

УДК 551.465

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕРМОХАЛИННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ В РАЗЛИЧНЫЕ ФАЗЫ АТЛАНТИЧЕСКОЙ МУЛЬТИДЕКАДНОЙ ОСЦИЛЛЯЦИИ ПО ДАННЫМ ОКЕАНСКИХ ОБЪЕКТИВНЫХ АНАЛИЗОВ И РЕАНАЛИЗОВ

© 2021 г. В. А. Багатинский^{a, *}, Н. А. Дианский^{a, b, c}

^aМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

^bИнститут вычислительной математики РАН им. Г.И. Марчука, ул. Губкина, 8, Москва, 119333 Россия

^cГосударственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Кропоткинский пер., 6, Москва, 119034 Россия

*e-mail: vladbag38@gmail.com

Поступила в редакцию 30.08.2020 г.

После доработки 05.12.2020 г.

Принята к публикации 09.12.2020 г.

По данным объективных океанских анализов EN4 и WOA13 и реанализов GFDL, ESTOC, ORA-S4 и GECCO2 исследуются зонально осредненные характеристики термохалинной циркуляции вод Северной Атлантики (СА) в различные фазы индекса Атлантической мультидекадной осцилляции (АМО) за последние 70 лет. Показано, что в зонально осредненных климатических трендах и разностях композитов аномалий полей потенциальной температуры и солёности для всех массивов данных проявляются схожие термохалинные структуры. Для того чтобы выяснить как изменчивость в термохалинном состоянии вод в СА сопровождается изменчивостью в ее термохалинной циркуляции, проводился анализ изменчивости функции тока Атлантической меридиональной опрокидывающейся циркуляции (АМОЦ). Рассчитанные по данным океанских объективных анализов и реанализов средние функции тока АМОЦ, отражающие термохалинную циркуляцию в СА, в целом похожи друг на друга. Тем не менее по своей пространственной структуре их можно разделить на две группы: (EN4, WOA13, GFDL) и (ESTOC, ORA-S4, GECCO2). В своих трендах и разностях композитов аномалий функции тока АМОЦ реанализов сильно отличаются как между собой, так и от данных объективных анализов EN4 и WOA13. Причем главное отличие заключается в знаках климатических трендов и разностей композитов, определяющих изменения направления зонально осредненной термохалинной циркуляции. Было установлено, что в чередующиеся последовательные периоды индекса АМО положительные и отрицательные (и солёностные) аномалии распространяются с периодом около 60 лет по ходу движения вод в АМОЦ, опускаясь в глубинные слои океана примерно на 60° N и поднимаясь на 25° N. Наиболее ярко этот процесс проявляется для объективных анализов EN4 и WOA13 и реанализа ORA-S4. Можно сделать вывод, что этот механизм вносит существенный вклад в формирование фаз индекса АМО.

Ключевые слова: климат, циркуляция, АМОЦ, Северная Атлантика, АМО, объективный анализ, реанализ, композитный анализ

DOI: 10.31857/S0002351521020024

1. ВВЕДЕНИЕ

В циркуляции вод Северной Атлантики (СА) на значимом уровне выделяются естественные долгопериодные квазициклические колебания с характерными периодами 50–70 лет. Это явление получило название Атлантической мультидекадной осцилляции (АМО) [1, 2]. Временной ход индекса АМО определяется как временной ход осредненной по экватории СА от экватора до 70° с.ш. аномалии температуры поверхности океана (ТПО), отсчитываемой относительно климатического линейного тренда ТПО [3]. Предпо-

лагается, что АМО отражает собственные моды климатической изменчивости в системе океан–атмосфера, а линейный тренд – климатические изменения, вызванные внешними факторами (антропогенные и природные выбросы парниковых газов, извержения вулканов, изменение солнечной активности и др.). На рис. 1а показано сравнение осредненных по пространству аномалий ТПО в СА, рассчитанных по данным NOAA (National Oceanic & Atmospheric Administration) [3] и EN4 [4] с 1900 г. Видно, что, хотя базы данных разные, аномалии ТПО хорошо соответствуют друг другу, тренды на потепление за последние

120 лет по данным NOAA и EN4 составляют 0.045 и 0.060°C/10 лет соответственно. За вычетом линейного тренда как раз получаются колебания, в которых проявляются мультидекадные и декадные колебания (рис. 1б), рассчитанные по данным NOAA [3]. Анализ климатического тренда аномалий ТПО в СА также представляет научный интерес, поскольку позволяет выявлять изменения климата и их тенденции.

АМО представляет собой ярко выраженный климатический сигнал мультидекадного и декадного масштабов, проявляющийся в ряде климатических характеристик системы океан–атмосфера. Воздействие АМО может оказывать влияние на изменения температуры воздуха, осадков и стока рек в СА, Европе и Арктике [3], на активность ураганов [5, 6] в СА, а также на атмосферные переносы тепла и влаги в Атлантико-Европейском регионе [7]. Однако единая точка зрения на природу формирования АМО пока еще не выработана.

В настоящее время предложено несколько возможных механизмов для объяснения естественных мультидекадных колебаний климата в Арктике и СА. В работе [8] авторы указывают на то, что механизм генерации мультидекадной изменчивости связан с взаимодействиями на границе океан–атмосфера и заключается в реакции атмосферы на аномалии ТПО. Одним из возможных механизмов поддержания АМО является сдвиг фаз между долгопериодными изменениями потоков тепла на границе раздела океан–атмосфера в высоких широтах СА и величинами меридиональных переносов тепла в Субтропической Атлантике, определяемый временем адвекции термохалинных аномалий из Тропической Атлантики в субарктические широты [9–14].

В работах [15, 16] на основе результатов длительных расчетов модели земной системы мультидекадные колебания связываются с колебаниями в Арктике. Альтернативная гипотеза состоит в том, что колебательный процесс поддерживается распространением волн типа Россби вдоль береговой линии [17, 18].

В работе [19] предполагается, что колебания климата связаны с колебаниями интенсивности меридиональной циркуляции в СА — так называемой Атлантической меридиональной опрокидывающейся циркуляции (АМОЦ). При повышении интенсивности меридиональной циркуляции в верхних слоях СА происходит усиление переноса более теплых вод в высокие широты СА. Однако эти более теплые и, следовательно, легкие воды в высоких широтах СА замедляют меридиональную циркуляцию, что, в свою очередь, приводит к охлаждению и переходу в противоположную фазу колебаний.

Поскольку АМОЦ является отражением термохалинной циркуляции в Атлантике, то формирование индекса АМО должно быть тесно связано с термохалинным режимом СА. Уже проведенное нами изучение [20] зонально осредненных трендов и аномалий полей потенциальной температуры и солёности объективных анализов EN4 [4] и WOA13 [21, 22] позволило обнаружить три интересных факта:

первый из них состоит в том, что в верхнем 1-км слое океана, в основном, наблюдается тренд на потепление и осолонение. Ниже 1-км слоя наблюдаются значительные области похолодания и распреснения, что можно связать с таянием льдов Гренландии, выносом распресненных вод из Северного Ледовитого океана и затягиванием этих холодных и более пресных вод в глубинные слои. Такие структуры трендов потенциальной температуры и солёности, наиболее вероятно, являются следствием парникового эффекта, вызванного, согласно IPCC (International Panel on Climate Change, или в русской версии МГЭИК — Межправительственная группа экспертов по изменению климата), в основном антропогенным воздействием [23, 24].

Второй факт заключается в том, что в периоды 1951–1959, 2000–2008 и 2009–2017 гг., когда индекс АМО (рис. 1б) положительный, наблюдаются положительные аномалии (за вычетом трендов) потенциальной температуры и солёности в верхнем ~1-км слое СА, в то время как глубже ~1-км слоя наблюдаются значительные области отрицательных аномалий потенциальной температуры и солёности. Когда же индекс АМО отрицательный (1973–1981 и 1982–1990 гг.), то в верхнем ~1-км слое наблюдаются отрицательные температурные и солёностные аномалии, а глубже, наоборот, положительные.

