

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Багатинский Владислав Андреевич

**Океанические механизмы мультideкадной изменчивости
климата в атлантическом секторе Мирового океана**

1.6.17 – Океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2022

Работа выполнена на кафедре физики моря и вод суши физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова.

**Научный
руководитель**

Дианский Николай Ардальянович

доктор физико-математических наук

**Официальные
оппоненты**

Гулев Сергей Константинович

доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
Лаборатория взаимодействия океана и атмосферы и
мониторинга климатических изменений,
заведующий лабораторией

Елисеев Алексей Викторович

доктор физико-математических наук, доцент

МГУ имени М.В.Ломоносова, Физический факультет,
Отделение геофизики, Кафедра физики атмосферы,
ведущий научный сотрудник

Платов Геннадий Алексеевич

доктор физико-математических наук,

Институт вычислительной математики и
математической геофизики СО РАН, Лаборатория
математического моделирования процессов в
атмосфере и гидросфере,

главный научный сотрудник

Защита диссертации состоится «1» декабря 2022 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета МГУ.016.3(01.15) Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, Южная Физическая Аудитория (ЮФА).

E-mail: versan@physics.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В.Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/497876121/>

Автореферат разослан «31» октября 2022г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



С.В. Колесов

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В настоящее время крайне актуальны задачи прогноза изменений климата и выявления причин, которые эти изменения обуславливают. Атлантический океан является важным звеном климатической системы Земли. Имеются все основания полагать, что мультидекадные изменения климата во многом порождаются долгопериодными изменениями в термохалинной циркуляции Северной Атлантики (СА), природа которых до сих пор до конца не изучена. Во всех характеристиках термохалинной циркуляции вод СА на значимом уровне выделяются естественные долгопериодные квазициклические колебания с характерными периодами 50–70 лет. Это явление получило название Атлантической мультидекадной¹ осцилляции (АМО) [Schlesinger and Ramankutty, 1994; Kerr, 2000]. Временной ход индекса АМО определяется как временной ход осредненной по акватории СА от экватора до 70°N аномалии температуры поверхности океана (ТПО), отсчитываемой относительно климатического линейного тренда ТПО [Enfield et al., 2001; Gulev et al., 2013; Gulev and Latif, 2015]. Индекс 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.) [Enfield et al., 2001; Gulev et al., 2013; Gulev and Latif, 2015].

В настоящее время механизм генерации мультидекадной изменчивости термохалинной циркуляции в СА является предметом дискуссии [Liu, 2012]. Некоторые авторы указывают на совместный характер взаимодействий в системе океан-атмосфера [Timmermann et al., 1998]. Другие авторы считают, что наблюдаемая мультидекадная изменчивость климата представляет собой океанический отклик на стохастическое атмосферное воздействие [Eden and Jung, 2001; Eden and Willebrand, 2001, Griffies and Tziperman, 1995]. Третьи авторы [Delworth et al., 1993; Gusev and Diansky, 2014; Дианский и Багатинский, 2019;

¹ В англоязычной литературе используется название multidecadal – мультидекадная. Поэтому мы будем придерживаться этого названия.

Volodin et al., 2017; Volodin, 2018] говорят о наличии собственных океанических мод, возбуждающихся в совместной климатической системе океан-атмосфера. Таким образом, АМО представляет собой ярко выраженный климатический сигнал мультидекадного и декадного временных масштабов, проявляющийся в ряде климатических характеристик системы океан-атмосфера. Явление АМО тесно связано с поведением атлантической меридиональной опрокидывающейся циркуляции (АМОЦ). Поэтому в работе проводится их комплексное изучение на основе современных данных объективных анализов **EN4** – Enhanced Ocean Data Assimilation and Climate Prediction (ENACT) и ENSEMBLES (улучшенная ассимиляция океанических данных и прогнозирование климата (ENACT) и ENSEMBLES (Ансамбли)), **WOA13** – World ocean atlas (Атлас мирового океана), **GFDL** – Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (Лаборатория геофизической гидродинамики), **ESTOC** – Estimated state of ocean for climate research (Оценочное состояние океана для климатических исследований), **ORA-S4** – Ocean Reanalysis (океанский реанализ), **GECCO** – German contribution of the Estimating the Circulation and Climate of the Ocean project (вклад Германии в проект "Оценка циркуляции и климата океана").

Целью работы является исследование связей климатических трендов и АМО с изменениями в термохалинной циркуляции СА на основе данных наблюдений и численного моделирования.

Для осуществления этой цели в работе были поставлены следующие **задачи**:

- 1) реализовать российскую модель INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model) для акватории всего Атлантического океана с пространственным разрешением 0.5° по долготе и широте;
- 2) провести расчеты циркуляции Атлантического океана методом диагноза-адаптации по данным океанских объективных анализов EN4 и WOA13 для выявления динамического отклика на изменение термохалинного состояния в Северной Атлантике;

- 3) выявить тренды гидротермодинамических характеристик на акватории СА по данным океанских объективных анализов EN4 и WOA13 и реанализов GFDL, ESTOC, ORA-S4 и GECCO2;
- 4) исследовать вклады климатических изменений температуры и солёности в формирование климатических трендов термохалинной циркуляции Северной Атлантики в 1951-2017 гг. путем проведения экспериментов с моделью INMOM по разработанным специально для этого сценариям;
- 5) используя данные наблюдений EN4 и WOA13 и реанализов GFDL, ESTOC, ORA-S4 и GECCO2, провести композитный анализ крупномасштабной климатической изменчивости аномалий температуры и солёности в СА для выявления их связей с теплыми и холодными фазами АМО.

Научная новизна заключается в оригинальном подходе к исследованиям, объединяющим анализ данных наблюдений и численного моделирования для восстановления циркуляции океана по этим данным. В работе впервые обнаружен и проанализирован механизм циркуляции среднезональных аномалий температуры и солёности в СА в координатах широта-глубина. Разработана методика выделения вкладов изменений температуры и солёности в изменчивость термохалинной циркуляции СА. На основе численных экспериментов обнаружена связь между интенсивностью термохалинной циркуляции и разностью уровней моря между максимумом в субтропиках и минимумом в субарктике.

Теоретическая и практическая значимость представленной работы обусловлена тем, что выявленные по данным наблюдений механизмы связей в изменчивости термохалинного состояния с АМО и АМОЦ могут быть использованы при настройках моделей земной системы, основу которых составляют совместные модели общей циркуляции атмосферы и океана. Это может повысить качество воспроизведения в них явления АМО, необходимого для повышения точности диагноза и прогноза климатических изменений.

Разработанная методика для оценки вкладов изменений различных характеристик океана в динамические характеристики может быть применена для диагноза климатических изменений в термохалинной циркуляции океана.

Аномалия разности между среднезональными уровнями моря на 34.5°N и 57.5°N может использоваться в качестве индекса изменчивости функции тока АМОЦ.

