

Отзыв официального оппонента
на диссертацию Аверьяновой Екатерины Анатольевны
«Климатическая изменчивость и термохалинная циркуляция в
Атлантическом океане», представляемой на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.30 —
метеорология, климатология, агрометеорология

Меридиональные переносы тепла относятся к важнейшим процессам формирования глобального климата и его изменчивости на разных временных масштабах. По мере увеличения рассматриваемых временных масштабов всё большее значение приобретают океанические процессы и процессы взаимодействия океана и атмосферы, которые регулируют обмен между этими средами теплом, импульсом, влагой и другими физическими субстанциями. Поэтому в последние годы отмечается интенсификация имеющих уже длительную историю исследований океанического переноса тепла и водных масс между разными широтами, который в интегральном виде представляет собой замкнутые меридиональные структуры. По современным представлениям особую роль в этом отношении играет Атлантический океан, в котором меридиональная циркуляция (АМЦ) по многим признакам имеет термохалинную природу. Палеоклиматические данные и модельные исследования показывают, что с резкими изменениями АМЦ связаны крупные, вплоть до катастрофических, вариации глобальной климатической системы. Несмотря на активное исследование этих процессов, отражающееся в неубывающем количестве публикаций, остается ряд вопросов требующих дальнейшего изучения. Выполненная в этом направлении диссертационная работа Е. А. Аверьяновой безусловно является актуальной.

Заявленной и достигнутой целью диссертации является исследование современного режима термохалинной циркуляции Атлантического океана и вероятности его катастрофических изменений средствами численного моделирования на базе так называемой боксовой модели. Выбор модели для решения поставленных задач — определяющая часть исследования — в достаточной степени обоснован автором диссертации. Боксовые модели



циркуляции океана, восходящие к работам Стommела 1960-х годов, не исчерпали свой потенциал несмотря на конкуренцию с современными полными трехмерными океаническими моделями.

Следует отметить конструктивность сформулированного в работе состава взаимосвязанных научных задач и последовательность их решения, отражающегося в структуре диссертации. В первом разделе автором выполнена систематизация сведений о механизмах, формирующих термохалинную циркуляцию и ее изменчивость в Атлантическом океане и проанализированы современные исследования проблемы неединственности меридиональных циркуляционных режимов. Сформулированы обоснованные выводы о том, что термохалинnyй механизм меридиональной циркуляции является доминирующим и в его рамках объясняется смена режимов такой циркуляции в Атлантике. При этом формирование резких переходных процессов происходит как отклик на быстрые изменения термохалинского форсинга, связанные, например, с поступлением значительных объемов пресных талых вод в северную часть Северной Атлантики. Здесь же, на основании обобщения результатов большого числа опубликованных работ, автором получены оценки интенсивности Атлантической меридиональной циркуляционной ячейки используемые далее в работе при настройке численной модели.

Термохалинная циркуляция в значительной мере определяется процессами взаимодействия океана и атмосферы посредством обмена теплом, импульсом и пресной водой между этими средами. Поэтому логичным образом во втором разделе диссертационной работы выполняются оценки основных параметров изменчивости поверхностных потоков тепла и пресной воды на акватории Северной Атлантики. На основе обработки обширных данных известных метеорологических реанализов Екатерина Анатольевна проанализировала все компоненты теплового и водного баланса на границе океан-атмосфера и убедительно показала, что в изменчивости суммарных потоков тепла доминирующую роль играет изменчивость турбулентных

потоков (явного и скрытого) тепла. К важным результатам, особенно впечатлившим оппонента, здесь относится продемонстрированная приуроченность областей сезонной и низкочастоной (периоды ~10 лет) изменчивости турбулентных потоков тепла со значительными амплитудами к регионам формирования Северо-Атлантических глубинных вод. Наряду с этим показано, что изменчивость потоков пресной воды (разность осадков и испарения) в этих регионах незначительна. Эти результаты могут указывать на преобладание термических факторов по сравнению с халинными в процессах генерации и эволюции меридиональной циркуляции. Следует отметить также результаты выполненного на базе материалов океанического реанализа ORA-S3 исследования климатической изменчивости полей температуры и солености морской воды в Северной Атлантике. Этот анализ, выполненный автором диссертации, показывает что в северной части этой акватории океана четко выражены квазипериодические колебания. Полученные в этой части диссертации оценки параметров изменчивости гидрофизических полей, помимо их самостоятельного значения, также используются автором при проведении численных экспериментов с моделью меридиональной циркуляции.

