

ОТЗЫВ
официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата географических наук Тузова Федора Константиновича
на тему: «Шельфовая конвекция и каскадинг в Северном Ледовитом
океане в меняющихся климатических условиях»
по специальности 1.6.17 – «океанология»

Известно, что воды относительно мелководных морских шельфов в холодный период года за счет отдачи тепла в атмосферу остывают быстрее, чем воды, над континентальным склоном, располагающиеся с ними по соседству. Вследствие этого они приобретают большую плотность. В Арктических морях уплотнение шельфовых вод происходит также из-за их осолонения при ледообразовании. Попадая на наклонное дно в области верхней границы континентального склона, более плотные шельфовые воды под действием составляющей силы тяжести, направленной вниз по склону, опускаются на некоторую глубину, осуществляя вентиляцию стратифицированных вод Арктического бассейна. Этот процесс в англоязычной океанографической литературе получил название «каскадинг», которое перекочевало и в русский язык.

Очевидно, что каскадинг играет важную роль в тепло-массообмене между шельфом и глубоким морем. В Северном Ледовитом океане (СЛО), с его протяженными шельфами и наличием устойчивой плотностной стратификации вод, препятствующей конвективно-турбулентному вертикальному перемешиванию, вклад опускания плотных вод с шельфа должен быть доминирующим в процессе обновления вод в промежуточном слое всего бассейна. Однако натурное исследование каскадинга в суровых условиях СЛО позволяет получать лишь некоторые свидетельства осуществления этого физического процесса. Поэтому его исследование с

привлечением других методов, например, численного гидродинамического моделирования, является весьма актуальным и перспективным.

Основной задачей диссертационного исследования Тузова Ф.К. являлась количественная оценка пространственно-временных характеристик каскадинга в различных районах Северного Ледовитого океана в период с 1986 – 2010 гг. и исследование возможной взаимосвязи между изменением площади ледяного покрова и интенсивностью шельфовой конвекции, а также каскадинга. При этом исходными материалами для выполнения работы были результаты расчета на гидродинамической модели NEMO в временном интервале 1986-2010 гг., данные натурных наблюдений в СЛО в различные годы, включая новейшие данные 2019-го года, океанский реанализ GLORYS12V1 (Mercator) и данные спутниковых наблюдений за концентрацией льда.

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников из 84 наименований. В ней содержится 143 страницы, 3 таблицы и 63 рисунка и 1 приложение.

Глава 1 посвящена обзору исследований по теме работы. Дано описание модели NEMO в общем виде и описание исследуемого модельного расчета для бассейна СЛО. Описан процесс каскадинга, приведены его основные характеристики, полученные на основании натурных исследований, теоретического и лабораторного моделирования. Указывается, в частности, что при опускании по склону поток плотных вод отклоняется вправо вдоль изобат под действием силы Кориолиса. На глубине, где плотность стекающих вод сравнивается по плотности с окружающей водой, (глубина эквивалентной или, нейтральной плотности) происходит отрыв потока от склона, и он распространяется квазизопикнически в область открытого океана. Отмечается, что обусловленный каскадингом и компенсационным апвеллингом вертикальный водообмен играет важную роль в биогеохимических циклах. Обусловленные каскадингом

вдольсклоновые горизонтальные перемещения фитопланктона, углерода и хлорофилла из продуктивных районов влияют на морские экосистемы.

Далее описывается используемая модель NEMO, которая является программным комплексом для численного моделирования динамики и термодинамики океана, а также протекающих в океане ледовых, биологических и геохимических процессов. В качестве исходных данных используется модельный расчет NEMO для акватории СЛО с пространственным разрешением 6-18 км и более высоким разрешением в области шельфа. Уточнение структуры вод в придонном слое было достигнуто благодаря применению гибридных вертикальных координат (30 сигма-уровней до глубины 300м и 44 z-уровня). Численное моделирование начинается 15 сентября 1979 года и заканчивается 31 декабря 2010. Модель разгоняется в течение 5 лет и 3 месяцев. В модели не используется ассимиляция или восстановление данных.

В главе 2 подробно описан разработанный автором алгоритм выделения областей с гидрологической структурой, характерной для каскадинга. Показан пример тестирования работы алгоритма для области шельфа вдоль побережья архипелага Северная земля. Необходимым условием развития каскадинга является наличие градиента плотности на склоне в направлении уменьшения глубины. Соответственно, выделение таких областей в массиве данных показывает зоны потенциального каскадинга. Для уменьшения обрабатываемого массива данных область поиска зон потенциального каскадинга определялась заранее на основании данных о глубине в узлах сетки. Из всего массива выбраны узлы сетки в диапазоне глубин до 500 м только на континентальном склоне. Определение таких узлов значительно сокращает объем информации и ускоряет обработку. Обозначив область поиска, все находящиеся в ней узлы проверяются на условие наличия градиента плотности на придонном горизонте с окружающими соседними узлами. После проверки всех узлов за определенный временной интервал формируется массив с координатами

цепочек узлов, удовлетворяющих условиям каскадинга. Поскольку под действием силы Кориолиса происходит смещение опускающихся плотных вод направо, добавляется условие наличия течения, отклоняющегося вправо вдоль изобат от направления цепочки узлов вниз по склону.

