

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Тузов Федор Константинович



**Шельфовая конвекция и каскадинг в Северном Ледовитом
океане в меняющихся климатических условиях**

1.6.17 – океанология (25.00.28 – океанология)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2022

Работа выполнена на кафедре океанологии географического факультета
МГУ имени М.В.Ломоносова

- Научный руководитель** – *Иванов Владимир Владимирович,
доктор физико-математических наук*
- Официальные оппоненты** – *Дианский Николай Ардальянович,
доктор физико-математических наук,
доцент, главный научный сотрудник
кафедры физики моря и вод суши
физического факультета Московского
государственного университета имени
М.В. Ломоносова*
- Белокопытов Владимир Николаевич,
доктор географических наук, доцент,
заведующий отделом океанографии
Федерального исследовательского
центра «Морской гидрофизический
институт РАН»*
- Зацепин Андрей Георгиевич, доктор
физико-математических наук,
заведующий лабораторией
экспериментальной физики океана
Института океанологии
им. П.П. Ширшова РАН*

Защита диссертации состоится « 26 » _____ мая 2022 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета МГУ.016.2(МГУ.11.02) Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, ГЗ МГУ, географический факультет, 18 этаж, ауд. 18-01 (тел. +7(495)9392238, факс +7 (495)9328836).

E-mail: Diss1102MSU@yandex.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/426808402/>

Автореферат разослан « 30 » _____ марта 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор биологических наук



А.В. Ольчев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Гипотеза об обновлении водных масс Арктического бассейна вследствие каскадинга (сползания тяжелых придонных вод вдоль склона до уровня эквивалентной плотности) была впервые высказана Ф. Нансеном в 1906 году. Первоначально предполагалось, что плотность формирующихся на шельфе вод достаточна для их изопикнического проникновения между поверхностным однородным слоем и атлантическими водами, т.е. для образования слоя холодного галоклина, но мала для погружения в глубинную и придонную структурные зоны. На основе анализа данных наблюдений, доступных в то время, было показано, что наиболее благоприятные условия для формирования уплотненных шельфовых вод, способных проникать до значительной глубины вдоль склона, наблюдаются в атлантическом секторе Северного Ледовитого океана (СЛО) в северных акваториях Баренцева и Карского морей. Этому способствует фоновая термохалинная структура, характеризующаяся повышенной соленостью в верхнем квазиоднородном слое. Наличие такой структуры вод связано со сравнительно слабым распреснением речными водами и проникновением в эти районы высокосоленных атлантических вод.

Сокращение многолетнего ледяного покрова в Арктическом бассейне СЛО и окраинных морях сибирского шельфа в последние десятилетия повлекло за собой усиление энергообмена между океаном и атмосферой. Конвективное перемешивание в условиях отсутствия постоянного ледяного покрова позволяет образовываться большему объему плотных вод на шельфе. Накапливающиеся на границе континентального склона плотные воды стекают вдоль уклона дна на большую глубину, осуществляя вентиляцию глубинных слоев Арктического бассейна. Этот процесс известен в современной океанографии под термином «каскадинг». Каскадинг играет одну из ключевых ролей в энергомассообмене между шельфом и глубоким океаном. В СЛО, с его протяженными шельфами и наличием

высокоградиентной структурной зоны в Арктическом бассейне, препятствующей глубокому проникновению конвекции, вклад каскадинга с шельфов в обновление вод в промежуточном и глубинном слоях по сути является определяющим. Принимая во внимание продолжающееся отступление летнего ледяного покрова в СЛО, ускорившееся после 2007 г., можно ожидать расширение зон с благоприятными фоновыми условиями для интенсивного энергомассообмена между шельфом и глубоким океаном, что в свою очередь непосредственно влияет на гидрологический режим. Обоснованный прогноз изменений гидрологического режима СЛО под действием меняющихся значимых процессов, к которым относится каскадинг, представляет актуальную научную задачу. Необходимым этапом на пути ее решения является количественная оценка произошедших изменений методами математического моделирования. Актуальность выполненного исследования дополнительно подкрепляется использованием для анализа новейших данных натурных наблюдений, полученных в экспедиции «Трансарктика–2019, первый этап» весной 2019 г. в северной части Баренцева моря, в сезон активного развития каскадинга.

Изучение изменения интенсивности каскадинга в морях Северного ледовитого океана в условиях уменьшения площади ледяного покрова представляет собой актуальную научную задачу.

Объектом исследования является каскадинг в морях Северного Ледовитого океана.

Предмет исследования – изменение интенсивности каскадинга в морях Северного Ледовитого океана при уменьшении площади ледяного покрова.

Целью работы является количественная оценка пространственно-временных характеристик каскадинга в различных районах СЛО в

современный период (1986–2010 гг.) и исследование возможной взаимосвязи между изменением площади ледяного покрова и интенсивностью шельфовой конвекции и каскадинга. 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 г., океанский реанализ GLORYS12V1 (Mercator) и данные спутниковых наблюдений за концентрацией льда.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Обработка результатов модельного расчета и вычисление параметров каскадинга.
2. Выборка районов СЛО, где каскадинг документирован по натурным данным и сопоставление с результатами модельного расчета.
3. Разработка методики выделения зон шельфовой конвекции и потенциального каскадинга по данным в узлах регулярной сетки.
4. Поиск областей каскадинга вдоль континентального склона Арктического бассейна и морей СЛО при помощи разработанной методики.
5. Исследование возможной взаимосвязи между изменениями площади ледяного покрова и интенсивности каскадинга в морях СЛО в 1986–2010 гг.
6. Исследование шельфовой конвекции и каскадинга в характерном районе Баренцева моря по материалам экспедиции «Трансарктика–2019» (март–май 2019 г.).

Для решения поставленных в работе задач:

- Выполнена инвентаризация районов СЛО, где по натурным данным был зафиксирован каскадинг.
- Для районов, где по натурным данным когда-либо наблюдался каскадинг проведено сравнение распределений термохалинных характеристик на вертикальных разрезах, построенных по натурным данным,

с соответствующими распределениями на разрезах, построенным по данным модельного расчета.

- Разработан алгоритм, реализованный в программной среде Matlab, выделяющий в массиве данных модельного расчета гидрологическую структуру вод, характерную для каскадинга.

- Рассчитано количество случаев каскадинга и площадь ледяного покрова за каждый временной интервал для российских арктических морей и построены линейные тренды этих характеристик.

- Проведен анализ развития шельфовой конвекции и каскадинга на Центральной банке в Баренцевом море в современных условиях сократившегося зимнего ледяного покрова.

Научная новизна диссертационной работы заключается **в положениях, выносимых на защиту:**

1. Гидродинамическая модель NEMO позволяет реалистично выявлять зоны, достигающей дна шельфовой конвекции и документировать события каскадинга, что открывает возможность предварительных теоретических предсказаний развития каскадинга в районах, где инструментальные наблюдения ранее не проводились.

2. Алгоритм, разработанный автором, позволяет выделять районы на шельфе со структурой плотности, характерной для различных стадий каскадинга. Анализ повторяемости событий каскадинга на основе разработанного алгоритма показал, что в Баренцевом море, море Бофорта и в море Лаптевых количество случаев каскадинга увеличивается при уменьшении площади ледяного покрова.

3. В Баренцевом море выявлен новый механизм шельфовой конвекции – каскадинга на Центральной банке: осенне-зимняя термическая конвекция достигает дна без ледообразования, требовавшего в климатических условиях второй половины 20-го века, после чего начинается каскадинг. Вынос льда в

район Центральной банки приводит к блокированию вертикального перемешивания и формированию характерного «купола» плотных вод.

Практическая значимость работы

Разработанный алгоритм выделения зон потенциального каскадинга по данным в узлах регулярной сетки (включая данные океанского реанализа с высоким пространственным разрешением), может быть применен для количественных оценок водообмена между шельфовой и глубоководной зонами Мирового океана.

