

СВЯЗИ ДОЛГОПЕРИОДНЫХ МОД ИЗМЕНЧИВОСТИ ТЕМПЕРАТУРЫ И ТОЛЩИНЫ ВЕРХНЕГО КВАЗИОДНОРОДНОГО СЛОЯ СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ С ИНДЕКСАМИ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ

© 2020 г. П. А. Сухонос^{a, *}, Н. А. Дианский^{b, c, d, **}

^aИнститут природно-технических систем, Севастополь, Россия

^bГосударственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Москва, Россия

^cМГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

^dИнститут вычислительной математики им. Г.И. Марчука Российской академии наук, Москва, Россия

*e-mail: pasukhonis@mail.ru

**e-mail: nikolay.diansky@gmail.com

Поступила в редакцию 15.10.2019 г.

После доработки 24.12.2019 г.

Принята к публикации 05.02.2020 г.

Межгодовая-мультidesятилетняя изменчивость температуры и толщины верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) Северной Атлантики (СА) анализируется по данным океанического ре-анализа ORA-S3 за 1959–2011 гг. Значительная часть ВКС СА характеризуется потеплением и уменьшением его толщины во все сезоны за анализируемый период. После удаления линейного тренда аномалии температуры и толщины ВКС в отдельные сезоны разложены по эмпирическим ортогональным функциям (ЭОФ). Обнаружено, что три ведущих ЭОФ описывают более 50% общей изменчивости температуры и толщины ВКС. Первая ЭОФ имеет подковообразную структуру и представляет собой когерентные изменения температуры и толщины ВКС по всей акватории СА, проявляющиеся на протяжении круглого года. Эта мода соответствует Атлантической мультideкадной осцилляции. Пространственная структура второй ЭОФ в зимне-весенний период представляет собой триполь и обусловлена Североатлантическим колебанием (САК). Временной коэффициент второй ЭОФ температуры ВКС в СА и индекс САК значимо коррелируют синхронно и при опережении индекса САК на 11 лет. Вторая ЭОФ температуры ВКС в летне-осенний период связана с Атлантической меридиональной модой. Третья ЭОФ, которая типична для колебаний температуры ВКС в январе, соответствует Восточноатлантическому колебанию.

Ключевые слова: эмпирические ортогональные функции, верхний квазиоднородный слой, температура, межгодовая-мультidesятилетняя изменчивость, Северная Атлантика

DOI: 10.31857/S0002351520030116

ВВЕДЕНИЕ

Результаты фундаментального исследования В. Бьеркнеса показывают, что межгодовая изменчивость температуры поверхности океана (ТПО) вызвана потоками тепла на поверхности океана, которые, в свою очередь, обусловлены изменениями атмосферной циркуляции, а десятилетние и более длительные флуктуации ТПО связаны с изменениями циркуляции океана [1]. В частности, межгодовая изменчивость может возникать в субтропическом круговороте как отклик на долгопериодное атмосферное воздействие (изменения связанные с интенсивностью и расположением субтропического максимума). Структуры когерентной низкочастотной изменчивости в системе океан–атмосфера, которые частично подтверждают результаты, полученные

В. Бьеркнесом, позднее были получены с использованием длительных массивов данных [2–6]. Вместе с тем в недавней статье [7] отмечается, что междесятилетняя изменчивость в Северной Атлантике (СА) возникает в результате прямого отклика верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) океана на стохастическое воздействие атмосферы без участия термохалинной циркуляции вод океана. Дискуссия о роли океана в формировании междесятилетней изменчивости продолжается [8, 9]. Таким образом, достаточно сложно идентифицировать моды межгодовой и мультidesятилетней изменчивости характеристик ВКС океана, связанные с процессами взаимодействия атмосферы и океана.

Рассмотрим основные климатические сигналы, определяемые для акватории СА.

Естественная долгопериодная флуктуация ТПО в СА называется Атлантическая мультideкадная осцилляция (АМО) [2, 10]. Это один из основных климатических сигналов в поле температуры Мирового океана на масштабах от межгодового до мультideсятилетнего и его происхождение не связано с Эль-Ниньо—Южным колебанием (ЭНЮК) [11]. В большом числе исследований показано влияние АМО на климатические условия в Северном полушарии.

Основной климатический сигнал в поле атмосферного давления над Атлантико-Европейским регионом — это Североатлантическое колебание (САК) (см., например, [12] и библиографию в ней). САК имеет несколько определений, но в целом оно представляет собой меридиональную дипольную структуру в поле атмосферного давления над СА. Второй по значимости климатический сигнал — это Восточноатлантическое колебание (ВАК). ВАК представляет собой хорошо выраженный монополю в поле атмосферного давления к югу от Исландии. САК и ВАК оказывают значительное влияние на атмосферную циркуляцию и долгопериодные погодные изменения в Европе [13].

В межгодовой-десятилетней изменчивости гидрофизических характеристик Тропической Атлантики хорошо проявляется Атлантическая меридиональная мода (АММ), отличная по своей физической сущности от “зональной” моды типа ЭНЮК [14]. Эта мода проявляется в виде аномального меридионального градиента ТПО через среднюю широту внутритропической зоны конвергенции (ВЗК) [15]. Аномалии ТПО в Тропической Атлантике по обе стороны от ВЗК, в отдельности, демонстрируют значительную согласованность с САК и изменчивостью давления на уровне моря над Исландией и Азорскими островами [16]. Предположив, что САК может влиять на меридиональные моды, авторы статьи [14] высказали мнение о том, что АММ может выступать в роли эффективного проводника для влияния внутритропической атмосферы на тропики. Кроме этого, АММ и АМО высоко коррелируют с активностью ураганов в СА на десятилетнем масштабе. Причем АММ также высоко коррелирует с активностью ураганов в СА и на межгодовом масштабе [17]. Таким образом, тропические и внутритропические моды климатической изменчивости взаимосвязаны.

Для идентификации самосогласованных пространственно-временных структур в полях гидрофизических характеристик успешно используется разложение по эмпирическим ортогональным функциям (ЭОФ) [18]. Разложение аномалий ТПО по ЭОФ за разные временные периоды и для разных областей СА выполнялось в большом числе работ. Однако разные авторы использовали разные методики обработки данных. Прежде все-

го, это относится к пространственно-временному осреднению исходных данных. Это может быть одной из причин несоответствия результатов. В то же время ЭОФ демонстрируют сильную тенденцию в своих главных, наиболее энергетичных, модах иметь простейшую пространственную структуру внутри анализируемой области. Это свойство приводит к сильной зависимости ЭОФ от формы границ анализируемой области в пространстве. Кроме того, результаты анализа ЭОФ зависят от длины используемых временных рядов, поскольку отдельные моды изменчивости температуры верхнего слоя океана могут давать разный вклад в общую дисперсию в различные временные периоды и, следовательно, не являются стационарными во времени. Таким образом, интерпретация ЭОФ как физических/динамических мод изменчивости должна выполняться с особой осторожностью и всегда сопровождаться физическим анализом их генерации.

Первое применение анализа ЭОФ к наблюдаемому полю ТПО в СА, по-видимому, выполнено в статье [19]. Низкочастотная климатическая изменчивость над СА в зимний период по данным наблюдений за 90-летний период проанализирована в работе [2]. Основные пространственно-временные закономерности изменчивости ТПО и давления на уровне моря в Атлантическом океане за 1856–1991 гг. описаны в статье [20]. Заметим, что межгодовые колебания гидрофизических полей проявляются в одновременных вариациях среднегодовых значений и характеристик сезонной изменчивости. Это означает, что внутригодовая изменчивость параметров гидрофизических полей не постоянна и меняется из года в год, что было подтверждено для крупномасштабных аномалий ТПО в СА [21]. Поэтому в данной работе пространственно-временные структуры межгодовой и мультideсятилетней изменчивости среднемесячных величин температуры и толщины ВКС в СА анализируются отдельно для разных сезонов. Результаты основаны на анализе ЭОФ, рассчитываемых по детрендрованным данным океанического ре-анализа ORA-S3. При этом ставилась задача поиска связей между ЭОФ температуры и толщины ВКС с вышеописанными климатическими сигналами.

ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ИХ ОБРАБОТКИ

Данные о среднемесячных величинах температуры океана и толщины ВКС взяты из массива океанического ре-анализа ORA-S3 за период с января 1959 г. по декабрь 2011 г. [22]. Пространственное разрешение этих данных составляет 1° , а в экваториальной зоне ($\pm 10^\circ$ широты) — $0.3^\circ \times 1^\circ$ по широте и долготе, соответственно. Кроме этого, в работе используются данные о суммарных потоках тепла на поверхности океана и касательном напря-

жении трения ветра по акватории СА, взятые из массива атмосферного ре-анализа ERA-40 [23] за период с января 1959 г. по июнь 2002 г. и оперативного анализа по модели ERA-40 за период с июля 2002 г. по декабрь 2011 г. Именно эти потоки тепла и импульса используются в качестве граничных условий в модели океанического ре-анализа ORA-S3. Акватория СА, выбранная для настоящего исследования, ограничена координатами $0-70^{\circ}$ N $80-10^{\circ}$ W, что совпадает с акваторией определения АМО.

Толщина ВКС по данным выбранного ре-анализа рассчитывается на основании полуэмпирической теории турбулентности [24]. Согласно ей толщина ВКС соответствует глубине, на которой число Ричардсона достигает критического значения, принимаемого 0.3.

На основании трехмерных данных выбранного ре-анализа для каждого месяца с 1959 по 2011 гг. рассчитывается средняя температура в пределах переменной по пространству и времени толщины ВКС. Затем выделяются значения температуры и толщины ВКС в отдельные месяцы. Далее из временных рядов температуры и толщины ВКС в каждом узле пространственной сетки удаляется линейный тренд. Параметры линейного тренда рассчитываются с помощью метода наименьших квадратов. После этого проводится разложение полученных массивов аномалий температуры и толщины ВКС по ЭОФ для каждого календарного месяца по отдельности за весь рассматриваемый период [25].

Среднемесячные величины индексов АМО и АММ за 1948–2017 гг. взяты с сайта <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>. Среднемесячные величины индексов САК и ВАК за 1950–2017 гг. взяты с сайта <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/telecontents.shtml>.

Наряду с разложением по ЭОФ в настоящей работе используется композитный анализ. Его суть заключается в следующем. Величины индексов САК, АММ и ВАК, превышающие по модулю одно среднеквадратичное отклонение (СКО), позволили выделить аномальные годы. Эти годы группируются в две выборки, которые соответствуют положительной и отрицательной фазам каждого климатического сигнала. Каждая фаза для каждого индекса содержит не менее 7 аномальных лет, что составляет не менее 15% от длины используемых временных рядов. Для этих групп лет рассчитываются средние значения, дисперсии и СКО температуры и толщины ВКС в каждом узле регулярной сетки. Затем находится “чистый” климатический сигнал в температуре и толщине ВКС в СА для календарных месяцев. Для этого определяется разность между средними по выборкам для каждого узла сетки (так называемый разностный композит). Оценка статистической значимости различий между композитными

аномалиями в рассматриваемые периоды выполняется по стандартному алгоритму с привлечением t -критерия Стьюдента. Также в работе используется корреляционный анализ.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ линейных трендов температуры и толщины ВКС

По используемым данным большая часть СА характеризуется положительным линейным трендом температуры ВКС. Наибольшие коэффициенты линейного тренда температуры ВКС отмечаются в области перехода Гольфстрима в Североатлантическое течение. Их величины составляют 0.05, 0.08, 0.04, и $0.04^{\circ}\text{C}/\text{год}$ в январе, апреле, июле и октябре соответственно. Отмечается заметное превышение величин коэффициентов линейных трендов в холодный период года по сравнению с теплым, что соответствует положению о более сильном потеплении в зимний период. Во внутренней части субполярного круговорота отмечаются отрицательные величины коэффициентов линейного тренда температуры ВКС, за исключением октября. Вклад дисперсии линейного тренда в суммарную дисперсию температуры ВКС превышает 30% в широтной полосе $0-10^{\circ}$ N к востоку от 40° W (за исключением апреля), в области перехода Гольфстрима в Североатлантическое течение (за исключением июля) и в окрестности Восточно-Гренландского течения в июле. Вклад дисперсии линейного тренда в суммарную дисперсию температуры ВКС в целом для всей акватории СА составляет 13.8, 9.4, 15.4 и 20.7% в январе, апреле, июле и октябре соответственно.

В тропических и субтропических широтах отмечаются области, в которых толщина ВКС в зимние месяцы характеризуется незначимым положительным линейным трендом за 1959–2011 гг. В высоких широтах выявлены значимые отрицательные линейные тренды толщины ВКС за исследуемый период. Величины коэффициента линейного тренда толщины ВКС в области интенсивной конвекции в море Лабрадор составляют -30 м/год в январе, что приводит к почти 2-кратному уменьшению средней толщины ВКС (с 3 до 1.5 км). После удаления линейного тренда СКО величин толщины ВКС в этой области в январе составило около 1 км. Величины толщины ВКС, их СКО и коэффициенты линейного тренда в летние месяцы малы по сравнению с этими величинами в зимние месяцы. Таким образом, основной вклад в низкочастотную изменчивость толщины ВКС в СА вносят процессы в высоких широтах. В целом в СА отмечается уменьшение толщины ВКС, которое наиболее выражено в холодный период года.

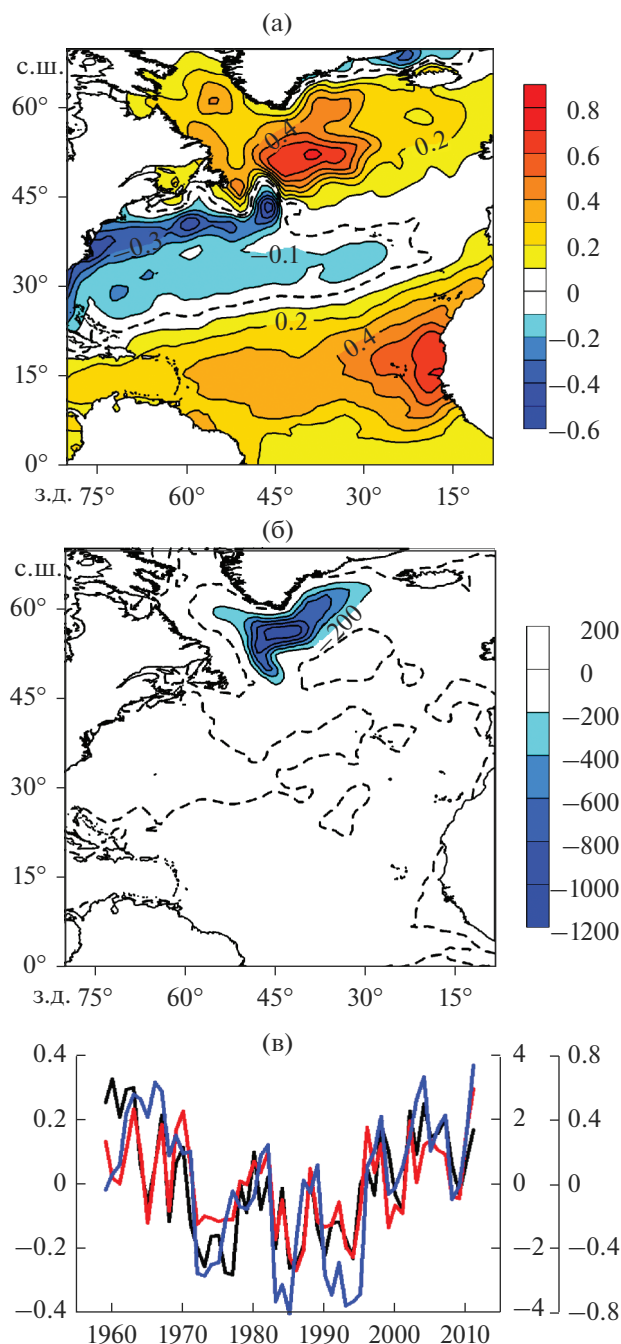


Рис. 1. Пространственные структуры первой ЭОФ температуры (а) и толщины ВКС (б) в январе. Соответствующий им временной коэффициент разложения температуры (красная линия, шкала вторая справа) и толщины ВКС (синяя линия, шкала первая справа) и индекс АМО в январе (черная линия, шкала слева) (в). Пунктирные линии на рисунках а, б показывают нулевую изолинию.