С надлежащим учетом особенностей решаемой задачи количественного описания эволюции характеристик меридиональной циркуляции в работе используется четырех-боксовая модель, имитирующая взаимодействие тропических и внепротических областей в двух слоях — поверхностном и глубинном. Несмотря на значительное упрощение рассматриваемых процессов эта модель и другие родственные по постановке задачи модели позволяют воспроизвести некоторые важные характеристики интегральной меридиональной циркуляции. Используемая в диссертации боксовая модель является развитием модели [Griffies and Tziperman, 1995] и представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений для температуры и солености каждого из боксов, дополненную соотношением связывающим величину объемного переноса между боксами с переменными модели через

уравнения состояния морской воды. На основе этой модели автором диссертации были проведены серии численных экспериментов с целью исследования режимов термохалинной циркуляции и возможности реализации термохалинной катастрофы (переброса режима меридиональной циркуляции) в Северной Атлантике.

Наряду с решением линейной задачи проведены численные эксперименты с учетом нелинейных эффектов, вносимых через выражение для скорости переноса вод и в уравнение состояния. Параметры модели, как уже отмечалось, подбирались с использованием результатов океанического и атмосферного реанализов. Именно с тщательной настройкой параметров модели на основе больших массивов данных и получаемых на этой основе результатах связана существенная новизна диссертационной работы в части моделирования термохалинной циркуляции Северной Атлантики в боксовом приближении.

По результатам численных экспериментов Екатерина Анатольевна показала, что в модели с такими параметрами воспроизводятся три режима термохалинной циркуляции: термический устойчивый режим, термический неустойчивый и халинний устойчивый режимы. Термический устойчивый режим соответствует современному климату и проявляется в виде квазипериодических колебаний. Халинний устойчивый режим соответствует палеоклиматическим условиям, относимых на 12 тыс. лет назад. Было также установлено, что дополнительный учет дрейфового переноса между северными и южными боксами, как и учет нелинейности уравнения состояния, незначительно влияют на стабильность термохалинной циркуляции. Анализ пороговых значений параметров, приводящих систему в неустойчивое состояние, показывает что эти пороговые значения существенно отличаются от присущих современному климату значений. Тем самым автор диссертации делает обоснованный вывод о малой вероятности возникновения термохалинной катастрофы (переброса режима термохалинной циркуляции).

В целом, диссертация изложена в принятом научном стиле, хотя при её прочтении возникает несколько замечаний:

1. На стр. 56 указано, что для поверхностных потоков тепла используется традиционное “океанологическое” соглашение по знаку потока — положительные значения соответствуют поступлению тепла в океан. Но уже через несколько страниц на рисунках и в тексте применяется обратное соответствие для направления потока, что вносит путаницу и затрудняет понимание материала.

2. В достаточно подробном обзоре боксовых моделей меридиональной циркуляции в океане упущен цикл работ Б. А. Кагана¹ с соавторами в которых рассматриваются важные модельные результаты в близкой постановке задачи. Их сопоставление с результатами, полученными автором, могло бы обогатить диссертационную работу.

3. В третьем разделе диссертации слишком лаконично изложены особенности применяемой численной схемы для решения системы уравнений модели. Не приводится разностная форма уравнений и не указывается вариант применяемого метода Рунге-Кутта, поэтому неясен порядок аппроксимации схемы. Это ставит ряд вопросов. Нет обоснования используемого временного шага — почему он принят равным одному дню (имеется в виду одни сутки?). Насколько обоснованы опасения, что неустойчивость численной схемы может давать ложные выводы о коллапсе термохалинной циркуляции?

4. В нескольких частях текста диссертации и автореферата вывод о возможности термохалинной катастрофы (переброса режима меридиональной циркуляции) приводится в категоричной форме. Тогда как следовало бы его сопровождать пояснением, что этот вывод получен на основе результатов моделирования.

¹ См., например:

Kagan B.A., Maslova N.B. Nonuniqueness of the thermohaline circulation of the ocean // Transactions (Doklady) of the USSR Academy of Sciences. Earth Science Sections. 1989. T. 309. № 6. P. 262-266.