Методология исследования заключается в применении модели общей циркуляции океана Института Вычислительной Математики (ИВМ) РАН – INMOM для расчета циркуляции СА в периоды положительных и отрицательных значений индекса АМО на основе современных климатических данных по температуре и солёности океана и предложенной оригинальной методики для оценки вкладов изменений потенциальной температуры и солёности в климатические тренды функции тока АМОЦ.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. По данным объективных океанских анализов EN4 и WOA13 в период с 1951 по 2017 гг. в верхнем ~ 1 -км слое СА, в термохалинных полях в основном наблюдается климатический среднезональный тренд на потепление и осолонение. Ниже ~ 1 -км слоя наблюдаются значительные области похолодания и распреснения. Эта картина подтверждается данными океанских реанализов GFDL, ESTOC, ORA-S4 и GECCO2 (в реанализах ORA-S4 и GECCO2 области потепления захватывают более глубокие слои океана до 3 км).
2. Имеется рассогласование в знаках климатических трендов функции тока АМОЦ с 1951 по 2017 гг., рассчитанных по данным реанализов GFDL, ESTOC, ORA-S4 и GECCO2 как между собой, так и между трендами функции тока АМОЦ, рассчитанных с помощью INMOM по данным объективных анализов EN4 и WOA13.
3. Поля климатических трендов потенциальной плотности, функции тока АМОЦ и уровня моря формируются по линейному закону, как сумма их трендов, формируемых за счет изменений потенциальной температуры и солёности, умноженных на коэффициенты близкие к единице, соответственно. Наблюдаемый тренд на усиление основного ядра функции тока АМОЦ с 1951 по 1990 гг. вызывается изменениями потенциальной температуры, а на ослабление основного ядра функции тока АМОЦ с 1991 по

2017 гг., вызывается изменениями солёности. Наблюдается отрицательная обратная связь в отклик на потепление. Результаты экспериментов подтвердили базовые положения гипотезы Шулейкина о взаимосвязи выноса льдов и поступлением Атлантических вод в Северный Ледовитый океан. Была обнаружена связь между трендами в АМОЦ и среднезональных градиентов уровня моря – между трендами максимума функции тока АМОЦ на 38.5°N и разностями между среднезональными уровнями моря на 34.5°N и 57.5°N , которые, возможно, могут использоваться в качестве индекса изменчивости функции тока АМОЦ.

4. В тёплые периоды индекса АМО по сравнению с холодными в верхнем ~ 1 км слое Северной Атлантики в основном наблюдаются потепление и осолонение. Ниже этого слоя наблюдаются значительные области похолодания и распреснения, при этом в реанализах GFDL и ESTOC эти области меньше, чем для данных EN4, WOA13, ORAS4 и GECCO2. В чередующиеся последовательные периоды индекса АМО положительные и отрицательные температурные (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 частично поднимаясь на поверхность на 25°N и в области экватора. Этот механизм вносит существенный вклад при формировании фаз индекса АМО.

Степень достоверности полученных результатов обеспечивается сочетанием данных наблюдений и численных расчетов (данные реанализов и моделирования по модели INMOM). Полученные результаты согласуются с результатами, описанными в публикациях других научных групп, специализирующихся по тематике климатической изменчивости в СА.

Апробация работы. Результаты данной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: IX Всероссийская конференция по прикладной океанографии «Моря и океаны в условиях изменяющегося климата» (Москва, 2022); Всероссийская научная конференция «Моря России» (Севастополь, 2022); XXVII Международная научная конференция студентов,

аспирантов и молодых ученых "Ломоносов-2020" (Москва, 2020); Всероссийская конференция, посвящённая памяти академика Александра Михайловича Обухова «Турбулентность, динамика атмосферы и климата» (Москва, 2020); Труды 61-й Всероссийской научной конференции МФТИ. «Прикладная математика и информатика». (Москва, 2018); VII Международная научно-практическая конференция "Морские исследования и образование" MARESEDU-2018 (Москва, 2018).

Результаты диссертационной работы использовались в следующих научно-исследовательских проектах, выполненных при участии автора: проект «Исследование десятилетней и междесятилетней изменчивости климата в Северной Атлантике и Арктике», РФФ, 2017-2021; проект «Исследование океанических механизмов декадной и мультидекадной изменчивости климата в атлантическом секторе Мирового океана», РФФИ, 2018-2020; проект «Тепломассопереносы в Атлантическом и Северном Ледовитом океанах как факторы, определяющие изменения гидрологического и ледового режимов», РФФ, 2019-2023; проект «Исследование океанических механизмов мультидекадной изменчивости климата в атлантическом секторе Мирового океана», РФФИ «Аспиранты», 2019-2022.

Личный вклад. Автор лично проводил анализ литературных данных и данных моделирования, активно участвовал в постановке цели и задач исследования, реализовал модель INMOM для всей акватории Атлантики и проводил ее расчеты на суперкомпьютере МГУ им. М.В.Ломоносова «Ломоносов 2», обрабатывал и анализировал результаты, формулировал выводы. Представленные автором теоретические аспекты и математические модели полностью оригинальны. Автор активно участвовал в подготовке публикаций, а также докладов на научных конференциях. Некоторые частные результаты по обработке данных наблюдений были получены совместно с научным руководителем Н.А. Дианским. Весь текст работы полностью написан автором за исключением случаев, где указаны цитируемые источники.

Публикации. По теме диссертации было опубликовано 3 статьи в журналах, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus и Russian Scientific Citation Index (RSCI) общим объемом 2.76 п.л. (личный вклад автора составляет 1.75 п.л.) и 2 статьи в сборниках, индексируемых в базе данных РИНЦ, общим объемом 1.47 п.л. (личный вклад автора составляет 0.73 п.л.), а также 4 тезиса докладов на российских и международных конференциях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списков условных обозначений и литературы и приложения. Диссертационная работа изложена на 135 страницах, из них 123 страницы основного текста, включая 23 рисунка и 2 таблицы, и 1 приложение на 12 страницах, Список литературы содержит 186 наименований.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы, перечисляются основные методы исследования и положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена обзору состояния исследований термохалинной циркуляции, а также обсуждению существующих методов анализа ее изменчивости и гипотез формирования индекса АМО.

Вторая глава посвящена численному моделированию и содержит описание используемых данных по температуре, солености и атмосферному воздействию. В главе описывается конфигурация модели INMOM, а также метод диагноза-адаптации для восстановления динамики океана по данным объективных анализов. Далее описывается методика оценки вкладов изменений температуры и солености в формирование трендов функции тока АМОЦ. Проводится сравнение функции тока АМОЦ, рассчитанной по различным данным объективных анализов и реанализов.

Для объективного изучения состояния вод и термохалинной циркуляции СА в различные фазы индекса АМО по данным о потенциальной температуре и солености океана были рассчитаны средние климатические состояния для различных периодов индекса АМО (Рис. 1) по двум объективным анализам EN4 и WOA13 и четырем океанским реанализам GFDL, ESTOC, ORA-S4 и GECCO2.