Таким образом, в рассматриваемый период ВКС СА характеризуется потеплением и уменьшением его толщины. Последнее происходит в основном за счет ослабления конвективного перемешивания в высоких широтах. Это может

быть связано с повышением температуры океана в Арктике и усилением таяния ледников Гренландии и выноса распресненных вод из Северного Ледовитого океана во второй половине 20-го века [26]. Оценки возможных изменений климата Северного полушария при прекращении океанического притока тепла в Северной Атлантике получены в [27]. Далее, после удаления линейных трендов из временных рядов, мы переходим к анализу межгодовой и мультideсятилетней изменчивости температуры и толщины ВКС на основе разложения по ЭОФ.

Основные ЭОФ температуры и толщины ВКС в СА

Пространственные структуры первой ЭОФ температуры ВКС в СА для каждого месяца согласуются между собой и имеют подковообразную форму. Значения на большей части акватории имеют одинаковый знак, а область другого знака расположена в западной части субтропического круговорота (рис. 1а). Однако существуют некоторые различия между структурами, полученными для разных месяцев. Размеры области противоположного знака в западной части субтропического круговорота максимальны в апреле и минимальны в октябре. Вклад первой ЭОФ в общую изменчивость температуры ВКС в СА составляет 29.6, 40.4, 18.3 и 21.8% в январе, апреле, июле и октябре соответственно. Высокий вклад в апреле объясняется тем, что весной происходит переход от зимнего перемешанного состояния к летнему стратифицированному, когда спонтанно возникают большие аномалии температуры ВКС при его малых толщинах. Временные коэффициенты первой ЭОФ температуры ВКС в СА демонстрируют одинаковую изменчивость на междесятилетнем-мультideсятилетнем масштабе для каждого месяца года (рис. 1в). Это проявляется в высокой корреляции между этими временными рядами. Что касается мультideсятилетней изменчивости, то наблюдаются длительные периоды низких температур ВКС (например, в начале 1970-х—начало 1990-х гг.) и высоких температур ВКС (например, в конце 1990-х и в 2000-х гг.). Величины коэффициентов корреляции между временными коэффициентами первой ЭОФ температуры ВКС в СА и индекса АМО за 1959–2011 гг. составляют 0.82 в январе, 0.88 в апреле, 0.85 в июле и 0.88 в октябре.

Пространственные структуры первой ЭОФ толщины ВКС в СА для каждого месяца согласуются между собой. Наибольшие значения одинакового знака сконцентрированы во внутренней части субполярного круговорота (рис. 1б). Площадь этой области максимальна в осенне-зимние месяцы и минимальна в летние. Вклад первой ЭОФ в общую изменчивость толщины ВКС в СА составляет 51.5, 40, 32.5 и 59.7% в январе, апреле,

июле и октябре соответственно. Коэффициент корреляции между временными коэффициентами первой ЭОФ толщины ВКС в январе и апреле составляет 0.73. Во временных коэффициентах первой ЭОФ толщины ВКС в СА для каждого месяца года проявляется низкочастотное квази-шестидесятилетнее колебание, аналогичное поведению индекса АМО. Коэффициент корреляции между временным коэффициентом первой ЭОФ толщины ВКС и индексом АМО в январе за рассматриваемый период равен 0.69 (рис. 1в). Коэффициент корреляции между временными коэффициентами первой ЭОФ температуры и толщины ВКС в январе равен 0.75.

Таким образом, несмотря на некоторые локальные различия между различными месяцами, первые ЭОФ температуры и толщины ВКС в СА хорошо коррелируют с АМО. Это указывает на крупномасштабный характер рассматриваемого климатического сигнала. Температура ВКС увеличивается вместе с уменьшением толщины ВКС в субполярном круговороте в положительную фазу АМО. Заметим, что в субполярном круговороте амплитуда этой ЭОФ может быть занижена из-за усреднения температуры океана по большой толщине ВКС, величины которой здесь могут превышать 2000 м в январе. Такое становится возможным в верхнем слое океана, когда в нем образуются области локального прогрева в результате взаимодействия деятельного слоя океана с атмосферой в зимний период [28].

Пространственные структуры второй и третьей ЭОФ толщины ВКС в СА представляют собой регионы с разными знаками в пределах субполярного круговорота. Вклад второй и третьей ЭОФ в общую изменчивость толщины ВКС невысокий. Для второй ЭОФ он составляет 8.7, 8, 10.3 и 8.6%, а для третьей ЭОФ — 5.8, 6, 9 и 5.6% в январе, апреле, июле и октябре соответственно. Далее на этих ЭОФ толщины ВКС подробно останавливаться не будем. Заметим лишь, что по используемым данным величина дисперсии толщины ВКС в целом для всей акватории СА составляет 19134, 17442, 2333 и 4631 м² в январе, апреле, июле и октябре соответственно. В зимние месяцы величина дисперсии толщины ВКС примерно в 7–8 раз больше, чем в летние месяцы. Поэтому, несмотря на более высокие относительные величины вклада (в %) второй и третьей ЭОФ в общую изменчивость толщины ВКС от летних месяцев, чем от зимних, доли дисперсии, описываемые этими ЭОФ в летние месяцы, невелики.

Проанализируем вторую ЭОФ температуры ВКС в СА. На рис. 2а показана ее пространственная структура для января и апреля. Структура второй ЭОФ в эти месяцы указывает на изменения температуры ВКС различных знаков в разных широтных зонах СА. Изменения простран-

ственной структуры этой моды для января и апреля незначительны и, в основном, проявляются в увеличении областей противоположного знака в западных частях субтропических и субполярных круговоротов в апреле. Эта ЭОФ описывает от 11.3% (январь) до 8.6% (апрель) от общей изменчивости температуры ВКС в СА. Коэффициент корреляции между ними в январе и апреле за 1959–2011 гг. составляет 0.48. Временные коэффициенты второй ЭОФ температуры ВКС демонстрируют интенсивную межгодовую изменчивость (рис. 2д). Коэффициент корреляции между временным коэффициентом второй ЭОФ температуры ВКС в январе и индексом САК в январе после удаления линейного тренда составляет 0.51.

Корреляционный анализ индекса САК и температуры ВКС в каждом узле сетки в январе в СА показывает тесную взаимосвязь между этими характеристиками: отрицательную во внутренней части субполярного круговорота и в области западноафриканского апвеллинга и положительную во внутренней части субтропического круговорота (рис. 2б).

Рассматриваемый период включает 10 лет положительной фазы САК (1974, 1983, 1984, 1986, 1989, 1990, 1993, 1994, 2005 и 2006) и 9 лет отрицательной фазы САК (1960, 1966, 1970, 1971, 1977, 1979, 1985, 1987 и 2010). Температура ВКС в положительную фазу САК относительно отрицательной характеризуется статистически значимым уменьшением на 0.4°C во внутренней части субполярного круговорота и в области западно-африканского апвеллинга и увеличением во внутренней части субтропического круговорота (рис. 2в).

Отмечается высокая схожесть пространственных структур второго ЭОФ температуры ВКС (рис. 2а), поля коэффициентов корреляции температуры ВКС с индексом САК (рис. 2б) и разностного композита (рис. 2в). Подобная структура подтверждается и композитным анализом суммарных потоков тепла на поверхности океана для положительной и отрицательной фаз САК (рис. 2г). Области с повышенными потерями тепла с поверхности океана находятся во внутренней части субполярного круговорота (+70 Вт/м²) и в Северном пассатном течении (+35 Вт/м²). Уменьшение отдачи тепла в атмосферу отмечается в западной части субтропического круговорота (–45 Вт/м²). Таким образом, в ходе композитного и корреляционного анализа подтверждается, что интенсификация САК сопровождается похолоданием ВКС в области пассатов и западных ветров и потеплением ВКС в субтропических широтах. Однако в области восточнее Ньюфаундленда вдоль 45° N, где рядом находится экстремум северной ячейки ЭОФ, знаки аномалий потоков тепла и температуры ВКС не согласованы. Это может объясняться тем фактом, что здесь существенную

