

На правах рукописи



Аверьянова Екатерина Анатольевна

**КЛИМАТИЧЕСКАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ И ТЕРМОХАЛИННАЯ
ЦИРКУЛЯЦИЯ В АТЛАНТИЧЕСКОМ ОКЕАНЕ**

Специальность 25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Севастополь — 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Институт природно-технических систем».

**Научный
руководитель:**

Полонский Александр Борисович
член-корреспондент Российской академии наук, доктор географических наук, профессор, научный руководитель Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Институт природно-технических систем»

**Официальные
оппоненты:**

Зеленько Александр Андреевич
доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации»

Багаев Андрей Владимирович
кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля»

Защита диссертации состоится «30» сентября 2022 г. в 10 ч 00 мин на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.231.02 по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Институт природно-технических систем» и Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Севастопольский государственный университет» по адресу: **299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Севастопольский государственный университет» и на сайте www.иптс.рф.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью составителя, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 299011, г. Севастополь, ул. Ленина, 28 на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Учёный секретарь объединенного диссертационного совета Д 999.231.02 кандидат физико-математических наук



В.П. Евстигнеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Диагноз состояния климатической системы и прогнозирование изменений климата – актуальная задача, имеющая большое практическое значение. Одним из важнейших климатообразующих механизмов является термохалинная циркуляция в Атлантическом океане (ТХЦ) – часть крупномасштабной циркуляции Мирового океана, обусловленная глобальными меридиональными градиентами плотности, создаваемыми потоками тепла и пресных вод на поверхности океана. ТХЦ способствует сглаживанию термических контрастов между экватором и полюсом и регулирует климатическую изменчивость на масштабах от десятилетий до тысячелетий (Broecker, 1997; Rahmstorf, 1999; Clark et al., 2002; Stocker, 2000; Полонский, 2008).

В работах, выполненных с использованием моделей разной степени сложности, например в (Stommel, 1961; Rooth, 1982; Brayan, 1986; Manabe, Stouffer, 1988; Hughes, 1994; Rahmstorf, 1996; Marotzke, 2000; Hawkins, 2011; Fürst, Levermann, 2012; Jackson, Wood, 2018a; Jackson, Wood, 2018b; Weijer et al., 2019), сообщается о различных режимах термохалинной циркуляции. Эти результаты хорошо согласуются с выводами палеоклиматических исследований, например (Rahmstorf, 2002; Henry, 2016; Lynch-Stieglitz, 2017; Holmes et al., 2021), показывающих, что для последних 120 тыс. лет имеются свидетельства существования отличных от современного режимов ТХЦ Атлантического океана: холодного режима и режима Хайнриха. Реализация этих режимов сопровождалась похолоданием климата, наиболее выраженным в Атлантико-Европейском регионе.

В конце XX – начале XXI века в связи с ростом внимания к проблеме глобального потепления увеличился интерес к вопросу стабильности современного режима ТХЦ в Северной Атлантике. Вследствие глобального потепления увеличивается скорость таяния льдов и происходит опреснение поверхности океана в высоких широтах, что может привести к ослаблению интенсивности ТХЦ или даже к термохалинной катастрофе (ТХК), то есть к переходу в отличный от современного циркуляционный режим. Вместе с тем вопрос о возможности реализации термохалинной катастрофы в ближайшем будущем до сих пор остается открытым. В ряде работ изменение режима ТХЦ в современную климатическую эпоху оценивается как вполне реалистичное, например (Tziperman, 2000; Liu, Liu, 2013; Liu, Fedorov, 2019; Liu et al., 2019; Sévellec et al., 2017; Boyers, 2021). В то же время имеются и противоположные мнения, например (Schiller et al., 1997; Urban, Keller, 2010; Delworth et al., 2012; Swingedouw et al., 2013; Gent, 2017; Lohmann, Ditlevsen, 2021).

Наряду с полными глобальными моделями и моделями промежуточной сложности боксовые модели являются эффективным инструментом изучения ТХЦ. Они представляют собой упрощенные физические модели, в которых океан разбивается на несколько однородных боксов, обмен между ними контролируется градиентами плотности. По сравнению с более сложными моделями, боксовые модели реализуются намного проще. В них используется меньшее количество

плохо определяемых параметров, а полученные результаты более просты в интерпретации и позволяют в явном виде проиллюстрировать различные физические механизмы, ответственные за те или иные наблюдаемые эффекты. В настоящей работе для оценки возможности реализации ТХК в современную климатическую эпоху используется модифицированная четырехблочная модель Северной Атлантики (Griffies, Tziperman, 1995). При этом параметры модели и типичные вариации граничных условий оценены на основе современных массивов данных.

Связь работы с научными программами, планами, темами

1) Работа выполнялась в соответствии с планами научных исследований Морского гидрофизического института Национальной академии наук Украины (МГИ НАНУ) в рамках следующих завершенных научно-исследовательских программ: «Фундаментальные и прикладные физико-климатические исследования окружающей среды и климатической системы океан–атмосфера» (шифр «Климат», № 0106U001406), «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем Черного и Азовского морей, на основе современных методов контроля состояния морской среды и гридтехнологий» (шифр «Фундаментальная океанология», № 0111U001420), «Фундаментальные исследования физических процессов, определяющих состояние морской среды» (шифр «Физика моря»), № 0109U003178, целевой проект по Договору между Национальным антарктическим научным центром (НАНЦ) и МГИ НАНУ от 30.09.2011 г. № Н/13 2011 в рамках Государственной целевой научно-технической программы проведения исследований Украины в Антарктике «Исследование сезонной и межгодовой изменчивости гидрометеорологических характеристик в поверхностном слое Южного океана и их связь с глобальными процессами в системе океан–атмосфера» (шифр «Антарктика», ГР № 0111U009940, ГР № 0112U008263), 2011–2012 гг., целевой проект по Договору между НАНЦ и МГИ НАНУ от 20.09.2010 г. № Н/15-10 в рамках Государственной целевой научно-технической программы проведения исследований Украины в Антарктике «Исследование межгодовой изменчивости гидрометеорологических условий в регионе Антарктического полуострова и в Атлантическом секторе Антарктики» (шифр «Антарктика», ГР № 0110U008154), 2010 г.