Третий факт состоит в том, что в чередующиеся последовательные периоды индекса АМО (1951–1959, 1961–1969, 1973–1981, 1982–01990, 1991–1999, 2000–2008 и 2009–2017 гг.), включающие переходные периоды от положительной к отрицательной фазе индекса АМО (1951–1959 гг.) (и наоборот (1991–1999 гг.)), положительные и отрицательные аномалии как потенциальной температуры, так и солёности распространяются с периодом около 60 лет по ходу движения вод в АМОЦ, опускаясь в глубинные слои океана примерно на 60° N и поднимаясь на поверхность на 25° N. Можно предположить, что благодаря этому наблюдаются положительные и отрицательные фазы индекса АМО. По-видимому, такая структура изменчивости связана с характером формирования термохалинной циркуляции в СА и требует своего дальнейшего исследования, используя другие базы данных объективных анализов и реанализов, а также проведения численных экспериментов с моде-

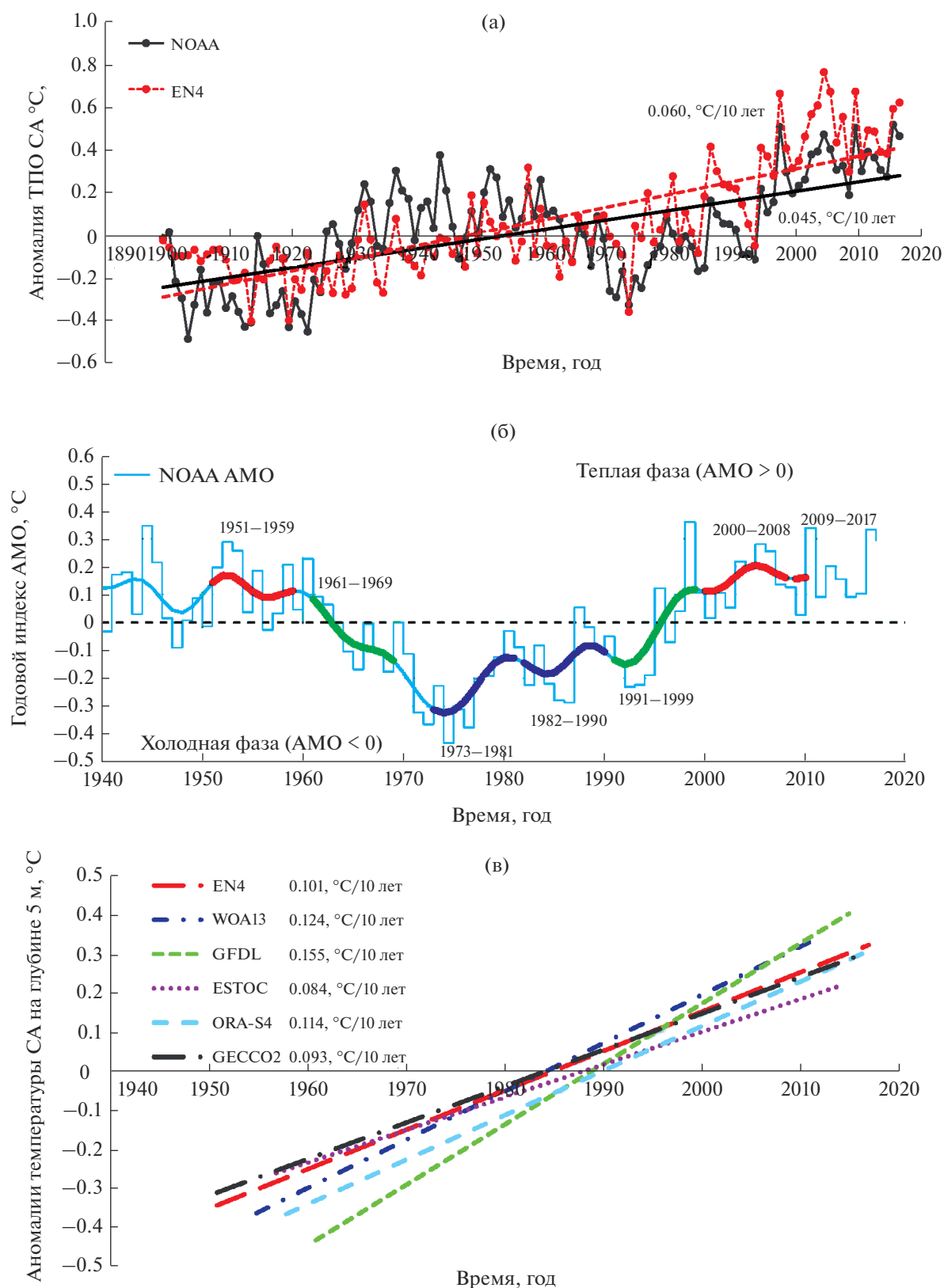


Рис. 1. (а) – Временной ход и тренды аномалий поверхностной температуры СА, осредненные от экватора до 70° N по данным NOAA [3] (сплошная линия) и EN4 [4] (пунктирная линия) с 1900 г. (б) – Ступенчатая линия – значения среднегодового индекса АМО, рассчитанного NOAA (National Oceanic & Atmospheric Administration) [3] с 1856 г. (показаны с 1940 г.), и плавная кривая – результат низкочастотной фильтрации с отсечением периодов до 8 лет. (в) – Средние тренды аномалий температуры СА на глубине 5 м по данным EN4, WOA13, GFDL, GECCO2, ESTOC и ORA-S4.

лью общей циркуляции океана Института Вычислительной Математики (ИВМ) РАН – INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model) [25].

В настоящей работе ставится задача изучения этих фактов с привлечением данных океанских реанализов, в которых в отличие от объективных анализов EN4 и WOA13 реконструируется общая циркуляция вод Мирового океана. При этом основная гипотеза вышеперечисленных фактов – изменение интенсивности термохалинной циркуляции.

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Для определения и сравнения термохалинного состояния СА были выбраны глобальные поля температуры и солёности по двум объективным анализам EN4 [4] и WOA13 (World Ocean Atlas 2013) [21, 22] и четырем реанализам GFDL (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) [26], ESTOC (Estimated state of ocean for climate research) [27], ORA-S4 (Ocean ReAnalysis System 4) [28] и GECCO2 (German partner of the Estimating the Circulation and Climate of the Ocean 2) [29]. Объективные анализы EN4 и WOA13 получены с использованием только пространственно-временной интерполяции данных наблюдений без учета динамики океана. Реанализы GFDL, ESTOC, ORA-S4 и GECCO2 получены путем расчетов по разным моделям общей циркуляции океана с использованием различных методов усвоения океанографической информации из каких-либо объективных анализов и спутниковой информации. Поэтому в них представлена и циркуляция вод Мирового океана. Потоки тепла, пресной воды и импульса из атмосферы предписываются из различных источников, полученных, в свою очередь, с использованием различных атмосферных реанализов. Основным источником данных объективных анализов EN4 и WOA13 и реанализа GFDL служит база данных World Ocean Database (WOD13 и WOD09), которая разработана NOAA, источник реанализа ESTOC – данные EN4, а реанализов ORA-S4 и GECCO2 – более ранняя версия EN3. Описание рассматриваемых массивов данных приведено в табл. 1 [30].

Стоит отметить, что океанский реанализ GFDL получен с помощью расчетов по совместной климатической модели общей циркуляции атмосферы и океана GFDL CM2.1 (Climate Model 2.1), которая использовалась для проведения климатических расчетов для подготовки 4-го оценочного доклада IPCC/МГЭИК [23].

Было проведено предварительное сравнение схожих реанализов ORA-S3 и ORA-S4, и в силу того, что ORA-S4 содержит больше горизонтов по глубине, имеет больший временной охват, выбор был остановлен на нем.