Личный вклад автора

Автор разработал и применил алгоритм выделения из массива данных модельного расчета NEMO (период 1986 – 2010 гг.) областей с гидрологической структурой, характерной для каскадинга. Автор принимал участие в сравнительном анализе данных натурных наблюдений и модельного расчета. Автор принимал непосредственное участие в научно-исследовательской экспедиции «Трансарктика–2019», результаты которой, составили фактическую основу четвертой главы данной работы. Автор выполнил исследование взаимосвязи между повторяемостью каскадинга и концентрацией льда в российских арктических морях.

Апробация работы

Основные результаты, составившие содержание данной работы, докладывались на научных конференциях «Моря России» (2019, 2020, 2021), «Комплексные исследования мирового океана» (2020, 2021), «Комплексные исследования природной среды Арктики и Антарктики» (2020).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 5 статей в отечественных и зарубежных рецензируемых журналах, из которых 4 журнала входят в систему индексирования Scopus.

Во всех опубликованных работах вклад автора является определяющим.

Автор принимал активное участие в постановке научных задач,

проведении исследований данных моделирования, анализе полученных результатов и предоставлении их в печати.

Автором была проведена значительная работа над текстом разделов статей (Luneva et al 2020, Ivanov, Tuzov 2021), а также созданы иллюстративные материалы. В статье (Luneva et al 2020) автором подготовлен раздел 5, посвященный исследованию каскадинга в акватории «Канадского бассейна». Результаты исследования приведены в 3 главе. В работе (Ivanov, Tuzov 2021), автором обработаны и проанализированы данные экспедиции «Трансарктика–2019» и данные реанализов Era Enterim и GLORYS12V1. Материалы статьи используются в главе 4. Получены аргументированные выводы о новом принципе возникновения каскадинга над Центральной банкой.

В статье «Разработка и применение алгоритма определения Каскадинга у побережья архипелага Северная земля» (Тузов 2021) автором описаны необходимые условия обработки массива данных, для выделения областей, где происходит каскадинг. Непосредственно разработан код программ в среде программирования Matlab. Подробно проиллюстрирован пример работы алгоритма с нахождением случая каскадинга у побережья острова Малый Таймыр. Материалы данной статьи изложены в главе 2. Разработанный алгоритм был применен автором при написании статьи «Тенденции изменения интенсивности каскадинга плотных вод с арктических шельфов при сокращении ледяного покрова» (Тузов 2021). В главе 3 данной диссертации используются опубликованные в статье результаты.

Автором была проведена значительная работа над текстом статей, а также представление их в архив и редакции журналов и переписка с редакторами и рецензентами.

Благодарности

Автор выражает благодарность своему научному руководителю доктору физико-математических наук, Иванову Владимиру Владимировичу за неоценимую помощь при работе над диссертацией, всем сотрудникам кафедры океанологии Географического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова за

помощь и поддержку. Автор благодарен к.г.н. Архипкину Виктору Семеновичу и к.ф.-м.н. Мысленкову Станиславу Александровичу за ценные консультации и помощь при работе с данными моделирования NEMO и реанализом GLORYS12V1. В завершении, автор хотел бы выразить свою благодарность своей супруге Елизавете и своим родителям за постоянную поддержку в течение всего периода написания диссертационной работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников из 84 наименований. В ней содержится 143 страницы, 3 таблицы, 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.

Шельфовая конвекция – это тип конвекции, которая происходит на мелководном шельфе, ограниченном береговой линией, и континентальным склоном. В отличие от конвекции в открытом океане, в случае распространения шельфовой конвекции до дна, ее результатом может стать каскадинг. Каскадинг – придонное гравитационное течение, выносящее уплотненную воду, образованную при охлаждении или осолонении, вниз по континентальному склону на большую глубину.

На рисунке 1 показан процесс прохождения шельфовой конвекции и каскадинга в Арктике. Осолоненные или охлажденные воды погружаются к дну в районе области «А» и стекают до области «Б» с большей глубиной на континентальном склоне. Глубина, на которой плотность стекающих вод сравнивается с окружающей плотностью называется «Уровнем нейтральной плотности». Во время движения по склону линза плотных вод отклоняется вправо вдоль изобат под действием силы Кориолиса.

Каскадинг – важный механизм вентиляции промежуточных и абиссальных вод может влиять на глобальную термохалинную циркуляцию и

глобальный климат. Поскольку интенсивный водообмен между шельфом и склоном в характерных районах, где периодически развивается каскадинг, происходит на временном масштабе в десятки лет, можно сказать, что это обеспечивает климатическую значимость каскадинга. Обусловленный каскадингом и компенсационным апвеллингом вертикальный водообмен играет важную роль в биогеохимических циклах через перенос растворенного кислорода и взвешенного терригенного материала из поверхностного в глубинный слой вод и обратного переноса биогенных веществ в фотическую зону. Связанные с каскадингом вдольсклоновые горизонтальные перемещения фитопланктона, углерода и хлорофилла из продуктивных районов непосредственно влияют на состояние морских экосистем.



Рисунок 1. схема каскадинга

Используемая модель NEMO 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 уточненными шельфовыми процессами. Горизонтальное разрешение базовой модели соответствует $0,25^\circ$ океанической модели ORCA. Используется сетка и топография из глобальной трехполюсной сетки NEMO, но в конечном

варианте сетка переиндексирована для создания бесшовного массива данных в координатах с координатами x , y . Две открытые жидкие границы расположены в Беринговом проливе в 55° с.ш. и в Атлантическом океане в районе 48° с.ш.

Уточнение структуры вод в придонном слое было достигнуто благодаря применению гибридных вертикальных координат (30 сигма-уровней до глубины 300м и 44 z-уровня). В итоговых файлах с данными моделирования значения параметров интерполированы на одинаковые для всех узлов горизонты по глубине без изменения максимального количества горизонтов (74 горизонта).

Численное моделирование начинается 15 сентября 1979 г. и заканчивается 31 декабря 2010 г. 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 0 – 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. Дополнительно сравнивается плотность вод на придонном и вышележащем горизонтах исследуемого узла. Это

позволяет исключить из формируемого выходного массива данных узлы на склоне, в которых происходит перемешивание до дна.

Условия проверки исследуемого узла можно представить в следующем виде:

1. Плотность на придонном горизонте в заданном узле больше или равна плотности одного из восьми окружающих его узлов.
2. Глубина выбираемого узла больше, чем у заданного узла.
3. Плотность над придонным горизонтом заданного узла меньше, чем на придонном.

При выполнении всех перечисленных условий имеется основание полагать, что на данном участке склона может происходить каскадинг (рисунок 2). Перечисленные выше условия можно представить в виде системы неравенств (1):

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho(i, j, k, q)_{\text{bot}} > \rho(i, j, k - 1) \\ \rho(i, j, k, q)_{\text{bot}} \geq \rho(i \pm 1, j \pm 1, k)_{\text{bot}} \\ D(i, j) < D(i \pm 1, j \pm 1) \\ q \geq n \\ D_{\min} \leq D(i, j) \leq D_{\max} \end{array} \right. \quad (1)$$

где $\rho(i, j, k, q)_{\text{bot}}$ – плотность на придонном горизонте в исследуемом узле сетки, $\rho(i, j, k - 1)$ – плотность на горизонте над придонным, $\rho(i \pm 1, j \pm 1, k)_{\text{bot}}$ – плотность на придонном горизонте в следующем исследуемом узле сетки, $D(i, j)$ – глубина исследуемого узла сетки, $D(i \pm 1, j \pm 1)$ – глубина в следующем исследуемом узле сетки, q – номер узла сетки в последовательности узлов, для которых выполняются приведенные условия, n – минимально возможное количество узлов сетки в последовательности, задается перед началом работы алгоритма, D_{\min} , D_{\max} – минимальная и максимальная глубины, ограничивающие область поиска на континентальном склоне.