2) Работа выполнялась в соответствии с планами научных исследований Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Институт природно-технических систем» в рамках следующих завершенных и действующих научно-исследовательских программ: «Фундаментальные исследования процессов в климатической системе, определяющих пространственно-временную изменчивость природной среды глобального и регионального масштабов» (№ 0012-2021-0003, № 0012-2019-0002), «Фундаментальные исследования процессов в системе океан–атмосфера–криосфера, определяющих пространственно-временную изменчивость глобального и регионального климата» (№ 0012-2016-0004), «Фундаментальные исследования процессов в системе океан–атмосфера–литосфера, определяющих пространственно-временную изменчивость

природной среды и климата глобального и регионального масштабов» (№ 0012-2014-0009).

3) Работа выполнялась при поддержке РФФИ: грант «Меридиональный перенос тепла в Тропической и Субтропической Атлантике: роль различных механизмов и низкочастотная изменчивость» (№ 15-05-02019, код «а»), 2015–2017 гг.

Объект исследования – Атлантический океан.

Предмет исследования – термохалинная циркуляция.

Цель диссертационной работы: исследовать режимы ТХЦ в Атлантическом океане в современную климатическую эпоху и возможность реализации ТХК с использованием данных реанализов и результатов численного моделирования в рамках боксовой модели.

Задачи исследования:

1) систематизировать сведения о механизмах, формирующих ТХЦ и ее изменчивость в Атлантическом океане, и описать современное состояние проблемы неединственности циркуляционных режимов Мирового океана;

2) оценить изменчивость основных факторов, контролирующих меридиональную термохалинную циркуляцию в Атлантическом океане, для использования их в дальнейших численных экспериментах;

3) провести серию численных экспериментов с типичными для современного климата параметрами для исследования режимов ТХЦ и возможности реализации ТХК в Северной Атлантике.

Методы исследования и использованные материалы

Для достижения целей, поставленных в диссертационной работе, привлекались данные нескольких массивов, содержащих данные о турбулентных потоках тепла (OAFlux (Objectively Analyzed air-sea fluxes for the global oceans), NCEP-DOE (The National Centers for Environmental Prediction Department of Energy) Reanalysis 2, MERRA2 (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2)). Основные результаты получены с использованием

– среднемесячных данных океанического реанализа ORA-S3 (ECMWF Operational Ocean Reanalysis System 3) о температуре и солёности;

– срочных данных (00:00, 06:00, 12:00, 18:00 UTC) атмосферного реанализа Национального центра прогнозов состояния окружающей среды / Национального центра атмосферных исследований США – NCEP/NCAR (о компонентах баланса тепла и пресных вод – турбулентном скрытом и явном потоках тепла, коротковолновой и длинноволновой радиации, осадках);

– данных глобальной цифровой модели рельефа, версия 2 (ETOPO2).

Для решения поставленных задач использовался спектральный анализ и стандартные статистические подходы: рассчитывались коэффициенты линейных трендов исследуемых величин, уровень их значимости по критерию Манна – Кендалла, среднеквадратические отклонения (СКО) рядов исследуемых величин, в которых выделены с использованием фильтра Тьюки колебания на высоких (с периодами менее 10 лет) и низких (с периодами более 10 или 30 лет) частотах, коэффициенты вариации исследуемых величин.

Для ответа на вопрос о возможности реализации ТХК при современных климатических тенденциях применялся метод математического моделирования. Используемая боксовая модель реализована на языке FORTRAN. Она представляет собой упрощенную физическую модель ТХЦ Северной Атлантики, в ней океан разбивается на четыре однородных бокса, обмен между которыми контролируется градиентами плотности. В южном поверхностном боксе (первом) вода относительно теплая и соленая, а в северном поверхностном (втором) – относительно холодная и пресная. Изменения тепла и соли в каждом боксе обусловлены адвективным обменом с соседними боксами и потоками тепла и соли через поверхность в первых двух боксах. Предполагалось, что океан получает тепло из атмосферы в первом южном боксе и отдает во втором северном с нулевым интегральным балансом. Кроме того, считалось, что осадки, выпадающие над вторым боксом, формируются в результате испарения в первом.

Научная новизна полученных результатов

Наиболее важные из результатов получены соискателем впервые и включены в **положения выносимые защиту**:

1. На основе анализа данных современных реанализов выявлены следующие особенности крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы, принципиально важные для формирования и изменчивости термохалинной циркуляции в Северной Атлантике, и/или уточнены их количественные характеристики:

- в областях формирования североатлантических глубинных водных масс (САГВ) обнаружены колебания суммарных турбулентных потоков тепла ($H + LE$) с типичными периодами несколько десятков лет и амплитудами $80\text{--}170 \text{ Вт/м}^2$;

- тренды суммарных турбулентных потоков тепла и потоков пресных вод, определяемых разностью осадков и испарений ($P - E$), в различных регионах формирования САГВ имеют разную направленность, но в целом по региону формирования этих вод тренд незначим на уровне 95%;

- установлен уровень высокочастотных шумов суммарных турбулентных потоков тепла и потоков пресных вод на поверхности в регионе формирования САГВ: СКО высокочастотных колебаний ($H + LE$) (с периодами менее 10 лет) варьируют в интервале от 60 до 230 Вт/м^2 , а ($P - E$) – от $0,5 \cdot 10^{-5}$ до $2 \cdot 10^{-5} \text{ кг/(м}^2\text{/с)}$.

2. На основании обобщенного анализа результатов более 200 численных экспериментов в рамках авторской четырехбоксовой модели:

- уточнен механизм генерации Атлантической мультидекадной осцилляции как внутренней термохалинной моды в Северной Атлантике;

- показано, что в современной климатической ситуации реализация термохалинной катастрофы маловероятна;

- продемонстрирована потенциальная важность Тихоокеанской декадной осцилляции, которая может дестабилизировать ТХЦ при увеличении амплитуды этой осцилляции в несколько раз.

Научная и практическая значимость полученных результатов

В диссертационной работе количественно описаны закономерности изменчивости суммарных турбулентных потоков тепла и потоков пресных вод,

термохалинных характеристик вод в местах формирования САГВ, изменчивость которых является одним из проявлений крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы. Получены фундаментальные результаты и уточнены имеющиеся знания об Атлантической термохалинной циркуляции и ее изменчивости в современную климатическую эпоху.