По массивам океанских данных GFDL, ESTOC, ORA-S4 и GECCO2 для потенциальной температуры и солёности были рассчитаны средние значения, а по данным EN4 для лета и зимы¹ – отдельно – для каждого рассматриваемого периода (рис. 1б):

– трех “теплых” периодов, когда наблюдаются значительные (по модулю больше 0.1°C) положительные состояния индекса АМО – с 1951 по 1959 гг. (кроме GFDL, ESTOC и ORA-S4), с 2000 по 2008 гг. и с 2009 по 2014–2017 гг. (в зависимости от временного охвата данных, см. табл. 1);

– переходного периода от “теплой” к “холодной” фазе – с 1961 по 1969 гг.;

– двух “холодных” периодов, когда наблюдаются значительные отрицательные состояния индекса АМО – с 1973 по 1981 гг. и с 1982 по 1990 гг.;

– переходного периода от “холодной” к “теплой” фазе – с 1991 по 1999 гг.

Интервалы периодом примерно 10 лет выбраны для того, чтобы исключить влияние 10-летних колебаний на более долгопериодные квази-шестидесятилетние колебания.

Массив данных WOA13 содержит среднемесячные, среднесезонные и среднегодовые данные по *in situ* температуре и солёности, осредненные для следующих 6 периодов: с 1955 по 1964 гг., с 1965 по 1974 гг., с 1975 по 1984 гг., с 1985 по 1994 гг., с 1995 по 2004 гг., с 2005 по 2012 гг. Для анализа были использованы средние состояния для зимы и лета для каждого периода. По *in situ* температуре данных WOA13 была рассчитана потенциальная температура с помощью методики TEOS-10 [31].

На рис. 1в показаны средние (от экватора до 70° N) тренды аномалий приповерхностной температуры СА по данным EN4, WOA13, GFDL, ESTOC, ORA-S4 и GECCO2 с 1951 по 2017 гг. и в зависимости от временного охвата данных (см. табл. 1). Средняя приповерхностная температура на глубине 5 м имеет положительный тренд по всем массивам данных. Объективный анализ EN4 и реанализ GECCO2 имеют одинаковый временной охват, и их тренды приповерхностной температуры близки и равны 0.101 и 0.093°C/10 лет соответственно. Тренд приповерхностной температуры по данным объективного анализа WOA13 выше и составляет 0.124°C/10 лет, так как этот массив имеет более короткую продолжительность, чем объективный анализ EN4, и вклад периода наиболее интенсивного потепления с конца 1970-х по начало 2000-х гг. сказывается в нем сильнее. Временной охват данных ESTOC, ORA-S4 и GFDL практически одинаковый, но при этом они показывают различные тренды приповерхностной температу-

¹ Заметим, что для океана даты начала и окончания зимнего (январь, февраль и март) и летнего (июль, август и сентябрь) периодов принято сдвигать на 1 мес. вперед от календарных дат.

Таблица 1. Описание океанских объективных анализов EN4 и WOA13 и реанализов GFDL, ESTOC, ORA-S4 и GECCO2, используемых в работе

	EN4	WOA13	GFDL	ESTOC (K7)	ORA-S4	GECCO2
Версия	4.2.0	2013 v2	1	1	4	2
Разработчик	MetOffice (UK)	NODC/NOAA (USA)	GFDL/NOAA (USA)	JAMSTEC/RCGC (Japan)	ECMWF (Europe)	UHN (Germany)
Модель	—	—	GFDLs ECDA CM2.1	MOM3-based OGCM	NEMO V3.0	MITgcm
Период расчета, годы	1900–2017	1955–2012	1961–2015	1957–2014	1958–2017	1948–2016
Шаг по времени	1 мес.	10 лет (для каждого календарного месяца)	1 мес.	1 мес.	1 мес.	1 мес.
Пространственное разрешение	1° × 1°	0.25° × 0.25°	1° × (1° – 1/3°)	1° × 1°	1° × 1°	1° × 1°
Число уровней	42	102	50	46	42	50
Нижний уровень, м	5350	5500	5316	5525	5350	5906
Исходные данные	WOD13, ASVO, GTSPP, Argo	WOD13	WOD09, GTSPP, Argo	EN4	EN3	EN3
Атмосферное воздействие	—	—	Atmospheric component of the coupled model	NCEP/NCAR RAI	ERA-40, ERA-Interim	NCEP RAI
Ассимиляция ТПО и морского льда	—	—	NCEP/NCAR, NCEP/DOE HadSST, OISST	Reynolds SST, OISST	ERA-40, NCEP OI v2, OSTIA	AMSRE SST

ры, равные 0.084° , 0.114° и $0.155^\circ\text{C}/10$ лет. У всех данных тренды выше, чем показанные на рис. 1а, т.к. в последние десятилетия климатические изменения заметно выше [23].

3. ОЦЕНКА КЛИМАТИЧЕСКИХ ТРЕНДОВ ТЕРМОХАЛИННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ

Для того чтобы выяснить как изменчивость в термохалинном состоянии в Северной Атлантике сопровождается изменчивостью в ее термохалинной циркуляции, была рассчитана функция тока АМОЦ для каждого из массивов используемых данных. В целом функция тока АМОЦ является характеристикой термохалинной циркуляции океана в СА, когда в верхнем ~ 1 -км слое воды медленно переносятся на север, отдавая накопленное тепло в атмосферу в средних и высоких широтах, и вследствие этого охлаждаются и опускаются (опрокидываются), возвращаясь в глубинных слоях на юг. Именно АМОЦ и определяет меридиональный перенос тепла на север водами СА. Таким образом, движение вод в АМОЦ можно косвенно связать с Атлантическим сектором океанского конвейера Брокера–Лаппо [32, 33].

Для океанских реанализов структура функции тока АМОЦ рассчитывалась по меридиональной составляющей скорости из баз данных рассматриваемых реанализов GFDL, ESTOC, ORA-S4 и GECCO2 по стандартной методике, описанной, например, в [25, 34].

Для восстановления динамики океана и расчета функции тока АМОЦ по данным о температуре и солёности объективных анализов EN4 и WOA13 (для каждого отдельно) была разработана ниже описываемая методология, основанная на хорошо апробированной модели океана INMOM [25]. Эта модель была реализована для акватории СА от 100° W до 15° E и от экватора до 80° N с пространственным разрешением 0.5° по долготе и широте. Для этого были подготовлены данные о батиметрии дна по массиву ETOPO5. Состояния по потенциальной температуре и солёности для этой модели задавались из EN4 и WOA13 для лета и зимы отдельно для каждого периода индекса АМО. Последнее связано с тем, что невозможно корректно восстановить среднегодовую циркуляцию океана по его среднегодовому термохалинному состоянию. Атмосферное воздействие рассчитывалось по приповерхностным атмосферным характеристикам из базы данных CORE (Coordinated Ocean-ice Reference Experiments) версии 2, специально предназначенного для автономных расчетов моделей общей циркуляции океана [35, 36]. Расчет циркуляции СА проводился по методу диагноза-адаптации, предложенному акад. А.С. Саркисяном с соавторами [37]. Согласно этой методике запуск модели осуществ-

лялся на короткий срок в 75 сут, из которых первые 30 сут проводился разгон модели в режиме диагноза при предписанных полях потенциальной температуры и солёности. В последующие 45 сут эксперимент проводился в режиме адаптации, при котором рассчитывались итоговые поля термохалинного состояния и циркуляции вод для всех летних и зимних выделенных периодов индекса АМО. Для анализа среднегодового состояния этих периодов результаты расчета осреднялись для зимы и лета и за последние 30 сут расчетов. При таком подходе роль модели вторична, поскольку она главным образом используется только для восстановления квази-геострофической циркуляции океана по оценке его термохалинного состояния по данным наблюдений, а также устранения на этапе адаптации заведомых ошибок в 3D полях потенциальной температуры и солёности. При таком подходе динамика океана, восстановленная по методу диагноза-адаптации, определяется, в первую очередь, используемыми данными наблюдений. Расчеты показали, что эта версия INMOM по предложенному сценарию диагноз-адаптация адекватно воспроизводит среднеклиматическую наблюдаемую структуру основных гидрофизических полей в средних и высоких широтах.