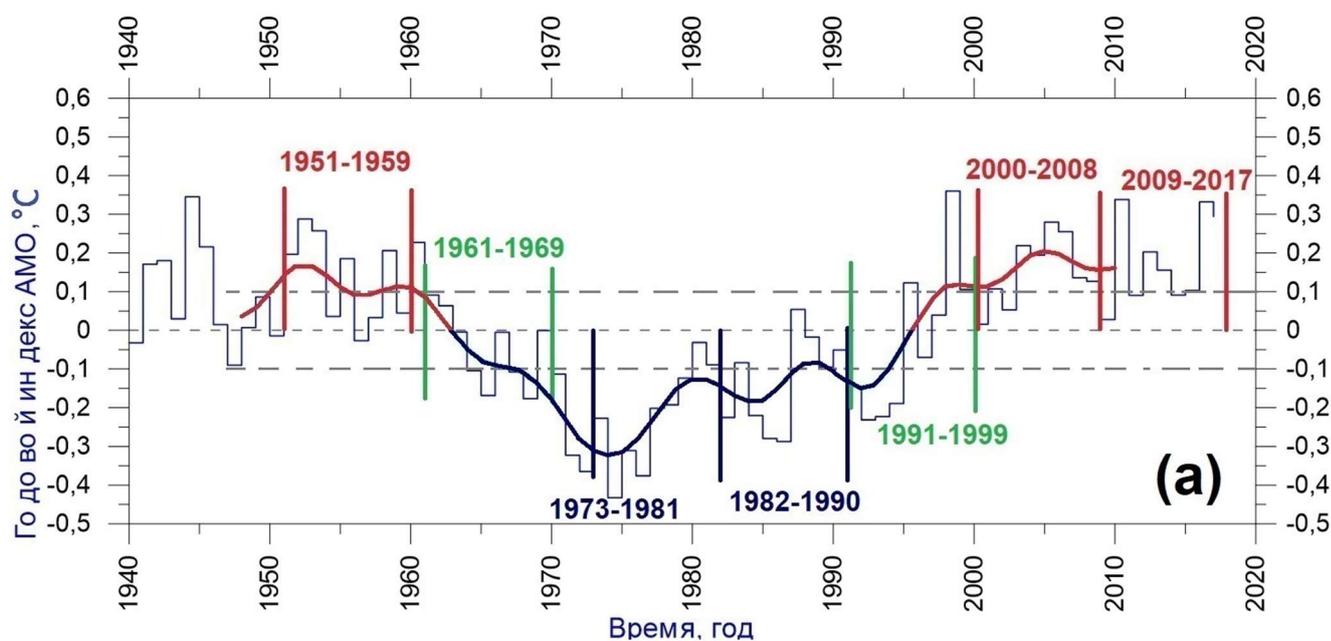


Рис. 1. Ступенчатая линия – значения среднегодового индекса АМО, рассчитанные в NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) и плавная кривая – результат его низкочастотной фильтрации с отсечением периодов до 8 лет. Штриховыми линиями показаны величины $\pm 0.1^\circ\text{C}$, отсекающие периоды, когда индекс АМО принимает значения по модулю больше 0.1°C .

Для того чтобы выяснить как изменчивость в термохалинном состоянии в СА сопровождается изменчивостью в ее термохалинной циркуляции, была реализована сигма-модель океана INMOM для акватории Атлантического океана от 100°W до 25°E и от Антарктиды до 82°N с пространственным разрешением 0.5° по долготе и широте и 33 неравномерно заданными уровнями по глубине со сгущением к поверхности океана для расчета динамики по данным EN4 и WOA13. По меридиональной составляющей скорости течений реанализов и меридиональной составляющей скорости течений восстановленной по методу диагноза-адаптации [Демин и др., 1991] с помощью модели INMOM по данным

объективных анализов, были рассчитаны функции тока АМОЦ [Дианский, 2013; Stepanov et al., 2016] по формуле:

$$\psi(y, z) = \int_{\text{дно океана}}^z \int_{100W}^{15E} v(x, y, z') dx dz' \quad (1)$$

где ψ – функция тока АМОЦ, v – меридиональная скорость, x – долгота, y – широта, z – глубина.

АМОЦ, определяя меридиональный поток тепла в СА [Gulev et al., 2013], 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.

Средняя потенциальная температура и функция тока АМОЦ с 1951 по 2017 гг.

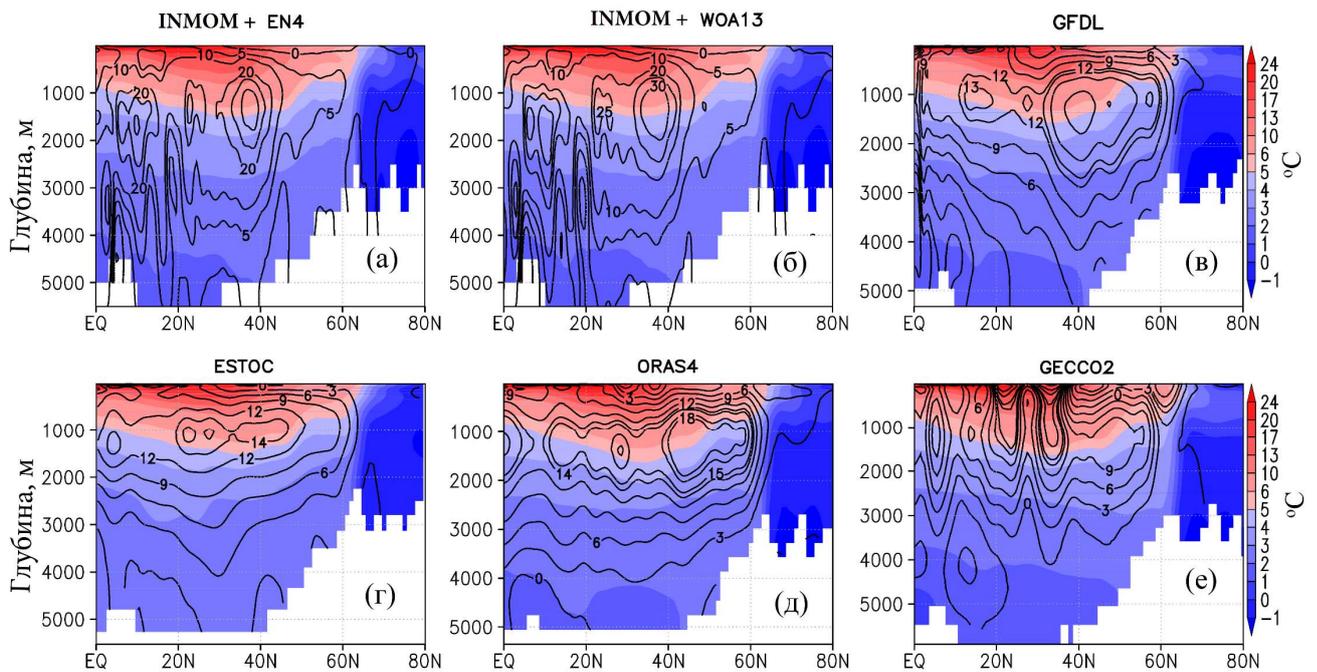


Рис. 2. Рассчитанные функции тока АМОЦ (показаны изолиниями в Sv) по данным объективных анализов EN4 (а), WOA13 (б) и реанализов GFDL (в), ESTOC (г), ORA-S4 (д) и GECCO2 (е) на фоне своих среднезональных потенциальных температур (а, б, в, г, д, е), показаны цветом в °С.

За исключением реанализа GECCO2, все рассчитанные функции тока АМОЦ в целом согласуются с климатическими расчетами [Danabasoglu et al., 2014; Гусев и Дианский, 2014] и между собой (Рис. 2). Рассчитанные по данным океанских объективных анализов и реанализов средние за доступный период 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) (Рис. 2).

Третья глава посвящена исследованию трендов климатических изменений термохалинного состояния и циркуляции вод СА.

Трендом называют коэффициент F_{trend} линейной регрессии $F(t)$:

$$\hat{F}(t) = F_{trend} * t + C \quad (2)$$

где $\hat{F}(t)$ – линейная регрессия какой-либо термогидродинамической характеристики $F(t)$, F_{trend} и C – коэффициенты линейной регрессии, t – время.