Результаты диссертации можно использовать для усовершенствования учебных и рабочих программ специальностей экологической, океанологической, метеорологической, географической направленности в вузах, сделанные выводы могут быть полезны для политиков и использованы в научно-популярных передачах, посвященных термохалинной катастрофе.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современных массивов данных реанализов, применением в работе боксовой модели Северной Атлантики, уровень сложности которой соответствует современному знанию о параметрах состояния климатической системы, тщательным подбором параметров боксовой модели, множеством проведенных численных экспериментов и детальным анализом их результатов. Полученные выводы не противоречат результатам работ по аналогичной тематике, выполненным на основе более сложных моделей.

Личный вклад соискателя

Постановка задачи исследования диссертационной работы проводилась совместно с научным руководителем членом-корреспондентом РАН А. Б. Полонским. Обсуждение выводов и анализ результатов исследований, выбор методов исследования осуществлялись совместно с научным руководителем. Соискатель участвовал в реализации боксовой модели на FORTRAN и провел все численные эксперименты. Им выполнены все нижеперечисленные расчеты, построение рисунков, графиков, схем и таблиц. Результаты, представленные в диссертации, соискатель лично докладывал на многочисленных всероссийских и международных конференциях.

Научные результаты, вошедшие в диссертацию, опубликованы в соавторстве с членом-корреспондентом РАН А. Б. Полонским, канд. физ.-мат. наук В. Ф. Санниковым и канд. геогр. наук А. В. Юровским.

В работах (Базюра, Полонский, Юровский, 2009; Базюра, Полонский, Юровский, 2009а; Базюра, Полонский, Юровский, 2011) Е. А. Аверьянова (девичья фамилия Базюра) участвовала в статистической обработке данных реанализа NCEP о турбулентных потоках тепла и потоках пресных вод, в анализе результатов, формулировке выводов.

В работах (Базюра, Полонский, Санников, 2011; Базюра, Полонский, Санников, 2014; Bazyura, Polonsky, Sannikov, 2014; Аверьянова, Полонский, Санников, 2017) Е. А. Аверьянова участвовала в разработке программного обеспечения для исследования термохалинной циркуляции Атлантики с помощью боксовой модели, в подборе параметров боксовой модели, самостоятельно проводила численные эксперименты, принимала участие в анализе результатов численных экспериментов и формулировке выводов.

Обзор (Аверьянова, Полонский, 2017) выполнен Е. А. Аверьяновой под руководством А. Б. Полонского.

Работы (Аверьянова, 2017; Аверьянова, 2021) выполнены Е. А. Аверьяновой без соавторов.

Апробация результатов диссертации

Результаты работы были представлены и обсуждались на следующих национальных и международных конференциях и семинарах:

1) Международная научная конференция «Функционирование и эволюция экосистем Азово-Черноморского бассейна в условиях глобального изменения климата», п. Кацивели, 2010 г.

2) Международная научная конференция «Ломоносовские чтения – 2010».

3) Международная научная конференция «Системы контроля окружающей среды – 2010», Севастополь, 2010 г.

4) Международная научная конференция «Системы контроля окружающей среды – 2011», Севастополь, 12–16 сентября 2011 г.

5) Международная конференция «Гидродинамическое моделирование динамики Черного моря» и семинар «Компьютерное моделирование динамики вод морей и Мирового океана: достижения и проблемы», Севастополь, 20–23 сентября 2011 г.

6) Международная конференция «Информатизация географических исследований и пространственное моделирование природных и социально-экономических систем», Алушта, 16–20 сентября 2012 г.

7) Международная конференция «Южные моря как имитационная модель океана», Севастополь, сентябрь 2013.

8) European Geosciences Union General Assembly 2014, Vienna, 27 April – 2 May 2014 (Session OS 1.3.).

9) Научно-практическая молодежная конференция «Экологические проблемы Азово-Черноморского региона и комплексное управление прибрежной зоной», Севастополь, 29 сентября – 5 октября 2014 г.

10) Международный технический семинар «Системы контроля окружающей среды – 2015», Севастополь, 14–18 декабря 2015 г.

11) XXII международная научно-техническая конференция «Прикладные задачи математики», Севастополь, 14–18 сентября 2015 г.

12) II научно-практическая молодежная конференция «Экобиологические проблемы Азово-Черноморского региона и комплексное управление биологическими ресурсами», Севастополь, 29 сентября – 2 октября 2015 г.

13) IV международная научно-практическая конференция «Морские исследования и образование: MARESEDU–2015», Москва, 19–24 октября 2015 г.

14) Третья всероссийская конференция по прикладной океанографии, Москва, 20–21 октября 2015 г.

15) Международная научная конференция «Окружающая среда и человек» (Арктика, моря, радиация, медицина) памяти члена-корреспондента РАН Д. Г. Матишова, Ростов-на-Дону, 5–8 сентября 2016 г.

16) III научно-практическая молодежная конференция «Экобиологические проблемы Азово-Черноморского региона и комплексное управление биологическими ресурсами», Севастополь, 28 сентября – 30 сентября 2016 г.

17) Международная молодежная научно-практическая конференция «Инновации в геологии, геофизике и географии – 2016», Севастополь, Филиал Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (МГУ), 30 июля – 2 августа 2016 г.

18) Черноморская научно-практическая конференция МГУ «Проблемы безопасности в современном мире», Севастополь, 26–28 мая 2016 г.

19) Международная научно-техническая конференция «Системы контроля окружающей среды – 2016», Севастополь, 24–27 октября 2016 г.

20) III международная конференция «Окружающая среда и устойчивое развитие регионов: экологические вызовы XXI века», Казань, 27–29 сентября 2017 г.

21) Международная научно-техническая конференция «Системы контроля окружающей среды – 2017», Севастополь, 6–9 ноября 2017 г.

22) Международная научно-практическая конференция «Системы контроля окружающей среды – 2021», Севастополь, 9–12 ноября 2021 г.