При соблюдении всех перечисленных выше условий найдется следующий узел сетки, который, в свою очередь, проверяется на соответствие условиям. При наличии нескольких узлов образуется их

цепочка с порядковыми номерами от 1 (с самой малой глубиной) до n с максимальной глубиной, через которую можно проследить развитие каскадинга в последующие временные интервалы. Для уточнения интересующих областей каскадинга можно установить минимальное количество узлов в цепочке (n) как дополнительное условие. Это позволяет определить каскадинг только на пологих склонах, где глубина между узлами меняется незначительно и не выходит за границы области поиска, в отличие от крутых склонов, где глубина узлов может выходить за границы области поиска уже при количестве узлов в цепочке более двух.

После проверки всех узлов за определенный временной интервал формируется массив со всеми координатами цепочек узлов, подходящих по условиям. Каждая цепочка узлов образует разрез с распределением плотности, подобным изображенному на рисунке 2.

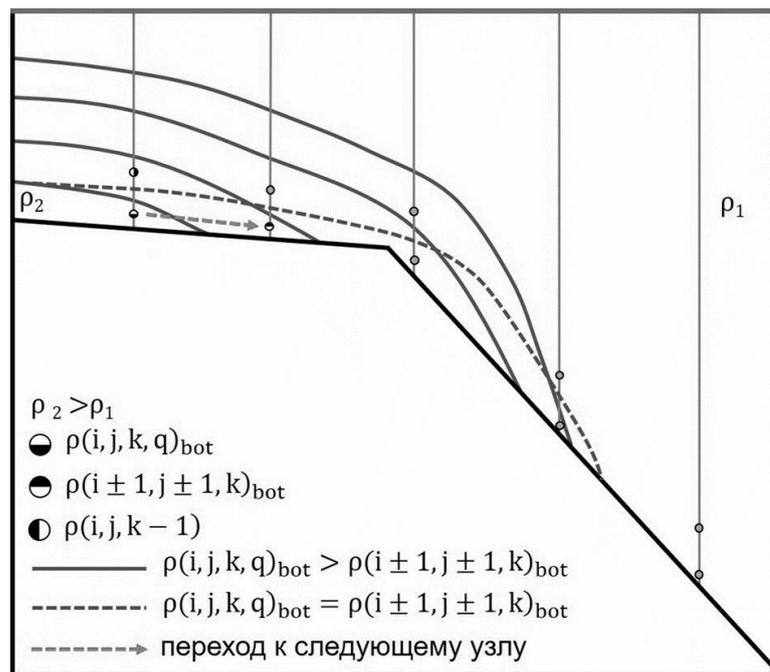


Рисунок 2. Схематичное изображение перехода к следующему узлу, исследуемому на условие возникновения каскадинга

При стекании по склону плотные воды под действием силы Кориолиса смещаются вдоль изобат. Следовательно, конечное направление каскадинга отличается от направления цепочки узлов. Для дополнительного подтверждения наличия каскадинга к условиям (1) добавляется условие

наличия течения, отклоняющегося вправо вдоль изобат от направления цепочки узлов (2):

$$\beta_c < \alpha_c < \beta_c + 180^\circ \quad (2)$$

где α_c – направление течения на придонном горизонте последнего узла цепочки в 5-дневные периоды, следующие за периодом, для которого в цепочке узлов были найдены условия возникновения каскадинга в $^\circ$, β_c – направление цепочки узлов каскадинга в $^\circ$.

В качестве района для тестирования работы алгоритма выбрана акватория вдоль побережья архипелага Северная земля (рисунок 3). В этом районе каскадинг в районе острова Комсомолец наблюдался во время экспедиций в 1984 и 1985 гг. Было установлено, что распределение плотности вод способствует возникновению каскадинга. Вдоль архипелага Северная земля были выбраны узлы сетки глубиной от 0 до 500 м (рисунок 3).

Используя алгоритм по условиям (1), все узлы в выбранном районе были проверены на наличие условий для каскадинга. В результате, были найдены все узлы, где начинается и заканчивается каскадинг и посчитано количество случаев каскадинга (рисунок 4).

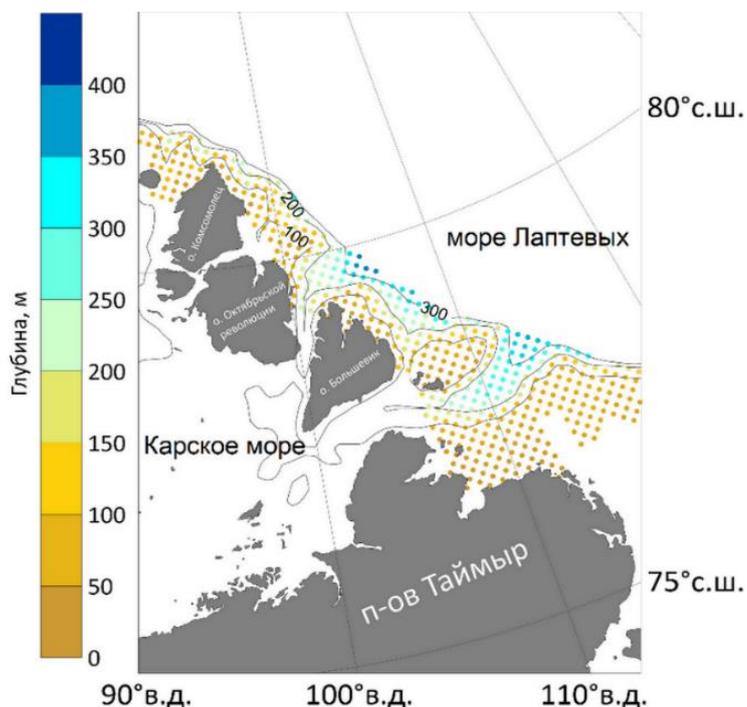


Рисунок 3. Район материкового склона моря Лаптевых с Областью узлов сетки с глубинами от 0 до 500 метров.

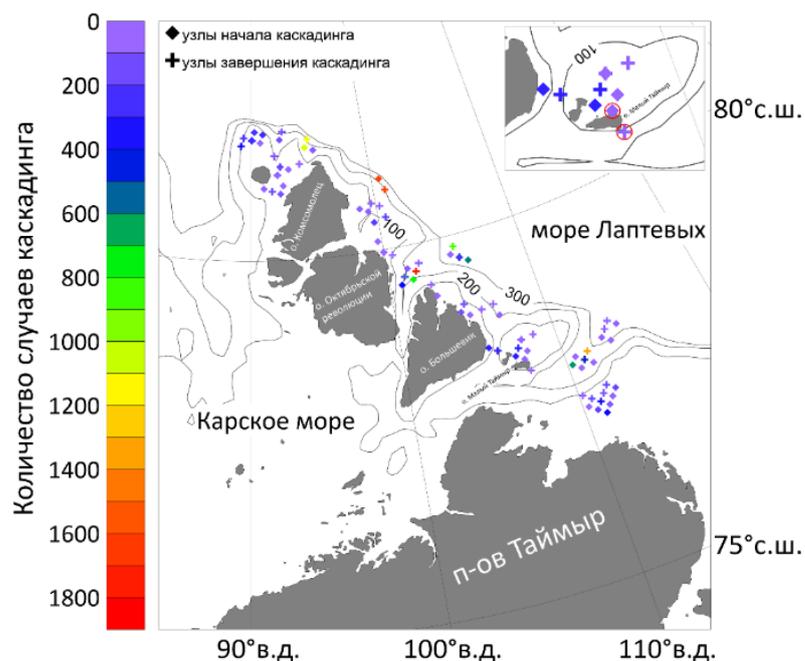


Рисунок 4. Распределение узлов начала и завершения каскадинга.