Каган Б.А., Маслова Н.Б., Сенч В.В. Разрывные автоколебания термохалинной циркуляции океана. Доклады Академии наук СССР. 1991. Т. 320. № 2. С. 456.

Вместе с тем, указанные замечания не влияют на полученные результаты и сформулированные в диссертации выводы и, в целом, не снижают значимости выполненного исследования.

Положения диссертации, вынесенные на защиту, полученные результаты и научные выводы достаточно обоснованы, имеют высокую достоверность и в отмеченных выше отношениях являются новыми. Новые сведения о характеристиках и особенностях крупномасштабной изменчивости потоков тепла в областях формирования глубинных вод в Северной Атлантике и результаты модельного исследования термохалинной циркуляции, полученные в диссертации, имеют значение для развития работ по мониторингу и прогнозированию климатических изменений, имеющих в настоящее время исключительную актуальность.

Основные результаты диссертационной работы полно отражены в автореферате и публикациях и обсуждались на авторитетных семинарах и научных конференциях. Содержание диссертационной работы соответствует паспорту специальности 25.00.30 – «Метеорология, климатология, агрометеорология» по п. 3 «Взаимодействие атмосферы и океана, явление Эль-Ниньо и глобальная атмосфера» и п.10 «Пограничные слои в атмосфере и океане». Представленная диссертация и опубликованные работы показывают высокую научную квалификацию автора, в полной мере соответствующую искомой ученой степени.

Таким образом, диссертация «Климатическая изменчивость и термохалинная циркуляция в Атлантическом океане» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, отвечающую требованиям, предъявляемым к диссертациям, а её автор, Аверьянова Екатерина Анатольевна, заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.30 — метеорология, климатология, агрометеорология.

Официальный оппонент:

Зеленько Александр Андреевич,

доктор физико-математических наук (специальность 25.00.29 — физика атмосферы и гидросфера), главный научный сотрудник Отдела морских гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России»

Адрес: 123376 г. Москва, Большой Предтеченский пер., д. 13, строение 1

Телефон: 8-(499)-795-22-27

Эл. почта: zelenko@mecom.ru



А.А. Зеленько

8 сентября 2022 г.

Я, Зеленько Александр Андреевич, даю свое согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.



А.А. Зеленько

Подписи Зеленько А.А. заверяю:

Заместитель директора ФГБУ

«Гидрометцентр России»



Д.Б. Киктев



Федеральное государственное бюджетное учреждение «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации», (ФГБУ «Гидрометцентр России»). 123376, Россия, Москва, Большой Предтеченский переулок, д.13, строение 1, телефон: (499) 252-34-48, факс: (499) 255-15-82, эл. почта: hmc@mecom.ru

*Сотрудник однокоманды
14.09.2022 Аверьянова Е.А.*

Сведения об официальном оппоненте
 по диссертационной работе Аверьяновой Екатерины Анатольевны
 «Климатическая изменчивость и термохалинная циркуляция в Атлантическом океане»
 представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
 по специальности 25.00.30 — метеорология, климатология, агрометеорология

Фамилия Имя Отчество оппонента	Зеленько Александр Андреевич
Шифр и наименование специальностей, по которым защищена диссертация	25.00.29 Физика атмосферы и гидросфера
Ученая степень и отрасль науки	Доктор физико-математических наук, науки о Земле
Ученое звание	Старший научный сотрудник
Полное наименование организации, являющейся основным местом работы оппонента	Федеральное государственное бюджетное учреждение «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации»
Сокращенное наименование организации в соответствии с уставом	ФГБУ "Гидрометцентр России"
Ведомственная принадлежность организации	Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет)
Структурное подразделение	Отдел морских гидрологических прогнозов
Почтовый индекс, адрес	123376, г. Москва, Большой Предтеченский переулок, д.13, строение 1
Веб-сайт	https://meteoinfo.ru
Телефон	8-499-795-22-27
Адрес электронной почты	zelenko@mecom.ru
Список основных публикаций в рецензируемых научных изданиях, монографии за последние 5 лет по теме диссертации (не более 15 публикаций)	<p><i>V. G. Gitis, A. B. Derendyaev, K. N. Petrov, A. P. Weinstock, I. O. Dumanskaya, S. N. Zatsepa, A. A. Zelenko, A. A. Ivchenko, E. S. Nesterov. Technology of Monitoring and Analysis of the Hydrometeorological Situation in the Arctic // Journal of Communications Technology and Electronics. 2018. Vol 63. No 6. P. 691-705.</i></p> <p><i>Зеленько А.А., Реснянский Ю.Д. Морские наблюдательные системы как составная часть оперативной океанологии (обзор) // Метеорология и гидрология. 2018. №12. С. 5–30.</i></p> <p><i>Думанская И.О., Зеленько А.А., Мысленков С.А., Нестеров Е.С., Попов С.К., Реснянский Ю.Д., Струков Б.С. Морские гидрологические прогнозы и оперативная океанология в Гидрометцентре России //</i></p>