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в соавторстве в 22 публикациях, в том числе в 2 статьях, отвечающих требованиям ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, в 5 статьях, отвечающих требованиям ВАК Украины и соответствующих п. 10 Постановления Правительства Российской Федерации от 30 июля 2014 г. № 723 «Об особенностях присуждения ученых степеней и присвоения ученых званий лицам, признанным гражданами Российской Федерации в связи с принятием в Российскую Федерацию Республики Крым и образованием в составе Российской Федерации новых субъектов – Республики Крым и города федерального значения Севастополя», в 4 статьях в журналах, входящих в систему РИНЦ, в 1 статье в входящей в наукометрические базы Scopus и Web of Science, в 13 научных публикациях в сборниках материалов и тезисов конференций различного уровня.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Диссертация соответствует пункту 3 «Взаимодействие атмосферы и океана, явление Эль-Ниньо и глобальная атмосфера» и пункту 10 «Пограничные слои в атмосфере и океане» паспорта научной специальности 25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология. Соответствие пункту 3 подтверждается результатами, представленными в первом и втором положениях, выносимых на защиту. Соответствие пункту 10 подтверждается результатами, представленными во втором положении, выносимом на защиту.

Структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, трех разделов, заключения и шести приложений. В первом разделе приведено описание основных особенностей термохалинно-ветровой меридиональной циркуляции в Атлантическом океане в прошлом и настоящем, приведены основные механизмы, контролирующие

меридиональную циркуляционную ячейку, изучена роль меридиональной циркуляции в Атлантическом океане в климатической системе. Во втором разделе исследуется изменчивость основных факторов, контролирующих ТХЦ, основное внимание уделяется регионам формирования САГВ. В третьем разделе с помощью четырехблочной модели исследуется ТХЦ в Северной Атлантике. Рассматривается влияние ветра, нелинейности связи между градиентами плотности север – юг и объемным меридиональным транспортом на режимы ТХЦ, при этом эксперименты проводятся с использованием уравнения состояния в линейной и более точной форме. Изучается влияние наблюдаемой в реальном океане изменчивости характеристик атмосферы и океана на режимы ТХЦ в модели и возможность возникновения ТХК. В приложениях А и Б подробно описаны особенности формирования Антарктических придонных водных масс, САГВ и их различных компонент. В приложении В исследуется взаимосвязь МЦА и явления возникновения области, в которой наблюдается отрицательный тренд температуры, расположенной в окрестности Северного Атлантического субполярного круговорота (в англ.яз. литературе эта область называется *warming hole*). В приложении Г проводится сравнительный анализ изменчивости и трендов суммарных турбулентных потоков тепла по данным проекта OAFflux и атмосферных реанализов NCEP/NCAR, NCEP-R2, MERRA2. В приложении Д приведены результаты обобщающего анализа научной литературы по изменчивости потока пресных вод, обусловленного изменением континентального речного стока. В приложении Е обсуждаются некоторые аспекты изменчивости криосферы Арктики и Антарктики.

Диссертационная работа содержит 281 страницу машинописного текста, 6 приложений, 56 рисунков и 6 таблиц в основном тексте работы, 4 таблицы и 18 рисунков в приложениях. Список использованных источников включает 527 наименований.

Благодарности

Автор работы выражает глубокую благодарность научному руководителю член.-корр. РАН А. Б. Полонскому за помощь, ценные советы и постоянное внимание к работе на всех ее этапах, канд. физ.-мат. наук В. Ф. Санникову и канд. геогр. наук А. В. Юровскому за плодотворное сотрудничество, рецензентам д-ру геогр. наук, проф., Е. Н. Воскресенской и канд. физ.-мат. наук А. Б. Федотову за полезные рекомендации, позволившие улучшить качество работы, сотрудникам лаборатории морских климатических исследований Института природно-технических систем и отдела морских климатических исследований МГИ НАНУ за обсуждение результатов работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** приведена общая характеристика работы, включающая обоснование актуальности темы, связь работы с научными программами, постановку цели и задач, методы и материалы исследования, научную новизну и

основные положения, выносимые на защиту, практическую значимость работы, личный вклад автора и апробацию результатов исследования.

В Разделе 1 на основе современных литературных источников подробно исследован вопрос множественности циркуляционных режимов меридиональной циркуляции в Атлантике (МЦА), рассмотрены основные механизмы, отвечающие за формирование и устойчивость меридиональной циркуляционной ячейки; подробно описаны процессы формирования глубинных и придонных водных масс в Атлантическом океане; исследована связь резких климатических изменений в прошлом с режимами ТХЦ; выполнена обобщенная оценка интенсивности МЦА, исследована взаимосвязь МЦА и Атлантической мультидекадной осцилляции (АМО).

В результате выполненного обобщения показано, что термохалинный механизм является основным, отвечающим за переключение между режимами МЦА. Формирование резких переходных циркуляционных режимов МЦА происходит как отклик на быстрый термохалинный форсинг, связанный, например, с поступлением значительных объемов пресных талых вод в северную часть Северной Атлантики.

Ключевым фактором, контролирующим ТХЦ в Атлантическом океане, являются поверхностные потоки тепла и соли. Они обуславливают интенсивность формирования глубинных и придонных вод. САГВ формируются в основном в Норвежском, Гренландском, Лабрадорском морях и в море Ирмингера. Формирование антарктических придонных водных масс (АДВ) потенциально возможно в следующих областях: в море Рисер-Ларсена, между Землей Эндерби и западной частью моря Росса в Индийско-Тихоокеанском секторе, а в Атлантическом секторе – в море Уэдделла. Атлантический сектор Южного океана считается основным регионом активного формирования придонных вод. Скорости формирования САГВ составляют 18 ± 5 Св, а АДВ в Атлантическом секторе Южного океана 4 ± 2 Св.

Согласно большинству прямых и косвенных оценок, средняя интенсивность МЦА в Атлантическом океане попадает в интервал $14 \div 20$ Св. Поэтому для использования в дальнейших численных экспериментах с боксовой моделью была выбрана величина интенсивности МЦА в современную климатическую эпоху $U_{\text{клим}} = 17$ Св (среднее из диапазона $14 \div 20$ Св).

В Атлантическом океане в последние 120 тыс. лет, кроме современного, реализовывались и другие режимы меридиональной циркуляции. Например, режим с мелкой циркуляционной ячейкой, при котором САГВ формируются в расположенной южнее Гренландии области субполярной Северной Атлантики и не проникают глубже 2 км, или режим Хайнриха, при котором формирование САГВ в Северной Атлантике блокируется или значительно уменьшается. Эти режимы (особенно последний из них) сопровождался резким похолоданием, наиболее выраженным в Атлантико-Европейском регионе.

