 2001. V. 14. № 5. P. 638–655.
32. *Sutton R.T., Allen M.R.* Decadal predictability of North Atlantic sea surface temperature and climate // Nature. 1997. V. 388. № 6642. P. 563–567. doi 10.1038/41523
33. *Yule G.* Why do we sometimes get nonsense-correlations between time-series? — a study in sampling and the nature of time-series // J. R. Stat. Soc. 1926. V. 89. № 1. P. 1–63. doi 10.2307/2341482

The Mechanism for the Formation of Temperature Anomalies in the Upper Layer of the North Atlantic

A. B. Polonsky, P. A. Sukhonos

The analysis of the role of various factors forming the anomalous advective heat transport on the interannual-to-decadal scale in the upper mixed layer in the North Atlantic Ocean according to ORA-S3 re-analysis data for 1959–2011 is performed. Areas, where the horizontal temperature advection anomalies are determined by changes in the intensity of currents, variations of temperature gradients and their combined influence, are identified. It is shown that different mechanisms generating the advective heat transport anomalies are dominated in different parts of the North Atlantic Ocean. In the Gulf Stream area after the jet separation from the continental slope the anomalous heat advection in the upper mixed layer is mainly due to the fluctuations of the intensity of the current. In the Caribbean Current and the Gulf Stream area (before the point of separation) anomalous advective heat transport is formed due to variations of the horizontal temperature gradients in the upper mixed layer. In the Labrador Current both of these mechanisms have the same sign and approximately equal in magnitude. In the East Greenland Current they compensate each another. The contribution of the anomalies of the horizontal gradients of temperature carried by anomalous currents in the formation of advection of temperature anomalies in the upper mixed layer of the North Atlantic in the whole water area is small. The areas of the North Atlantic Current and West Greenland Current are the exception.