

На правах рукописи

Кубрякова Елена Адиловна

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО И
ВЕРТИКАЛЬНОГО ТРАНСПОРТА СОЛИ И БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
В ЧЕРНОМ МОРЕ**

Специальность 25.00.28 – Океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Севастополь – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Морской гидрофизический институт РАН»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор,
член-корреспондент РАН
Коротаяев Геннадий Константинович

Официальные оппоненты: Иванов Владимир Владимирович
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова»,
ведущий научный сотрудник кафедры океанологии
географического факультета

Костяной Андрей Геннадьевич
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник, Федеральное
государственное бюджетное учреждение науки
Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской
академии наук, главный научный сотрудник
лаборатории экспериментальной физики океана

Ведущая организация:
Федеральное государственное бюджетное учреждение Федеральный
исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук»

Защита состоится «19» марта 2019 года в 13 ч. 00 мин. на заседании
Диссертационного совета Д 900.010.02 при Федеральном государственном бюджет-
ном учреждении науки «Морской гидрофизический институт РАН» по адресу:
299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного
бюджетного учреждения науки «Морской гидрофизический институт РАН» и на
сайте Института http://mhi-ras.ru/thesis_defenses.html

Автореферат разослан « » 2019 года

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

Алексеев Дмитрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности. Черное море – распресненный морской бассейн, имеющий ограниченный водообмен с другими регионами Мирового океана вследствие узости и мелководности проливов. В силу практически полной замкнутости бассейна и сильной халинной стратификации значительное влияние на формирование плотностной структуры бассейна оказывает вертикальный и горизонтальный обмен. Кроме того, горизонтальный кросс-шельфовый транспорт биогенных веществ из шельфовых районов, подверженных действию речного стока, в центральную часть моря оказывает важнейшее влияние на баланс биогенных веществ и цветение фитопланктона в центре моря [Oguz et al., 2002; Kubryakov et al., 2016].

Вертикальный обмен, обусловленный вертикальной адвекцией, ветровым и конвективным перемешиванием, вызывает поступление биогенных элементов из глубинных слоев и способствует перераспределению соли и вентиляции глубинных вод [Сорокин, 1982; Булгаков, 1996; Titov, 2004; Иванов и др., 2012; Finenko et al., 2014; Mikaelyan et al., 2011, 2017].

На горизонтальный обмен оказывают влияние различные динамические процессы, которые исследовались в большом количестве работ по контактными и спутниковым измерениям, данным численного моделирования. К этим процессам относятся синоптические вихри [Ginzburg et al., 2002b; Korotaev et al., 2003; Zatsepin et al., 2003; Shapiro et al., 2010; Zhou et al., 2014; Kubryakov et al., 2016], шельфовые волны [Stanev et al., 1999, 2002; Zatsepin et al., 2014; Ivanov et al., 2014], дрейфовые течения [Kubryakov et al., 2018], апвеллинги [Sur et al., 1994; Gawarkiewicz et al., 1999; Yankovsky et al., 2004].

Важным механизмом, который оказывает существенное влияние на горизонтальный и вертикальный обмен в бассейне, является крупномасштабная вертикальная ячейка циркуляции, связанная с ветровым воздействием и потоками плавучести. Циклоническая циркуляция вод Черного моря, вызванная циклонической завихренностью ветра, приводит к дивергенции и подъему вод в центре моря и их опусканию на периферии бассейна [Stanev et al., 2000; Korotaev et al., 2001]. Разница в потоках плавучести, обусловленная распресняющим действием речного стока и поступлением соленых вод через пролив Босфор, также способствует формированию вертикальной ячейки циркуляции [Штокман, 1951; Булгаков и др., 1984а, 1989; Гидрометеорология ... , т. 4, вып. 1; Булгаков, 1996; Korotaev, 1997]. Изучение вертикальной ячейки циркуляции и ее роли в перераспределении вещества в бассейне проводилось в ограниченном числе работ [Булгаков и др., 1984а; Булгаков, 1996]. В этих работах на основе балансового метода были впервые даны оценки средних потоков воды и соли между центральной частью моря и его периферией, обусловленных этим механизмом, и показано его существенное влияние на формирование термохалинной структуры вод.

В то же время многие аспекты, связанные с влиянием вертикальной циркуляции, остаются неизученными. До настоящего времени отсутствовали исследования сезонной изменчивости горизонтальных потоков соли и массы, вертикального распределения этих потоков по глубине и их влияния на халинную структуру вод, обусловленные изменчивостью вертикальной циркуляции.

Влияние физических процессов горизонтального обмена на химическую структуру Черного моря представляет собой одну из актуальных задач, необходимых для понимания функционирования экосистемы бассейна. До настоящего времени оценок влияния крупномасштабной циркуляции Черного моря на вертикальный и горизонтальный перенос химических веществ не было. Существенные климатические изменения, наблюдающиеся в последнее время, приводят к значимым изменениям скорости течений, ветра, интенсивности вертикальных движений, температуры моря. Определение механизмов влияния физических факторов на биотические характеристики необходимо для понимания наблюдаемых процессов изменения экосистемы.

Данная диссертационная работа позволила расширить имеющиеся знания о горизонтальном обмене в Черном море, изучить влияние крупномасштабной вертикальной циркуляции на сезонную и вертикальную изменчивость горизонтальных потоков массы и соли, оценить её вклад в суммарный обмен веществом в бассейне. Использование междисциплинарного подхода – физико-биогеохимического моделирования – позволило впервые оценить влияние крупномасштабной вертикальной циркуляции на вертикальные и горизонтальные потоки азотосодержащих веществ, определяющих развитие биоты в бассейне.

Цель работы. Исследовать влияние горизонтальной и вертикальной циркуляции вод Черного моря на его халинную структуру и на потоки биогенных элементов в центральной части Черного моря. Для достижения цели были поставлены и решены следующие научные задачи:

1. Проведена параметризация вертикальной скорости в центральной части Черного моря, исследовано влияние вертикальных движений на формирование термохалинной структуры центральной части Черного моря в рамках одномерной физико-биохимической модели.

2. Разработана боксовая физико-биогеохимическая модель Черного моря и на ее основе исследовано влияние вертикальной циркуляции на горизонтальный массо- и солеобмен между водами центральной части Черного моря и континентального склона.

3. Исследована зависимость величины объемов воды и соли, которые переносятся из центральной части Черного моря в район континентального склона, от интенсивности вертикальной ячейки циркуляции и горизонтальной турбулентной диффузии.

4. Оценена величина вертикального потока аммония из анаэробной зоны центральной части бассейна, оценены величины горизонтальных потоков азота между районом континентального склона и центральной частью Черного моря и их влияние на функционирование экосистемы в центральной части Черного моря.

5. Исследовано влияние интенсивности зимнего выхолаживания на сезонную изменчивость цветения фитопланктона.

Научная новизна. Впервые на основе математического моделирования даны численные оценки и исследована сезонная изменчивость горизонтального и вертикального водообмена, солеобмена и обмена биогенными веществами, обусловленных

крупномасштабной вертикальной ячейкой циркуляции в Черном море. Впервые исследовано влияние вертикальной скорости на формирование сезонного хода температуры и солености верхнего квазиоднородного слоя.