Функция тока АМОЦ определялась по рассчитанной с помощью INMOM меридиональной скорости, по той же методике [25, 34]. Следует отметить, что восстановленные для объективных анализов EN4 и WOA13 функции тока АМОЦ показаны на рис. 2а, б только начиная от 20° N, так как метод диагноза-адаптации в используемой версии INMOM работает недостаточно корректно в приэкваториальной области. Это происходит, во-первых, из-за влияния граничных условий, выбранных на экваторе, а во-вторых, из-за особенностей океанической циркуляции, приводящей здесь к дополнительному шуму в динамике океана за счет возбуждения экваториальных волн Россби и Кельвина. Поэтому в низких широтах продолжительность расчетов по методу диагноза-адаптации должна быть больше, чем в средних и высоких широтах. Но так как нас интересовала функция тока АМОЦ в средних широтах, то нам было достаточно и 75 сут расчетов (30 сут диагноза и 45 сут адаптации).

Стоит отметить, что при анализе изменений характеристик термохалинной циркуляции по данным объективных анализов EN4 и WOA13 использовались не исходные данные, а прошедшие процедуру адаптации в модели INMOM на ее модельной сетке с разрешением 0.5° по долготе и широте, а не исходные данные (табл. 1).

За исключением реанализа GECCO2, все рассчитанные функции тока АМОЦ в целом согласуются с климатическими расчетами [36, 38] и между

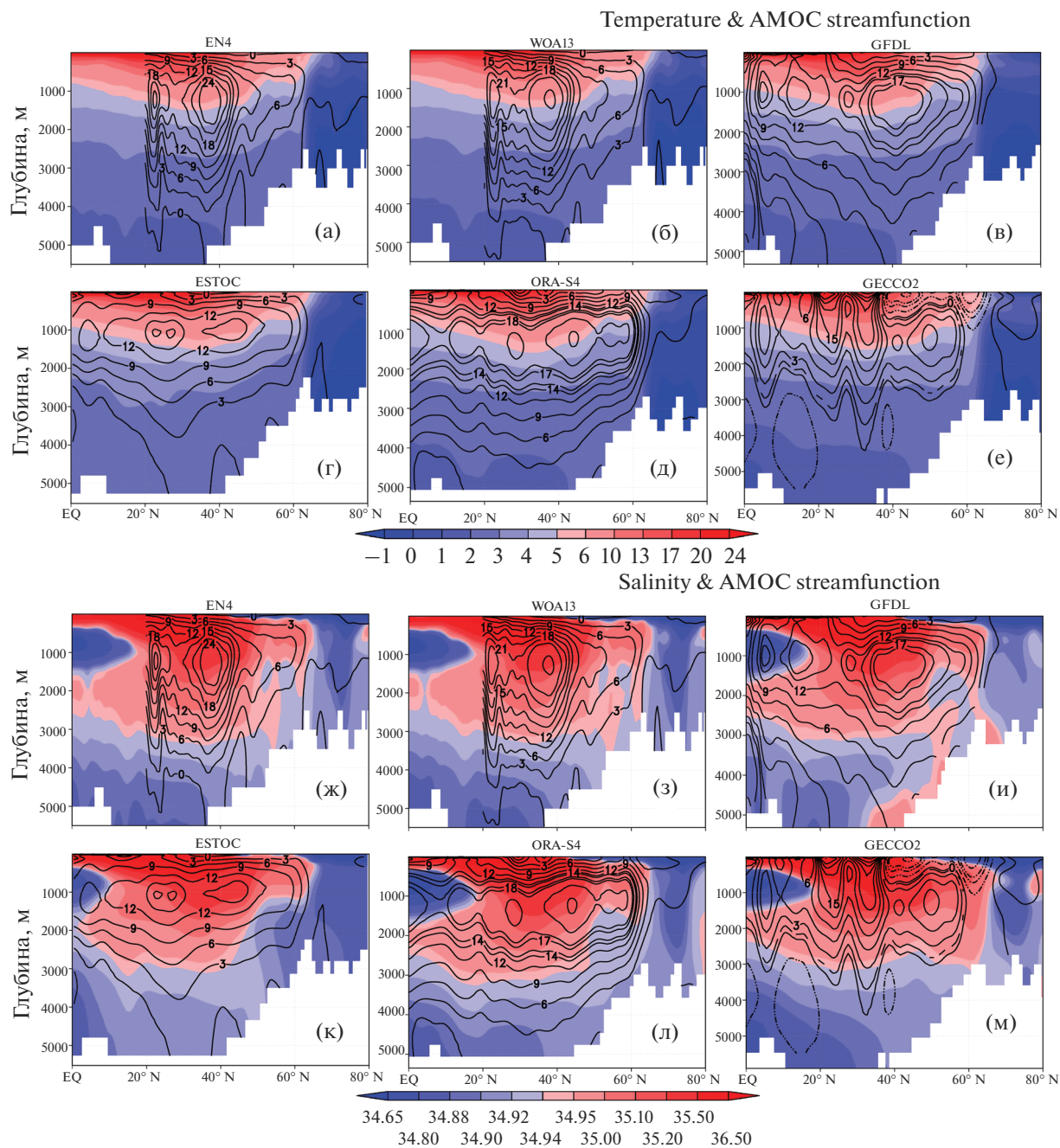


Рис. 2. Рассчитанные функции тока АМОЦ (показаны изолиниями в Св) по данным объективных анализов EN4 (а, ж), WOA13 (б, з) и реанализам GFDL (в, и), ESTOC (г, к), ORA-S4 (д, л) и GECCO2 (е, м) на фоне своих зонально-осредненных потенциальных температур (а, б, в, г, д, е), показаны цветом в °С, и соленостей (ж, з, и, к, л, м, н), показаны цветом в ПЕС (практические единицы солености).

собой (рис. 2). Функция тока АМОЦ, восстановленная с помощью модели INMOM по данным объективного анализа EN4 (рис. 2а, 2ж) хорошо согласуется с функцией тока АМОЦ, рассчитанной по данным реанализа GFDL (рис. 2в, 2и), с коэффициентом корреляции равным 0.84. Более того,

рассчитанные по данным океанских объективных анализов и реанализов функции тока АМОЦ можно разделить на две группы: (EN4, WOA13, GFDL), где наблюдается ядро на ~40° N и (ESTOC, ORA-S4, GECCO2) – ядро немного сдвинуто к северу от 40° N.