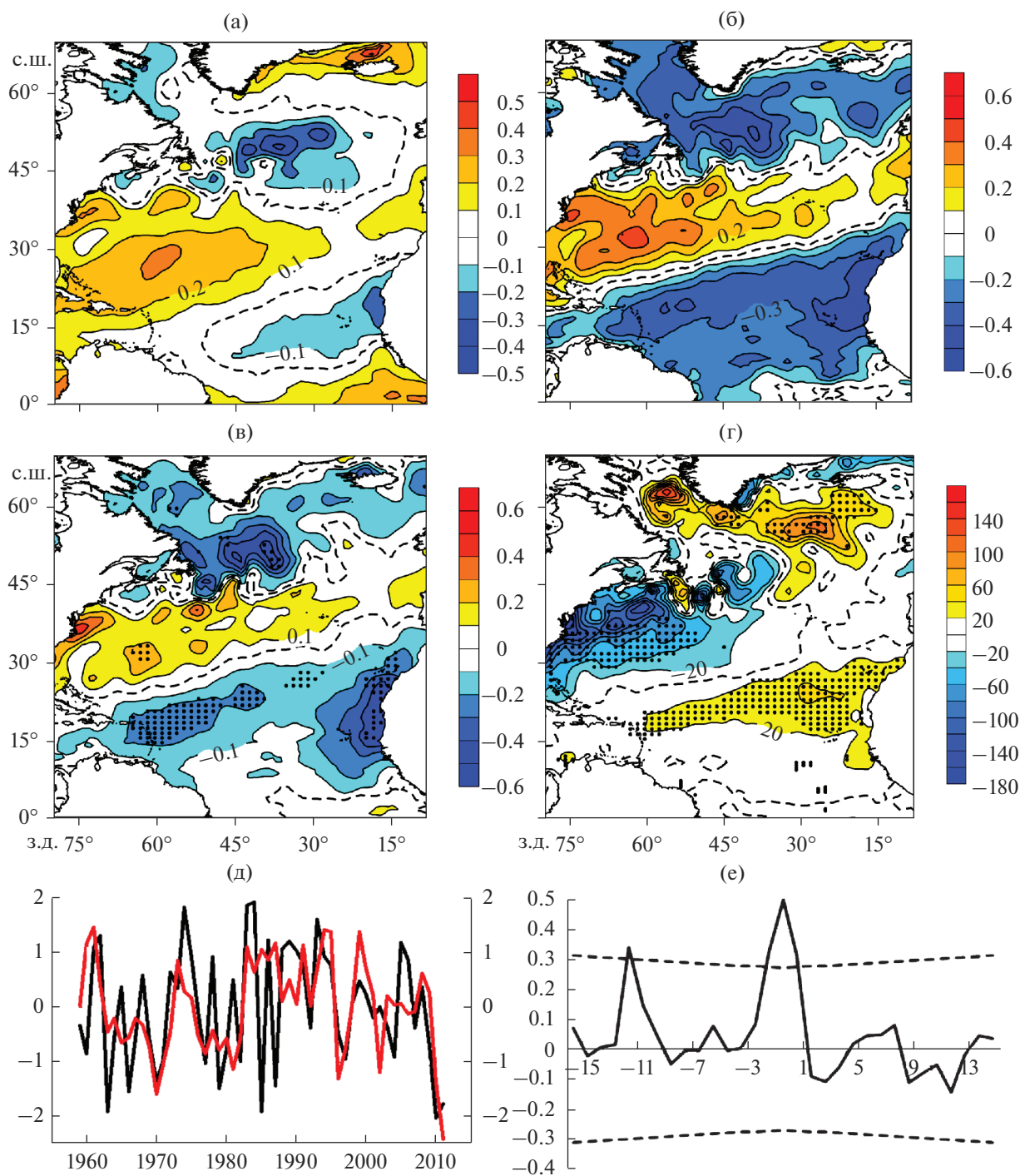


Рис. 2. Пространственная структура второй ЭОФ температуры ВКС в январе (а). Пространственное распределение коэффициентов корреляции между температурой ВКС и индексом САК в январе (б). Разность между аномалиями температуры ВКС (в, °С) и между аномалиями суммарных потоков тепла на поверхности океана (г, Вт/м², положительные величины — отток тепла из океана) в положительную и отрицательную фазы САК в январе. Временной коэффициент второй ЭОФ температуры ВКС (красная линия, шкала справа) и индекс САК (черная линия, шкала слева) в январе (д). Функция взаимной корреляции (е) между временными рядами, показанными на рисунке (д). Отрицательные сдвиги (годы) соответствуют опережению индекса САК. Пунктирная линия на рисунках а, б, в, г показывает нулевую изолинию. Черными точками на рисунках в, г отмечены узлы сетки, в которых величина разности статистически значима на уровне 90%. Пунктирная линия на рисунке (е) показывает 95% доверительный интервал.

роль играют адвективные факторы формирования аномалий температуры ВКС, поскольку эта область находится под влиянием Гольфстрима и Североатлантического течения.

Анализ взаимной корреляционной функции между временным коэффициентом второй ЭОФ температуры ВКС и индексом САК после удаления линейного тренда в январе показал, что самые высокие коэффициенты корреляции приблизительно равные 0.5 отмечаются при нулевом сдвиге между этими временными рядами (рис. 2е). Кроме этого, эти временные ряды значимо коррелируют при опережении индекса САК на 11 лет.

Пространственные структуры второй ЭОФ температуры ВКС в СА для июля и октября схожи между собой. На рис. 3а приведена пространственная структура второй ЭОФ по данным за июль. Эта ЭОФ имеет подковообразную структуру, ориентированную с запада на восток, с величинами одного знака в восточной части экваториальной Атлантики, широтной полосе 35–50° N и Восточно-Гренландском течении и противоположного знака на остальной части акватории. Вторая ЭОФ описывает от 12% (июль) до 10.5% (октябрь) от общей изменчивости температуры ВКС в СА. Коэффициент корреляции между временным коэффициентом рассматриваемой ЭОФ и индексом АММ после удаления линейного тренда за 1959–2011 гг. составляет 0.47 (рис. 3д). Заметим, что индекс АММ в июле характеризуется выраженной десятилетней изменчивостью: уменьшением до начала 1970-х гг., а затем его увеличением.

Коэффициенты корреляции между индексом АММ после удаления линейного тренда и температурой ВКС в каждом узле сетки в СА в июле показывают тесную связь, особенно к югу от 25° N (рис. 3б). Коэффициенты корреляции в этой области превышают 0.6. Таким образом, более 35% общей изменчивости температуры ВКС в Тропической Атлантике в летний период обусловлено влиянием АММ.

Анализируемый период включает 7 лет положительной фазы АММ (1962, 1988, 1989, 1995, 2004, 2005 и 2010) и 9 лет отрицательной фазы АММ (1972, 1973, 1974, 1984, 1986, 1991, 1993, 1994 и 2002). Температура ВКС в положительную фазу АММ относительно отрицательной характеризуется статистически значимым увеличением во внутренней части субполярного круговорота, восточной части субтропического круговорота и тропических широтах, за исключением восточной части экваториальной Атлантики (рис. 3в). Отрицательные значения температуры ВКС отмечаются в Восточно-Гренландском течении. Анализ разностного композита модуля касательного напряжения трения ветра в положительную и отрицательную фазы АММ показывает значимое уменьшение этой характеристики в положительную фазу

АММ в пассатной зоне (-0.012 Н/м^2) (рис. 3г). Таким образом, подтверждается, что интенсификация АММ в июле сопровождается потеплением ВКС в Тропической Атлантике и уменьшением модуля касательного напряжения трения ветра в пассатной зоне.

Рассмотрим далее третью ЭОФ температуры ВКС в СА. На рис. 4а показана пространственная структура этой моды для января. Пространственная структура третьей ЭОФ показывает изменения температуры ВКС различных знаков: одного знака в окрестности ВЗК и к северу от 30° N, и противоположного знака в широтной полосе 15–30° N. Эта ЭОФ описывает 8.2% (январь) от общей изменчивости температуры ВКС в СА. Временной коэффициент третьей ЭОФ температуры ВКС характеризуется выраженной междесятилетней изменчивостью. Коэффициент корреляции между временным коэффициентом третьей ЭОФ температуры ВКС и индексом ВАК после удаления линейного тренда за 1959–2011 гг. равен 0.31 в январе (рис. 4б). Корреляция между этими временными рядами после удаления параболического тренда составляет 0.33.