Положения, выносимые на защиту:

- 1) описание механизма горизонтального обмена между центральной частью Черного моря и районом континентального склона, обусловленного сезонной изменчивостью вертикальной ячейки циркуляции;
- 2) боксовая гидродинамическая модель Черного моря, позволяющая получить оценки массо- и солеобмена, обусловленного предложенным механизмом;
- 3) описание сезонной изменчивости и вертикального распределения горизонтального водо- и солеобмена, обусловленного действием крупномасштабной вертикальной циркуляции, и связанного с горизонтальной турбулентной диффузией;
- 4) оценки относительных вкладов горизонтального и вертикального транспорта азота в аэробной-субкислородной зонах центральной части моря, показавшие, что 70% от общего потока азота поступает с периферии бассейна, и обусловлен этот перенос азота совместным действием горизонтальной турбулентной диффузии и вертикальной циркуляции в форме единой ячейки. 30 % от общего потока азота связано с переносом аммония вертикальными движениями из анаэробной зоны в субкислородную;
- 5) оценки влияния интенсивности зимнего выхолаживания на цветение фитопланктона в центральной части моря;
- 6) физические принципы механизма влияния вертикальной циркуляции на содержание нитратов в центральной части Черного моря.

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты, полученные в данной работе, позволяют углубить понимание влияния физических процессов на функционирование экосистемы в замкнутых морях. Полученные данные могут быть использованы для уточнения параметризации биогеохимических процессов в рамках трехмерных моделей экосистемы Черного моря. Усовершенствование физико-биогеохимических моделей является важной практической задачей, решение которой в перспективе позволит наиболее эффективно использовать морские ресурсы и предотвращать экологические риски, связанные с изменением климатических условий.

Методы исследования. Расчеты проводились с использованием современных методов математического моделирования динамики деятельного слоя моря и биогеохимических процессов Черного моря. Для определения кросс-шельфовых скоростей, связанных с изменчивостью крупномасштабной циркуляции, использовались спутниковые альтиметрические данные [Архив *AVISO*]. Для определения концентрации хлорофилла «а» и температуры поверхности моря (ТПМ) использовались данные спутника *MODIS-Aqua* за период с 2004 по 2013 гг. [*NASA OceanColor Web*]. В работе также использовались измерения с трех буев Био-Арго за 2014-2017 гг., которые позволили получить данные о вертикальном распределении концентрации хлорофилла «а» с высоким вертикальным разрешением (1 метр) [Xing et al., 2011; Архив *IFREMER*].

Степень достоверности и апробация результатов. Сезонная изменчивость вертикального распределения температуры и солености в слое 0-400 м, полученная по результатам боксовой модели Черного моря, сопоставлялась с изменчивостью тем-

пературы и солености, восстановленной по данным ретроспективного анализа гидрофизических полей Черного моря за 1993–2012 гг. Реанализ был получен при помощи модели циркуляции, включающей процедуру ассимиляции профилей температуры и солености, полученных по оригинальной методике совместной обработки спутниковых альтиметрических и малочисленных гидрологических наблюдений [Korotaev et al., 2016]. Сопоставление показало хорошее качественное и количественное согласование полученных результатов с предыдущими работами.

Распределение элементов в субкислородной зоне хорошо согласуется с данными контактных измерений, выполненных в рейсах 1991–1994 гг. в рамках проекта *NATO TU-Black Sea*, экспедиции НИС «*KNORR*» 1988, 2001 [Oguz et al., 2001; Murray et al., 2003a, b; Konovalov et al., 2006].

Профиль вертикальной скорости, полученный в результате предложенной в работе параметризации, сравнивался с результатами реанализа гидрофизических полей, выполненного на основе ассимиляции данных дистанционных измерений в численной модели циркуляции Черного моря [Дорофеев и др., 2016].

Численные оценки потока воды из центра на периферию, полученные в настоящей работе по результатам моделирования, согласуются с качественными оценками, полученными в [Булгаков и др., 1984а; Зацепин и др., 2002] на основе балансового анализа.

Основные результаты диссертации представлялись на семинарах отдела динамики океанических процессов ФГБУН МГИ, отделения оперативной океанографии ФГБУН МГИ (2011–2017 гг.), а также на следующих российских и международных конференциях, семинарах и школах:

– Marine Ecosystem Evolution in a Changing Environment (MEECE) Summer School, Ankara, Turkey, 7–15 September 2011.

– Международная научная конференция «Гидродинамическое моделирование динамики Черного моря», г. Севастополь, 20–24 сентября 2011 г.

– Международная конференция «Южные моря как имитационная модель океана», г. Севастополь, сентябрь 2012 г.

– Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы экологии и гидрометеорологии», г. Тбилиси, Грузия, 28–30 мая 2013 г.

– International Conference «Marine Research Horizon 2020», Varna, Bulgaria, 16–20 September 2013. Работа отмечена дипломом за 1 место среди постерных докладов молодых ученых.

– Международная научная конференция «Интегрированная система мониторинга Черного и Азовского морей», г. Севастополь, 24–27 сентября 2013 г.

– Научный семинар в Институте вычислительной математики РАН, г. Москва, 9 октября 2013 г.

– Научный семинар в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, 11 октября 2013 г.

– PERSEUS Training Courses/Summer school «Challenge for good environmental status in coastal waters» and 3-rd International Seminar «Dynamics of Coastal Zone in the Non-Tidal Seas», г. Геленджик, Россия, 30 июня – 4 июля 2014 г.

– Шестая международная Школа-конференция «Спутниковые методы и системы исследования Земли», г. Таруса, 2–6 марта 2015 г.

– XII Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», г. Москва, Институт космических исследований РАН, 13-15 апреля 2015 г.

– Молодежная научная конференция «Комплексные исследования морей России: оперативная океанография и экспедиционные исследования», г. Севастополь, 25–29 апреля 2016 г.

– Международная научная конференция «Мировой океан: модели, данные и оперативная океанография», г. Севастополь, 26–30 сентября 2016 г.

– XIV Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», г. Москва, 14–18 ноября 2016 г.

– II Всероссийская научная конференция молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана», г. Москва, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 10–15 апреля 2017 г.

– PICES/ICES Early Career Scientific Conference «Climate Oceans and Society Challenges and Opportunities», Pusan, South Korea, 30 May – 2 June 2017.

– III Всероссийская научная конференция молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана», г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет, 21–25 мая 2018 г.

Личный вклад автора. Совместно с научным руководителем проводилась постановка задач, обсуждение основных научных результатов и формулировки выводов. Лично автором были проведены параметризация профиля вертикальной скорости в центральной части Черного моря; усовершенствование одномерной физико-биогеохимической модели центральной части Черного моря; разработка боксовой физико-биогеохимической модели Черного моря; проведение численных расчетов, анализ полученных результатов.

Публикации по теме диссертации. Результаты диссертации опубликованы в соавторстве в 16 научных работах, из них 6 статей в рецензируемых журналах, 3 статьи в рецензируемых сборниках научных трудов и 7 тезисов докладов на Всероссийских и Международных конференциях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4-х разделов, заключения, списка сокращений и обозначений, списка использованных источников. Объем работы составляет 179 страниц. Текст исследования иллюстрирован 61 рисунком и 5 таблицами. Библиографический список включает в себя 196 наименований, в том числе 112 на английском языке.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** представлена общая характеристика работы, включающая актуальность и степень разработанности темы, цель исследования, поставленные задачи, новизну работы, ее практическую значимость, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробацию результатов, личный вклад автора и список публикаций по теме диссертации.

В **первом разделе** описаны особенности физической и биогеохимической структуры Черного моря и приведен обзор основных математических моделей экосистемы. В *подразделе 1.1* представлены оценки вкладов речных вод, осадков и испарения, нижнебосфорского и верхнебосфорского течений, азовских вод и стока черноморской воды через Керченский пролив в водный и солевой баланс Черного моря на основе различных литературных источников. В *подразделе 1.2* приводятся основные характеристики циркуляции Черного моря, описывается вертикальная крупномасштабная ячейка циркуляции, связанная с циклоническим движением вод. В *подразделе 1.3* дается общее представление о химической структуре вод Черного моря. *Подраздел 1.4* посвящен вопросам моделирования состояния морских экосистем. Приводится классификация математических моделей и краткий обзор существующих моделей экосистемы Черного моря [Lebedeva et al., 1994; Oguz et al., 1996, 2000; Staneva et al., 1998; Совга, 2002; Якушев, 2002; Gregoire et al., 2003, 2010; Konovalov et al., 2006; Дорофеев, 2009, 2012], рассматривается влияние физических факторов и биогенных веществ на образование первичной продукции.