В качестве района для тестирования работы алгоритма была выбрана акватория вдоль побережья архипелага Северная земля. В этом районе каскадинг в районе острова Комсомолец наблюдался во время экспедиций в 1984 и 1985 годах. Используя разработанный алгоритм, все узлы в выбранном районе были проверены на наличие условий для каскадинга. В результате, были найдены узлы, где начинается и заканчивается каскадинг и подсчитано количество случаев каскадинга.

В. Главе 3 описываются результаты анализа модельных данных в районах, где каскадинг наблюдался во время проведения экспедиций. До проведения исследований с помощью алгоритма определения зон каскадинга, на шельфе моря Бофорта и в Чукотском море по заранее определенным координатам выполнявшихся разрезов, из модельного расчета выбраны узлы сетки, в которых предполагалось обнаружить каскадинг. По избранным узлам сетки построены разрезы и распределения придонной плотности, по которым удастся определить время осуществления каскадинга. Одним из ярких примеров реализации каскадинга является зима 2007–2008 гг. На мелководном шельфе в районе дельты р. Маккензи образовывались воды с повышенной аномалией потенциальной плотности, более 26 кг/м^3 , и, в течение зимы наблюдалось стекание плотных вод до глубины около 160 м.

В результате анализа, выполненного для всех морей СЛО, была установлена слабая положительная корреляция между количеством случаев каскадинга, найденных с помощью алгоритма, и площадью ледяного покрова. Для морей Лаптевых и Бофорта, а также для Баренцева моря наблюдается отрицательная корреляция между количеством случаев каскадинга, найденных с помощью алгоритма, и площадью ледяного

покрова. То есть при уменьшении площади ледяного покрова количество случаев каскадинга увеличивается.

В Главе 4 представлены результаты исследования каскадинга над Центральной банкой в Баренцевом море. Описаны полученные во время экспедиции «Трансарктика – 2019» данные гидрологических разрезов. Показано развитие каскадинга в мае 2019, связанного с опусканием более плотных вод, образовавшихся над банкой зимой и весной 2019 года. Проанализированы данные о сплоченности ледяного покрова и показано, что зимой 2019 года конвективное перемешивание и уплотнение происходило без привноса соли от образующегося льда, так как ледяной покров в районе центральной банки зимой отсутствовал.

Для исследования эволюции вертикальной структуры вод использованы данные реанализа GLORYS12V1. Построены распределения аномалии потенциальной плотности на разрезе, аналогичном разрезу, выполненному 15 мая 2019 года во время экспедиции «Трансарктика–2019».

Детальное исследование различных фаз эволюции термохалинной структуры вод над банкой в период с сентября 2018 г. по май 2019 г. включительно, показало, что формирование столба перемешанных вод над банкой происходит на протяжении 4-х месяцев, после чего в феврале над ее юго-западным склоном начинается каскадинг. При этом воды с наибольшей плотностью в течение месяца стекают по склону на глубину до 270 м. С начала апреля 2019 г. и до конца мая однородная водная толща над Центральной банкой трансформируется в «куполообразную» структуру, которая была зарегистрирована во время выполнения STD-разреза в экспедиции «Трансарктика-2019». Переход от «столбообразной» к куполообразной термохалинной структуре вод над банкой весной 2019 года был вызван опреснением поверхностного слоя из-за таяния льда.

В Заключение, сформулированы основные результаты выполненной работы, состоящие в следующем.

1. Используемая модель NEMO с горизонтальным разрешением 6 – 18 км и высоким вертикальным разрешением показала возможность воспроизводить наблюдаемые явления каскадинга. Используя 25-летний модельный расчет (1986 – 2010), удалось определить участки склонов шельфа вокруг Канадского бассейна, где были результаты моделирования сходны с данными наблюдений.
2. Разработанный автором алгоритм позволяет определить узлы модельной сетки, через которые проходит каскадинг.
3. Увеличение площадей, свободных ото льда в Море Лаптевых, море Бофорта и Баренцевом море способствует интенсификации каскадинга на континентальных склонах этих морей.
4. Благодаря проведению экспедиции «Трансарктика - 2019» удалось выявить и описать каскадинг над Центральной банкой в Баренцевом море. Установлено, что плотные воды над Центральной банкой сформировались зимой 2018 - 2019 благодаря термической конвекции, без осолонения при ледообразовании.

Все эти результаты являются хорошо обоснованными, обладают высокой степенью новизны и имеют научную и практическую значимость. Наиболее интересным из них и, отчасти, парадоксальным представляется третий результат, который позволяет заключить, что потепление регионального климата Арктики и частичное освобождение ото льда моря Лаптевых, моря Бофорта и Баренцева моря способствует интенсификации каскадинга на шельфах этих морей.