Окружностями выделены узлы начала и завершения каскадинга в районе острова Малый Таймыр, по которым были построены распределения температуры, солёности и аномалии плотности

17 декабря 1991 г. к востоку от острова Малый Таймыр сложились условия для возникновения каскадинга (рисунок 4, 5). Именно в эту дату структура плотности вод удовлетворяла всем условиям в системе неравенств (1). Аномалия плотности на придонном горизонте первого узла достигла 27 кг/м^3 . Такая же аномалия плотности наблюдается на глубине 80–90 м. (рисунок 5). 17 декабря температура в первом узле близка к температуре замерзания (рисунок 5).

Распределение солёности 17 декабря показывает повышенные значения солёности в узле начала каскадинга, следовательно, произошло повышение плотности воды из-за осолонения при льдообразовании. В следующий временной интервал – 22 декабря – наблюдалось развитие каскадинга (рисунок 5).

Распределение солёности в следующий после 17 декабря период сходно с распределением плотности.

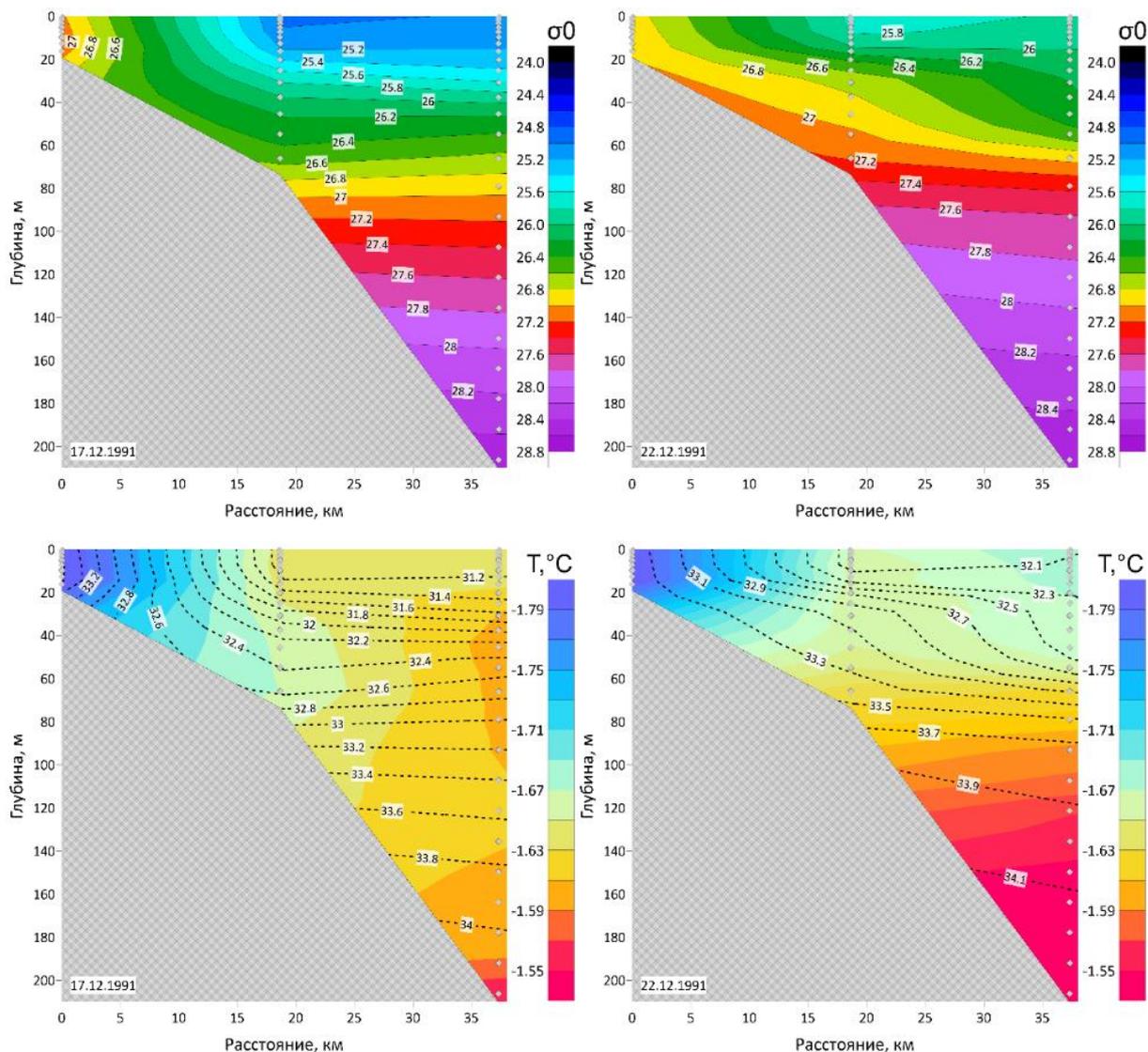


Рисунок 5. Распределение аномалии плотности (кг/м^3), температуры ($^\circ\text{C}$) и солености (епс, пунктирные линии) на разрезе в декабре 1991 г.

Глава 3 посвящена исследованию модельных данных в районах, где каскадинг наблюдался во время проведения экспедиций. Показано изменение количества случаев каскадинга, найденных с помощью алгоритма, и площади ледяного покрова для всех морей СЛО, в целом, и для моря Лаптевых, Моря Бофорта и Баренцева моря.

До проведения исследований с помощью алгоритма определения зон каскадинга, на шельфе моря Бофорта и в Чукотском море по заранее определенным координатам выполнявшимся разрезам, из модельного расчета выбраны узлы сетки, в которых предполагалось обнаружить каскадинг (рисунок 6). По вырезанным узлам сетки построены разрезы и распределения

придонной плотности, по которым удастся определить время прохождения каскадинга (рисунок 7).. Одним из ярких примеров прохождения каскадинга является зимний период 2007–2008 г. На мелководном шельфе в районе дельты р. Маккензи возникают воды с повышенной аномалией потенциальной плотности, более 26 кг/м^3 , и, в течение зимы наблюдается стекание плотных вод до глубины около 160 м (рисунок 7).



Рисунок 6. Узлы модельной сетки вырезанные по заранее определённым координатам для проверки возможности определения каскадинга