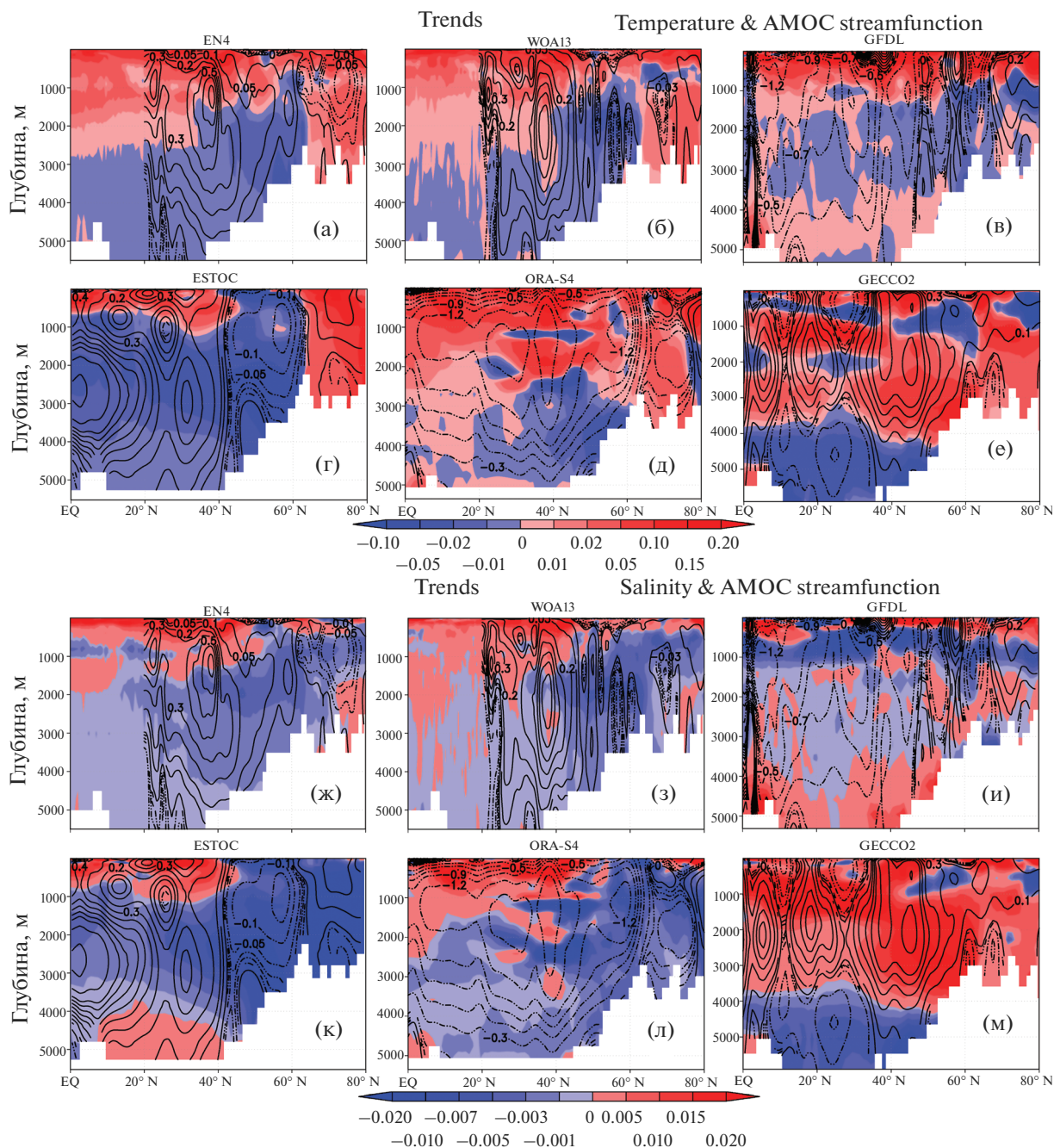


Рис. 3. Линейные тренды функции тока АМОЦ (показаны изолиниями в Св/10лет) по данным объективных анализов EN4 (а, ж), WOA13 (б, з) и реанализам GFDL (в, и), ESTOC (г, к), ORA-S4 (д, л) и GECCO2 (е, м) на фоне своих зонально осредненных линейных трендов потенциальной температуры (а, б, в, г, д, е), показаны цветом в °С/10 лет, и солёности (ж, з, и, к, л, м, н), показаны цветом в ПЕС/10 лет.

Если в целом рассчитанные нами функции тока АМОЦ по различным данным похожи друг на друга, то наши расчеты высветили проблему того, что в своих трендах и разностях композитов аномалий (см. следующий раздел статьи) функции тока АМОЦ реанализов сильно отличаются как между собой, так и от данных объективных ана-

лизов EN4, WOA13. Причем основная проблема заключается в том, какого знака эти климатические тренды и разности композитов аномалий функции тока АМОЦ.

На рис. 3 изолиниями показаны линейные тренды функции тока АМОЦ по данным объективных анализов и реанализов на фоне своих зо-

нально осредненных линейных трендов потенциальной температуры и солености (показаны цветом) в координатах широта—глубина.

Стоит отметить, что линейные тренды и аномалии (за вычетом трендов) потенциальной температуры и солености рассчитывались в каждой точке сетки рассматриваемых данных, а затем зонально осреднялись.

Зонально осредненные тренды потенциальной температуры (рис. 3, показаны цветом) СА, построенные по данным объективных анализов EN4 (рис. 3а), WOA13 (рис. 3б) и реанализа GFDL (рис. 3в), показывают, что в верхнем ~1-км слое в основном наблюдается потепление, а ниже этого слоя наблюдаются значительные области похолодания. По нашему мнению, эти массивы данных показывают наиболее объективную картину трендов. Области похолодания и распреснения в глубинных слоях можно связать с таянием льдов Гренландии, выносом распресненных вод из Северного Ледовитого океана и затягиванием этих холодных и более пресных вод в глубинные слои.

Для реанализа ESTOC (рис. 3г) область потепления наблюдается в верхнем ~1-км слое от экватора до 40° N, а затем область похолодания до 60° N и далее снова область потепления по всей глубине до 80° N. В реанализе ORA-S4 (рис. 3д) в верхнем ~2.5-км слое наблюдается потепление, а глубже также есть области похолодания. По данным реанализа GECCO2 (рис. 3е), в верхнем ~4-км слое наблюдаются области и потепления, и похолодания, ниже ~4-км слоя — только области похолодания.

Зонально осредненные тренды солености (рис. 3, показаны цветом) СА показали осолонение в верхнем ~1-км слое от экватора до ~40–50° N и в основном распреснение от ~50° N до 80° N по данным объективных анализов EN4 (рис. 3ж) и WOA13 (рис. 3з), а также реанализов ESTOC (рис. 3к) и ORA-S4 (рис. 3л), в то время как глубже ~1-км слоя наблюдаются в основном области распреснения. По данным реанализа GFDL (рис. 3и), по всей глубине наблюдаются и области распреснения и осолонения. В реанализе GECCO2 (рис. 3м) в верхнем ~4-км слое осолонение, а ниже — распреснение.

В своих трендах функции тока АМОЦ (рис. 3, показаны изолиниями) реанализов и объективных анализов EN4 и WOA13 показывают неоднозначную структуру. Так, данные объективных анализов (данные наблюдений) EN4 (рис. 3а, 3ж) и WOA13 (рис. 3б, 3з) и реанализа GECCO2 (рис. 3е, 3м) демонстрируют в основном положительные тренды функции тока АМОЦ, что говорит о ее интенсификации.

Данные реанализа ESTOC (рис. 3г, 3к) показывают положительные тренды функции тока АМОЦ от экватора до 40° N и отрицательные от 40° N до 60° N. Но тренды по данным GFDL

(рис. 3в, 3и) и ORA-S4 (рис. 3д, 3л) показывают главным образом отрицательные значения, что сигнализирует об ослаблении АМОЦ при наблюдаемых климатических изменениях, что согласуется с климатическими расчетами и оценками по данным наблюдений IPCC [23], где с помощью модели GFDL показано, что если наблюдается тренд температуры на потепление, то АМОЦ ослабляется.

Таким образом, по данным объективных анализов (наблюдений) EN4 и WOA13, а также по реанализам GECCO2 и ESTOC — тренды функции тока АМОЦ в основном положительные, а по реанализам GFDL и ORA-S4 — тренды функции тока АМОЦ — отрицательные. Это противоречие должно быть исследовано в будущем, так как тренды функции тока АМОЦ во многом определяют глобальные климатические изменения.

4. КОМПОЗИТНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОХАЛИННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ

В данной работе применялся композитный анализ [20, 39], который основан на расчете разности композитов — осредненных за определенные периоды аномальных состояний. Разность композитов аномалий какой-либо характеристики отражает сигнал естественных мультидекадных колебаний, показывая картину изменений в теплой фазе по отношению к холодной.

