



ДЕН
ия КарНЦ РАН

Э.Н. Бахмет
019 г.

О Т З Ы В

ведущей организации на диссертационную работу

Кубряковой Елены Адиевны

«Моделирование процессов горизонтального и вертикального транспорта соли и биогенных элементов в Черном море», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.28 – океанология.

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Морской гидрофизический институт РАН».

Актуальность темы работы.

Актуальность исследования состоит в том, что влияние физических процессов на химическую структуру Черного моря представляет собой одну из актуальных задач, необходимых для понимания функционирования экосистемы водоема, и до настоящего времени изучено было недостаточно. Практически отсутствовали исследования сезонной изменчивости горизонтальных потоков соли и массы, вертикального распределения этих потоков по глубине и их влияния на халинную структуру вод, обусловленного изменчивостью вертикальной циркуляции.

Общая характеристика работы.

Цель работы: исследовать влияние горизонтальной и вертикальной циркуляции вод Черного моря на его соленостную структуру и на потоки биогенных элементов в центральной части Черного моря.

Для достижения цели Е.А. Кубряковой были поставлены и решены следующие задачи. Изучено влияние горизонтальной и вертикальной циркуляции вод Черного моря на его соленостную структуру и на потоки биогенных элементов в центральной части Черного моря. Выполнена параметризация вертикальной скорости и изучено влияние вертикальных движений на формирование термохалинной структуры центральной части Черного моря в рамках одномерной физико-биохимической модели. Автором 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. Оценена величина вертикального потока аммония из анаэробной зоны центральной части бассейна, значение горизонтальных потоков азота между районом континентального склона и центральной частью

Черного моря и их влияние на функционирование экосистемы в центральной части Черного моря. Исследовано влияние интенсивности зимнего выхолаживания на сезонную изменчивость цветения фитопланктона.

Структура и объем диссертации. 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.

Основные результаты, полученные в диссертации.

В первом разделе работы представлены особенности физической и биогеохимической структуры и приведен обзор основных математических моделей экосистемы Черного моря. Даны оценки вкладов речных вод, осадков и испарения, течений, азовских вод и стока черноморской воды через Керченский пролив в водный и солевой баланс Черного моря на основе использования различных литературных источников. Представлены основные характеристики циркуляции Черного моря, описываются особенности вертикальной крупномасштабной ячейки циркуляции, связанной с циклоническим движением вод. В этом же разделе дается общее представление о химической структуре вод Черного моря, а завершается раздел описанием состояния моделирования морских экосистем, в том числе, которые были разработаны для Черного моря.

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 на основе существующих представлений о характере изменения вертикальной скорости в центральной части бассейна была предложена ее параметризация. Показаны особенности горизонтального обмена в поддержании солевого баланса в море. Описан механизм горизонтального обмена между центральной частью бассейна и районом континентального склона, который обусловлен действием вертикальной ячейки циркуляции, отражающей сезонную изменчивость вертикальной скорости. В этой главе 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. Автором диссертации была построена боксовая модель Черного моря, которая позволила получить оценки переноса массы и соли. Эта гидродинамическая модель была дополнена биогеохимическим блоком, на основе которого получены оценки горизонтального транспорта органического и неорганического азота между центральной частью моря и районом континентального склона и исследовано влияние верти-

кальных движений в центре бассейна на баланс азота в аэробной и субкислородной зонах.

Отметим очень высокое качество выполненных экспериментов по оценке влияния на горизонтальный транспорт органического вещества. Показано, что в слое 25–135 м наибольшее влияние на перенос азота оказывает вертикальная ячейка циркуляции, благодаря которой перенос направлен с периферии в центр моря. Транспорт, обусловленный турбулентной диффузией направлен в обе стороны и поэтому его суммарный вклад в горизонтальный перенос в центр моря в несколько раз меньше. Показано, что примерно 70 % от общего потока азота в аэробную-субкислородную зоны моря поступает с периферии бассейна, а 30 % от общего потока азота связано с переносом аммония вертикальными движениями из анаэробной зоны в субкислородную. 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.

В третьем разделе проводится исследование горизонтального массо- и солеобмена на основе разработанной боксовой гидродинамической модели Черного моря. Проведены количественные оценки объемов воды и соли, которые переносятся из центральной части моря к его периферии. Они по порядку величин согласуются с результатами, полученными ранее балансовым методом. На основе созданной боксовой модели, рассчитана сезонная изменчивость температуры и солености в слое 0–400 м. Полученные результаты согласуются с данными ретроспективного анализа гидрофизических полей Черного моря за 1993–2012 гг., полученными Г.К. Коротаевым ранее. Изучен вклад различных механизмов в суммарный перенос соли и показано, что в поверхностном слое перенос, обусловленный сезонной изменчивостью вертикальной скорости, дает вклад до 30 %, а в слое 30–150 м этот механизм определяет примерно 5–10 % от общего переноса соли.

В четвертом разделе представлены результаты математического моделирования биогеохимических процессов Черного моря. В нем исследуется связь биогеохимических и динамических процессов в центральной части бассейна и на его периферии. 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.