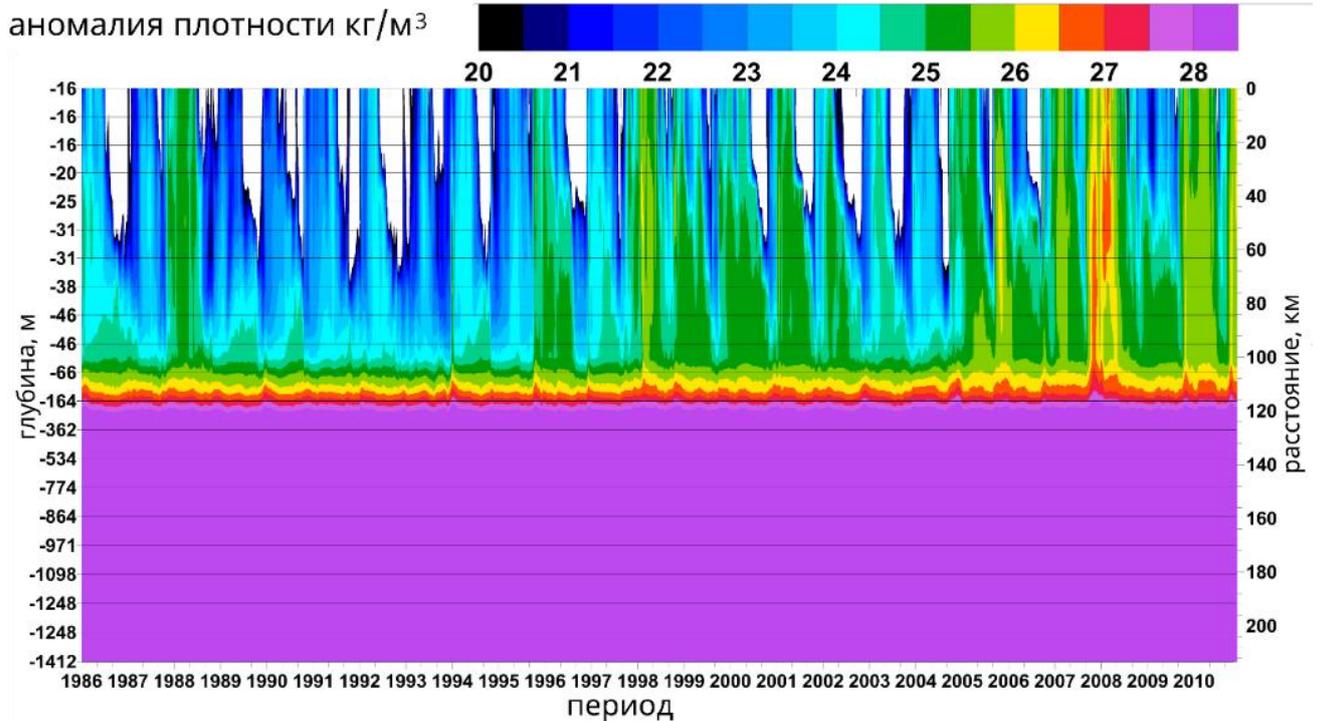


Рисунок 7. Распределение аномалии плотности на придонном горизонте на разрезе в районе дельты р. Маккензи по данным модельного расчета

Построенные линейные тренды площади ледяного покрова и аномалии площади ледяного покрова относительно среднего за весь период, показали, что при оценке всех морей СЛО (рисунок 8 А) не наблюдается сокращение площади морского льда. Вместе с тем, для большинства морей, кроме Баренцева, Лаптевых и Бофорта, характерно уменьшение количества случаев каскадинга.

Баренцево море испытывает значительное влияние теплых атлантических вод и, в силу этого, характеризуется отличным от других морей ледовым режимом. Максимальная площадь ледяного покрова, рассчитанная по спутниковым данным, отмечалась зимой 1998 г. В этот год наблюдалась и максимальное количество случаев каскадинга в зимний период – 37 случаев в отдельный пятидневный период (рисунок 8 Б). Интенсивное ледообразование привело к выделению большого количества рассола и значительному уплотнению вод. После 2000 г. практически каждый год наблюдается ситуация, когда площадь льда уменьшается до близких к нулю значений, а количество случаев каскадинга в течение некоторого времени (приблизительно 1 месяц) остается близким к высоким зимним значениям. Это может означать, что часть случаев происходит без процесса ледообразования, только при охлаждении и уплотнении вод на участках акватории, свободной ото льда. Также наблюдается увеличение количества случаев каскадинга в зимний период при уменьшении площади ледяного покрова. Количество случаев каскадинга увеличилось с 17 до 21, при этом площадь ледяного покрова снижается с 38% до 20%. Такая же динамика наблюдается в море Бофорта и море Лаптевых.

В Главе 4 проведено исследование каскадинга над Центральной банкой в Баренцевом море. Описаны полученные во время экспедиции «Трансарктика–2019» данные гидрологических разрезов. Показано развитие каскадинга плотных вод в мае 2019, образовавшихся над банкой зимой и весной 2019 г.

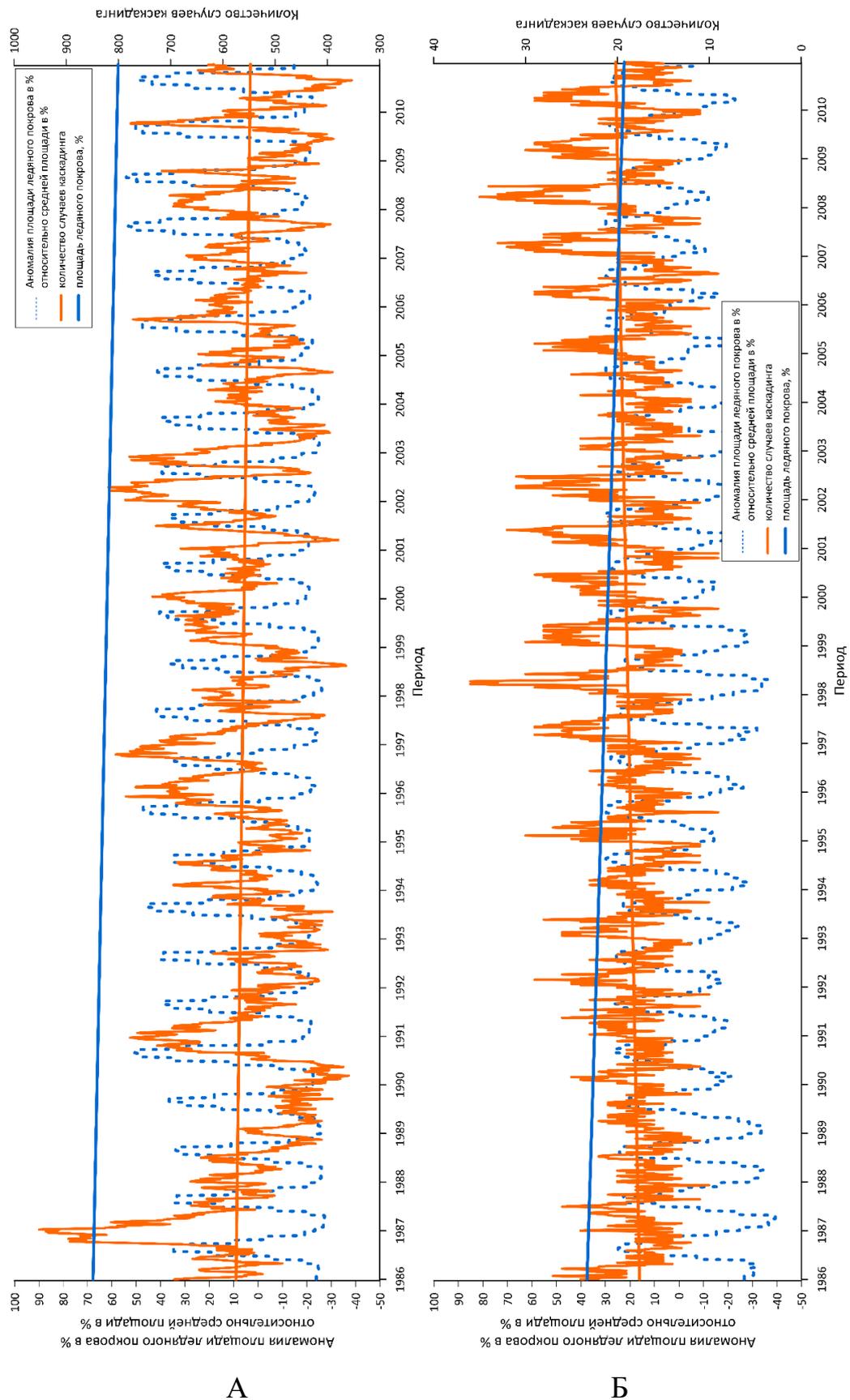


Рисунок 8. Изменение количества случаев каскадинга и аномалии площади ледяного покрова в акваториях исследуемых морей (А) и в Баренцевом море (Б) за период модельного расчета

Проанализированы данные о сплоченности ледяного покрова и показано, что зимой 2019 г. конвективное перемешивание и уплотнение происходило без привноса соли от образующегося льда, так как ледяной покров в районе центральной банки зимой отсутствовал.

Исследование спутниковых данных показало, что в районе Центральной банки появление ледяного покрова происходит, в основном только в апреле 2019 г. В остальное время акватория над центральной банкой практически свободна ото льда. При этом, в апреле лед с концентрацией до 0,5 (рисунок 9) не образуется непосредственно над банкой, а является дрейфующим льдом.