Зонально осредненные разности композитов аномалий потенциальной температуры и солености (рис. 4, показаны цветом) для объективных анализов EN4 (рис. 4а, 4ж) и WOA13 (рис. 4б, 4з) и реанализа ORA-S4 (рис. 4д, 4л) показали важную особенность структуры пространственной термохалинной изменчивости. Было установлено, что в теплые периоды индекса АМО по сравнению с холодными в верхнем ~1-км слое СА в основном наблюдаются потепление и осолонение, кроме широт от 10° N до 20° N. Ниже ~1-км слоя наблюдаются значительные области похолодания и распреснения от экватора до 50°–60° N. Для реанализа GFDL разности композитов аномалий потенциальной температуры (рис. 4в) также показывают потепление в верхнем ~1-км слое и небольшое похолодание глубже, при этом зонально-осредненные разности композитов солености (рис. 4и) в верхнем ~1-км слое показывают области и осолонения, и распреснения. В реанализе ESTOC в верхнем ~1-км слое от экватора до 40° N наблюдается похолодание и далее до 80° N потепление (рис. 4г), и от экватора до 20° N — распреснение и далее до 80° N — в основном осолонение (рис. 4к). Зонально осредненные разности композитов потенциальной температуры и солености по данным реанализа GECCO2 (рис. 4е, 4м) показывают потепление и осолонение в верхнем

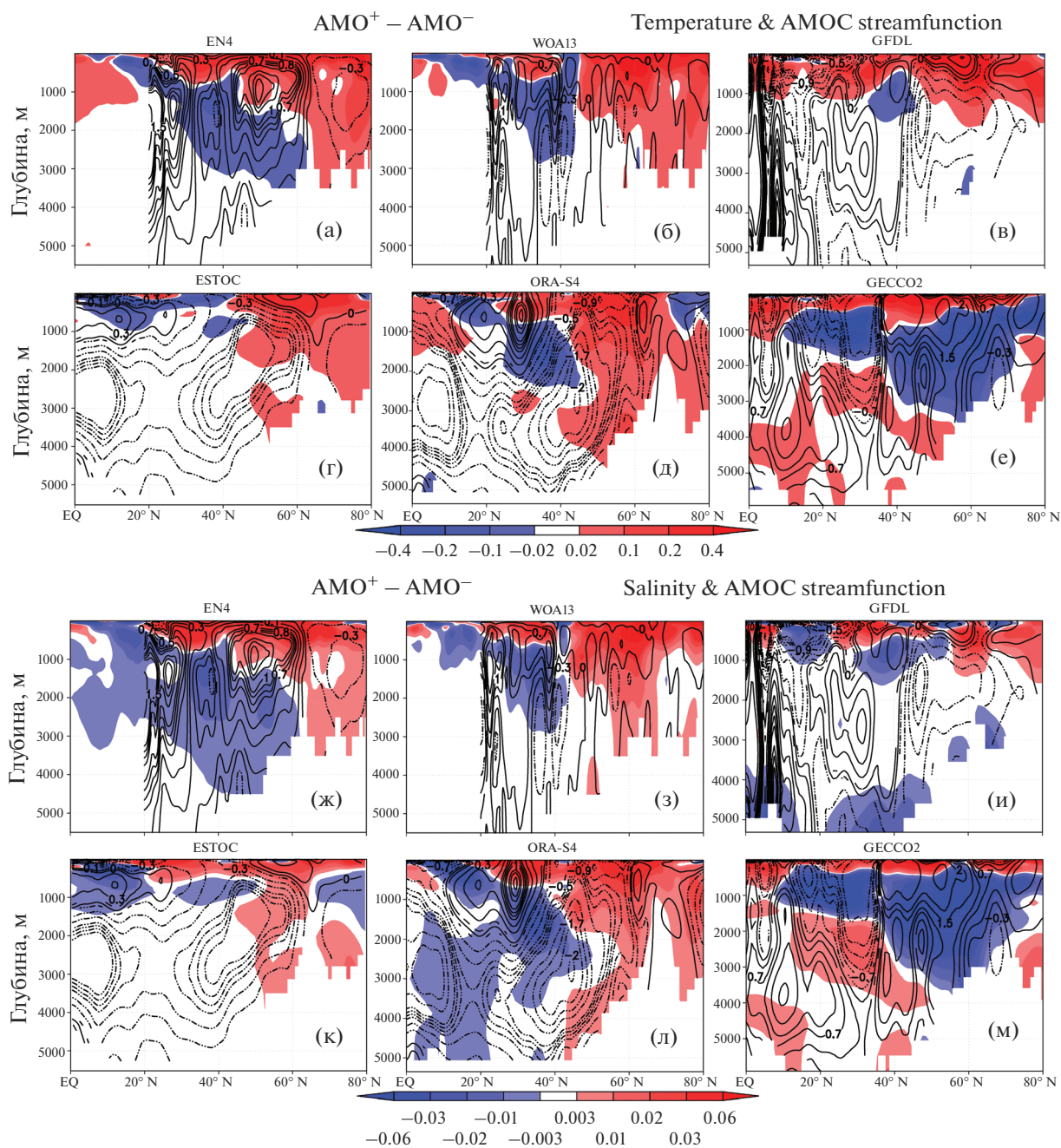


Рис. 4. Разности композитов аномалий функции тока АМОЦ (показаны изолиниями в Св) по данным объективных анализов EN4 (а, ж), WOA13 (б, з) и реанализам GFDL (в, и), ESTOC (г, к), ORA-S4 (д, л) и GECCO2 (е, м) на фоне своих зонально осредненных разностей композитов аномалий потенциальной температуры (а, б, в, г, д, е), показаны цветом в °С, и солёности (ж, з, и, к, л, м, н), показаны цветом в ПЕС.

~0.5-км слое, в слое от ~0.5 до ~2 км — похолодание и распреснение, и глубже ~2 км от экватора до 40° N снова наблюдается потепление и осолонение и от 40° N до 80° N — в основном похолодание и распреснение.

Разности композитов аномалий функции тока АМОЦ (рис. 4, показаны изолиниями) показыва-

ли, что по данным EN4 (рис. 4а, 4ж), WOA13 (рис. 4б, 4з) и GECCO2 (рис. 4е, 4м) наблюдается в основном усиление АМОЦ в теплую фазу индекса АМО по отношению к холодной, а по данным ESTOC (рис. 4г, 4к) и ORA-S4 (рис. 4д, 4л) — в основном ослабление АМОЦ, в то время как данные реанализа GFDL (рис. 4в, 4и) показывают смешанную структуру. Причем по данным

ESTOC от экватора до 25° N и по данным ORA-S4 от 10° N до 30° N наблюдаются также и области положительных значений разностей композитов аномалий функции тока АМОЦ, а по данным GECCO2 от 10° N до 35° N наблюдается область отрицательных значений.

Разности композитов аномалий функции тока АМОЦ по данным объективного анализа EN4 (рис. 4а, 4ж) согласуются с реанализом GFDL (рис. 4в, 4и) от 20° N до 40° N (в области ядра функции тока АМОЦ на 25° N (рис. 2а, 4в)), где наблюдаются положительные значения разностей композитов аномалий функции тока АМОЦ, и стоит отметить, что между этими широтами находится максимум меридионального переноса тепла на север [25].

Как и для данных объективных анализов EN4 и WOA13 для реанализа ORA-S4 и в меньшей степени для остальных реанализов GFDL, ESTOC и GECCO2 было обнаружено, что в чередующиеся последовательные периоды индекса АМО положительные и отрицательные температурные (и солёностные) аномалии распространяются по ходу движения вод в АМОЦ с периодом около 60 лет, опускаясь в глубинные слои океана примерно на 60° N и поднимаясь на поверхность на 25° N. Можно сделать вывод, что этот механизм вносит существенный вклад при формировании фазы индекса АМО.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Атлантический океан является важным звеном климатической системы Земли. Имеются основания полагать, что мультideкадные изменения климата во многом порождаются долгопериодными изменениями в термохалинной циркуляции СА, природа которых до сих пор до конца не изучена. Эти мультideкадные (главным образом квазишестидесятилетние) колебания климата хорошо проявляются в индексе АМО [1–3]. На фоне этих колебаний развиваются и декадные осцилляции.

Для объективного изучения состояния вод и термохалинной циркуляции СА в различные фазы индекса АМО по данным о потенциальной температуре и солёности океана были рассчитаны средние климатические состояния для различных периодов индекса АМО по двум объективным анализам EN4 [4] и WOA13 [21, 22] и четырьмя океанским реанализам GFDL [26], ESTOC [27], ORA-S4 [28] и GECCO2 [29].