Проведен сравнительный анализ среднезональных трендов с 1951 по 2017 гг. потенциальной температуры, солёности и функции тока АМОЦ по данным объективных анализов EN4 и WOA13 и реанализов GFDL, ESTOC, ORA-S4 и GECCO2.

В верхнем ~1-км слое, в основном, наблюдается климатический тренд на потепление и осолонение (Рис. 3). Ниже ~1-км слоя наблюдаются значительные области похолодания и распреснения (в реанализах ORA-S4 и GECCO2 эти области захватывают более глубокие слои океана до 3 км), что связывается с таянием льдов Гренландии, выносом распресненных вод из Северного Ледовитого океана и затягиванием этих холодных и более пресных вод в глубинные слои. При наблюдаемых климатических изменениях потенциальной температуры и солёности, тренды 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, определяющих изменения направления среднезональной термохалинной циркуляции (Рис. 3).

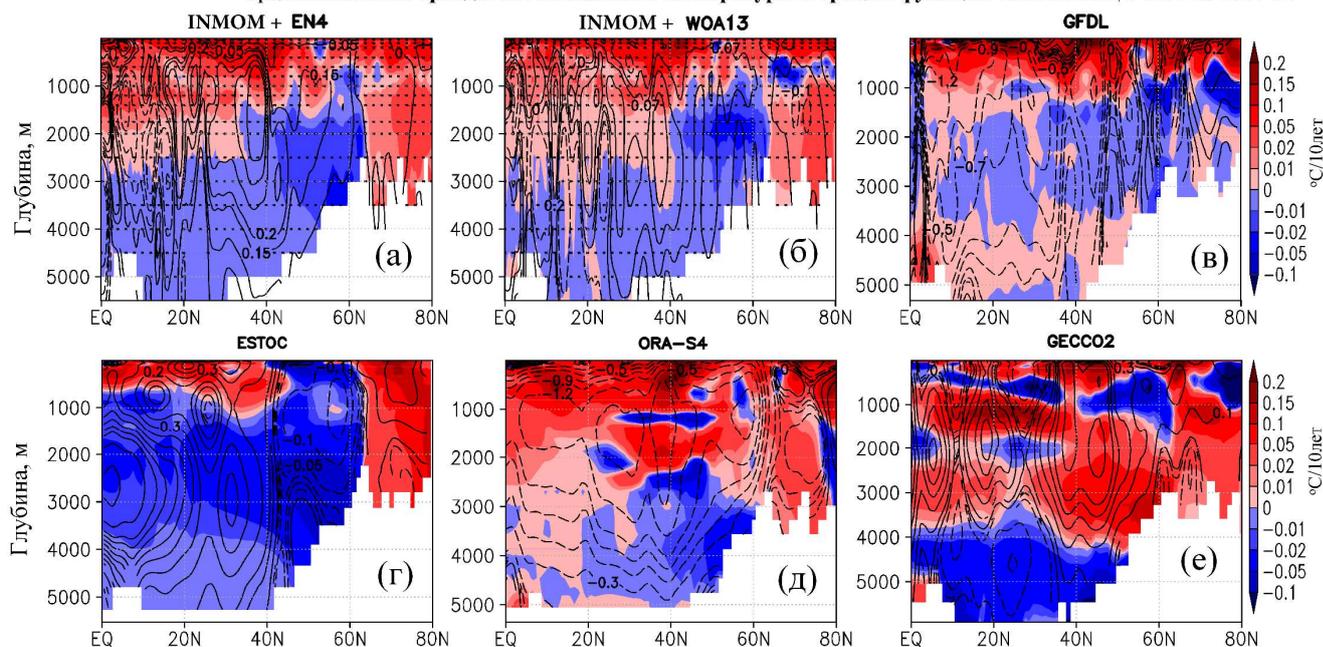


Рис. 3. Линейные тренды функции тока АМОЦ (показаны изолиниями в Св/10лет) по данным объективных анализов EN4 (а), WOA13 (б) и реанализам GFDL (в), ESTOC (г, к), ORA-S4 (д) и GECCO2 (е) на фоне своих среднезональных линейных трендов потенциальной температуры (а, б, в, г, д, е), показаны цветом в °С/10лет. Точками на рисунках (а, б) показаны статистически значимые тренды потенциальной температуры.

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

Для выяснения роли термохалинных факторов в формирование климатических трендов термохалинной циркуляции в СА была предложена методика для оценки вкладов изменений потенциальной температуры и солёности в формирование изменчивости функции тока АМОЦ с помощью модели INMOM методом диагноза-адаптации. Для этого для каждого из исследуемых состояний СА в различные фазы АМО (Рис. 1) проводились эксперименты, в каждом из которых расчет циркуляции СА проводился по нижеследующим методикам.

1. Учитывались изменения потенциальной температуры $T(t)$ и солёности $S(t)$, а напряжение трения ветра задавалось постоянным:

$$F_1 = F_1(\theta(t), S(t)) \quad (3)$$

где F – функция тока АМОЦ ψ , уровень моря ζ или потенциальная плотность ρ , θ – потенциальная температура, S – соленость, t – время.

2. Учитывались только изменения потенциальной температуры $\theta(t)$, $S = const$, а соленость и напряжение трения ветра задавались постоянными:

$$F_2 = F_2(\theta(t), S = const) \quad (4)$$

3. Учитывались только изменения солености $S(t)$, $\theta = const$, а температура и напряжение трения ветра задавались постоянными:

$$F_3 = F_3(S(t), \theta = const) \quad (5)$$

Методом наименьших квадратов для трендов динамических характеристик определялись коэффициенты множественной регрессии (с точностью до второго знака после запятой) линейной модели [Gromyko et al., 2022]:

$$F_{1,trend}(\theta, S) = aF_{2,trend}(\theta) + bF_{3,trend}(S) \quad (6)$$

где $F_{i,trend}$ – тренд F_i (функция тока АМОЦ ψ , уровень моря ζ или потенциальная плотность ρ) в i эксперименте (см. выше), определяемый по формуле (2).

По описанной выше методике были определены вклады изменений потенциальной температуры и солености в тренды функции тока АМОЦ. Для этого с помощью модели INMOM и данных электронного атласа EN4 методом диагноза-адаптации восстанавливалась циркуляция СА за характерные периоды: 1951–2017 гг., 1951–1990 гг. и 1991–2017 гг.

Показано, что поля трендов потенциальной плотности, функции тока АМОЦ и уровня моря формируются по линейному закону (6), как сумма их трендов, формируемых за счет изменений в потенциальной температуре и солености, умноженных на коэффициенты a и b близкие к 1, соответственно (Рис. 5, таблица 1). Это подтверждают рассчитанные коэффициенты множественной регрессии, которые также близки к 1.

Таблица 1. Коэффициенты множественной регрессии, рассчитанные по формуле (6) для трендов функции тока АМОЦ и уровня моря. R – коэффициент множественной корреляции.