Анализируемый период включает 10 лет положительной фазы ВАК (1970, 1971, 1973, 1988, 1991, 2001, 2002, 2003, 2007 и 2009) и 8 лет отрицательной фазы ВАК (1963, 1965, 1968, 1969, 1976, 1981, 2000 и 2005). Температура ВКС в положительную фазу ВАК относительно отрицательной проявляет статистически значимое уменьшение на 0.3°C в области, ограниченной координатами: 35–45° N, 35–20° W. Положительные значения температуры ВКС отмечаются в области к северу от Южной Америки ($+0.2^\circ\text{C}$) (рис. 4в). Таким образом, интенсификация ВАК сопровождается похолоданием ВКС в окрестности Азорских островов и потеплением ВКС на Больших Антильских островах. Этот результат также подтверждается коэффициентами корреляции между временными рядами температуры ВКС в каждом узле сетки и индексом ВАК после удаления линейного тренда в январе (рис. 4г). Заметим, вместе с тем, что третья ЭОФ описывает гораздо меньшую долю общей изменчивости температуры ВКС в зимний период.

Пространственные структуры третьей ЭОФ температуры ВКС в апреле, июле и октябре представляют собой регионы с разными знаками в пределах СА. Вклад этой ЭОФ в общую изменчивость температуры ВКС невысокий. Он составляет 6, 10 и 7.7% в апреле, июле и октябре, соответственно. Величина дисперсии температуры ВКС в целом для всей акватории СА составляет 0.38, 0.28, 0.22 и 0.26°C^2 в январе, апреле, июле и октябре соответственно. В зимние месяцы величина дисперсии температуры ВКС примерно в 1.5 раза больше, чем в летние месяцы. Поэтому, несмотря

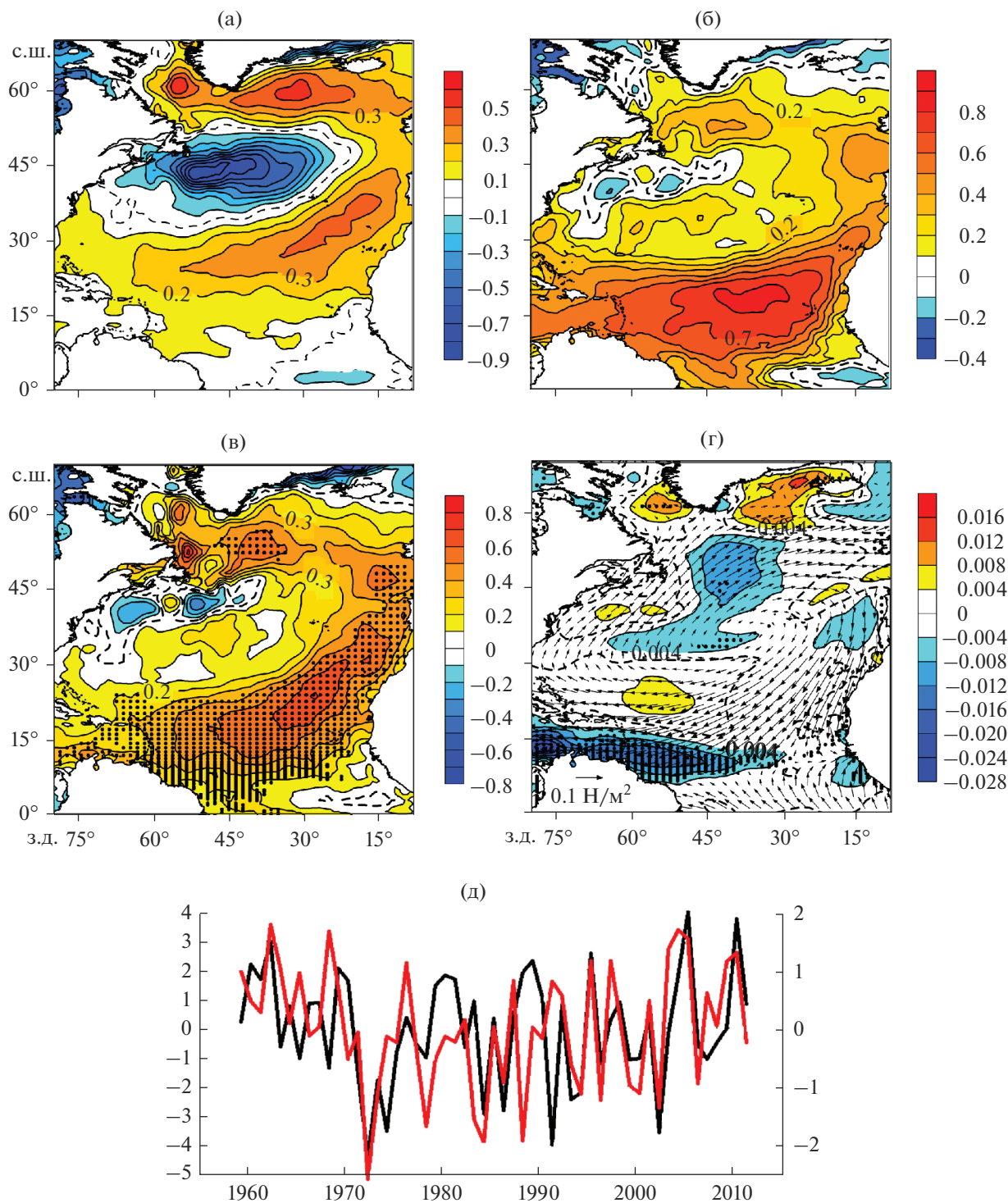


Рис. 3. Пространственная структура второй ЭОФ температуры ВКС в июле (а). Пространственное распределение коэффициентов корреляции между температурой ВКС и индексом АММ в июле (б). Разность между аномалиями температуры ВКС (в, °С) и между аномалиями модуля касательного напряжения трения ветра (г, Н/м²) в положительную и отрицательную фазы АММ в июле. Временной коэффициент второй ЭОФ температуры ВКС (красная линия, шкала справа) и индекс АММ (черная линия, шкала слева) в июле (д). Пунктирная линия на рисунках а, б, в, г показывает нулевую изолинию. Черными точками на рисунках в, г отмечены узлы сетки, в которых величина разности статистически значима на уровне 90%. Векторами на рисунке г показано среднее значение касательного напряжения трения ветра за 1959–2011 гг. в июле.