Исследование зонально осредненных трендов потенциальной температуры и солёности СА объективных анализов EN4 и WOA13 и реанализов GFDL, ESTOC, ORA-S4 и GECCO2 показало, что по данным объективных анализов EN4 и WOA13 в верхнем ~1-км слое в основном наблюдается тренд на потепление и осолонение. Ниже этого

слоя наблюдаются значительные области похолодания и распреснения. При этом зонально-осредненные тренды потенциальной температуры согласуются по данным объективных анализов EN4 и WOA13 и реанализов GFDL и, в меньшей степени, ESTOC. А зонально осредненные тренды солёности согласуются по данным объективных анализов EN4 и WOA13 и реанализов ORA-S4 и ESTOC.

Также для анализа данных использовался композитный анализ, основанный на расчете усредненной разности состояний (композитов) для теплых и холодных периодов за вычетом линейного тренда [20, 39]. Таким образом, разность композитов аномалий какой-либо характеристики отражает сигнал естественных мультideкадных колебаний, показывая картину изменений в теплой фазе по отношению к холодной.

Зонально осредненные разности композитов аномалий потенциальной температуры и солёности показали, что для объективных анализов EN4 и WOA13 и реанализа ORA-S4 в теплые периоды индекса АМО по сравнению с холодными в верхнем ~1-км слое СА в основном наблюдаются потепление и осолонение. Ниже 1-км слоя наблюдаются значительные области похолодания и распреснения. По данным реанализа GFDL, такая структура наблюдается в меньшей степени, а по данным ESTOC практически не наблюдается. По данным GECCO2, верхний слой осолонения меньшей глубины, чем слой потепления, а в глубинных слоях кроме охлаждения и распреснения наблюдаются области потепления и осолонения.

Для того чтобы выяснить как изменчивость в термохалинном состоянии в СА сопровождается изменчивостью в ее термохалинной циркуляции, по меридиональной составляющей скорости течений реанализов и меридиональной составляющей скорости течений восстановленной по методу диагноза-адаптации [37] с помощью модели INMOM по данным объективных анализов были рассчитаны функции тока АМОЦ. АМОЦ, определяя меридиональный поток тепла в СА, имеет важное значение для формирования климата Земли и его изменений. Она отражает термохалинную циркуляцию в СА, показывая ее интенсивность и пространственно-временные особенности изменчивости состояния вод и их циркуляции.

В целом рассчитанные по данным океанских объективных анализов и реанализов средние функции тока АМОЦ, отражающие термохалинную циркуляцию в СА, похожи друг на друга. Тем не менее необходимо отметить, что функции тока АМОЦ по данным объективных анализов EN4 и WOA13 более схожи с функцией тока АМОЦ, рассчитанной по данным GFDL, чем по остальным реанализам, и по своей пространственной структуре рассчитанные функции тока АМОЦ

можно разделить на две группы: (EN4, WOA13, GFDL) и (ESTOC, ORA-S4, GECCO2).

Еще большее рассогласование имеется для трендов функции тока АМОЦ из реанализов, которые сильно отличаются как между собой, так и от данных объективных анализов EN4, WOA13. Причем основная проблема заключается в том, какого знака эти тренды. Так, данные объективных анализов EN4 и WOA13 и реанализов ESTOC и GECCO2 демонстрируют в основном положительные тренды функции тока АМОЦ, что говорит о ее интенсификации. Но тренды по данным реанализов GFDL и ORA-S4 показывают главным образом отрицательные значения, что сигнализирует об ослаблении АМОЦ при наблюдаемых климатических изменениях. Это противоречие должно быть исследовано в будущем, т.к. тренды функции тока АМОЦ во многом определяют глобальные климатические изменения.

Разности композитов аномалий функции тока АМОЦ показали, что по данным EN4, WOA13 и GECCO2 наблюдается в основном усиление АМОЦ в теплую фазу индекса АМО по отношению к холодной, а по данным ESTOC и ORA-S4 — в основном ослабление функции АМОЦ, в то время как данные реанализа GFDL показывают смешанную структуру. Разности композитов аномалий функции тока АМОЦ по данным объективного анализа EN4 согласуются с реанализом GFDL в области ядра функции тока АМОЦ на $\sim 25^\circ$ N, где наблюдаются положительные значения разностей композитов аномалий функции тока АМОЦ, и стоит отметить, что между этими широтами находится максимум меридионального переноса тепла на север водами СА [25].

Также было обнаружено, что в чередующиеся последовательные периоды индекса АМО положительные и отрицательные температурные (и солёностные) аномалии циркулируют с периодом около 60 лет по ходу движения вод в АМОЦ. Это явление лучше всего наблюдается по данным объективных анализов EN4 и WOA13 и реанализа ORA-S4 и в меньшей степени по остальным реанализам. Можно сделать вывод, что этот механизм вносит существенный вклад при формировании фаз индекса АМО.

Обнаруженные в океанских объективных анализах и реанализах значительные различия в зонально осредненных характеристиках и их изменениях для потенциальной температуры, солёности и функции тока АМОЦ свидетельствуют, что реконструкция океанических полей с помощью синтеза данных наблюдений и моделирования еще далека от завершения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке грантов РФФИ № 19-35-90132 (построение зонально осредненных трендов и разностей композитов характеристик термохалин-

ной циркуляции по данным объективных анализов и реанализов, проведение расчетов по модели INMOM) и РНФ № 19-17-00110 (анализ изменчивости характеристик термохалинной циркуляции в СА по данным объективных анализов и океанских реанализов в различные периоды АМО). Расчеты по модели INMOM выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ им. М.В. Ломоносова [40] и МСЦ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Schlesinger M.E., Ramankutty N.* An oscillation in the global climate system of period 65–70 years // *Nature*. 1994. V. 367. P. 723–726.
2. *Kerr R.A.* A North Atlantic climate pacemaker for the centuries // *Science*. 2000. V. 288. P. 1984–1985.
3. *Enfield D.B., Mestas-Nunez A.M., Trimble P.J.* The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall river flows in the continental U.S // *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28. P. 2077–2080. <https://psl.noaa.gov/data/timeseries/AMO/>
4. *Gouretski V., Reseghetti F.* On depth and temperature biases in bathythermograph data: development of a new correction scheme based on analysis of a global ocean database // *Deep Sea Res., Part I*. 2010. V. 57. P. 812–834. <https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/en4/>
5. *Knight J.R., Folland C.K., Scaife A.A.* Climate impacts of the Atlantic multidecadal oscillation // *Geophys. Res. Lett.* 2006. V. 33. P. L17706.
6. *Панин Г.Н., Дианский Н.А., Соломонова И.В., Гусев А.В., Выручалкина Т.Ю.* Оценка климатических изменений в Арктике в XXI столетии на основе комбинированного прогностического сценария // *Арктика: экология и экономика*. 2017. Т. 2. № 26. С. 35–52.
7. *Панин Г.Н., Дианский Н.А.* Колебания уровня Каспийского моря и климата Северной Атлантики // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2014. Т. 50. № 3. С. 304–316.
8. *Timmermann A., Latif M., Voss R., Grotzner A.* Northern hemispheric interdecadal variability: a coupled air-sea mode // *J. Clim.* 1998. V. 11. P. 1906–1931.
9. *Knight J., Allan R., Folland C. et al.* A signature of persistent natural thermohaline circulation cycles in observed climate // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32. P. L20708.
10. *Polonsky A.B.* Interdecadal variability in the ocean-atmosphere system // *Russian Meteorology and Hydrology*. 1998. V. 5. P. 37–44.
11. *Polonskii A.B.* Atlantic multidecadal oscillation and its manifestations in the Atlantic-European region // *Phys. Oceanogr.* 2008. V. 18. № 4. P. 227–236.
12. *Voskresenskaya E.N., Polonskii A.B.* Low-frequency variability of hydrometeorological fields and heat fluxes over the North Atlantic // *Phys. Oceanogr.* 2004. V. 14. № 4. P. 203–220.