Изменчивость МЦА и обусловленного ею меридионального переноса тепла является одним из механизмов, отвечающих за формирование низкочастотной

изменчивости температуры поверхности океана, проявляющейся в виде Атлантической мультидекадной осцилляции.

В Разделе 2 на основе собственных расчетов и анализа результатов современных научных работ исследуется изменчивость основных факторов, контролирующих ТХЦ, – потоков тепла и пресных вод, при этом акцент сделан на регионы формирования САГВ. Кроме того, анализируется изменчивость термохалинных свойств САГВ в северной части Северной Атлантики.

На исследуемом промежутке времени происходит потепление, которое приводит к изменению ключевых параметров криосферы в высоких широтах Северного полушария: таянию морского льда в Арктике и уменьшению массы Гренландского ледникового щита. Для периода 1979–2019 гг. среднегодовое распространение льда в Арктике уменьшается на 4,7 %/10 лет; за период 2000–2018 гг. уменьшение массы Гренландского ледникового щита составляет 181 ± 31 Гт/год. Эти процессы способствуют уменьшению плавучести вод в регионе формирования САГВ, особенно в регионах активной конвекции, и, соответственно, уменьшению скорости их формирования и потенциально могут повлиять на термохалинный режим МЦА.

В северной части Северной Атлантики значимые на 95%-ном уровне тренды среднегодовых величин ($H + LE$) получены в западной части Норвежского моря ($0,1 \div 0,3$ Вт/(м²·год)), на границе кромки льда в Гренландском море ($0,8 \div 1,8$ Вт/(м²·год)). В Дэвисовом и Датском проливах, в восточной части Гренландского моря тренды значимые на уровне 95%, но отрицательные ($-0,5 \dots -0,7$ Вт/(м²·год)). То есть в различных регионах формирования САГВ тренды ($H + LE$) имеют различную направленность, а в областях формирования Лабрадорской водной массы тренд незначим на уровне 95%. В регионах формирования САГВ – в Норвежском и Гренландском морях – тренды $P - E$, значимые на уровне 95%, отрицательны ($-0,1 \dots -0,25$ кг/(м²·с·год)); в центральной части Лабрадорского моря, на акватории Исландского бассейна и моря Ирмингера среднегодовые тренды $P - E$ положительные, значимые на уровне 95%, коэффициенты линейного тренда изменяются в интервале от $0,15 \cdot 10^{-6}$ до $0,3 \cdot 10^{-6}$ кг/(м²·с·год). Однако если усреднять по всему региону формирования САГВ, то получим, что тренды ($H + LE$) и ($P - E$) незначимы на уровне 95%.

Лабрадорское море и область кромки льда в Гренландском море относятся к областям с наибольшими сезонными вариациями ($H + LE$), здесь амплитуда сезонного хода ($H + LE$) составляет $110 \div 200$ Вт/м². Из всех регионов формирования САГВ наибольшая амплитуда сезонного хода $P - E$ отмечается в Лабрадорском море и в море Ирмингера и составляет $(0,7 \div 1,3) \cdot 10^{-5}$ кг/(м²·с).

Области максимумов СКО и СКО ($H + LE$) на высоких частотах (с периодами менее 10 лет – СКОВч10-НЛЕ) совпадают, и в регионах формирования САГВ (в Лабрадорском, Гренландском, Норвежском морях и окрестности Восточно-Гренландского течения) в зимний период СКОВч10-НЛЕ варьируют в интервале от 60 до 230 Вт/м². Наибольшие величины СКОВч10-НЛЕ отмечаются зимой в Лабрадорском море (от 150 до 230 Вт/м²).

В Северной Атлантике максимум низкочастотной изменчивости ($H + LE$) отмечается зимой в Лабрадорском, Гренландском, Норвежском морях и окрестности Восточно-Гренландского течения, т. е. в области формирования САГВ. В этих районах СКО ($H + LE$) на низких частотах (с периодами более 10 и более 30 лет – СКО10-НЛЕ и СКО30-НЛЕ) составляют $50 \div 120 \text{ Вт/м}^2$ и $30 \div 60 \text{ Вт/м}^2$. В окрестности Североатлантического течения и южной части Гольфстрима СКО10-НЛЕ достаточно велики, но не превышают 50 Вт/м^2 , а коэффициенты вариации находятся в интервале от 0,1 до 0,3. В регионах формирования САГВ низкочастотная изменчивость $P - E$ слабо выражена.

Во второй половине XX – начале XXI в. для температуры и солёности САГВ, формирующихся в северной части Северной Атлантики, характерны выраженные квазипериодические колебания десятилетнего масштаба.

Таким образом, знание всех вышеперечисленных особенностей изменчивости потоков тепла и пресных вод, а также выводов раздела 1, дало возможность задать реалистичные начальные и граничные условия для проведения физически непротиворечивого моделирования ТХЦ в Северной Атлантике в рамках боксовой модели, результаты которого представлены в третьем разделе диссертации.

В Разделе 3 с помощью четырехбоксовой модели (рис. 1) исследуется ТХЦ в Северной Атлантике. Рассматривается влияние различных механизмов на режимы ТХЦ. В частности, исследуется относительная роль ветра, нелинейности связи между меридиональными градиентами плотности и объемным меридиональным транспортом в формировании различных режимов ТХЦ. При этом эксперименты проводятся с использованием уравнения состояния в разных формах. Изучается влияние стохастических атмосферных флуктуаций и наблюдаемой в реальном океане изменчивости температуры и солёности межгодового – десятилетнего масштабов на устойчивость ТХЦ и возможность возникновения термохалинной катастрофы.