Во **втором разделе** исследуется влияние вертикальной скорости на формирование термохалинной структуры вод Черного моря на основе расчетов по одномерной гидродинамической модели. В рамках одномерной модели без дополнительных параметризаций или предположений невозможно рассчитать вертикальную скорость, а, следовательно, и учесть влияние вертикальных движений на динамику верхнего слоя. В *подразделе 2.1* проводится параметризация вертикальной скорости в центральной части Черного моря [Кубрякова и др., 2013а; Kubryakova et al., 2017]. В этой области вертикальная скорость преимущественно направлена вверх вследствие циклонического движения Основного черноморского течения (ОЧТ), на нижней границе пикноклина (H) она меняется незначительно; оценки вертикальной скорости подъема вод в центральной части бассейна варьируются от $0,1 \cdot 10^{-4}$ см/с до $10 \cdot 10^{-4}$ см/с [Иванов и др., 2012]. На основе существующих представлений, а также данных о сезонной изменчивости вертикальной скорости, полученной по результатам реконструкции климатических полей течений Чёрного моря [Демышев и др., 2006; Кныш и др., 2008с], предлагается следующая параметризация вертикальной скорости в центральной части Черного моря:

$$W = W_{\infty} + (W_E - W_{\infty}) e^{-\left(\frac{z}{h_T}\right)^2} - W_E e^{-\frac{z}{h_E}}, \quad (1)$$

где W_{∞} – вертикальная составляющая скорости на нижней границе пикноклина, м/с; W_E – экмановская скорость, м/с; $h_T = 100$ м – глубина термоклина; $h_E = 10$ м – толщина слоя Экмана; z – вертикальная координата, направленная вверх.

Первое слагаемое формулы (1), задающее составляющую вертикальной скорости на нижней границе главного пикноклина, и второе слагаемое, описывающее распределение скорости в пикноклине, обусловлены формированием ячейки циркуляции в вертикальной плоскости [Булгаков и др., 1984b; Whitehead et al., 1998; Ivanov et al., 2001]. Слагаемые, пропорциональные W_E , описывают движение жидкости под действием ветра в экмановском слое трения («экмановская накачка») [Кубрякова и др., 2013a].

Параметры W_∞ и W_E были подобраны на основе результатов расчетов по трехмерной модели [Демышев и др., 2004; Кныш и др., 2008с]. Согласно этим расчетам, максимальное значение вертикальной скорости наблюдается в зимний период на глубине 25–30 м, а минимальное – летом. Изменчивость во времени экмановской скорости и скорости на нижней границе пикноклина задавалась следующим образом:

$$W_E(t) = 2,57 \cdot 10^{-7} + 2,27 \cdot 10^{-7} \sin\left(2\pi \frac{345 - t}{365} + \frac{\pi}{2}\right), \quad (2)$$

$$W_\infty(t) = -W_E(t) \frac{e^{-\left(\frac{H}{h_T}\right)^2} - e^{-\frac{H}{h_E}}}{1 - e^{-\left(\frac{H}{h_T}\right)^2}} + 0,6 \cdot 10^{-8},$$

Согласно предложенной параметризации, максимум вертикальной скорости достигается на глубине 30 м и равен $4,5 \cdot 10^{-7}$ м/с в зимний период, когда ОЧТ наиболее интенсивно; минимальное значение вертикальной скорости, близкое к нулю по всей глубине, наблюдается в летний период (Рисунок 1).

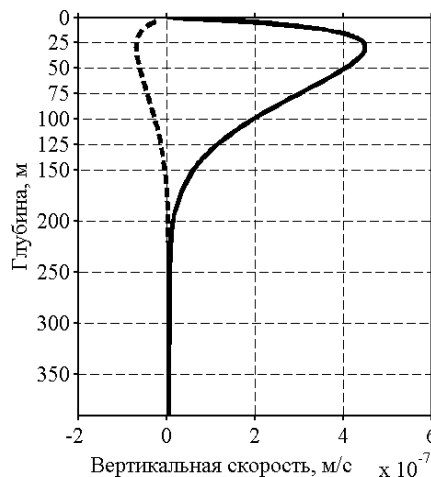


Рисунок 1 – зимний (сплошная линия) и летний (пунктирная) профили вертикальной скорости, полученные согласно параметризации

В *подразделе 2.2* приводятся уравнения гидродинамической модели и граничные условия. Одномерная гидродинамическая модель построена на основе одномерной версии модели океанической циркуляции *POM* [Mellor, 2001]. В работе [Oguz et al., 1996] подобная версия была адаптирована для Черного моря, однако она не учитывала влияния вертикальных движений на динамику верхнего квазиоднородного

слоя (ВКС). Для того, чтобы учесть влияние вертикальных движений, в одномерную гидродинамическую модель добавлены слагаемые с вертикальной составляющей скорости течений.

В подразделе 2.3 исследовалось влияние вертикальных движений на формирование холодного промежуточного слоя и перемешанного слоя моря на основе долговременных численных расчетов без учета вертикальной скорости и с учетом переменной во времени вертикальной скорости. Выполненные расчеты показывают, что вследствие постоянного перемешивания под действием ветра при долгосрочном расчете в эксперименте без учета вертикальной скорости происходит постепенное выравнивание температуры по всей глубине (Рисунок 2, а). Учет сезонной изменчивости вертикальной скорости позволяет сохранить основные особенности термохалинной структуры бассейна (Рисунок 2, б). Для существования периодически меняющегося ВКС необходимо наличие плотностной стратификации, механизмом поддержания которой выступают вертикальные движения вод. Подъем вод способствует поступлению соленых, а, следовательно, более плотных глубинных вод к поверхности и, тем самым выступает в роли противодействующей силы волновому и турбулентному перемешиванию.

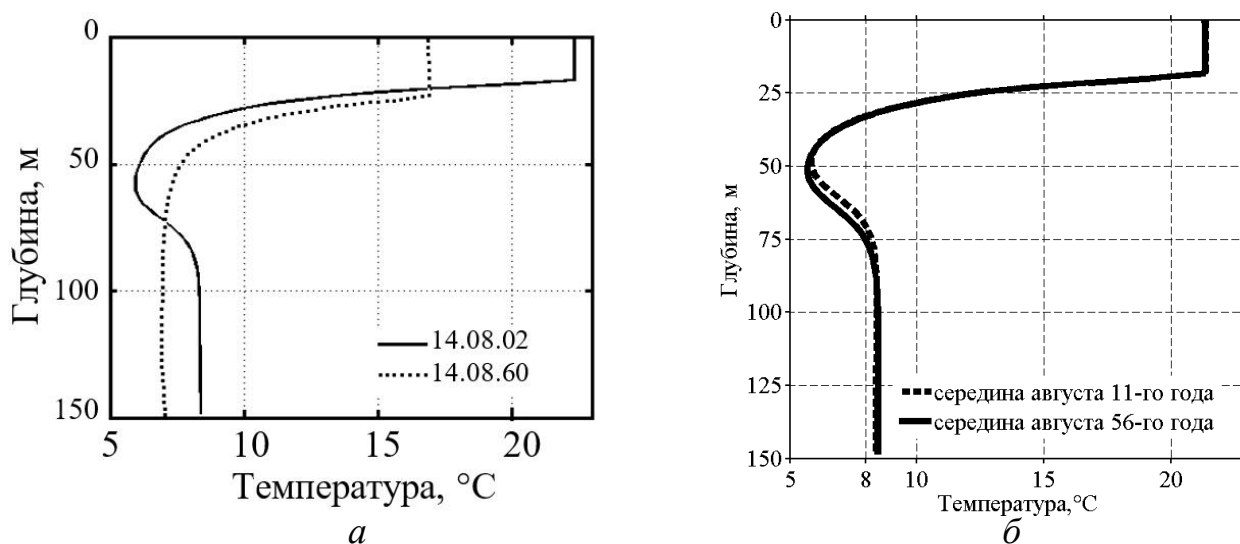


Рисунок 2 – профили температуры, полученные по расчету без учета вертикальной скорости (а) и с учетом вертикальной скорости (б)