Обоснованность и достоверность результатов. Обоснованность полученных в работе результатов вытекает из корректного использования широко апробированной численной модели, сопоставления полученных результатов численного моделирования с дан-

ными натурных наблюдений, а также метрологически и методически грамотного планирования и проведения натурных измерений. Расчеты проводились с использованием современных методов математического моделирования динамики деятельного слоя моря и биогеохимических процессов Черного моря. Для определения скоростей, связанных с изменчивостью крупномасштабной циркуляции, использовались спутниковые альтиметрические данные. Для определения концентрации хлорофилла «а» и температуры поверхности моря (ТПМ) использовались данные спутника MODIS-Aqua за период с 2004 по 2013 гг. В работе также применялись 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). Реанализ был получен с использованием модели циркуляции, включающей процедуру ассимиляции профилей температуры и солёности, полученных по оригинальной методике совместной обработки спутниковых альтиметрических и малочисленных гидрологических наблюдений, разработанной ранее Г.К. Коротаевым. Сопоставление показало качественное и количественное согласование полученных результатов с предыдущими работами.

Научная новизна и практическая значимость.

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. Исследовано влияние вертикальной скорости на формирование сезонного хода температуры и солёности верхнего квазиоднородного слоя. Отметим, что использование междисциплинарного подхода – физико-биогеохимического моделирования – дало возможность впервые оценить влияние крупномасштабной вертикальной циркуляции на вертикальные и горизонтальные потоки азотосодержащих веществ, определяющих развитие биоты в бассейне. Несомненно, 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.

Рекомендации по использованию результатов диссертации.

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 мор-

ские ресурсы и предотвращать экологические риски, связанные с изменением климатических условий.

Замечания по диссертации.

В целом физические аргументы и интерпретации результатов выглядят убедительными. Однако некоторые фрагменты изложены не совсем удачно. Это касается, в частности, описания аномалии потенциальной энергии (П.Э.). В тексте, например, приводится определение «среднего по глубине значения потенциальной энергии»; на рисунке 2.8 приводится динамика аномалии П.Э., с единицами измерения кг/с^2 , которые не увязываются с определением, приведенным в тексте.

Практически не представлены результаты, касающиеся величины и динамики такого важного модельного параметра, как «масштаб турбулентности» l . Казалось бы, этот параметр должен представлять основной интерес в рамках задачи о динамике ВКС. Если в работе была рассчитана эволюция вертикального профиля $l(z, t)$, то соответствующие результаты могли бы послужить наиболее прямым индикатором изменений в ВКС. Аналогичное замечание возникает и в связи с расчетом коэффициентов турбулентного переноса.

В некоторых фрагментах работы описание технических деталей расчета превалирует, в ущерб физической интерпретации, обсуждению полученных результатов и их качественной оценке. Это особенно характерно для достаточно громоздкого, в отношении постановки задачи и используемых расчетных процедур, раздела 3. В частности, по приведенным в этом разделе результатам трудно соотнести относительные вклады горизонтальной турбулентной диффузии и вертикальной ячейки циркуляции в процесс горизонтального обмена веществом.

В работе имеются также немногочисленные опечатки и ошибки, в частности, на рис. 2.4 стр. 55 перепутаны обозначения линий второго и последнего модельных годов расчета, на с. 89 для коэффициента турбулентной диффузии указывается размерность м/с^2 ; рисунок на с. 82 не пронумерован. Имеются также некоторые стилистические ошибки, например, стр. 149: усиление интенсификации циклонической циркуляции – тавтология. Некоторые рисунки перегружены информацией, например, рис. 4.13, стр. 124 и в них очень трудно разобраться.

Заключение. Диссертация Кубряковой Елены Адиловны «Моделирование процессов горизонтального и вертикального транспорта соли и биогенных элементов в Черном море», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.28 – океанология, является завершенной научной работой, выполнена автором самостоятельно на высоком научном уровне.

В диссертации имеются необходимые ссылки на авторов и источники заимствованных материалов, в том числе – на научные работы соискателя. Результаты работы в полной мере опубликованы в рецензируемых научных изданиях, удовлетворяющих требованиям ВАК Российской Федерации.

Автореферат диссертации в достаточной мере отражает ее содержание и удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842. Диссертация полностью соответствует паспорту специальности 25.00.28 – «Океанология» и удовлетворяет всем требованиям действующего «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям. Актуальность работы, научная новизна и практическая значимость дают основание считать, что она отвечает требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Кубрякова Елена Адильовна достойна присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности «25.00.28 – океанология».

Настоящий отзыв обсужден и одобрен на заседании Ученого Совета Института водных проблем Севера – обособленного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук» (ИВПС КарНЦ РАН), протокол от 20 февраля 2019 г. № 2.

Директор ИВПС КарНЦ РАН
чл.-корр. РАН, д.г.н., профессор

Николай Николаевич Филатов

Заведующая лаборатории гидрофизики ИВПС КарНЦ РАН,
к.г.н.

Галина Эдуардовна Здоровеннова

Ведущий научный сотрудник лаборатории гидрофизики ИВПС КарНЦ РАН,
д.ф.-м.н.

Сергей Рэмович Богданов

Институт водных проблем Севера – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук» (ИВПС КарНЦ РАН)
185030 г. Петрозаводск, пр. А. Невского 50
(88142) 57-63-81, [nwpi.karelia\(at\)yandex.ru](mailto:nwpi.karelia(at)yandex.ru)

Подписи Н.Н. Филатова, Г.Э. Здоровенновой, С.Р. Богданова и заверяю.

Главный документовед ИВПС КарНЦ РАН.

Н.Ю. Григорьевская

«20» февраля 2019 г.