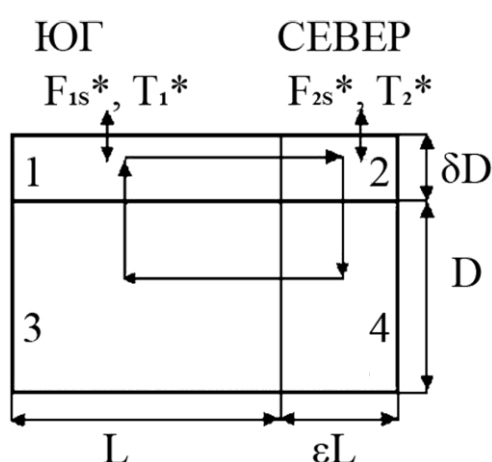


Рисунок 1 – Схема четырехбоксовой модели Северной Атлантики: 1 – южный поверхностный тропический бокс; 2 – северный поверхностный внетропический бокс; 3 – южный глубинный тропический бокс; 4 – северный глубинный внетропический бокс. Стрелками показано положительное направление термохалинной циркуляции (термическая мода, соответствующая современному климатическому режиму)

Сформулированная 4-боксовая модель является обобщением модели Гриффиса и Тzipермана (Griffies, Tziperman, 1995). Краткая характеристика модели дана в тексте выше (см. п. **Методы исследования и использованные материалы** автореферата). Поэтому далее приведем только основные уравнения модели. Изменения температуры и солёности в каждом боксе описываются следующими дифференциальными уравнениями:

$$\begin{aligned} \dot{T}_1 &= \frac{|U|}{\delta V} (T_k - T_1) + F_{1T}, & \dot{S}_1 &= \frac{|U|}{\delta V} (S_k - S_1) + F_{1S}, \\ \dot{T}_2 &= \frac{|U|}{\delta \varepsilon V} (T_1 - T_2) + F_{2T}, & \dot{S}_2 &= \frac{|U|}{\delta \varepsilon V} (S_1 - S_2) + F_{2S}, \\ \dot{T}_3 &= \frac{|U|}{V} (T_m - T_3), & \dot{S}_3 &= \frac{|U|}{V} (S_m - S_3), \\ \dot{T}_4 &= \frac{|U|}{\varepsilon V} (T_n - T_4), & \dot{S}_4 &= \frac{|U|}{\varepsilon V} (S_n - S_4). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь U – скорость объемного переноса (транспорта);

T_{1-4} и S_{1-4} – температуры и солёности боксов;

ε и δ – безразмерные геометрические параметры (см. рис. 1);

V – объем третьего бокса;

$k = 3, l = 1, m = 4, n = 2$ при $U \geq 0$ и $k = 2, l = 4, m = 1, n = 3$ при $U < 0$;

точка сверху означает производную по времени.

Потоки тепла на поверхности океана считаются пропорциональными разности эффективной температуры воздуха и температуры воды, то есть $F_{1T} = \gamma_T (T_i^* - T_i)$. При решении стационарной и нестационарной задач для потоков соли использовались условия $F_{1S} = \gamma_S (S_i^* - S_i)$ и $F_{1S} = \gamma_S (S_i^* - \bar{S}_i)$ соответственно, где \bar{S}_i – значения солёности боксов в стационарном состоянии. Здесь $T_1^*, T_2^*, S_1^*, S_2^*$ – эффективные температуры и солёности, определяющие величину потоков тепла и соли на поверхности океана; $\gamma_T^{-1}, \gamma_S^{-1}$ – время релаксации температуры и солёности.

Термохалинная циркуляция в боксовой модели обусловлена меридиональным градиентом давления, который в гидростатическом приближении пропорционален градиенту плотности. Охлаждение океана на севере увеличивает плотность в боксах 2 и 4 и обуславливает ТХЦ, направленную в верхнем слое от первого бокса ко второму. Объемный меридиональный перенос (U) может определяться следующими условиями:

а) линейной зависимостью U от градиентов плотности (как, например, в работе (Griffies, Tziperman, 1995))

$$U = \frac{U_0}{\rho_0} [\delta(\rho_2 - \rho_1) + (\rho_4 - \rho_3)]; \quad (2)$$

б) линейной зависимостью U от градиентов плотности с учетом дрейфовой составляющей объемного переноса между боксами (согласно методике, предложенной в работе (Полонский, 2002))

$$U = \frac{U_0}{\rho_0} [\delta(\rho_2 - \rho_1) - (\rho_4 - \rho_3)] - K(T_1 - T_2)^2; \quad (3)$$

в) нелинейной зависимостью U от градиентов плотности (как в работе (Park, 1999))

$$U = U_1 \left[\frac{\delta(\rho_2 - \rho_1) - (\rho_4 - \rho_3)}{\rho_0} \right]^{\frac{1}{3}}. \quad (4)$$

В формулах (2), (3), (4) коэффициенты U_0 и U_1 , K подбирались так, чтобы получить реалистичное значение объемного транспорта и его дрейфовой компоненты. Методика подбора U_0 и U_1 , K подробно обсуждается в диссертации.

Плотность в одной серии экспериментов определялась уравнением состояния в линейной (5) или в более полной форме (6), учитывающей квадратичное слагаемое для температуры:

$$\rho_i = \rho_0 [1 - \alpha(T_i - T_0) + \beta(S_i - S_0)], \quad (5)$$

$$\rho_i = \rho_0 [1 - \alpha(T_i - T_0) + \beta(S_i - S_0) - \alpha_1(T_i - T_0)^2]. \quad (6)$$

Здесь α , α_1 , β – коэффициенты уравнения состояния;

T_0 , S_0 – отсчётные температуры и солёности;

$$\rho_0 = 1027 \text{ кг/м}^3.$$

В другой серии экспериментов уравнение для плотности записывалось в линейной (или в более полной) форме отдельно для поверхностных боксов (см. уравнения (7) и (8)), отдельно для глубинных боксов (см. уравнения (9) и (10)):

$$\rho_i = \rho_0 [1 - \alpha_s(T_i - T_{0s}) + \beta_s(S_i - S_{0s})], \quad (7)$$

$$\rho_i = \rho_0 [1 - \alpha_s(T_i - T_{0s}) + \beta_s(S_i - S_{0s}) - \alpha_{1s}(T_i - T_{0s})^2], \quad (8)$$

$$\rho_i = \rho_0 [1 - \alpha_d(T_i - T_{0d}) + \beta_d(S_i - S_{0d})], \quad (9)$$

$$\rho_i = \rho_0 [1 - \alpha_d (T_i - T_{0d}) + \beta_d (S_i - S_{0d}) - \alpha_{1d} (T_i - T_{0d})^2]. \quad (10)$$

Здесь $\alpha_s, \alpha_{1s}, \beta_s$ – коэффициенты уравнения состояния для поверхностных боксов;

T_{0s}, S_{0s} – отсчетная температура и соленость для поверхностных боксов;

$\alpha_d, \alpha_{1d}, \beta_d$ – коэффициенты уравнения состояния для глубинных боксов;

T_{0d}, S_{0d} – отсчетная температура и соленость для глубинных боксов;

Методика подбора коэффициентов уравнения состояния, отсчетных температур и соленостей подробно описана в диссертации.