Одномерная модель для центральной части моря, описанная в разделе 2, воспроизводит гидродинамические процессы только по вертикали. Обособленность Черного моря, наличие постоянного подъема глубинных соленых вод в центре моря и разнесенность источников соленых и пресных вод определяют значимость горизонтального обмена для формирования халинной структуры бассейна. Поэтому для правильного описания баланса соли и биогенных элементов в бассейне необходимо учитывать в модели процессы обмена веществом между центральной и периферийной зонами моря. В третьем разделе проводится исследование горизонтального массо- и солеобмена на основе разработанной боксовой гидродинамической модели Черного моря.

В подразделе 3.1 описывается механизм обмена солью между периферией и центральной частью моря, связанный с сезонной изменчивостью вертикальной скорости,

и приводятся его количественные оценки. В работе [Korotaev et al., 2001] показано, что в конце зимнего – начале весеннего периода наблюдается интенсификация ОЧТ, и увеличение вертикальной скорости в центральной части моря, что связано с возрастанием завихренности ветра. Подъем глубинных соленых вод на поверхность моря во время интенсификации циркуляции способствует увеличению поверхностной солености. Поднятая наверх соленая вода стекает к берегам, где происходит ее опреснение прибрежными водами (Рисунок 3, а). В летне-осенний период наблюдается ослабление циклонической циркуляции вплоть до ее полного исчезновения. В результате ослабления экмановского переноса происходит обратный приток воды из прибрежной в центральную часть моря (Рисунок 3, б) [Кубрякова и др., 2013а]. Притекающая вода имеет пониженную соленость вследствие ее смешивания на шельфе с опресненными речным стоком водами. Проведены количественные оценки объема воды и соли, который переносится из центральной части моря к его периферии. Они по порядку величин согласуются с результатами, полученными балансовым методом в [Булгаков, Коротаев, 1984] и в [Зацепин и др., 2002].

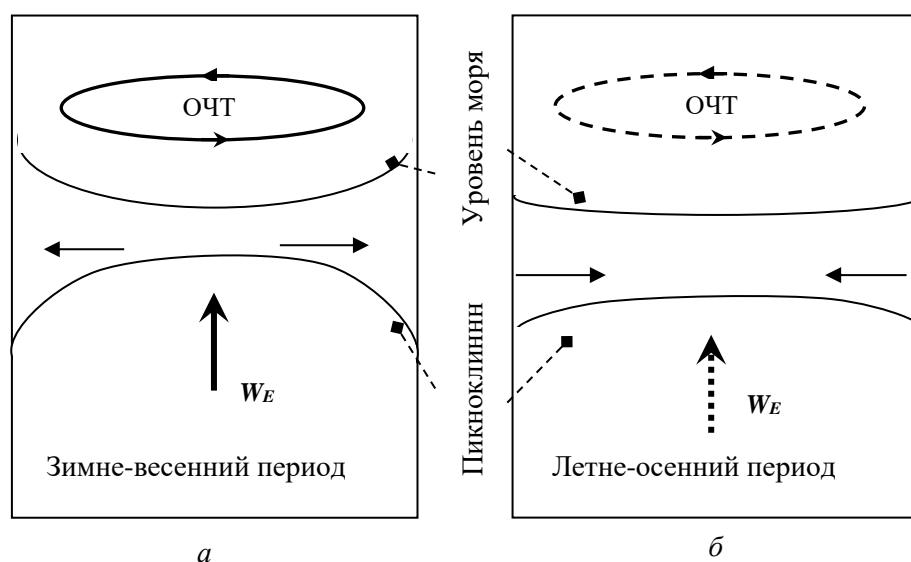


Рисунок 3 – Схема сезонного цикла циркуляции Черного моря в зимне-весенний (а) и летне-осенний (б) периоды

В *подразделе 3.2* дается описание разработанной боксовой гидродинамической модели Черного моря. В предлагаемой боксовой модели выделяются водная масса континентального склона (ВМКС) и центральная водная масса (ЦВМ). Для описания эволюции термохалинной структуры каждой выделенной водной массы используется одномерная гидрофизическая модель, описанная в разделе 2. ВМКС формируется под влиянием речного стока, разности осадков и испарения, водообмена с Мраморным и Азовским морями. На формирование ЦВМ влияет смешение с водами ВМКС, а также осадки и испарение. Для описания перераспределения тепла и соли используется одномерное уравнение переноса тепла и соли [Булгаков и др., 1984b], но с учетом описанного в разделе 3.1 механизма обмена ЦВМ и ВМКС. Пренебрегая горизонтальными вариациями солености в пределах каждой из водных масс, получим уравнения переноса соли (уравнение переноса тепла аналогично) вида:

– для центральной водной массы

$$\Omega_C \frac{\partial S}{\partial t} + w_c \frac{\partial S}{\partial z} + (S - S_p) \frac{dw_c}{dz} \theta \left(\frac{dw_c}{dz} \right) = \Omega_C \frac{\partial}{\partial z} \left[K_H \frac{\partial S}{\partial z} \right] + \kappa \cdot (S_p - S), \quad (3)$$

– для периферийной водной массы

$$\Omega_P \frac{\partial S_p}{\partial t} + \frac{\partial (w_p S_p)}{\partial z} + \frac{dw_c}{dz} \left[S - (S - S_p) \theta \left(\frac{dw_c}{dz} \right) \right] = \Omega_P \frac{\partial}{\partial z} \left[K_H \frac{\partial S_p}{\partial z} \right] + \kappa \cdot (S - S_p) + \psi \quad (4)$$

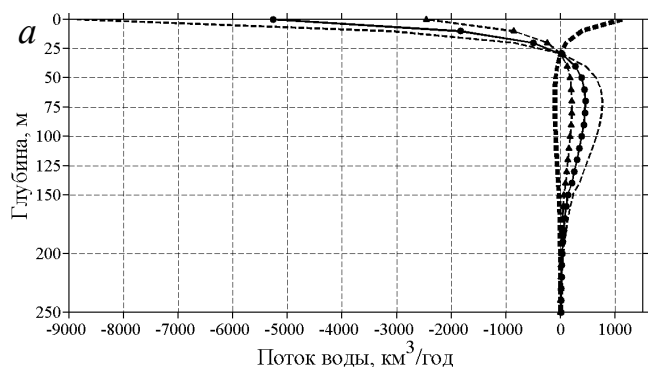
где Ω_C , Ω_P – площадь поверхности ЦВМ и ВМКС, соответственно, м^2 ; S , S_p – соленость ЦВМ и ВМКС, ‰; t – время, с; w_c , w_p – вертикальный поток в центральной части бассейна и на периферии; z – глубина, м; K_H – коэффициент вертикальной турбулентной диффузии тепла и соли, $\text{м}^2/\text{с}$; $\theta(x)$ – функция Хевисайда; κ – отношение коэффициента горизонтальной турбулентной диффузии к ширине области сопряжения между центральной и периферийной областями; ψ – нормированный на глубину H поток соли, обусловленный поступлением речных, мраморноморских и азовских вод, ‰ · $\text{м}^2/\text{с}$.