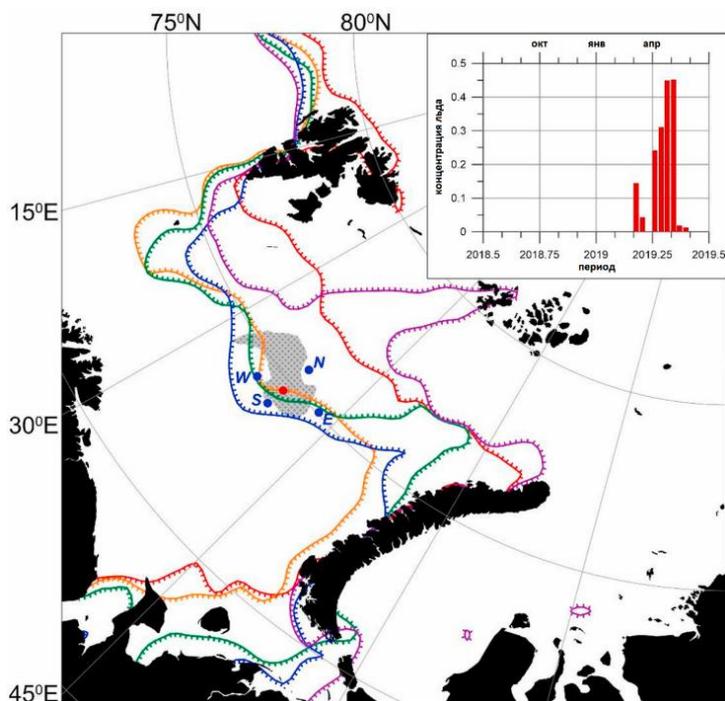


Рисунок 9. Среднее положение кромки льда в течение первых 10 дней: февраль (красный), март (оранжевый), апрель (зеленый), май (синий) и июнь (пурпурный). На вставке показан временной ряд сплоченности льда над ЦБ. Красная точка обозначает расположение центральной станции CTD над ЦБ

Для исследования эволюции вертикальной структуры вод использованы данные реанализа GLORYS12V1. Построены распределения аномалии потенциальной плотности на разрезе, аналогичном выполненному 15 мая 2019 г. во время экспедиции «Трансарктика–2019» (рисунок 10).

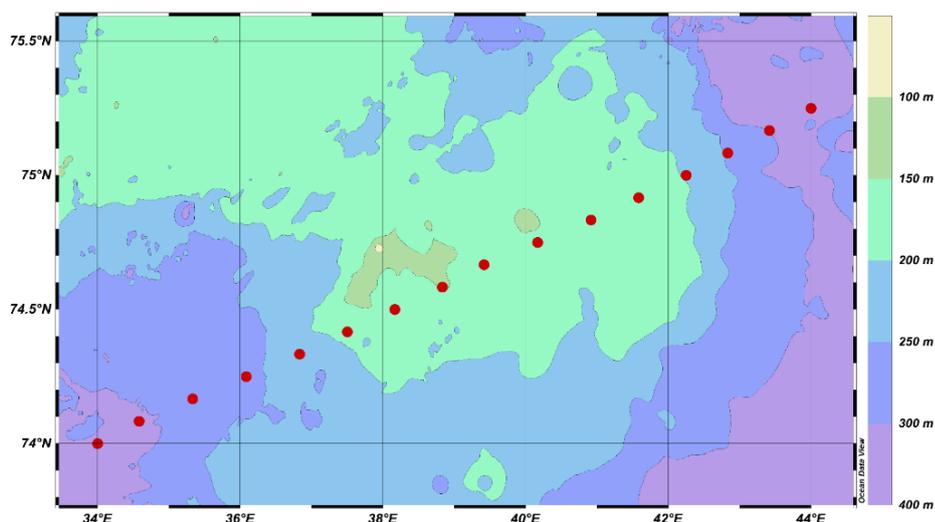


Рисунок 10. Схема узлов сетки реанализа GLORYS над Центральной банкой в Баренцевом море

Начиная с середины сентября вертикальная конвекция постепенно перемешивает воду над ЦБ. На перемешивание всей толщи воды уходит около 4 месяцев. К концу января водный столб от поверхности до дна становится однородным с температурой $-0,22^{\circ}\text{C}$, соленостью 34,91 епс и аномалией потенциальной плотности $28,05\text{ кг/м}^3$ (рисунок 11 А).

После появления над Центральной банкой столба перемешанных вод на юго-западном склоне Центральной банки в феврале начинается каскадинг (рисунок 11 Б, В). Шлейф вод с плотностью $27,94\text{ кг/м}^3$ сформированный в начале февраля к 15 февраля стекает по склону на глубину 270 м (рисунок 11 В).

С начала апреля 2019 г. до конца мая однородная водная толща над Центральной банкой трансформируется в «куполообразную» структуру (рисунок 11 Г). Основываясь на анализе, представленном в предыдущих разделах, можно констатировать, что, по крайней мере, весной 2019 г. этот переход был вызван опреснением поверхностного слоя, вызванным таянием морского льда, дрейфовавшего с севера. Промежуточное состояние этого преобразования было зафиксировано STD-измерениями на разрезе с высоким разрешением в мае 2019 г. (Рисунок 12 А) и в реанализе GLORYS (Рисунок 12 Б).

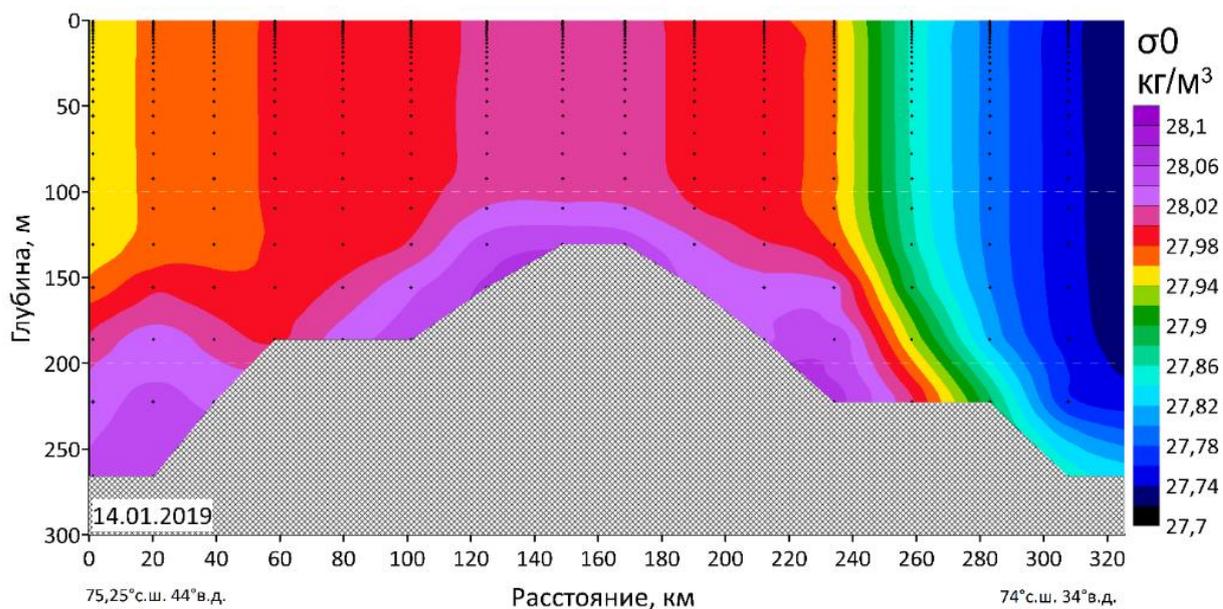


Рисунок 11 А. Распределение аномалии потенциальной плотности на разрезе через Центральную банку в Баренцевом море 14 января 2019 г.