На основе современных массивов данных (океанического реанализа ORA-S3 и атмосферного реанализа NCEP, данных глобальной цифровой модели рельефа ETOPO2) параметры модели подобраны таким образом, чтобы она была приближена к современной климатической системе Северной Атлантики. В модели с такими параметрами в принципе возможны три режима ТХЦ: термический устойчивый режим, термический неустойчивый и халинный устойчивый режимы. Термический устойчивый режим соответствует современному климату. Халинный устойчивый режим соответствует палеоклиматическим условиям, типичным для Позднего Дриаса.

Для ответа на вопрос о возможности реализации ТХК исследовался соответствующий современному климату термический устойчивый режим. Задавался внешний форсинг, решалась нестационарная задача, определялись пороговые значения, при которых в системе происходит термохалинная катастрофа. Вычисления проводились для временного промежутка в 2000 лет. Внешнее воздействие (форсинг) задавалось в виде мгновенных возмущений (изменением начальных значений), белого гауссовского шума и осцилляций потоков тепла и солей на поверхности различного временного масштаба.

Белый гауссовский шум задавался и в потоки тепла, и в потоки соли следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{T}_1 &= \frac{U}{\delta V} (T_3 - T_1) + \gamma_T (T_1^* - T_1 + k_{1T} \psi_{1T}), \\ \dot{T}_2 &= \frac{U}{\delta \varepsilon V} (T_1 - T_2) + \gamma_T (T_2^* - T_2 + k_{2T} \psi_{2T}), \\ \dot{S}_1 &= \frac{U}{\delta V} (S_3 - S_1) + F_{1S} + \gamma_S k_{1S} \psi_{1S}, \\ \dot{S}_2 &= \frac{U}{\delta \varepsilon V} (S_1 - S_2) + F_{2S} + \gamma_S k_{2S} \psi_{2S}, \end{aligned} \quad (11)$$

где ψ_i – случайные величины, распределенные по нормальному закону;
 k_i – СКО белого шума.

Периодический форсинг температуры и солености поверхностных боксов задавался в следующем виде:

$$\begin{aligned}\dot{T}_1 &= \frac{U}{\delta V} (T_3 - T_1) + \gamma_T (T_1^* - T_1) + \gamma_T A_{1T} \sin\left(\frac{2\pi t}{\tau}\right), \\ \dot{T}_2 &= \frac{U}{\delta V} (T_1 - T_2) + \gamma_T (T_2^* - T_2) + \gamma_T A_{2T} \sin\left(\frac{2\pi t}{\tau}\right), \\ \dot{S}_1 &= \frac{U}{\delta V} (S_3 - S_1) + F_{1S} + \gamma_S A_{1S} \sin\left(\frac{2\pi t}{\tau}\right), \\ \dot{S}_2 &= \frac{U}{\delta \epsilon V} (S_1 - S_2) + F_{2S} + \gamma_S A_{2S} \sin\left(\frac{2\pi t}{\tau}\right),\end{aligned}\tag{12}$$

где τ и A_i – период и амплитуда возмущений.

Анализ результатов многочисленных экспериментов позволил сделать следующие выводы:

– показано, что учет дрейфового переноса между северными и южными боксами приводит к незначительному уменьшению стабильности ТХЦ, а использование нелинейной зависимости объемного переноса от меридиональной разности плотностей между северным и южным боксами – к противоположному эффекту;

– выявлено, что использование уравнения состояния в более полном виде способствует незначительному уменьшению стабильности современного циркуляционного режима в боксовой модели: немного уменьшает пороговые возмущения, при которых в модели возникает ТХК, по сравнению с линейным случаем. Однако даже в экспериментах с его использованием пороговые возмущения существенно (на порядки) превышают типичные для современного климата величины;

– наименьшее различие между пороговой и наблюдаемой амплитудами периодических возмущений отмечается для колебаний с периодом около 20 лет, типичным для Тихоокеанской декадной осцилляции. Как следует из полученных результатов, внешний форсинг, связанный с тихоокеанскими процессами, может дестабилизировать ТХЦ при увеличении их амплитуды в несколько раз.

В явном виде проанализирован механизм формирования собственных колебаний в боксовой модели с периодом около 100 лет, проявляющихся в виде АМО.

Таким образом, для ТХЦ в современную климатическую эпоху характерен квазипериодический осцилляционный режим, проявляющийся в естественных колебаниях климата. Развитие термохалинной катастрофы при этом представляется маловероятным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании обобщенного анализа литературных источников, собственных результатов обработки современных массивов данных и расчетов в рамках авторской боксовой модели можно сделать следующее заключение.

Средняя интенсивность МЦА в Атлантическом океане варьирует в интервале от 14 до 20 Св. Современный режим МЦА с такой интенсивностью не является единственно возможным. В последние 120 тыс. лет реализовывались и другие режимы, переход к которым сопровождался резким похолоданием, наиболее выраженным в Атлантико-Европейском регионе. Между различными режимами МЦА возможны резкие переходы вплоть до коллапса ТХЦ – термохалинной катастрофы. Термохалинный механизм является ключевым, отвечающим за переключение между режимами МЦА. Поверхностные потоки тепла и пресных вод (соли) – это ключевой фактор, обуславливающий интенсивность формирования глубинных и придонных вод и определяющий особенности термохалинной циркуляции в Атлантическом океане.

Для Атлантического океана низкочастотная (с периодами более 10 лет) изменчивость суммарных потоков тепла ($H + LE$) составляет 35% от общей изменчивости суммарных турбулентных потоков тепла. Наибольшая изменчивость ($H + LE$) на низких частотах выявлена для зимы в Северной Атлантике в области формирования САГВ, на границе кромки льда в полярных областях. Типичные величины СКО суммарных турбулентных потоков тепла на низких частотах (с периодами более 10 лет) здесь варьируют в интервале от 50 до 120 Вт/м². Колебания ($H + LE$) носят квазипериодический характер с типичными периодами несколько десятков лет. В северной части Северной Атлантики области максимумов низкочастотной изменчивости в полях температуры и солёности поверхностного слоя частично соответствуют области максимумов низкочастотной изменчивости суммарных потоков тепла на границе между океаном и атмосферой. В регионах формирования САГВ максимумов низкочастотной изменчивости $P - E$ не выявлено.