Первые слагаемые левых частей уравнений (3), (4) описывают изменение количества соли со временем в рамках каждой выделенной водной массы. Вторые члены левых частей характеризуют вертикальную адвекцию ЦВМ и ВМКС, соответственно. Третьи слагаемые в левых частях уравнений (3), (4) обеспечивают горизонтальный обмен между ЦВМ и ВМКС, который обусловлен сезонной изменчивостью экмановского переноса и потоков плавучести. Первые слагаемые правых частей (3), (4) описывают процесс вертикальной турбулентной диффузии. Вторые слагаемые правых частей описывают горизонтальную турбулентную диффузию, которая обусловлена мезомасштабными процессами (вихрями) в бассейне. Третье слагаемое правой части уравнения (4) определяет количество тепла и соли, поступающее в бассейн с речными, азовскими и босфорскими водами.

В *подразделе 3.3* приводятся результаты численных расчетов на основе созданной боксовой модели. Рассчитанная сезонная изменчивость температуры и солености в слое 0–400 м, полученная по результатам боксовой модели, согласуется с данными ретроспективного анализа гидрофизических полей Черного моря за 1993–2012 гг. [Korotaev et al., 2016].

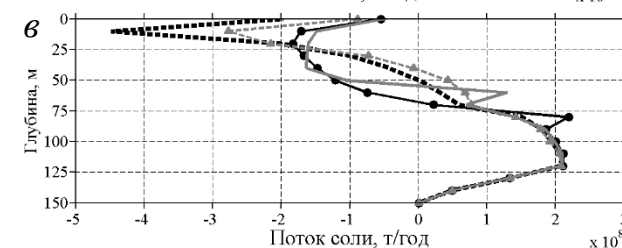
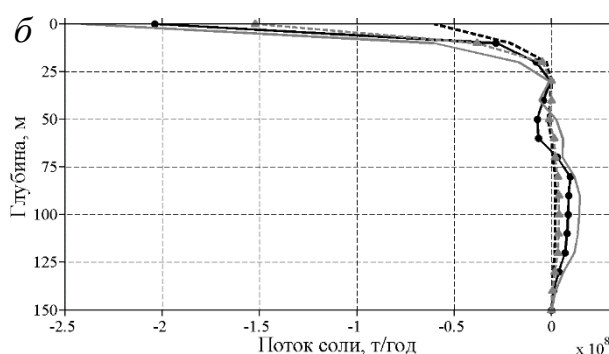
В *подразделе 3.4* рассматривается механизм формирования солености поверхностных вод Черного моря. Горизонтальный обмен веществом в рамках боксовой модели происходит благодаря горизонтальной турбулентной диффузии и вертикальной ячейки циркуляции, которая обусловлена совместным действием потоков плавучести, сезонной осцилляцией экмановского переноса. Профили потоков воды и соли из центральной части моря на периферию, вызванные действием экмановского переноса, изображены на рисунке 4. На рисунке 4, а хорошо просматривается вертикальная ячейка циркуляции: отток воды из центра моря на периферию при интенсификации циклонической циркуляции в верхних 30 метрах и приток воды в центр в слое 30–200 м.

В холодный период года в результате циклонической циркуляции ветра возникает экмановский перенос и наблюдается дивергенция вод. Вследствие этого с октября по май наблюдается интенсивный отток воды из центра к периферии в верхних 30 метрах (Рисунок 4, *а*) с максимумом ~ 9000 км³/год. В результате этого соленая поднятая на поверхность вода в центральной части моря переносится на периферию. Максимальный поток соли характерен для поверхностного слоя и достигает в ноябре значения $2,5 \cdot 10^8$ т/год (Рисунок 4, *б*). В это же время в слое 30–200 м существует компенсирующий поток воды с периферии моря. Величина этого потока воды достигает максимума – 760 км³/год на глубине 75 м (Рисунок 4, *а*).



Поток воды: февраль (—●—), май (—■—), август (—▲—), ноябрь – штриховая линия

Рисунок 4: *а* – среднемесячные профили горизонтального переноса воды, обусловленного вертикальной ячейкой циркуляции; среднемесячные профили горизонтального потока соли, обусловленного сезонной изменчивостью вертикальной скорости (*б*) и влиянием горизонтальной турбулентной диффузии (*в*)



Поток соли: февраль (—●—), май – штриховая линия, август (серая штриховая с маркером —▲—), ноябрь – серая сплошная

В весенне-летний период при ослаблении циркуляции опресненная на периферии вода поступает в центральную часть моря. На поверхности этот поток достигает 1000 км³/год в мае, а в глубинных слоях наблюдается слабый обратный отток воды к периферии (Рисунок 4, *а*). Приток пресных вод приводит к понижению солености в центре моря, т.е. поток соли отрицателен и составляет в мае $6,0 \cdot 10^7$ т/год (Рисунок 4, *б*).

Суммарный объем воды, который транспортируется из центральной части моря к периферии в верхних 30 метрах в результате сезонной изменчивости вертикальной скорости, составляет около $3,0 \cdot 10^3$ км³ в год. Суммарный объем соли, который переносится из центра к периферии, составляет около $2 \cdot 10^9$ т/год [Кубрякова и др., 2017б; Kubryakova et al., 2017].

Соль перераспределяется в бассейне также под влиянием горизонтальной турбулентной диффузии, которая во многом определяется переносом синоптическими вихрями [Зацепин и др., 2002; Zatsepin et al., 2003; Zhou et al., 2014]. На рисунке 4, *в* представлены среднемесячные профили потока соли, обусловленного горизонтальной турбулентной диффузией. Значения потока соли, обусловленного горизонтальной турбулентной диффузией на тех горизонтах, где соленость центральной части моря выше, чем на периферии (0–60 м), отрицательны, и составляют в мае

$4,5 \cdot 10^8$ т/год. В слое, где происходит приток высокосолёных мраморноморских вод, значения потока соли с периферии в центр моря имеют положительные значения и составляют порядка $2,0 \cdot 10^8$ т/год.

Вклад исследуемых механизмов в суммарный перенос соли различен на разных глубинах. В поверхностном слое перенос, обусловленный сезонной изменчивостью вертикальной скорости, даёт существенный вклад, около 30 %. В слое 30–150 м этот механизм определяет примерно 5–10 % от общего переноса соли.

Четвёртый раздел посвящён математическому моделированию биогеохимических процессов Чёрного моря. В нём исследуется связь биогеохимических и динамических процессов в центральной части бассейна и на его периферии. В *подразделе 4.1* приводится описание одномерной биогеохимической модели, которая основана на [Oguz, 2000], и которую условно можно разделить на биологический, азотный и окислительно-восстановительный блоки по характеру процессов, протекающих в них. В *подразделе 4.2* описывается разработанная боксовая биогеохимическая модель Чёрного моря. В модели учитывается вертикальная скорость согласно параметризации (1), поступление нитратов с речным стоком и горизонтальный обмен, описанный в подразделе 3.3.

В *подразделе 4.3* исследуется влияние зимнего выхолаживания на интенсивность цветения фитопланктона по результатам численных экспериментов и спутниковым данным. На основе измерений буев Био-Арго и спутниковых оптических измерений исследована сезонная изменчивость интегральной и поверхностной концентрации хлорофилла «а». Показано, что результаты численных расчетов достаточно хорошо согласуются с данными контактных и спутниковых наблюдений. На основе серии расчетов по одномерной физико-биогеохимической модели даны оценки связи интегральной и поверхностной биомассы фитопланктона с зимним потоком тепла и температурой поверхности моря. Модельные оценки показывают, что при изменении зимнего потока тепла на ≈ 25 % биомасса диатомовых водорослей меняется на ≈ 10 %. При уменьшении минимальной температуры от 9 °С до 5 °С интегральная биомасса меняется в 1,5 раза от 36 до 56 ммоль N/м², а поверхностная – от 0,4 до 0,6 ммоль N/м³. Таким образом, при смене зимы от нормальной к суровой, биомасса фитопланктона будет выше на ≈ 25 %, а от теплой к суровой на ≈ 50 %.