Характеристика	Формула	периоды		
		1951-2017	1951-1990	1991-2017
Функция тока АМОЦ	$\psi_{1,trend}(\theta, S) = a\psi_{2,trend}(\theta) + b\psi_{3,trend}(S)$	$a=1.01,$ $b=0.95$ $R=0.99$	$a=0.87,$ $b=0.86$ $R=0.98$	$a=0.94,$ $b=0.90$ $R=0.93$
Уровень моря	$\zeta_{1,trend}(\theta, S) = a\zeta_{2,trend}(\theta) + b\zeta_{3,trend}(S)$	$a=1.00,$ $b=1.01$ $R=1.00$	$a=1.01,$ $b=1.01$ $R=1.00$	$a=1.00,$ $b=0.97$ $R=1.00$

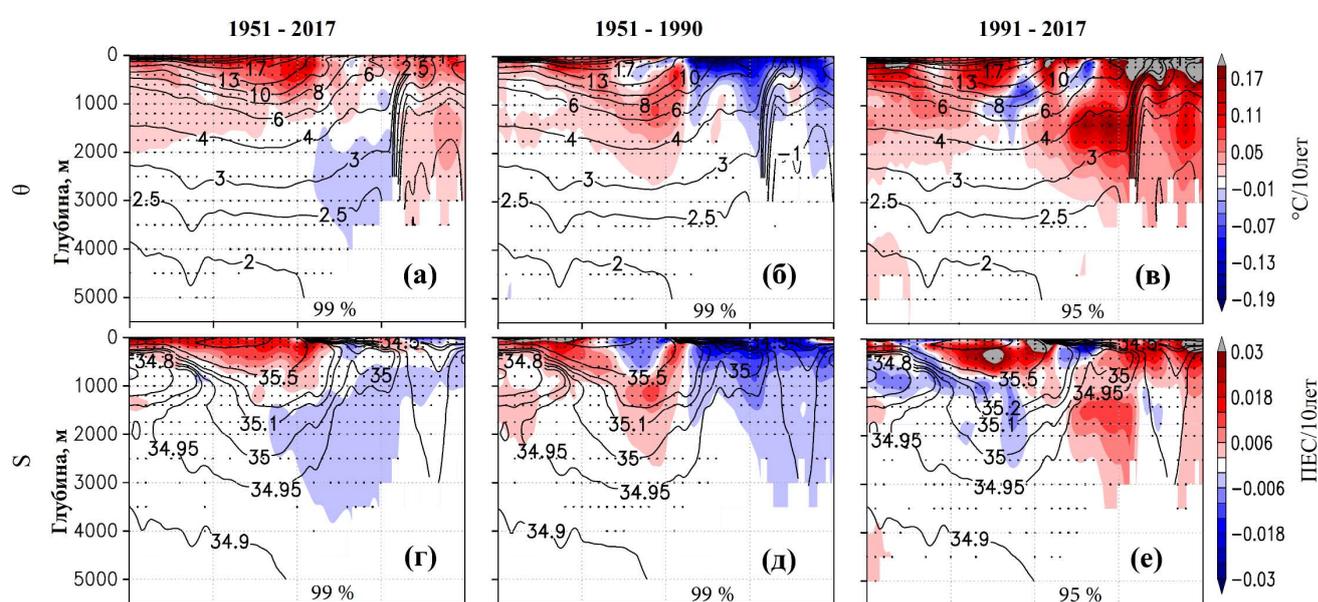


Рис. 4. Климатические среднезональные тренды потенциальной температуры, используемой в экспериментах 1 и 2, °С/10лет и °С: за 1951-2017 (а), 1951-1991 (б) и 1991-2017 (в) гг. (показаны цветом), соответственно, и средние за период среднезональные состояния потенциальной температуры (показаны изолиниями).

(г), (д), (е) – то же, что (а), (б), (в), но для солёности, используемой в экспериментах 1 и 3, ПЕС/10лет и ПЕС; Точками на рисунках (а-е) показаны статистически значимые тренды на уровне 95-99 % потенциальной температуры и солёности, соответственно.

Обнаружено, что вклады в тренды функции тока АМОЦ от изменений потенциальной температуры (Рис. 5г-е; тренды потенциальной температуры на рис. 4а-в) в основном противоположны и противодействуют вкладам от изменений солёности (Рис. 5ж-и; тренды солёности на рис. 4г-е). Показано, что основной вклад в формирование трендов функции тока АМОЦ, рассчитанных за период с 1951 по

2017, вносят изменения потенциальной температуры и функция тока АМОЦ усиливается по всей глубине. В двух выбранных периодах 1951–2017 гг. и 1951–1990 гг. все основные особенности изменений в АМОЦ объясняются главным образом температурными изменениями, которые преобладают над соленостными. При этом наблюдаемый тренд на ослабление основного ядра функции тока АМОЦ с 1991 по 2017 гг., вызывается изменениями солености, а на усиление основного ядра функции тока АМОЦ с 1951 по 1990 гг. вызывается изменениями потенциальной температуры.