	<p>Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. №4 (374). С. 149-183.</p> <p><i>Струков Б.С., Реснянский Ю.Д., Зеленъко А.А.</i> Структура внутригодовой изменчивости гидрофизических полей океана в глобальной версии модели NEMO с системой усвоения данных // Океанологические исследования. 2019. Том 47. № 3. С. 139–151. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(3).12</p> <p><i>Степанов В.Н., Реснянский Ю.Д., Струков Б.С., Зеленъко А.А.</i> Крупномасштабная циркуляция океана и характеристики ледяного покрова по данным численных экспериментов с использованием модели NEMO // Метеорология и гидрология. 2019. № 1. С.50-66.</p> <p><i>B. S. Strukov, Yu. D. Resnyanskii, A. A. Zelenko.</i> Relaxation Method for Assimilation of Sea Ice Concentration Data in the NEMO–LIM3 Multicategory Sea Ice Model. Russian Meteorology and Hydrology. 2020. Vol. 45. No. 2. P. 96–104.</p> <p><i>Степанов В.Н., Реснянский Ю.Д., Струков Б.С., Зеленъко А.А.</i> Оценка эффектов усвоения данных наблюдений в модели общей циркуляции океана с помощью ансамблевого фильтра Калмана: численные эксперименты с имитацией наблюдений // Метеорология и гидрология. 2021. № 2. С. 50-66.</p> <p><i>Myslenkov S., Zelenko A., Resnyanskii Y., Arkhipkin V., Silvestrova K.</i> Quality of the Wind Wave Forecast in the Black Sea Including Storm Wave Analysis // Sustainability. 2021, 13, 13099. P. 1-21. https://doi.org/10.3390/su132313099</p> <p><i>Yu.D. Resnyanskii, A.A. Zelenko, V.N. Stepanov, and B.S. Strukov.</i> Influence of Short-Period Variations of Atmospheric Forcing on Large-Scale Ocean Dynamics // Research activities in atmospheric and oceanic modelling. CAS/JSC WGNE. WCRP Report No. 4/2022. WMO. 2022. P. 8.13-8.14.</p>
Являетесь ли Вы работником ФБГНУ “Институт природно-технических систем” или ФГАОУ ВО “Севастопольский государственный университет” (в том числе по совместительству)?	Не являюсь

Являетесь ли Вы работником (в том числе по совместительству) организации, где работает соискатель ученой степени или его научный руководитель?	Не являюсь
Являетесь ли Вы работником (в том числе по совместительству) организаций, где ведутся научно-исследовательские работы, по которым соискатель ученой степени является руководителем или работником организации-заказчика или исполнителем (соисполнителем)?	Не являюсь
Являетесь ли Вы членом Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования науки Российской Федерации?	Не являюсь
Являетесь ли Вы членом экспертных советов Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования науки Российской Федерации?	Не являюсь
Являетесь ли Вы членом диссертационного совета, принявшего диссертацию к защите?	Не являюсь
Являетесь ли Вы соавтором соискателя степени по опубликованным работам по теме диссертационного исследования?	Не являюсь

Главный научный сотрудник
ФГБУ “Гидрометцентр России”

А.А. Зеленько

Подпись А.А. Зеленько заверяю:
И.о. начальника отдела кадров
ФГБУ “Гидрометцентр России”

О.П. Иноземцева

8 июля 2022 г.