В *подразделе 4.4* приводятся результаты моделирования по боксовой физико-биогеохимической модели Чёрного моря. Распределение элементов в субкислородной зоне, полученное по данным моделирования (Рисунок 5), хорошо согласуется с данными контактных измерений, выполненных в рейсах 1991–1994 г. в рамках проекта *NATO TU-Black Sea*, экспедиции НИС «KNORR» 1988, 2001 [Oguz et al., 2001; Murray et al. 2003a, b; Konovalov et al., 2006]. Приведены результаты моделирования сезонной изменчивости биологических компонент экосистемы и азотсодержащих соединений.

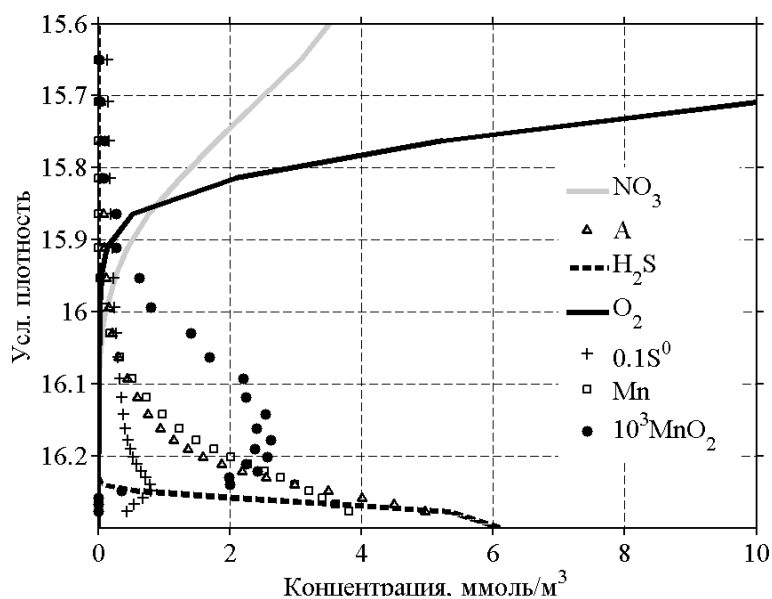


Рисунок 5 – Структура субкислородной зоны:

среднегодовые профили нитратов, аммония, сероводорода, кислорода, растворенного марганца, элементарной серы и оксида марганца по модельным расчетам

В *подразделе 4.5* оцениваются влияние горизонтальных и вертикальных движений на баланс азота в центральной части бассейна. Приводятся оценки горизонтальных потоков органического и неорганического азота (азот нитратов и нитритов, аммонийный азот), вызванные действием крупномасштабной вертикальной циркуляции и горизонтальной турбулентной диффузии, для четырех выделенных слоев (см. Таблицу 1).

Таблица 1 – Значения горизонтальных потоков неорганического и органического азота

Глубины, м	Поток	Неорганический азот, т N / год	Органический азот, т N / год
0–25	M_E	$-3 \cdot 10^3$	$-47 \cdot 10^3$
	M_D	$-1 \cdot 10^3$	$15 \cdot 10^3$
25–50	M_E	$2 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^3$
	M_D	$-32 \cdot 10^3$	$-19 \cdot 10^3$
50–100	M_E	$118 \cdot 10^3$	$7 \cdot 10^3$
	M_D	$-14 \cdot 10^3$	$-8 \cdot 10^3$
100–135	M_E	$15 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$
	M_D	$27 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$

Показано, что действие вертикальной ячейки циркуляции оказывает наибольшее влияние на транспорт неорганического азота в слое 50–100 м. Максимальные значе-

ния потока M_E характерны для зимнего периода, когда в бассейне происходит интенсификация циклонической циркуляции. В это время в верхнем 25-метровом слое происходит отток органического азота из центрального района на периферию моря. В слое 25–135 м вертикальная ячейка циркуляции приводит к оттоку воды и максимальному переносу неорганического азота из области континентального склона в центральную часть моря в слое 50–100 м. Горизонтальный диффузионный поток M_D органического вещества в верхнем слое направлен с периферии моря богатой биогенными элементами, приходящими с речным стоком, в центральную часть бассейна.

В следующем пункте подраздела 4.5 оцениваются относительные вклады горизонтальных потоков азота с периферии и восходящего потока аммонийного азота из анаэробной зоны M_A в суммарное поступление азота в аэробную-субкислородную зону центральной части моря (Рисунок 6). Основным источником азота в этой зоне является его горизонтальный поток с периферии (70%). Аммонийный азот, поступающий из анаэробной зоны под действием вертикальных движений, также вносит значимый вклад (30%). Однако, большая часть аммония, образующегося в субкислородном слое или перенесенного из анаэробной зоны, расходуется в результате окислительно-восстановительных процессов с образованием минеральной формы азота (Рисунок 6, б). Меньшая его доля переносится на периферию под действием горизонтальной турбулентной диффузии, и лишь малая часть достигает аэробной зоны и может быть вовлечена напрямую в процесс образования первичной продукции или трансформирована в нитраты. Поэтому вклад восходящих потоков аммония в баланс азота в аэробной зоне не превышает 5 %, а вклад горизонтальных процессов является определяющим (95 %).