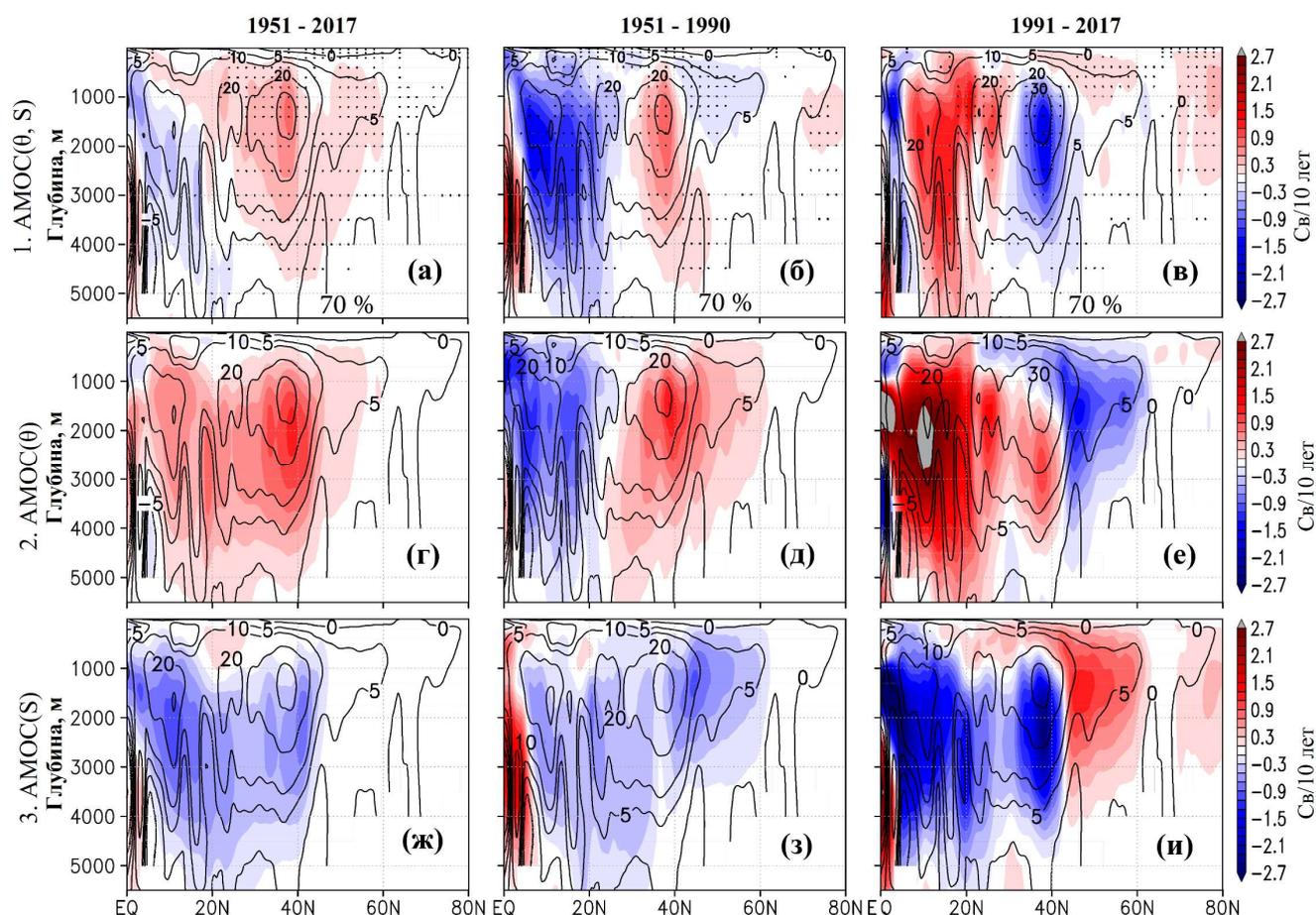


Рис. 5. Тренды функции тока АМОЦ, Св/10лет за 1951-2017, 1951-1991 и 1991-2017 гг. (показаны цветом), соответственно и средние за период функции тока АМОЦ (показаны изолиниями) Св: по результатам 1 эксперимента (а), (б), (в); по результатам 2 эксперимента (г), (д), (е), по результатам 3 эксперимента (ж), (з), (и). Точками на рисунках (а-в) показаны статистически значимые тренды на уровне 70 %.

Результаты экспериментов подтвердили базовые положения гипотезы Шулейкина о взаимосвязи выноса льдов и поступлением Атлантических вод в Северный Ледовитый океан.

Тренды разности между среднезональными уровнями моря на 34.5°N (максимум уровня моря в субтропиках) и 57.5°N (минимум уровня моря в субарктике) (Рис. 6, таблица 1) хорошо согласуются с трендами максимума функции тока АМОЦ на 38.5°N , где преобладают вклады от изменений потенциальной температуры и, возможно, могут использоваться в качестве индекса по прогнозу изменчивости функции тока АМОЦ в области ядра.

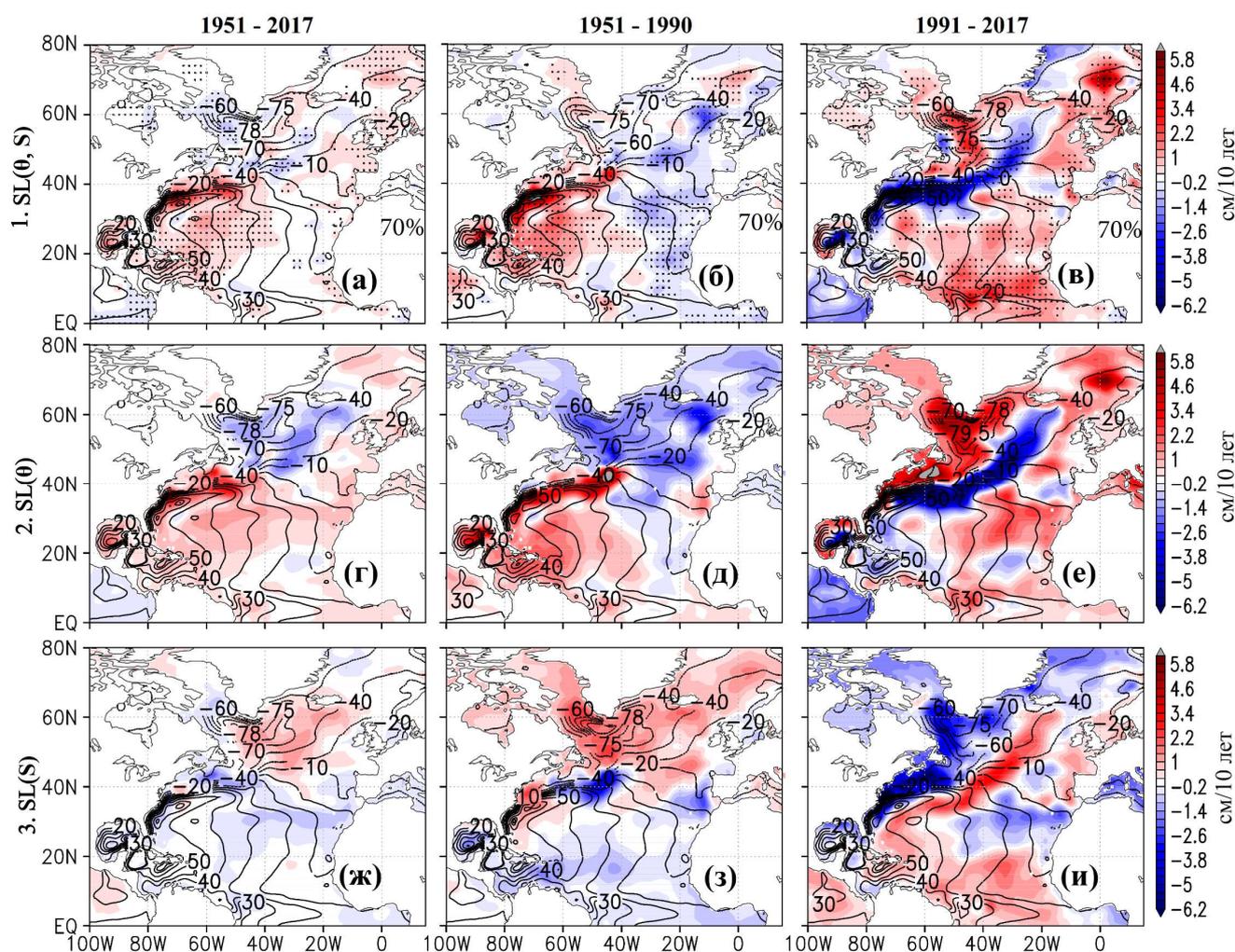


Рис. 6. Тренды уровня моря, см/10лет за 1951-2017, 1951-1991 и 1991-2017 гг. (показаны цветом), соответственно и средние за период уровни моря (показаны изолиниями) см: по результатам 1 эксперимента (а), (б), (в); по результатам 2 эксперимента (г), (д), (е), по результатам 3 эксперимента (ж), (з), (и). Точками на рисунках (а-в) показаны статистически значимые на уровне 70 % тренды уровня моря.

Четвертая глава посвящена исследованию мультидекадной естественной изменчивости термохалинной циркуляции состояния вод СА.

Для анализа данных использовался композитный анализ, основанный на расчете усредненной разности состояний (композитов) для теплых и холодных периодов за вычетом линейного тренда [Дианский и Багатинский, 2019; Diansky and Sukhonos, 2018]. Разность композитов аномалий какой-либо характеристики отражает сигнал естественных мультидекадных колебаний, показывая картину изменений в теплой фазе по отношению к холодной. Разность композитов рассчитывалась:

$$F_{diff. comp.} = F_{anomaly}(2000 - 2017 \text{ гг.}) - F_{anomaly}(1973 - 1990 \text{ гг.}) \quad (7)$$

где, $F_{anomaly}(t) = F(t) - \hat{F}(t)$, $\hat{F}(t)$ – линейная регрессия $F(t)$ (потенциальная температура, соленость, функция тока АМОЦ и др.) в (2), t – время.

Показано, что в среднезональных разностях композитов (7) полей потенциальной температуры и солености для отдельных массивов данных проявляются схожие термохалинные структуры (Рис. 7).