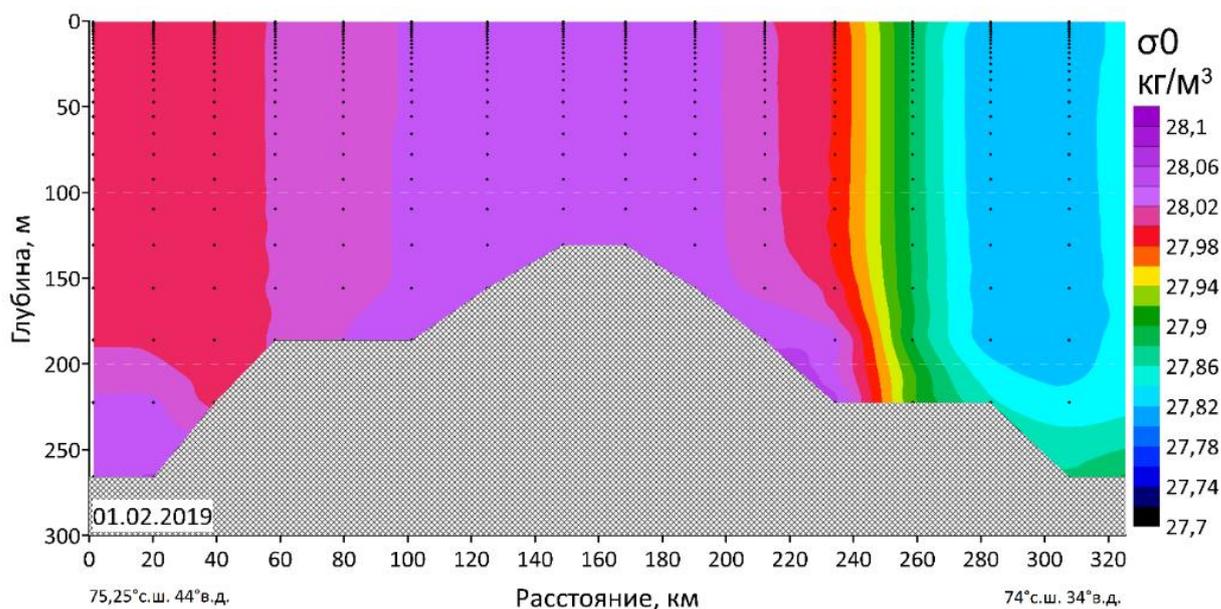


Рисунок 11 Б. Распределение аномалии потенциальной плотности на разрезе через Центральную банку в Баренцевом море 1 февраля 2019 г.

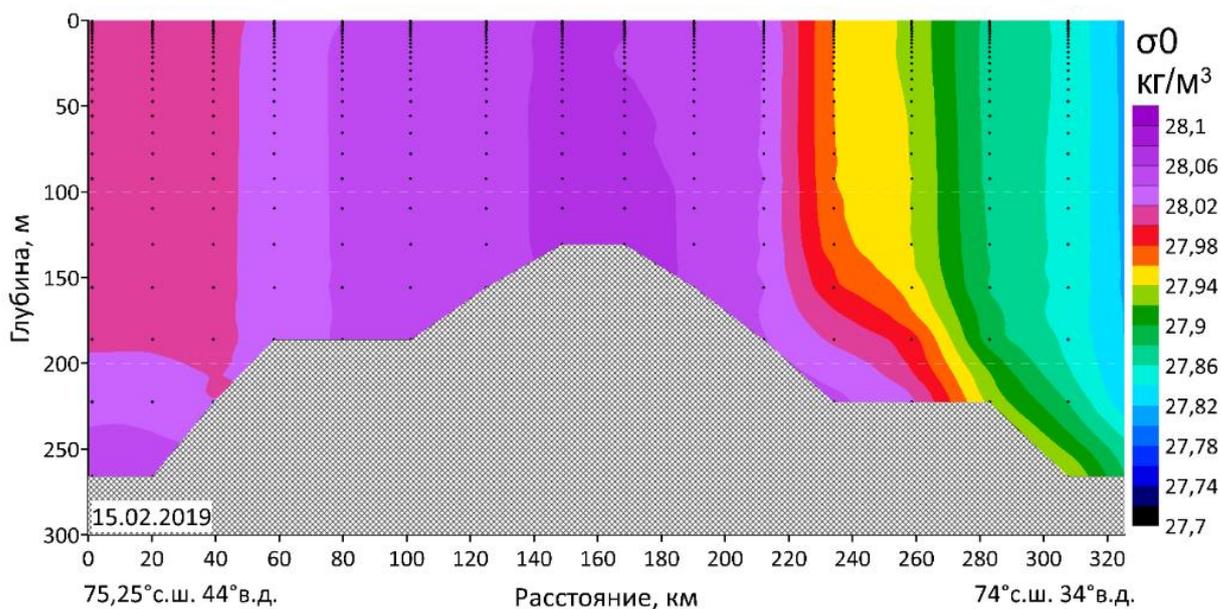


Рисунок 11 В. Распределение аномалии потенциальной плотности на разрезе через Центральную банку в Баренцевом море 15 февраля 2019 г.

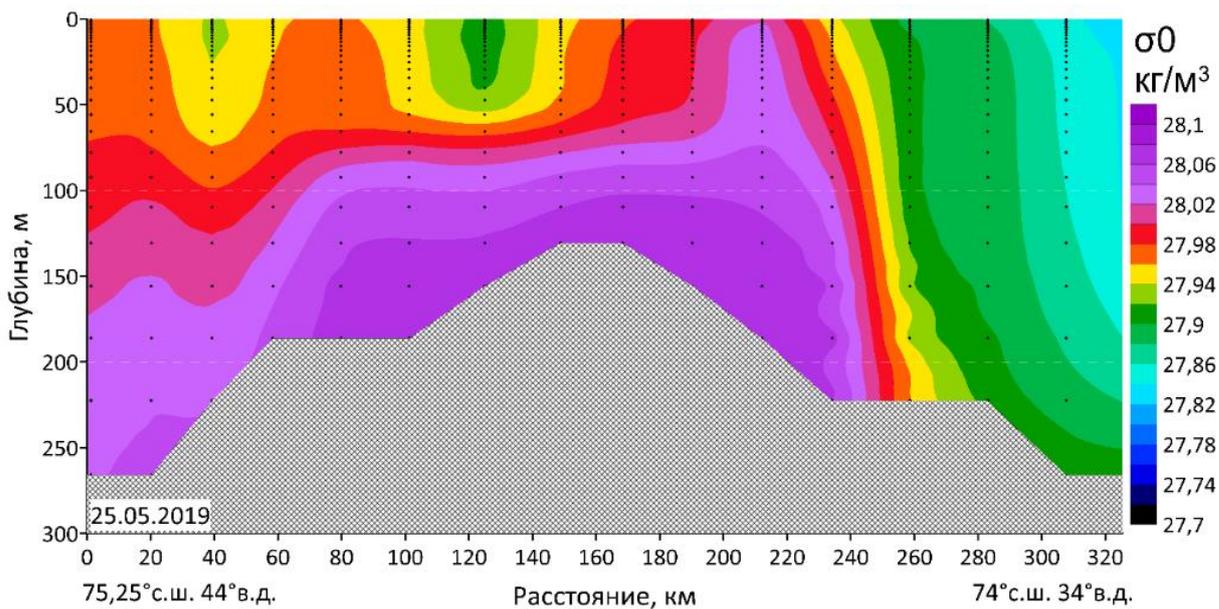


Рисунок 11 Г. Распределение аномалии потенциальной плотности на разрезе через Центральную банку в Баренцевом море 25 мая 2019 г.