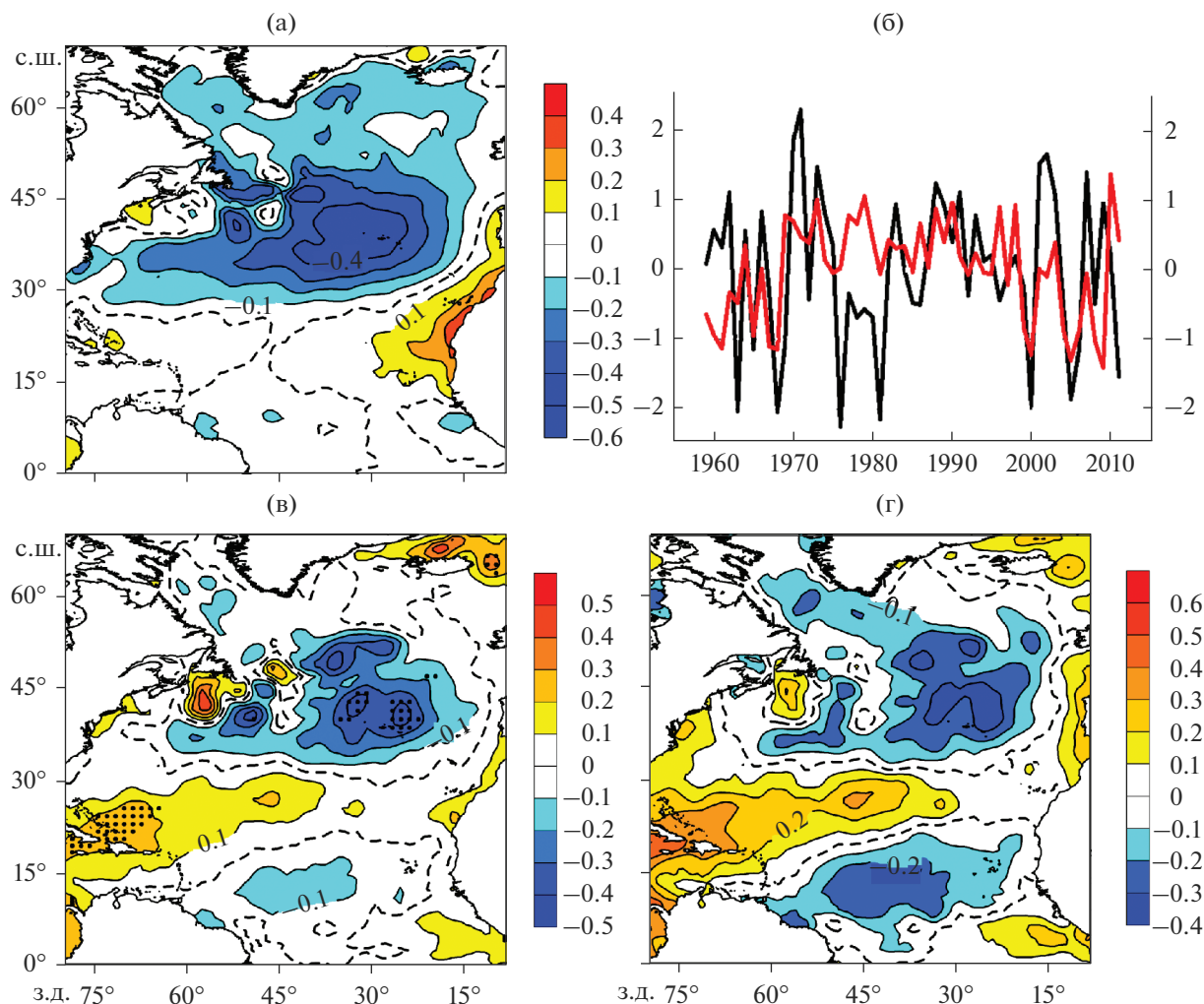


Рис. 4. Пространственная структура третьей ЭОФ температуры ВКС в январе (а). Временной коэффициент третьей ЭОФ температуры ВКС (красная линия, шкала справа) и индекс ВАК (черная линия, шкала слева) в январе (б). Разность между аномалиями температуры ВКС ($^{\circ}\text{C}$) в положительную и отрицательную фазы ВАК в январе (в). Пространственное распределение коэффициентов корреляции между температурой ВКС и индексом ВАК в январе (г). Пунктирная линия на рисунках а, в, г показывает нулевую изолинию. Черными точками на рисунке в отмечены узлы сетки, в которых величина разности статистически значима на уровне 90%.

на большую относительную величину вклада (в %) третьей ЭОФ в общую изменчивость температуры ВКС от летних месяцев, чем от зимних, доля дисперсии, описываемая этой ЭОФ в январе, почти в 1.5 раза больше соответствующей доли дисперсии этой ЭОФ в июле.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ изменчивости толщины ВКС в СА за 1960–2004 гг. ранее был выполнен в статье [29]. Эти авторы показали, что в центральной части СА толщина ВКС в зимне-весенний период углубляется на 10–40 м в течение этого 45-летнего периода. В указанной работе толщина ВКС рассчитывается с использованием температурного критерия, согласно которому толщина ВКС определяется

как глубина, на которой температура изменяется на 0.2°C относительно ее значения на глубине 10 м. Подчеркнем, что разностные и градиентные критерии для определения толщины ВКС требуют тщательного выбора порогового значения, поскольку результирующая толщина ВКС (и ее долгопериодная изменчивость) сильно зависят от методики ее определения. Большие величины температурного критерия, по-видимому, захватывают более глубокие градиенты в термоклизе вместо нижней границы ВКС, что особенно важно в условиях низкотемпературной стратификации в северной части СА (см., например, рис. 2g–i в [30]). Следует отметить, что разностный критерий по температуре для определения толщины ВКС не учитывает соленостный вклад в плотность. Поэтому правильнее будет использовать разностный

критерий по плотности. Заметим, что методика определения глубины залегания нижней границы ВКС по числу Ричардсона более оправдана с физической точки зрения. В зимне-весенний период с 1960 по 2004 г. толщина ВКС в субтропиках действительно увеличивалась и по нашим данным. Однако с начала 2000-х годов, когда АМО находилась в положительной фазе, интенсивность субтропической конвективной ячейки ослабла [31], и толщина ВКС в январе уменьшилась на мультидесятилетнем масштабе [32]. Это привело к уменьшению длительного углубления ВКС в субтропиках в зимний период 1959–2011 гг. Что касается межгодовой-мультидесятилетней изменчивости толщины ВКС для всей СА (после удаления линейного тренда), роль океанических процессов в высоких широтах имеет большое значение. Заметим, что в настоящей статье линейные тенденции проанализированы отдельно и удалены, после чего проводился анализ естественной изменчивости характеристик ВКС. Это обусловлено тем фактом, что в период 1960–2004 гг. тенденции антропогенного влияния и естественной изменчивости в ВКС совпадали.

Оценки максимальной толщины ВКС в центральной части моря Лабрадор, полученные на основе имеющихся данных наблюдений за 1993–2014 гг. приведены в статье [33]. Максимальные величины зимней толщины ВКС значительно уменьшились с середины 1990-х до середины 2000-х гг. на фоне интенсивной межгодовой изменчивости. Этот факт также согласуется с нашими оценками величины толщины ВКС, полученными на основе критерия Ричардсона.

Согласно нашим результатам, индекс АМО также можно определить как временной коэффициент первой моды разложения по ЭОФ среднемесячной температуры или толщины ВКС. Вполне вероятно, что это утверждение верно для разложения по ЭОФ длительных временных рядов, длина которых больше или равна периоду АМО. Например, индекс Тихоокеанского декадного колебания определяется как временной коэффициент первой моды разложения среднемесячной ТПО в северной части Тихого океана (к северу от 20° N) [34]. Наши результаты также показывают, что субполярный круговорот — это ключевой регион для формирования АМО, и что процессы на нижней границе ВКС важны в эволюции изменчивости такого масштаба. Указанный вывод не согласуется с результатами статьи [7], полученными с помощью предельно упрощенной модели океана с ВКС постоянной толщины. Это является косвенным подтверждением важной роли термохалинной циркуляции в формировании АМО, отстаиваемой в работе [8]. Кроме этого, большую роль в поддержании АМО играют океанические процессы в Арктике [35, 36].

Пространственная структура второй ЭОФ температуры ВКС, согласованная с индексом САК,

представляет собой трипольную структуру, в которой положительные корреляции с ТПО отмечаются в Саргассовом море, а отрицательные — в северо-западной части Тропической Атлантики и окрестности моря Лабрадор (см., например, [4, 5, 37, 38] и др.). Такая структура в системе океан-атмосфера связана с ветровой адвекцией тепла над океаном [39]. В работах [4, 5] показано, что эта мода в зимних аномалиях температуры ВКС генерируется атмосферным воздействием. Это подтверждает вынужденный характер этой моды. Максимальная величина коэффициента корреляции между временным коэффициентом второй ЭОФ температуры ВКС и индексом САК после удаления линейного тренда при полумесячном опережении атмосферного воздействия возрастает приблизительно до 0.75 [5]. В этой работе такое повышение величины коэффициента корреляции объясняется с помощью простой аналитической модели эволюции аномалий температуры в ВКС. Полумесячный сдвиг запаздывания крупномасштабных аномалий температуры ВКС в средних широтах определяется как четверть периода от наиболее значимого периода колебаний в атмосферном воздействии, соответствующего приблизительно 2 месяцам в наиболее энергонесущем диапазоне изменчивости САК, т.к. низкочастотная изменчивость атмосферы в среднемесячных полях хорошо проявляется именно на этом периоде.

Обнаруженное повышение корреляции при опережении индекса САК на 11 лет (рис. 2e) уже не может быть объяснено такими простыми соображениями, т.к. на периодах 10–40 лет в спектре индекса САК наблюдается минимум (см., например, [40]). Поэтому связь между аномалиями температуры ВКС и опережающим на 11 лет САК требует своего объяснения. Заметим, что типичное время приспособления субтропического круговорота к изменяющемуся атмосферному воздействию составляет около 10 лет [41].

Авторы статьи [42], используя относительно короткие временные ряды (1950–1987 гг.), предположили, что монополярная мода к югу от Исландии (третья ЭОФ температуры ВКС в январе в настоящей статье) связана с океаническим воздействием на атмосферные процессы. Наши результаты, основанные на длительных данных, показывают, что третья ЭОФ температуры ВКС в январе совпадает с ВАК. Причем ВАК оказывает значимое влияние на температуру ВКС в некоторых небольших регионах СА. Однако его вклад в общую изменчивость температуры ВКС в зимний период наименьший по сравнению с другими рассмотренными модами.