В регионе формирования САГВ СКО высокочастотных (с периодами менее 10 лет) колебаний ($H + LE$) варьируют в интервале от 60 до 230 Вт/м², а $P - E$ от $5 \cdot 10^{-6}$ до $20 \cdot 10^{-6}$ кг/(м²·с).

Значимые на уровне 95% тренды ($H + LE$) на большей части акватории Атлантического океана (за исключением западных частей антициклонических круговоротов) отрицательны. Уменьшение суммарных турбулентных потоков тепла в ответ на глобальное потепление является одним из проявлений отрицательной обратной связи в системе океан – атмосфера. На уровне значимости 95% показано, что тенденции изменений турбулентных потоков тепла ($H + LE$) и потоков пресных вод $P - E$ в Гренландском и Норвежском морях способствуют увеличению плотности поверхностных вод, а в областях активной конвекции, расположенных южнее Гренландско-Шотландских порогов, тенденции изменения потоков способствуют уменьшению плотности поверхностных вод и их плавучести

соответственно. Однако в целом по региону формирования САГВ тренды (H + LE) и P – E не значимы на уровне 95%.

Сформулирована четырехблочная модель, обобщающая модель Гриффиса и Тzipермана (Griffies, Tziperman, 1995). Подобраны параметры четырехблочной модели, максимально приближенные к современной климатической ситуации в Северной Атлантике. В модели возможны три режима термохалинной циркуляции: термический устойчивый режим, термический неустойчивый и халинный устойчивый режимы. Исследовано влияние учета различных физических механизмов на устойчивость ТХЦ. Показано, что учет нелинейности уравнения состояния и дрейфового переноса между северными и южными блоками способствует незначительному уменьшению стабильности современного циркуляционного режима в блоковой модели, а использование нелинейной зависимости объемного переноса от меридиональной разности плотностей между северным и южным блоками – к противоположному результату.

Определены пороговые возмущения, при которых в модели происходит ТХК. Показано, что пороговые возмущения значительно превышают типичные для современного климата величины.

Наименьшее различие между пороговой и наблюдаемой амплитудами периодических возмущений отмечается для колебаний с периодом около 20 лет, типичным для Тихоокеанской декадной осцилляции. Таким образом, показана потенциальная важность этой осцилляции, которая, как следует из полученных результатов, может дестабилизировать ТХЦ при увеличении амплитуды в несколько раз.

Блочная модель характеризуется собственными колебаниями с периодом около 100 лет, проявляющимися в виде Атлантической мультидекадной осцилляции, механизм которой исследован в явном виде.

Таким образом, для термохалинной циркуляции в современную климатическую эпоху характерен квазипериодический осцилляционный режим, проявляющийся в естественных колебаниях климата. Развитие термохалинной катастрофы при этом представляется маловероятным.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях из Перечня ВАК РФ:

1. **Аверьянова Е.А.,** Полонский А.Б. Резкие климатические изменения в прошлом и их связь с режимами меридиональной циркуляции в Атлантическом океане // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2017. № 1. С. 20–53. DOI: 10.21513/2410-8758-2017-1-20-53.

2. **Аверьянова Е.А.,** Полонский А.Б., Санников В.Ф. Моделирование особенностей современной термохалинной циркуляции Северной Атлантики с использованием блоковой модели // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2017. Т. 53, № 3. С. 406–414. DOI: 10.7868/S0002351517030038. (**Averyanova E. A.,** Polonsky A. B., Sannikov V. F. Thermohaline circulation in the North Atlantic and its simulation with a box model // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2017. Т. 53,

№ 3. С. 359–366. DOI: 10.1134/S0001433817030021) (также входит в наукометрические базы Web of Science, Scopus).

Статьи, опубликованные в изданиях из Перечня ВАК Украины (в соответствии с п. 10 Постановления Правительства Российской Федерации от 30 июля 2014 г. № 723):

1. Полонский А.Б., **Базюра Е.А.**, Санников В.Ф. Об устойчивости термохалинной циркуляции Северной Атлантики // Доповіді Національної академії наук України. 2014. № 10. С. 99–105.

2. **Базюра Е.А.**, Полонский А.Б., Санников В.Ф. Малопараметрическая модель термохалинной циркуляции Северной Атлантики // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2011. Т. 2, вып. 25. С. 45–57.

3. **Базюра Е.А.**, Полонский А.Б., Юровский А.В. О низкочастотной изменчивости турбулентных потоков тепла на акватории Мирового океана // Системы контроля окружающей среды. 2009. С. 305–308.

4. **Базюра Е.А.**, Полонский А.Б., Юровский А.В. О низкочастотной изменчивости явных турбулентных потоков тепла на акватории Мирового океана // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2009. Вып. 20. С. 108–116.

5. **Базюра Е.А.**, Полонский А.Б., Юровский А.В. Межгодовая изменчивость положения границы кромки льда в Южном океане // Системы контроля окружающей среды. 2011. Вып. 16. С. 246–250.

Статьи, опубликованные в изданиях, входящих в РИНЦ:

1. **Аверьянова Е.А.** О низкочастотной изменчивости баланса осадки–испарение на границе океана и атмосферы в Атлантическом океане // Системы контроля окружающей среды. 2017. Вып. 7 (27). С. 107–113.

2. **Аверьянова Е.А.** Особенности пространственно-временной изменчивости суммарных турбулентных потоков тепла на границе океан-атмосфера в Атлантике // Системы контроля окружающей среды. 2021. Вып. 4 (46). С. 38–44. DOI: 10.33075/2220-5861-2021-4-38-44.

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Аверьяновой Екатерины Анатольевны

Подписано к печати 25.07.2022
Выход в свет 27.07.2022
Заказ 35. Тираж 120 экз.
Распространяется бесплатно

Отпечатано ИК ИПТС
299011, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
ОГРН 1022302946489 от 24.05.2012
Тел.: +7(8692) 54-44-10
ph@instpts.ru