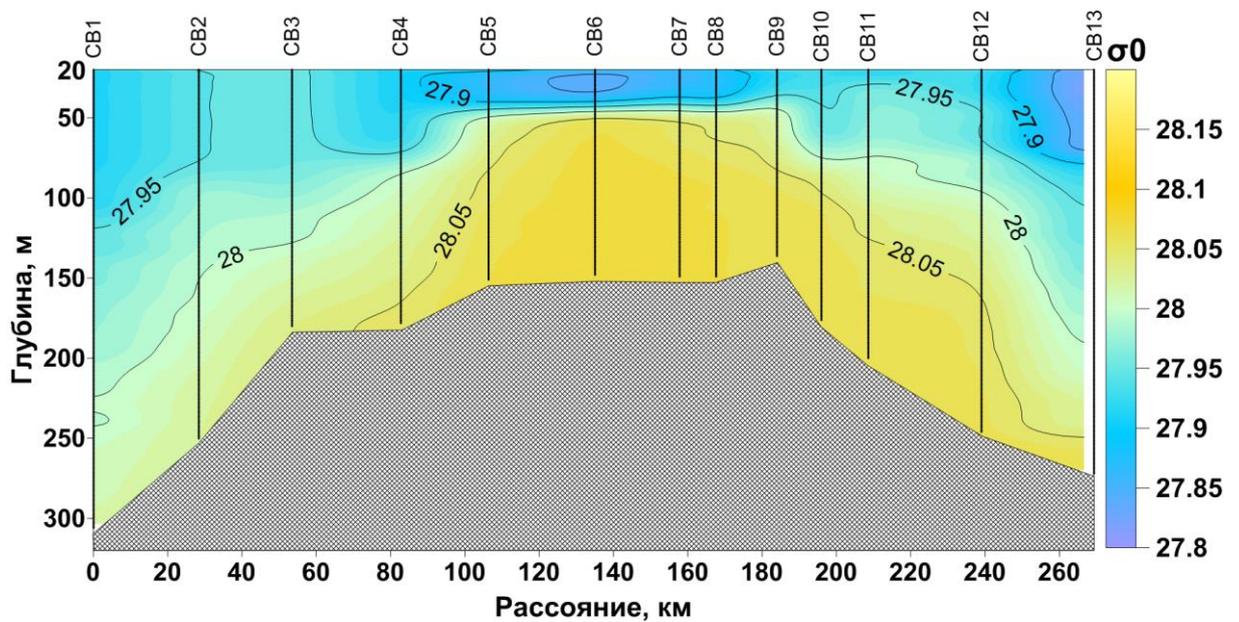


Рисунок 12 А. Вертикальный разрез аномалии потенциальной плотности ($\text{кг}/\text{м}^3$) поперек Центральной банки 15 мая 2019 г. по результатам CTD-измерений

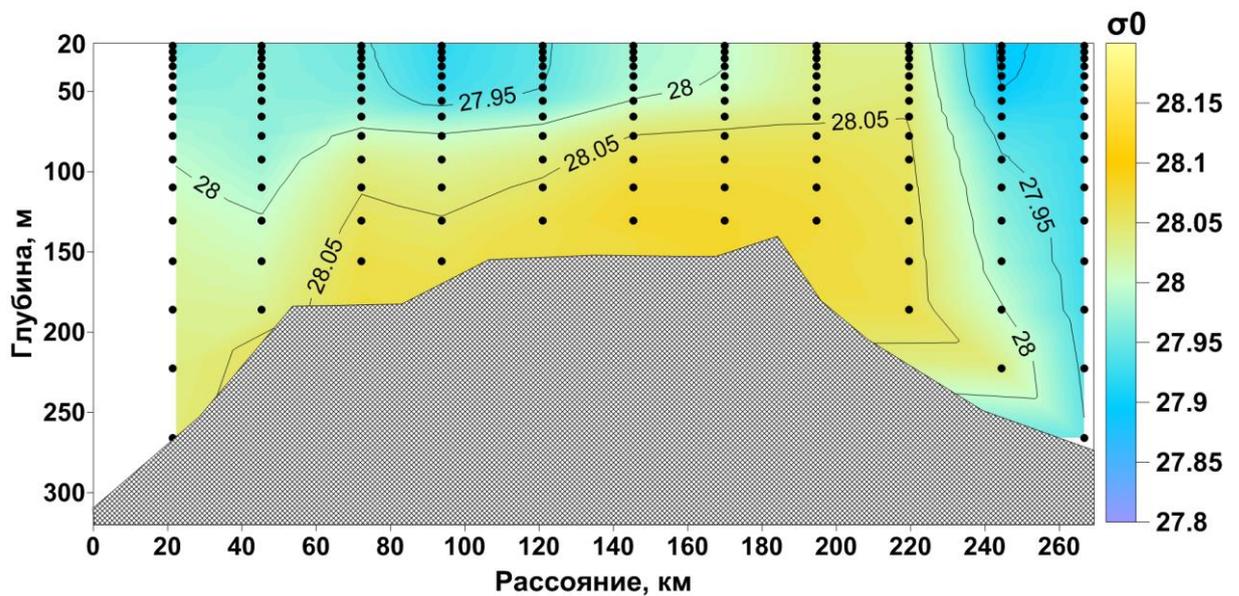


Рисунок 12 Б. Вертикальный разрез аномалии потенциальной плотности ($\text{кг}/\text{м}^3$) поперек Центральной банки 15 мая 2019 г. По реанализу GLORYS (Б). Данные реанализа взяты из узлов ближайших к координатам станций

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процесс каскадинга играет особенно важную роль в Северном Ледовитом океане. Это основной механизм глубоководной вентиляции, посредством которого пополняются промежуточные и глубинные воды. Случаи каскадинга также могут способствовать переносу углерода с шельфа в качестве составной части «углеродного насоса» и, как было показано, вносят свой вклад в изменение атлантических вод. Каскадинг в бассейне СЛО трудно определяем из-за несистематического прохождения и технических трудностей проведения зимних наблюдений под морским льдом. На сегодняшний день, известно, только 27 мест на континентальном шельфе и склоне, где наблюдался каскадинг в Северном Ледовитом океане. С учетом продолжающегося отступления ледяного покрова в СЛО можно прогнозировать расширение зон с благоприятными фоновыми условиями для интенсификации каскадинга. В выполненной работе реалистичность подобных сценариев была оценена на основе совместного анализа результатов математического моделирования и данных экспедиционных наблюдений. Кратко сформулируем выводы данной работы:

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 гг.), 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 гг. благодаря термической конвекции, без осолонения при ледообразовании.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Luneva M.V., Ivanov V.V., **Tuzov F.K.**, Aksenov Y., Harle J.D., Kelly S., Holt J.T. Hotspots of dense water cascading in the Arctic Ocean: Implications for the Pacific water pathways // **J. Geophys. Res.: Oceans**. 2020. Vol. 125, no 10. P. 1–35. DOI: 10.1029/2020JC016044 (Scopus IF CiteScore = 6,1 (2021))
2. Ivanov V.V., **Tuzov F.K.** Formation of dense water dome over the Central Bank under conditions of reduced ice cover in the Barents Sea // **Deep Sea Research. Part I: Oceanographic Research Papers**. 2021. Vol. 175, 103590 (Scopus IF CiteScore = 4,7 (2021))
3. **Тузов Ф.К.** Разработка и применение алгоритма определения каскадинга у побережья архипелага Северная земля // **Вестник Московского университета. Сер. 5. География**. 2021. № 4. С. 52–61 (Scopus IF CiteScore = 0,9 (2021))
4. Иванов В.В., Архипкин В.С., Лемешко Е.М., Мысленков С.А., Смирнов А.В., Суркова Г.В., **Тузов Ф.К.**, Чечин Д.Г., Шестакова А.А. Изменение гидрологических условий в Баренцевом море как индикатор климатических трендов в евразийской Арктике в XXI веке // **Вестник Московского университета. Сер. 5. География**. 2022. № 1. С. 13–25. (Scopus IF CiteScore = 0,9 (2021))
5. **Тузов Ф.К.** Тенденции изменения интенсивности каскадинга плотных вод с арктических шельфов при сокращении ледяного покрова в морях северного ледовитого океана // **Проблемы Арктики и Антарктики**. 2021. Т. 67. № 4. С. 318–327. DOI: 10.30758/0555-2648-2021-67-4-318-327 (IF = 0)