В зимний период атмосферные циркуляционные факторы играют важную роль в формировании изменчивости температуры ВКС в СА. В летний период интенсивность ветров и течений в СА ослаблена, а толщина ВКС уменьшена. Поэтому

индексы атмосферной циркуляции, такие как САК и ВАК, плохо коррелируют с временными коэффициентами разложения температуры ВКС по ЭОФ в летние месяцы. В летний период САК характеризуется меньшей амплитудой, по сравнению с зимним периодом, и смещением своих центров действия на северо-восток за пределы акватории СА [43]. Поэтому летом этот климатический сигнал уже не может описывать высокую долю дисперсии характеристик ВКС в СА и возрастает роль тропических мод изменчивости.

Изменения интенсивности пассатных ветров в Тропической Атлантике предшествуют аномалиям ТПО (и, следовательно, аномальному градиенту ТПО на средней широте ВЗК): более слабые (более сильные) пассаты сопровождаются более теплыми (более холодными) аномалиями ТПО [15]. Кроме того, это означает, что “меридиональная” мода изменчивости температуры ВКС Тропической Атлантики возникает в результате внешнего воздействия. САК может выступать в роли одного из источников такого воздействия. Однако другим объяснением меридиональной моды является наличие положительной обратной связи между аномалиями скорости ветра, испарения и ТПО [44, 45]. Хотя и в этом случае для поддержания меридиональной моды также требуется внешнее воздействие.

Представляет интерес тот факт, что моды разложения по ЭОФ температуры ВКС оказались тесно связанными с отдельными процессами в системе океан-атмосфера. Поскольку ЭОФы ортогональны между собой по определению, то должны быть и квази-ортогональны ассоциируемые с ними АМО, САК, ВАК и АММ. Это частично подтверждается малыми значениями синхронных коэффициентов корреляции между индексами рассмотренных климатических сигналов в разные сезоны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье проанализированы линейные тенденции и межгодовая-мультидесятилетняя изменчивость температуры и толщины ВКС в разные сезоны в СА. Результаты основаны на разложении данных океанического ре-анализа ORA-S3 за 1959–2011 гг. по ЭОФ.

В СА отмечается потепление ВКС вместе с уменьшением его толщины в рассматриваемый период. Положительный линейный тренд температуры ВКС выражен во все месяцы года на большей части акватории, хотя в некоторых регионах наблюдаются отрицательные тренды. Значимые линейные тенденции изменчивости толщины ВКС в основном сосредоточены в высоких широтах и более выражены в зимние месяцы. В летние месяцы также наблюдаются линейные тренды в изменчивости толщины ВКС, но значения их коэффициентов невелики.

Анализ основных мод изменчивости температуры и толщины ВКС в СА после удаления линейного тренда показал следующее. Три ведущих ЭОФ описывают более 50% общей изменчивости температуры и толщины ВКС. Первая ЭОФ показывает когерентную мультидесятилетнюю изменчивость температуры и толщины ВКС по всей акватории. Несмотря на некоторые различия пространственной структуры для отдельных месяцев, эта ЭОФ является проявлением АМО. Вторая ЭОФ для колебаний температуры ВКС в январе и апреле характеризуется пространственной структурой с противоположными знаками в разных широтных зонах СА. Вклад этой ЭОФ в общую изменчивость температуры ВКС составляет около половины вклада первой ЭОФ. Эта ЭОФ обусловлена САК. Получена значимая корреляционная связь между временным коэффициентом второй ЭОФ температуры ВКС и индексом САК после удаления линейного тренда синхронно и при опережении САК на 11 лет. Вторая ЭОФ для вариаций температуры ВКС в июле и октябре характеризуется пространственной структурой с изменениями температуры ВКС одного знака в восточной части экваториальной Атлантики, Североатлантическом и Восточно-Гренландском течениях и другого знака на остальной части акватории. Обнаружено, что эта ЭОФ соответствует АММ. Третья ЭОФ для колебаний температуры ВКС в январе совпадает с ВАК. Однако ее вклад в общую изменчивость температуры ВКС невелик. Таким образом, получено, что только самая низкочастотная мода является отражением эволюции индекса АМО, который можно ассоциировать с колебаниями термохалинной циркуляции в СА. Вторая и третья моды ЭОФ являются реакцией ВКС на атмосферное воздействие, определяемое САК, АММ и ВАК. Причем вторая мода температуры ВКС имеет различную природу в холодный и теплый период года.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю благодарность анонимному рецензенту за доброжелательную и конструктивную критику первого варианта работы и редакции за профессиональное и оперативное рассмотрение статьи. Анализ межгодовой-мультидесятилетней изменчивости температуры и толщины ВКС выполнен при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 17-17-01295). Разложение аномалий температуры и толщины ВКС по ЭОФ выполнено при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (грант 18-05-01107).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bjerknes J. Atlantic air-sea interaction. *Advances in Geophysics*. N.Y.: Academic Press, 1964. V. 10. P. 1–82. [https://doi.org/10.1016/S0065-2687\(08\)60005-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2687(08)60005-9)