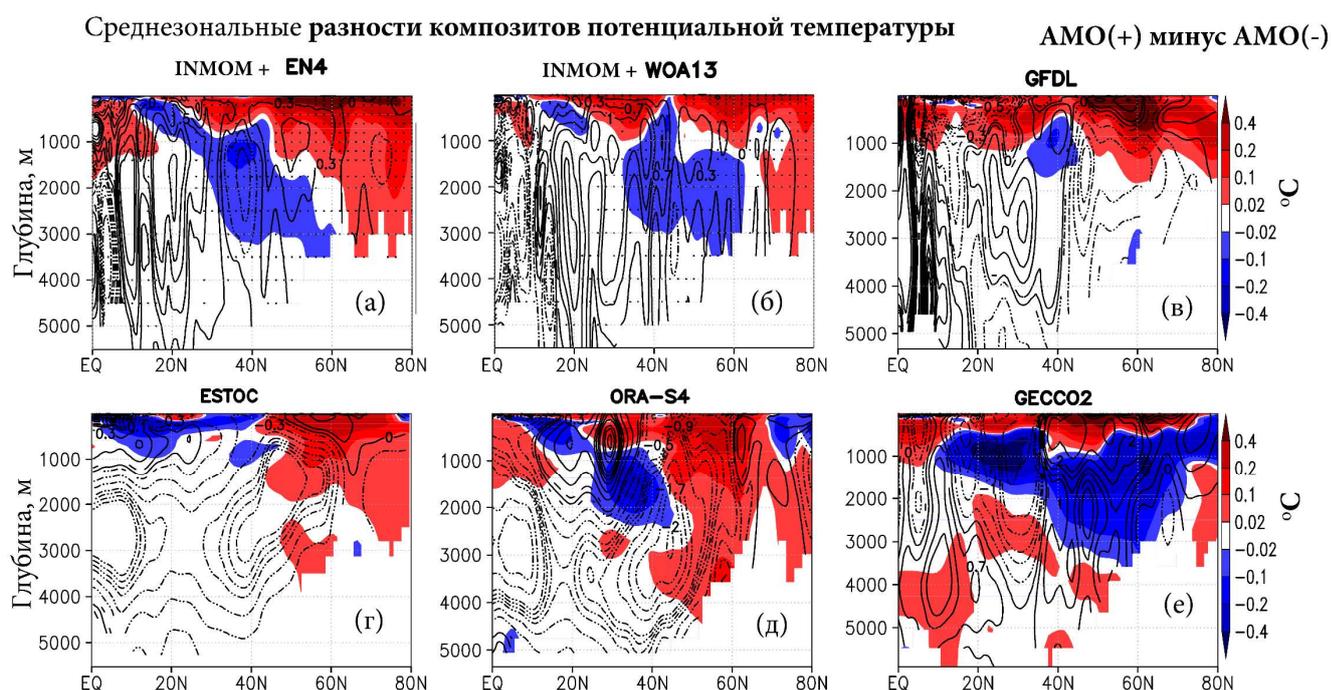


Рис. 7. Разности композитов аномалий функции тока АМОЦ (показаны изолиниями в Св) по данным объективных анализов EN4 (а), WOA13 (б) и реанализам GFDL (в), ESTOC (г), ORA-S4 (д) и GECCO2 (е) на фоне своих среднезональных разностей композитов аномалий потенциальной температуры (а, б, в, г, д, е), показаны цветом в °С. Точками на рисунках (а,б) показаны статистически значимые на уровне 99% тренды потенциальной температуры.

При этом разности композитов функции тока АМОЦ реанализов сильно отличаются как между собой, так и от данных объективных анализов EN4 и WOA13. Причем главное отличие заключается в знаках разностей композитов.

Показано, что в чередующиеся последовательные периоды индекса АМО положительные и отрицательные температурные (и соленостные) аномалии перемещаются с периодом около 60 лет по ходу движения вод в АМОЦ (Рис. 8). 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. Обнаруженный процесс формирования среднезональных детрендрованных аномалий температуры и солёности в чередующиеся последовательные периоды индекса АМО косвенно подтверждает положение о том, что 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 [Knight et al., 2005; Polonsky, 1998; Polonskii, 2008; Voskresenskaya and Polonskii, 2004; Williams et al., 2014; Wang et al., 2010a].

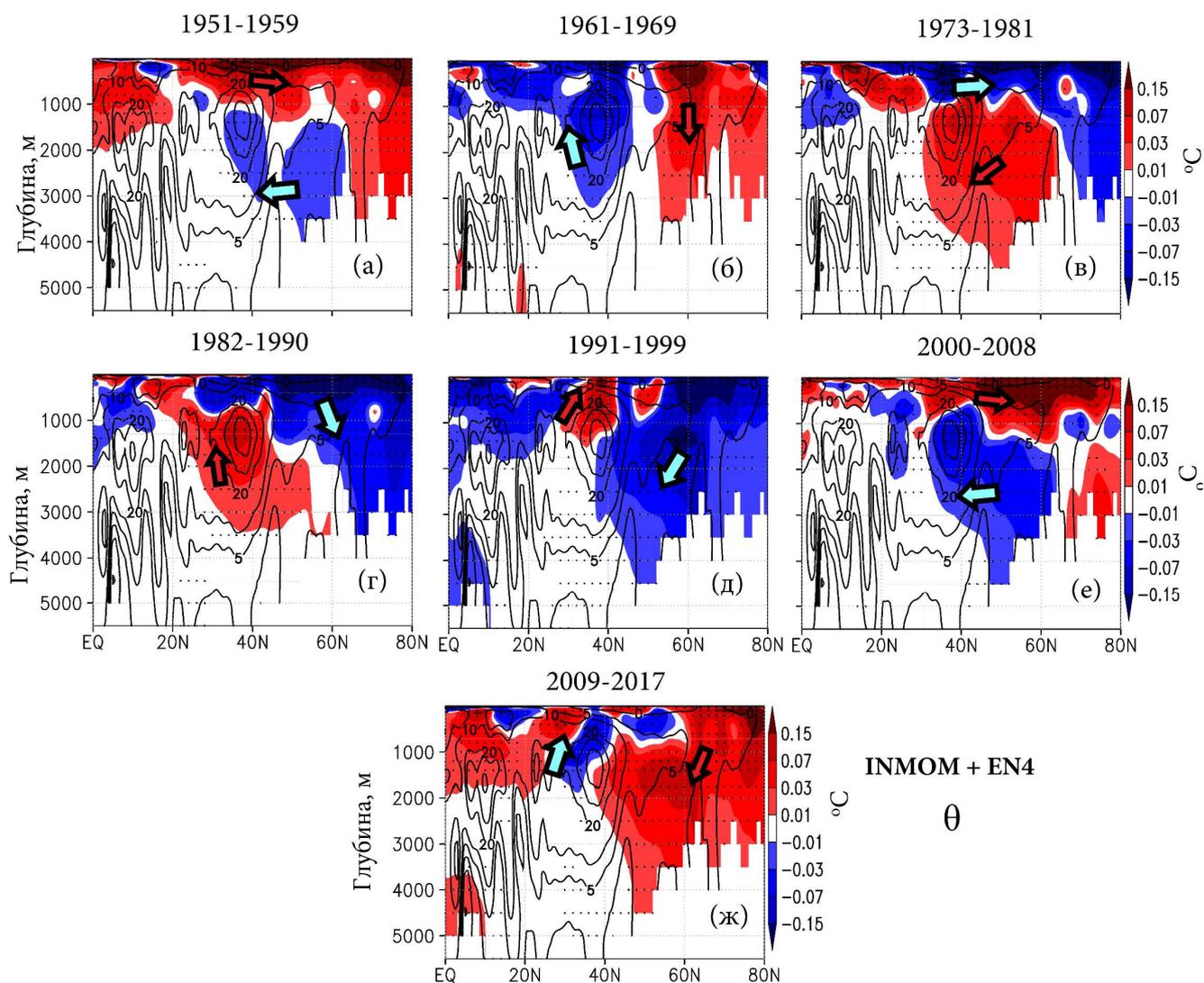


Рис. 8. Среднезональные аномалии потенциальной температуры θ в различные периоды АМО, ($^{\circ}\text{C}$, показана цветом) и наложенная на неё средняя за 1948 – 2017 гг. функция тока АМОЦ, рассчитанная с помощью модели INMOM по данным EN4 (Св, показана изолиниями, стрелки указывают на генерализованное направление движения вод меридиональной циркуляции). Точками на рисунках показаны статистически значимые тренды на уровне 90 %.