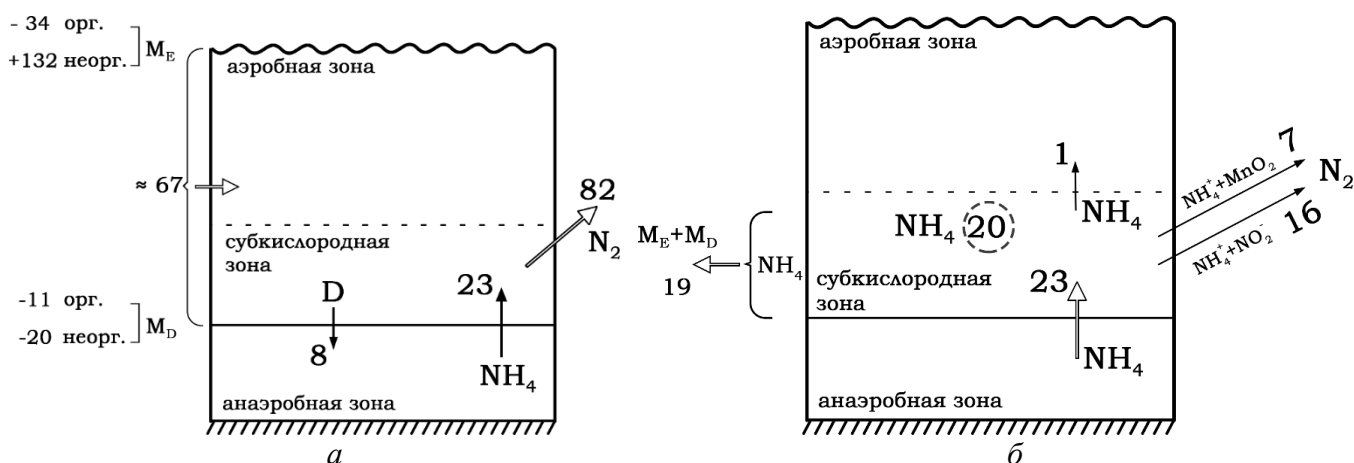
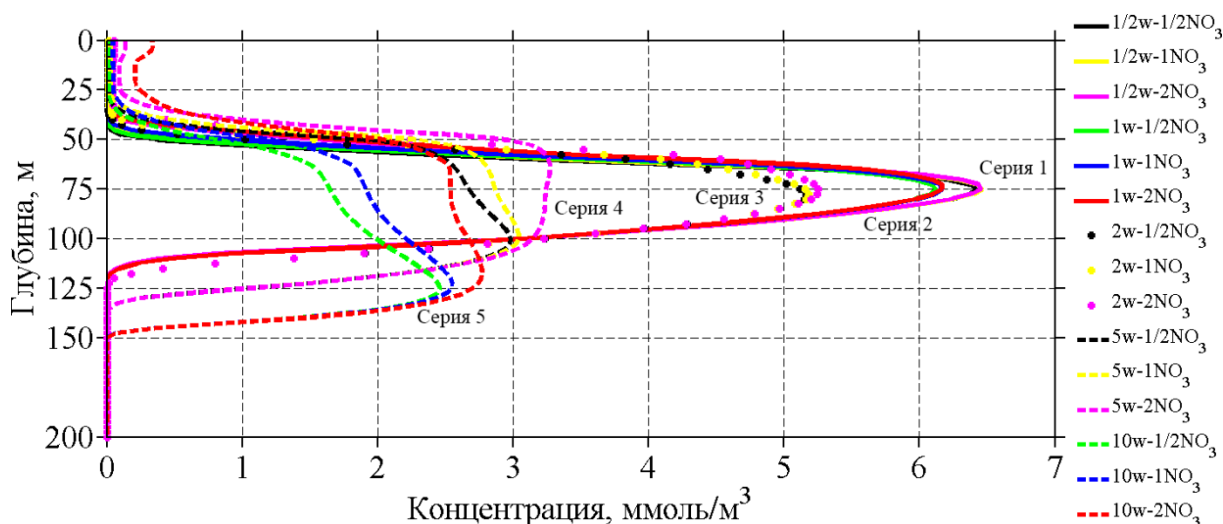


Рисунок 6 – Упрощенная схема горизонтальных и вертикальных потоков: а – органического и неорганического азота в центральной части Черного моря, б – аммонийного азота в субкислородной зоне Черного моря, в 10^3 т N /год

Для исследования роли вертикальной скорости и потока речных вод на содержание нитратов в центральной части моря были проведены 15 экспериментов (5 серий) с различными сочетаниями значений вертикальной скорости w и концентрации нитратов NO_3 , поступающих с речным стоком. Эксперименты показали, что наиболее существенное влияние на содержание нитратов и их перераспределение оказывает вертикальная скорость.

При уменьшении вертикальной скорости в два раза по сравнению с ее базовыми величинами наблюдалось сужение слоя максимума нитратов в центре моря и незначительный рост максимального значения их концентрации (Рисунок 7). В то же время увеличение значений вертикальной скорости в экспериментах серий 3–5 привело к расширению слоя максимума нитратов и его заглублению в центре бассейна. При этом максимальные значения концентраций уменьшились по сравнению с базовым расчетом. Описанные изменения в профиле нитратов объясняются действием механизма вертикальной ячейки циркуляции в Черном море. Возрастание вертикальной скорости в центральной части моря приводит к усилению нисходящих вертикальных движений и заглублению слоя нитроклина на периферии. Вследствие этого горизонтальный (адвективный и диффузионный) перенос биогенных элементов с периферии в центр бассейна происходит на несколько больших глубинах. Это приводит к тому, что в центре моря нитраты скапливаются в более глубоких слоях, что вызывает расширение слоя нитроклина.



В названии экспериментов указаны коэффициенты, на которые умножались значения w и NO_3 , соответственно

Рисунок 7 – Среднегодовые профили нитратов согласно модельным результатам 5 серий экспериментов

Результаты расчетов показывают, что биопродуктивность уменьшается при увеличении вертикальных движений. Расширение слоя нитроклина, сопровождающееся уменьшением максимальной концентрации нитратов (от 6,5 до 3,0 ммоль/м³) на глубинах 50–100 м, оказывает более существенный эффект по сравнению с влиянием восходящих движений на рост (на 0,5 ммоль/м³) концентрации нитратов в верхнем слое моря. Вариации в значениях концентрации биогенных элементов, поступающих с речным стоком, менее значительно изменяют величину содержания нитратов в слое максимума в центральной части моря. Результаты, полученные в данной работе, свидетельствуют, что вертикальные движения и связанный с ними горизонтальный транспорт могут оказывать существенное влияние на функционирование экосистемы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Диссертационная работа посвящена исследованию горизонтального и вертикального транспорта соли и биогенных элементов в Черном море. В работе на основе численного моделирования выполнен анализ процессов, ответственных за перенос вещества между центральной областью бассейна и его периферией.

Основные научные результаты исследования могут быть сформулированы следующим образом.

1. Вертикальные движения являются важным фактором, необходимым для поддержания плотностной стратификации. Показано, что для корректного описания сезонной изменчивости ВКС необходимо учитывать вертикальные движения вод. В рамках одномерной модели на основе существующих представлений о поведении вертикальной скорости в центральной части бассейна была предложена ее параметризация.

2. Дивергенция и конвергенция вод и связанная с ними экмановская «накачка» способствуют горизонтальному обмену между центральной частью Черного моря и его периферией. Показано, что горизонтальный обмен важен для поддержания солевого баланса в бассейне, что связано с наличием постоянного подъема глубинных соленых вод в центре моря и разнесенностью источников соленых и пресных вод. Предложен механизм горизонтального обмена между центральной частью бассейна и районом континентального склона, который обусловлен действием вертикальной ячейки циркуляции, отражающей сезонную изменчивость вертикальной скорости. Показано, что интенсивный подъем вод в центральной части Черного моря в зимний период и отсутствие вертикальных движений летом приводит к асимметрии горизонтального транспорта и переноса соли из центральной части моря в зону континентального склона, при этом в слое 0–30 м в среднем за год происходит отток соленой воды из центра. Для количественного описания горизонтального обмена построена боксовая модель Черного моря, которая позволила получить оценки переноса массы и соли, обусловленного предложенным механизмом.

3. Разработанная боксовая гидродинамическая модель Черного моря была дополнена биогеохимическим блоком, на основе которого были проведены оценки горизонтального транспорта органического и неорганического азота между центральной частью моря и районом континентального склона и исследовано влияние вертикальных движений в центре бассейна на баланс азота в аэробной и субкислородной зонах. Получено, что, в слое 0–25 м сезонная изменчивость вертикальной скорости оказывает значительное влияние на горизонтальный транспорт органического вещества из центра на периферию. В слое 25–135 м наибольшее влияние на перенос азота оказывает вертикальная ячейка циркуляции, благодаря которой перенос направлен с периферии в центр моря. Поток неорганического азота, обусловленный действием этого механизма, является важным источником азота для центра бассейна. В то же время транспорт, обусловленный турбулентной диффузией, направлен в обе стороны и поэтому его суммарный вклад в горизонтальный перенос в центр моря в несколько раз меньше.

4. Проведена оценка вкладов горизонтального и вертикального транспорта азота в аэробной-субкислородной зоне центральной части моря и оценка возможных стоков азота в этом слое, которая показала, что:

– 70 % от общего потока азота в аэробную-субкислородную зоны моря поступает с периферии бассейна, и обусловлен этот перенос азота совместным действием горизонтальной турбулентной диффузии и вертикальной циркуляции в форме единой ячейки;

– 30 % от общего потока азота связано с переносом аммония вертикальными движениями из анаэробной зоны в субкислородную;

– сток азота обусловлен оседанием органического вещества, на которое приходится 10 % от общей потери азота, и расходом неорганических соединений на образование молекулярного азота N_2 – 90 % в результате денитрификации, анаэробного окисления аммония, окисления аммония оксидом марганца (IV), окисления марганца нитратом.