2. *Deser C., Blackmon M.L.* Surface climate variations over the North Atlantic Ocean during winter: 1900–1989 // *J. Climate*. 1993. V. 6. № 9. P. 1743–1753.
3. *Kushnir Y.* Interdecadal variations in North Atlantic sea surface temperature and associated atmospheric conditions // *J. Climate*. 1994. V. 7. № 1. P. 141–157.
4. *Deser C., Timlin M.S.* Atmosphere–ocean interaction on weekly timescales in the North Atlantic and Pacific // *J. Climate*. 1997. V. 10. № 3. P. 393–408.
5. *Дианский Н.А.* Временные связи и пространственные формы совместных мод аномалий высоты изобарической поверхности 500 мб и температуры поверхности океана зимой в Северной Атлантике // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 1998. Т. 34. № 2. С. 197–213.
6. *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. <https://doi.org/10.1038/nature12268>
7. *Clement A., Bellomo K., Murphy L.N. et al.* The Atlantic Multidecadal Oscillation without a role for ocean circulation // *Science*. 2015. V. 350. Is. 6258. P. 320–324. <https://doi.org/10.1126/science.aab3980>
8. *Zhang R., Sutton R., Danabasoglu G. et al.* Comment on “The Atlantic Multidecadal Oscillation without a role for ocean circulation” // *Science*. 2016. V. 352. Is. 6293. P. 1527. <https://doi.org/10.1126/science.aaf1660>
9. *Bellomo K., Murphy L.N., Cane M.A. et al.* Historical forcings as main drivers of the Atlantic multidecadal variability in the CESM large ensemble // *Clim. Dyn.* 2018. V. 50. Is. 9–10. P. 3687–3698. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3834-3>
10. *Schlesinger M.E., Ramankutty N.* An oscillation in the global climate system of period 65–70 years // *Nature*. 1994. V. 367. № 6465. P. 723–726. <https://doi.org/10.1038/367723a0>
11. *Enfield D.B., Mestas-Nunez A.M.* Multiscale variabilities in global sea surface temperatures and their relationships with tropospheric climate patterns // *J. Climate*. 1999. V. 12. № 9. P. 2719–2733.
12. *Нестеров Е.С.* Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. М.: Триада, 2013. 144 с.
13. *Moore G.W.K., Renfrew I.* Cold European winters: Interplay between the NAO and the East Atlantic mode // *Atmos. Sci. Lett.* 2012. V. 13. № 1. P. 1–8. <https://doi.org/10.1002/asl.356>
14. *Chiang J.C.H., Vimont D.J.* Analogous Pacific and Atlantic meridional modes of tropical atmosphere–ocean variability // *J. Climate*. 2004. V. 17. № 21. P. 4143–4158. <https://doi.org/10.1175/JCLI4953.1>
15. *Nobre P., Shukla J.* Variations of sea surface temperature, wind stress, and rainfall over the tropical Atlantic and South America // *J. Climate*. 1996. V. 9. № 10. P. 2464–2479.
16. *Rajagopalan B., Kushnir Y., Tourre Y.M.* Observed decadal midlatitude and tropical Atlantic climate variability // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. № 21. P. 3967–3970. <https://doi.org/10.1029/1998GL900065>
17. *Vimont D.J., Kossin J.P.* The Atlantic Meridional Mode and hurricane activity // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34. № 7. P. L07709. <https://doi.org/10.1029/2007GL029683>
18. *Вайновский П.А., Малинин В.Н.* Методы обработки и анализа океанологической информации. Ч. II. Многомерный анализ. СПб.: Изд. РГГМИ, 1992. 96 с.
19. *Weare B.C., Newell R.E.* Empirical orthogonal analysis of Atlantic Ocean surface temperatures // *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 1977. V. 103. № 437. P. 467–478. <https://doi.org/10.1002/qj.49710343707>
20. *Tourre Y.M., Rajagopalan B., Kushnir Y.* Dominant patterns of climate variability in the Atlantic Ocean during the last 136 years // *J. Climate*. 1999. V. 12. № 8. P. 2285–2299.
21. *Угрюмов А.И.* О крупномасштабных колебаниях температуры поверхности воды в Северной Атлантике // *Метеорология и гидрология*. 1973. Т. 5. С. 12–22.
22. *Balmaseda M.A., Vidard A., Anderson D.L.T.* The ECMWF Ocean Analysis System: ORA-S3 // *Mon. Weather Rev.* 2008. V. 136. № 8. P. 3018–3034. <https://doi.org/10.1175/2008MWR2433.1>
23. *Uppala S.M., Kållberg P.W., Simmons A.J. et al.* The ERA-40 re-analysis // *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 2005. V. 131B. № 612. P. 2961–3012. <https://doi.org/10.1256/qj.04.176>
24. *Pacanowski R.C., Philander S.G.H.* Parameterization of vertical mixing in numerical models of tropical oceans // *J. Phys. Oceanogr.* 1981. V. 11. № 11. P. 1443–1451.
25. *Huang N.E., Shen Z., Long S.R. et al.* The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis // *Proc. Roy. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 1998. V. 454. № 1971. P. 903–995. <https://doi.org/10.1098/rspa.1998.0193>
26. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K. et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
27. *Зуев В.В., Семенов В.А., Шелехова Е.А., Гулев С.К., Колтерманн П.* Оценки влияния океанического переноса тепла в Северной Атлантике и в Баренцевом море на климат Северного полушария // *Докл. АН*. 2012. Т. 445. № 5. С. 585–589.
28. *Moshonkin S.N., Diansky N.A.* Upper mixed layer temperature anomalies at the North Atlantic storm-track zone // *Ann. Geophysicae*. 1995. V. 13. P. 1015–1026.
29. *Carton J.A., Grodsky S.A., Liu H.* Variability of the oceanic mixed layer, 1960–2004 // *J. Climate*. 2008. V. 21. № 5. P. 1029–1047. <https://doi.org/10.1175/2007JCLI1798.1>
30. *Lorbacher K., Dommenges D., Niiler P.P. et al.* Ocean mixed layer depth: A subsurface proxy of ocean-atmosphere variability // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. P. C07010. <https://doi.org/10.1029/2003JC002157>
31. *Wang C., Zhang L.* Multidecadal ocean temperature and salinity variability in the tropical North Atlantic: Linking with the AMO, AMOC, and subtropical cell // *J. Climate*. 2013. V. 26. № 16. P. 6137–6162. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00721.1>
32. *Diansky N.A., Sukhonos P.A.* Multidecadal variability of hydro-thermodynamic characteristics and heat fluxes

- in North Atlantic // *Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes*. Springer Geology. Springer, Cham. 2018. P. 125–137.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-77788-7_14
33. Kieke D., Yashayaev I. Studies of Labrador Sea Water formation and variability in the subpolar North Atlantic in the light of international partnership and collaboration // *Prog. Oceanogr.* 2015. V. 132. P. 220–232.
<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2014.12.010>
 34. Mantua N.J., Hare S.R., Zhang Y. et al. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 1997. V. 78. № 6. P. 1069–1079.
 35. Алексеев Г.В., Глок Н.И., Смирнов А.В., Вязилова А.Е. Влияние Северной Атлантики на колебания климата в районе Баренцева моря и их предсказуемость. // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 8. С. 38–56.
 36. Иванов В.В., Репина И.А. Влияние сезонной изменчивости температуры атлантической воды на ледяной покров Северного Ледовитого океана // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2018. Т. 54. № 1. С. 73–82.
 37. Cayan D.R. Latent and sensible heat flux anomalies over the northern oceans: Driving the sea surface temperature // *J. Phys. Oceanogr.* 1992. V. 22. № 8. P. 859–881.
 38. Slonosky V., Yiou P. Does the NAO index represent zonal flow? The influence of the NAO on North Atlantic surface temperature // *Clim. Dyn.* 2002. V. 19. № 1. P. 17–30.
<https://doi.org/10.1007/s00382-001-0211-y>
 39. Zorita E., Kharin V., von Storch H. The atmospheric circulation and sea surface temperature in the North Atlantic area in winter: their interaction and relevance for Iberian precipitation // *J. Climate*. 1992. V. 5. № 10. P. 1097–1108.
 40. Greatbatch R.J. The North Atlantic Oscillation // *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2000. V. 14. Is. 4–5. P. 213–242.
<https://doi.org/10.1007/s004770000047>
 41. Latif M., Grötzner A., Münnich M. et al. A mechanism for decadal climate variability. In: Anderson D.L.T., Willebrand J. (eds) *Decadal Climate Variability*. NATO ASI Series (Series I: Global Environmental Change). Springer, Berlin, Heidelberg. 1996. V. 44. 387 pp.
https://doi.org/10.1007/978-3-662-03291-6_6
 42. Peng S., Fyfe J. The coupled patterns between sea level pressure and sea surface temperature in the midlatitude North Atlantic // *J. Climate*. 1996. V. 9. № 8. P. 1824–1839.
 43. Folland C.K., Knight J., Linderholm H.W., Fereday D., Ineson S., Hurrell J.W. The summer North Atlantic Oscillation: past, present, and future // *J. Climate*. 2009. V. 22. № 5. P. 1082–1103.
<https://doi.org/10.1175/2008JCLI2459.1>
 44. Chang P., Ji L., Li H. A decadal climate variation in the tropical Atlantic Ocean from thermodynamic air–sea interactions // *Nature*. 1997. V. 385. № 6616. P. 516–518.
<https://doi.org/10.1038/385516a0>
 45. Xie S.P. A dynamic ocean–atmosphere model of the tropical Atlantic decadal variability // *J. Climate*. 1999. V. 12. № 1. P. 64–70.
<https://doi.org/10.1175/1520-0442-12.1.64>

Connection of Long-Period Modes of Variability of Temperature and Mixed Layer Depth in the North Atlantic and Climate Variability Indices

P. A. Sukhonos^{1, *} and N. A. Diansky^{2, 3, 4, **}

¹*Institute of Natural and Technical Systems, Sevastopol, Russia*

²*Zubov State Oceanographic Institute, Moscow, Russia*

³*Faculty of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

⁴*Institute of Numerical Mathematics of the RAS, Moscow, Russia*

*e-mails: pasukhonis@mail.ru

**e-mails: nikolay.diansky@gmail.com

The interannual-multidecadal variability of temperature and depth of the upper mixed layer (UML) of the North Atlantic (NA) is analyzed according to the ORA-S3 ocean reanalysis data for 1959–2011. A significant part of the UML in the NA is characterized by warming and a decrease in its thickness in all seasons for the analyzed period. After the linear trend has been removed, the anomalies of temperature and depth of the UML in individual seasons are decomposed into the empirical orthogonal functions (EOF). It was found that the three leading EOFs describe more than 50% of the total variability of the temperature and depth of the UML. The first EOF has a horseshoe-shaped structure and represents coherent changes in the temperature and depth of the UML throughout the entire NA, manifesting throughout the year. This mode corresponds to the Atlantic multidecadal oscillation. The spatial structure of the second EOF in the winter–spring period is a tripole and is caused by the North Atlantic Oscillation (NAO). The temporal coefficient of the second EOF of the UML temperature in the NA and the NAO index significantly correlate synchronously and when the NAO index is 11 years ahead. The second EOF of the UML temperature in the summer–autumn period is associated with the Atlantic meridional mode. The third EOF, which is typical for the UML temperature fluctuations in January, corresponds to the East Atlantic Oscillation.

Keywords: empirical orthogonal functions, upper mixed layer, temperature, interannual-multidecadal variability, North Atlantic