В **закл^ючении** приведены основные результаты работы:

1. В верхнем ~ 1 -км слое, в основном, наблюдается климатический тренд на потепление и осолонение. Ниже ~ 1 -км слоя наблюдаются значительные области похолодания и распреснения (в реанализах ORA-S4 и GECCO2 эти области захватывают более глубокие слои океана до 3 км), что связывается с таянием льдов Гренландии, выносом распресненных вод из Северного

Ледовитого океана и затягиванием этих холодных и более пресных вод в глубинные слои.

2. При наблюдаемых климатических изменениях в целом за 1951-2017 гг. 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. Это противоречие должно быть разрешено в будущем, т.к. тренды функции тока АМОЦ во многом определяют глобальные климатические изменения.
3. Поля климатических трендов потенциальной плотности, функции тока АМОЦ и уровня моря формируются по линейному закону, как сумма их трендов, формируемых за счет изменений потенциальной температуры и солености, умноженных на коэффициенты a и b близкие к единице, соответственно. Это подтверждают рассчитанные коэффициенты множественной регрессии, также близкие к единице.
4. Для периодов с 1951 по 1990 гг. и с 1951 по 2017 гг. в целом все основные особенности изменений в структуре АМОЦ объясняются главным образом температурными изменениями, которые превалируют над соленостными. Однако для периода с 1991 по 2017 гг. наблюдаемый тренд на ослабление основного ядра функции тока АМОЦ, вызывается изменениями солености. Наблюдается отрицательная обратная связь в отклик на потепление. Результаты экспериментов подтвердили базовые положения гипотезы Шулейкина о взаимосвязи выноса льдов и поступлением Атлантических вод в Северный Ледовитый океан.
5. Была обнаружена связь между трендами в АМОЦ и среднезональных градиентов уровня моря – между трендами максимума функции тока АМОЦ на 38.5°N и трендами разности между среднезональными уровнями моря на 34.5°N и 57.5°N , которые, возможно, могут использоваться в качестве индекса изменчивости функции тока АМОЦ.

6. В тёплые периоды индекса АМО по сравнению с холодными в верхнем ~1 км слое Северной Атлантики в основном наблюдаются потепление и осолонение. Ниже этого слоя наблюдаются значительные области похолодания и распреснения, причем в реанализах GFDL и ESTOC эти области меньше, чем для данных EN4, WOA13, ORAS4 и GECCO2.
7. В чередующиеся последовательные периоды индекса АМО положительные и отрицательные температурные (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 частично поднимаясь на поверхность на 25°N и в области экватора. Этот механизм вносит существенный вклад в формирование фаз индекса АМО.

Тренд на усиление основного ядра АМОЦ с 1950-х по 1990 гг., в значительной степени является отражением потепления из-за антропогенного и других внешних факторов, что воспроизводится климатическими моделями земной системы в ответ на повышение уровня CO₂ [Caesar et al., 2018]. На эту тенденцию к усилению АМОЦ из-за потепления накладывается тенденция к ослаблению из-за осолонения в тропических и средних широтах, но распреснения в высоких широтах. С 1991 по 2017 вклад от осолонения в верхнем ~1 км слое в средних широтах начинает превалировать, что приводит к ослаблению основного ядра АМОЦ в этот период. Эта изменчивость АМОЦ хорошо отражается в разности между среднезональными уровнями моря на 34.5°N (максимум уровня моря в субтропической области) и 57.5°N (минимум уровня моря в субарктической области).

Все представленные в работе расчеты проведены с использованием открытого программного обеспечения. Для обработки данных использовались такие программы, как OpenGrads, Python и др. Расчеты по INMOM проводились на вычислительных ресурсах центра коллективного пользования на суперкомпьютерах «Ломоносов» и «Ломоносов-2» (<https://www.msu.ru/lomonosov/science/computer.html/>), принадлежащих МГУ

имени М.В.Ломоносова, а также на суперкомпьютере «МВС-100К», принадлежащему МСЦ РАН (<http://www.jscc.ru/>).

Публикации автора по теме диссертации

В изданиях, входящих в международные базы цитирования Web of Science, Scopus и RSCI.

- А.1 **Багатинский В. А., Дианский Н. А.** Вклады климатических изменений температуры и солености в формирование трендов термохалинной циркуляции Северной Атлантики в 1951-2017 гг. // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. — 2022. — № 3. — С. 73–88.

На английском: Bagatinsky V. A., Diansky N. A. Contributions of climate changes in temperature and salinity to the formation of north atlantic thermohaline circulation trends in 1951–2017 // Moscow University Physics Bulletin. — 2022. — Vol. 77, no. 3. — P. 565–581.

(Scopus/WoS = 0.672) (1 п.л./авторский вклад 0.8 п.л. : анализ литературы, подготовка данных, проведение моделирования, анализ результатов, формулирование выводов и публикация результатов в журнале)

- А.2 **Багатинский В. А., Дианский Н. А.** Изменчивость термохалинной циркуляции Северной Атлантики в различные фазы Атлантической мультидекадной осцилляции по данным океанских объективных анализов и реанализов // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. — 2021. — Т. 57, № 2. — С. 1–14.

На английском: Bagatinsky V. A., Diansky N. A. Variability of the north atlantic thermohaline circulation in different phases of the atlantic multidecadal oscillation from ocean objective analyses and reanalyses // Izvestiya - Atmospheric and Oceanic Physics. — 2021. — Vol. 57, no. 2. — P. 208–219.

(импакт фактор РИНЦ = 1.660, Scopus/WoS = 0.831) (0.88 п.л./авторский вклад 0.55 п.л.: анализ литературы, подготовка данных, проведение моделирования, анализ результатов, формулирование выводов и публикация результатов в журнале)

А.3 Дианский Н. А., Багатинский В. А. Термохалинная структура вод Северной Атлантики в различные фазы Атлантической мультideкадной осцилляции // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. — 2019. — Т. 55, № 6. — С. 157–170.

На английском: Diansky N. A., Bagatinsky V. A. Thermohaline structure of waters in the north atlantic in different phases of the atlantic multidecadal oscillation // Isvestia, Atmospheric and Oceanic Physics. — 2019. — Vol. 55, no. 6. — P. 628–639. (импакт фактор РИН = 1.660, Scopus/WoS = 0.831)

(0.88 п.л./авторский вклад 0.3 п.л.: анализ литературы, подготовка данных, проведение моделирования, анализ результатов, формулирование выводов и подготовка результатов к публикации в журнале)