5. Проведен анализ источников и стоков аммонийного азота в субкислородной зоне центральной части моря. Получено, что горизонтальный обмен оказывает определяющее влияние на пополнение запасов азота в центре моря, вместе с тем вертикальный перенос аммония из анаэробной зоны может способствовать подпитке содержания аммонийного азота в субкислородной зоне.

6. Основное влияние вертикальная ячейка циркуляции оказывает на транспорт неорганического азота из района континентального склона в центральную часть моря. Проведенные численные эксперименты показали, что при увеличении вертикальной скорости, вызванной интенсификацией циклонической циркуляции в центре моря, происходит заглубление слоя максимума нитратов. Возрастание вертикальной скорости в центральной части моря влечет за собой усиление горизонтального обмена между центром и периферией и из закона сохранения массы – к усилению нисходящих вертикальных движений на периферии. Возникающая интенсификация нисходящих движений приводит к заглублению слоя нитроклина на периферии. Вследствие этого горизонтальный – адвективный и диффузионный – перенос биогенных элементов с периферии в центр бассейна происходит на несколько больших глубинах. Это приводит к тому, что в центре моря нитраты скапливаются в более глубоких слоях и, как следствие – к расширению слоя нитроклина. Таким образом показано, что даже при той же интенсивности зимней конвекции впоследствии меньшее количество биогенных элементов будет вовлечено в эвфотический слой.

Созданная боксовая физико-биогеохимическая модель Черного моря и выполненные на ее основе численные эксперименты позволили провести оценку влияния различных динамических факторов на термохалинную структуру бассейна, биопродуктивность и функционирование его морской экосистемы. Результаты, полученные в рамках данной работы, в дальнейшем могут быть использованы для уточнения параметризации биогеохимических процессов при разработке трехмерной модели экосистемы Черного моря.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах

1. **Кубрякова Е.А.** Влияние вертикальной скорости на воспроизведение изменчивости термохалинной структуры верхнего слоя морского бассейна / Е.А. Кубрякова, Г.К. Коротаев // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2011. – Вып. 25, Т. 2. – С. 220-239.
2. **Кубрякова Е.А.** Моделирование марганцевого цикла в рамках одномерной биогеохимической модели Черного моря / Е.А. Кубрякова, Г.К. Коротаев // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2013. – Вып. 26, Т. 2. – С. 272-286.
3. **Кубрякова Е.А.** Сезонная изменчивость циркуляции и формирование солёности поверхностных вод Черного моря / Е.А. Кубрякова, Г.К. Коротаев // Морской гидрофизический журнал. – 2013. – №3. – С. 3-12.
4. **Kubryakova, E.A.** Influence of vertical motions on maintaining the nitrate balance in the Black Sea based on numerical simulation / E.A. Kubryakova, G.K. Korotaev // Oceanology. – 2016. – Vol. 56, Iss. 1. – P. 25-35. – doi:10.1134/S0001437016010082.
5. **Kubryakova, E.A.** Mechanism of Horizontal Mass- and Salt-Exchange between the Waters of Continental Slope and Central Part of the Black Sea / E.A. Kubryakova, G.K. Korotaev // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. – 2017. – Vol. 53, No. 1. – P. 102-110. – doi:10.1134/S0001433817010078.
6. **Kubryakova, E.A.** Impact of Winter Cooling on Water Vertical Entrainment and Intensity of Phytoplankton Bloom in the Black Sea / E.A. Kubryakova, A.A. Kubryakov, S.V. Stanichny // Physical Oceanography, [e-journal]. – 2018. – №3. – P. 191–206. – doi:10.22449/1573-160X-2018-3-191-206.

Статьи в сборниках научных трудов

7. **Кубрякова Е.А.** Восходящие потоки аммония и баланс биогенов в верхнем слое глубоководной части Черного моря / Е.А. Кубрякова // Труды института гидрометеорологии грузинского технического университета. – 2013. – Т. 119. – С. 269-273.
8. **Кубрякова Е.А.** Сезонная изменчивость концентрации фитопланктона в Черном море по данным численного моделирования и спутниковых оптических измерений / Е.А. Кубрякова, А.А. Кубряков // Сборник трудов XII конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования» под ред. А.М. Садовского, 2015. – С. 50-57.
9. **Кубрякова Е.А.** Массо- и солеобмен между центром и периферией Черного моря по модельным и спутниковым данным / Е.А. Кубрякова, А.А. Кубряков // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – Севастополь. – 2017. – №2. – С. 44-52.

Тезисы докладов на Всероссийских и международных конференциях

10. **Kubryakova, E.** Study of nutrient balance of the Black Sea ecosystem / E. Kubryakova, G. Korotaev // Book of abstracts of Marine Research Horizon 2020. – Varna: Helix Press Ltd. – 2013. – P. 166.

11. **Кубрякова Е.А.** Массо- и солеобмен между центром и периферией Черного моря, вызванный изменчивостью крупномасштабной динамики / Е.А. Кубрякова, А.А. Кубряков // Тезисы докладов научной конференции «Мировой океан: модели, данные и оперативная океанология», г. Севастополь, 26–30 сентября 2016. – Севастополь, ФГБУН МГИ, 2016. – С. 76-77.

12. **Кубрякова Е.А.** Механизм горизонтального водо- и солеобмена континентального склона Черного моря и его центрального района / Е.А. Кубрякова, Г.К. Коротаев // Комплексные исследования морей России: оперативная океанография и экспедиционные исследования. Материалы молодежной научной конференции, г. Севастополь, 25–29 апреля 2016 г. [Электронный ресурс]. – Севастополь: ФГБУН МГИ. – С. 98-99. – Режим доступа: http://mhi-ras.ru/news/news_201605201055.html, свободный.

13. **Кубрякова Е.А.** Горизонтальный транспорт соли и биогенов в Черном море по модельным и спутниковым данным / Е.А. Кубрякова, Г.К. Коротаев, А.А. Кубряков // Всероссийские открытые ежегодные конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Дистанционные исследования поверхности океана и ледяных покровов, 14–18 ноября 2016 г. [Электронный ресурс] – Москва: ИКИ РАН. – С. 259. – Режим доступа: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/mythesis.aspx?thesis=5725.

14. **Кубрякова Е.А.** Влияние физических процессов на транспорт биогенных элементов в Черном море на основе численного моделирования / Е.А. Кубрякова, Г.К. Коротаев, А.А. Кубряков // Комплексные исследования Мирового океана. Материалы II Всероссийской научной конференции молодых ученых, г. Москва, 10–14 апреля 2017 г. [Электронный ресурс]. – Москва: ИО РАН. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30062846>, свободный. – С. 132-133.

15. Кубряков А.А. Изменчивость биооптических характеристик Черного моря по измерениям буев Био-Арго и спутниковым данным / А.А. Кубряков, С.В. Станичный, **Е.А. Кубрякова** // Комплексные исследования Мирового океана. Материалы II Всероссийской научной конференции молодых ученых, г. Москва, 10–14 апреля 2017 г. [Электронный ресурс]. – Москва: ИО РАН. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30062843>, свободный. – С. 130-131.

16. **Кубрякова Е.А.** Сезонная изменчивость концентрации фитопланктона и ее связь с интенсивностью зимнего выхолаживания в Черном море / Е.А. Кубрякова, А.А. Кубряков // Процессы в геосредах. – № 3 (17). – 2018. – С. 72-73.