13. Williams R.G., Roussenov V., Smith D., Lozier M.S. Decadal Evolution of Ocean Thermal Anomalies in the North Atlantic: The Effects of Ekman, Overturning, and Horizontal Transport // *J. Climate*. 2014. V. 27. P. 698–719.
14. Wang C., Dong S., Munoz E. Seawater density variations in the North Atlantic and the Atlantic meridional overturning circulation // *Clim. Dyn.* 2010. V. 34. P. 953–968.
15. Volodin E. M. The nature of 60-year oscillations of the Arctic climate according to the data of the INM RAS climate model // *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling*. 2018. V. 33. № 6. P. 1–9.
16. Volodin E. M., Mortikov E. V., Kostykin S. V. et al. Simulation of modern climate with the new version of the INM RAS climate model // *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2017. V. 53. № 2. P. 142–155.
17. Frankcombe L.M., Dijkstra H.A. The role of Atlantic – Arctic exchange in North Atlantic multidecadal climate variability // *Geophys Res Lett.* 2011. V. 38. № 16. P. L16603.
18. Volodin E.M. The mechanism of multidecadal variability in the Arctic and North Atlantic in climate model INMCM4 // *Environ. Res. Lett.* 2013. V. 8. № 3. P. 035038.
19. Delworth T., Manabe S., Stouffer R. J. Interdecadal variations of the thermohaline circulation in a coupled atmosphere-ocean model // *J. Clim.* 1993. V. 6. P. 1993–2011.
20. Дианский Н.А., Багатинский В.А. Термохалинная структура вод Северной Атлантики в различные фазы Атлантической мультideкадной осцилляции // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2019. Т. 55. № 6. С. 157–170.
21. Locarnini R.A., Mishonov A.V., Antonov J.I. et al. World Ocean Atlas 2013, Volume 1: Temperature // NOAA Atlas NESDIS. 2013. V. 73. P. 1–40.
22. Zweng M.M., Reagan J.R., Antonov J.I. et al. World Ocean Atlas 2013, Volume 2: Salinity // NOAA Atlas NESDIS. 2013. V. 74. P. 1–39.
23. T.F. Stocker, D. Qin, G.K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (Eds.) IPCC: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge (UK), New York (USA): Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
24. Caesar L., Rahmstorf S., Robinson A. et al. Observed fingerprint of a weakening Atlantic Ocean overturning circulation // *Nature*. 2018. V. 556. P. 191–196.
25. Дианский Н.А. Моделирование циркуляции океана и исследование его реакции на короткопериодные и долгопериодные атмосферные воздействия. Москва: Физматлит, 2013. 272 с.
26. Zhang S., Harrison M.J., Rosati A., Wittenberg A.T. System design and evaluation of coupled ensemble data assimilation for global oceanic climate studies // *Mon. Weather Rev.* 2007. V. 135. Iss. 10. P. 3541–3564.
27. Osafune S., Masuda S., Sugiura N., Doi T. Evaluation of the applicability of the Estimated State of the Global Ocean for Climate Research (ESTOC) dataset // *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42. Iss. 12. P. 4903–4911.
28. Balmaseda M.A., Mogensen K., Weaver A. Evaluation of the ECMWF Ocean Reanalysis ORAS4 // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2013. V. 139. Iss. 674. P. 1132–1161.
29. Köhl A. Evaluation of the GECCO2 Ocean Synthesis: Transports of Volume, Heat and Freshwater in the Atlantic // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2015. V. 141. Iss. 686. P. 166–181.
30. Горбушкин А.Р., Демидов А.Н. Изменчивость термохалинных характеристик на ~26.5° с. ш. по данным трансатлантических океанологических разрезов и реанализов // *Метеорология и гидрология*. 2019. № 7. С. 64–77.
31. McDougall T.J., Barker P.M. Getting started with TEOS-10 and the Gibbs Seawater (GSW) Oceanographic Toolbox // SCOR/IAPSO WG127. 2011. P. 1–28.
32. Ланно С.С. О причинах адвекции тепла на север в Атлантическом океане // *Исследование процессов взаимодействия океана и атмосферы*. М.: Гидрометеоиздат, 1984. С. 125–129.
33. Broecker W.S. The great ocean conveyor // *Oceanography*. 1991. V. 4. P. 79–89.
34. Stepanov V.N., Iovino D., Masina S., Storto A., Cipollone A. Methods of calculation of the Atlantic meridional heat and volume transports from ocean models at 26.5° N // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2016. V. 121. P. 1459–1475.
35. Griffies S.M., Winton M., Samuels B., et al. Datasets and protocol for the CLIVAR WGOMD coordinated ocean–sea ice reference experiments (COREs) // WCRP Report No. 21/2012. 2012. P. 21.
36. Danabasoglu G., Yeager S.G., Bailey D. et al. North Atlantic simulations in Coordinated Ocean-ice Reference Experiments phase II (CORE-II). Part I: Mean states // *Ocean Modelling*. 2014. V. 73. P. 76–107. <https://data1.gfdl.noaa.gov/nomads/forms/core/COREv2.html>
37. Демин Ю.Л., Ибраев Р.А., Саркисян А.С. Калибрация моделей циркуляции и воспроизведения климата Мирового океана // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана*. 1991. Т. 27. № 10. С. 1054–1067.
38. Гусев А.В., Дианский Н.А. Воспроизведение циркуляции Мирового океана и ее климатической изменчивости в 1948–2007 гг. с помощью модели INMOM // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2014. Т. 50. № 1. С. 3–15.
39. 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*. 2018. P. 125–137.
40. Воеводин Вл.В., Жуматий С.А., Соболев С.И., Антонов А.С., Брызгалов П.А., Никитенко Д.А., Стефанов К.С., Воеводин Вад.В. Практика суперкомпьютера “Ломоносов” // *Открытые системы*. М.: Издательский дом “Открытые системы”, 2012. № 7. С. 36–39.

Variability of the North Atlantic Thermohaline Circulation in Different Phases of the Atlantic Multidecadal Oscillation According to Ocean Objective Analysis and Reanalysis

V. A. Bagatinsky^{1, *} and N. A. Diansky^{1, 2, 3}

¹*Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991 Russia*

²*Marchuk Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences, Gubkina str., 8, Moscow, 119333 Russia*

³*Zubov State Oceanographic Institute, Kropotkinskij per., 6, Moscow, 119034 Russia*

*e-mail: vladbag38@gmail.com

According to the objective oceanic analyses of EN4 and WOA13 and the reanalyses of GFDL, ESTOC, ORA-S4, and GECCO2, the zonally-averaged characteristics of the thermohaline circulation of the North Atlantic (NA) waters are investigated in different phases of the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) index over the past 70 years. It is shown that in the zonally-averaged climatic trends and the differences in the composites of the anomalies of the potential temperature and salinity fields for all data sets, similar thermohaline structures appear. In order to find out how the variability in the thermohaline state of waters in the NA is accompanied by variability in its thermohaline circulation, we analyzed the variability of the Atlantic meridional overturning circulation stream function (AMOC). The average AMOC stream functions calculated from the data of ocean objective analyses and reanalyses, reflecting the thermohaline circulation in the NA, are generally similar to each other. Nevertheless, according to their spatial structure, they can be divided into two groups: (EN4, WOA13, GFDL) and (ESTOC, ORA-S4, GECCO2). In their trends and differences in the composites of anomalies, the current functions of AMOC reanalyses are very different both from each other and from the data of objective analyses of EN4 and WOA13. Moreover, the main difference lies in the signs of climatic trends and differences in composites that determine changes in the direction of the zonally-averaged thermohaline circulation. It was found that in alternating successive periods of the AMO index, positive and negative temperature (and salinity) anomalies circulate with a period of about 60 years along the movement of water in the AMOC, descending into the deep layers of the ocean by about 60° N and rising by 25° N. This process is most clearly manifested for objective analyses of EN4 and WOA13 and reanalysis of ORA-S4. It can be concluded that this mechanism makes a significant contribution to the formation of phases of the AMO index.

Keywords: climate, circulation, AMOC, North Atlantic, AMO, objective analysis, reanalysis, composite analysis