В целом данное диссертационное явление является пионерским и не имеет аналогов ни в России, ни за рубежом.

Работа написана хорошим языком, обладает четкой структурой и логически выверенным представлением материала. Ее результаты выводы и положения опубликованы в высокорейтинговых научных журналах и доложены на ряде всероссийских научных конференций.

По диссертации имеется несколько замечаний.

1. На стр. 4 (Введение) указано, что: «Основной целью работы является количественная оценка пространственно-временных характеристик каскадинга в различных районах СЛО в современный период»... При этом имеются в виду годы с 1986 по 2010. В тоже время, на стр. 27 говорится, что в начале 21 века (2001-2007 гг.) произошел переход к новому состоянию распределения арктического морского льда. Данный вывод убедительно иллюстрируется рис. 4. В связи с этим, представляется более корректным говорить, что исследование каскадинга в работе производится для двух периодов времени, характеризующихся различной ледовитостью (современного и предшествующего ему), а также для времени перехода между ними.
2. На стр. 17 (Глава 1) утверждается, что «основным фактором замедления и остановки стекания уплотненных вод является интенсивная диффузия, которая уменьшает горизонтальный плотностной градиент»... Наверно, было бы более правильно говорить о турбулентном вовлечении менее плотных окружающих вод в придонный слой уплотненных вод и их разбавлении за счет этого.
3. На стр. 36 (параграф 1.2.2) указывается, что численная модель NEMO, данные расчетов по которой использовались для выявления случаев каскадинга на шельфе СЛО, функционировала без ассимиляции или, восстановления данных. Поскольку расчеты производились для весьма протяженного периода времени (1979-2010 гг.) возникает вопрос, насколько хорошо модель воспроизводила реальную термохалинную структуру вод на всем временном интервале? Вместе с тем, о том, как тестировались результаты численных расчетов, в данном параграфе информации не приводится. Само тестирование – сопоставление расчетов с натурными данными, не являлось предметом работы диссертанта, но следовало бы обсудить данный вопрос и представить доказательства адекватности модельных и натурных данных.

4. На рис. 20 (Глава 3, параграф 3.1) приведены рассчитанные с годовым осреднением потоки воды через изобату 300 м для всего СЛО для исследуемого периода (1986-2010 гг.) в поверхностном и придонном экмановском слоях, а также в придонном слое за счет каскадинга. Все потоки являются сугубо положительными. Если это не модули потоков, то, для экмановских слоев они должны быть знакопеременными, чтобы суммарный водообмен через избранную изобату стремился к нулю. Необходимо прояснить этот вопрос.
5. Представляет интерес обсуждение вопроса взаимодействия придонного экмановского переноса (ПЭП) с процессом каскадинга. ПЭП может усиливать каскадинг, если направлен от берега в море и, наоборот, противодействовать каскадингу, если направлен в сторону берега. Однако, похоже, что диссертант не анализировал это взаимодействие.
6. Некоторое неудовлетворение вызывает отсутствие оценок, насколько велико расхождение «реальной» глубины погружения более плотных вод в процессе каскадинга от «номинальной» глубины погружения, рассчитанной на основе начальной плотности вод, образующихся на шельфе перед каскадингом. Это позволило бы выявить влияние разбавления плотных вод во время их опускания (велико ли оно?).
7. Имеются редакционные погрешности. В частности, в тексте на стр. 6 написано, что ...«термическая конвекция достигает дна без ледообразования, *требовавшего* в климатических условиях XX века, после чего начинается каскадинг». На стр. 103 упоминается рис. 50, а на самом деле, это рис. 54. Список несуразностей такого рода можно было бы продолжить, но, вместе с тем, их количество не так уж и велико, как бывает в некоторых диссертациях.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации

соответствует паспорту специальности 1.6.17 – «океанология» (по географическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Тузов Федор Константинович вполне заслуживает присуждения ученой степени кандидата географических наук по специальности 1.6.17 – «океанология».

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук, руководитель лаборатории экспериментальной физики океана Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук

Зацепин Андрей Георгиевич



Контактные данные:

тел.: +7-499

2, e-mail: za

zan.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 11.00.08 - Океанология

Адрес места работы:

117997, Москва, Нахимовский проспект д. 36

Тел.: +7 (499) 124-61-49, e-mail: office@ocean.ru

Подпись сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук А.Г. Зацепина удостоверяю:

руководитель/кадровый работник

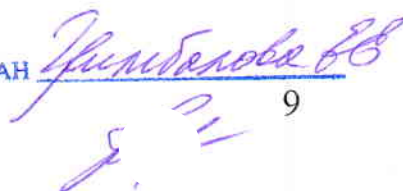
И.О. Фамилия

дата



Верно:

Зав. канцелярией ИО РАН



9

18.05.2022