

На правах рукописи

Масевич Анна Владимировна

**ДИНАМИКА КИСЛОРОДА В ОСНОВНОМ ПИКНОКЛИНЕ
ЧЕРНОГО МОРЯ**

Специальность 1.6.17 – Океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Севастополь – 2022

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

Научный руководитель: доктор географических наук, член-корреспондент РАН
Коновалов Сергей Карпович

Официальные оппоненты:

Дубинин Александр Владимирович, доктор химических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, руководитель Лаборатории геохимии Отдела геологии и геодинамики

Тищенко Павел Яковлевич, доктор химических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук, главный научный сотрудник Лаборатории гидрохимии Отдела геохимии и экологии океана

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова»

Защита состоится **25 октября 2023 г. в 11.00** на заседании Диссертационного совета 24.1.229.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Морской гидрофизический институт РАН» по адресу: **299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН» и на сайте Института http://mhi-ras.ru/news/thesis_defense_202212141620.html

Автореферат разослан «20» января 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.229.01
кандидат географических наук

Харитоновна Людмила Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Черное море является уникальным водоемом, глубинные слои которого (более 150–200 м) не содержат кислорода и содержат большие концентрации восстановленных форм серы, сумму которых принято называть термином «сероводород» и выражать в его эквивалентном содержании. Географическое положение Черного моря обусловило ограниченный водообмен с Атлантическим океаном через Мраморное и Средиземное моря. Для вертикальной гидрологической структуры вод характерна сильная постоянная стратификация, что вызвано наличием слоя высоких градиентов солености между поверхностным слоем моря, распресненным речным стоком и осадками, и глубинными слоями, куда поступают соленые воды Мраморного моря (Гидрометеорология..., 1991). Слой высоких градиентов солености и плотности называется основным пикноклином (Гидрометеорология..., 1991). Наличие основного пикноклина ограничивает глубину вертикальной конвекции, обуславливает наличие в Черном море достаточно тонкой (до 200 м) кислородсодержащей (аэробной) зоны. В слое основного пикноклина наблюдается высокий вертикальный градиент кислорода. Именно в этом слое кислород исчезает и появляется сероводород. Поэтому изучение процессов, определяющих динамику кислорода в слое основного пикноклина, является первостепенно актуальной задачей для исследования.

Растворенный кислород является одним из наиболее важных гидрохимических компонентов, обеспечивающих жизнедеятельность живых организмов в водной толще. Присутствие кислорода в морской воде необходимо для осуществления жизненно важных окислительных процессов: дыхания организмов, окисления органических и восстановленных неорганических веществ естественного и антропогенного происхождения. По характеру вертикального распределения кислорода в морской воде можно судить о соотношении интенсивности его поступления и расходования в окислительно-восстановительных и биохимических реакциях, о тех процессах, которые определяют пространственные и временные изменения содержания кислорода в водах основного пикноклина. Характер распределения кислорода в водных массах служит показателем их происхождения и протекающих в них химических и физических процессов.

Вопрос об особенностях горизонтального и вертикального распределения кислорода в водах Черного моря является одним из главных на протяжении более чем столетней истории океанологических исследований. Эти особенности определяют фундаментальные биогеохимические и экологические характеристики бассейна, его устойчивость и условия катастрофических изменений. Особое внимание уделяется изучению субкислородного слоя, в котором происходит изменение окислительно-восстановительных условий и процессов, формирование границы аэробных и анаэробных вод моря.

Актуальными для изучения остаются вопросы об основных процессах, определяющих баланс кислорода в водах Черного моря. Прежде всего это вертикальный поток кислорода, обусловленный интенсивностью обновления холодного промежуточного слоя (ХПС) за счет поступления в холодный период года насыщенных кислородом поверхностных вод моря. Оценки межгодовой изменчивости обновления вод ХПС Черного моря приводятся в работах (Belokopytov, 1998; Кривошея и др., 2002; Титов, 2003а; Титов, 2003b; Белокопытов, 2010; Полонский и др., 2013; Miladinova et al., 2017; Akpınar et al., 2017; Белокопытов, 2017). Кроме вертикального потока в результате зимнего перемешивания, кислород поступает в слои субкислородной и анаэробной зон вместе с горизонтальными интрузиями мраморноморских вод. Особенности распространения и влияния мраморноморских интрузий на воды Черного моря рассмотрены в работах (Ozsoy et al., 1995; Ivanov and Samodurov, 2001; Konovalov et al., 2003; Falina et al., 2017; Stanev et al., 2017). Важными для изучения являются вопросы пространственно-временной изменчивости поступления органического вещества, а также оценки годовых величин и потоков первичной продукции в Черном море, которые рассматривались в работах (Bologa et al., 1999; Yunev et al., 2002; Burlakova et al., 2003; Русаков и др., 2003; Агатова и др., 2005; Yılmaz et al., 2006; Денисов и Черноусов, 2007; Клювиткин и др., 2007; Ducklow et al., 2007; Демидов, 2008; Кукушкин, 2014; Агатова и др., 2016; Агатова, 2017; Kaiser et al., 2017).

Вместе с тем, вопросы межгодовых изменений в распределении кислорода в слое основного пикноклина, а главное – вопросы о процессах, определяющих эти изменения в современный период, остаются открытыми для исследования и определяют основную цель данного исследования.

Степень разработанности темы исследования

Океанографические исследования по изучению гидрохимической структуры Черного моря начались в 1890 г. (Андрусов, 1890) с обнаружения сероводорода глубже 200 м и продолжают в настоящее время. За этот период получено, проанализировано и систематизировано большое количество данных о распределении кислорода.

Основными результатами исследований явились:

1) эволюция представлений о взаимодействии кислорода и сероводорода – от зоны сосуществования кислорода (Скопинцев, 1975) и сероводорода (Коновалов, 2001) до «субкислородной» зоны. Это слой малых значений и низких величин вертикального градиента концентрации кислорода, где его содержание не превышает 10 мкмоль/л, а нижняя граница этого слоя совпадает с глубиной аналитически значимого (при использовании метода обратного титрования (Современные методы..., 1992) появления сероводорода (3 мкмоль/л) (Cadispoti et al., 1991; Murray et al., 1991a; Tugrul et al., 1992; Безбородов и Еремеев, 1993; Stanev et al., 2017; Stanev et al., 2018).

2) переход к анализу особенностей гидрохимических характеристик с привязкой к шкале условной плотности, который позволяет сравнивать распределения, полученные в разных районах и в различное время, получать количественные оценки изменений гидрохимических характеристик (Безбородов, 1989; Безбородов, 1990;

Виноградов и Налбандов, 1990; Murray et al., 1995; Еремеев и др., 1996; Kononov and Murray, 2001; Сапожников и Сапожников, 2002; Якушев и др., 2002).

3) использование численных диагностических моделей, описывающих взаимодействие и распределение кислорода и сероводорода в водах моря (Айзатулин и Леонов, 1990; Беляев и Совга, 1991; Леонов и Айзатулин, 1995; Yakushev and Neretin, 1997; Oguz et al., 1999).

4) использование экосистемного подхода при анализе результатов наблюдений и создаваемых численных моделей, учитывающего совместное влияние физических и взаимосвязанных биогеохимических процессов на гидрохимическую структуру и бюджет элементов (Еремеев и др., 2001; Стунжас, 2002; Oguz, 2002; Еремеев и Коновалов, 2006; Стунжас и Якушев, 2006; Glazer et al., 2006; Capet et al., 2016; Stanev et al., 2018).

Начиная с осени 2015 г. Морским гидрофизическим институтом РАН совместно с Институтом биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН, Институтом океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Тихоокеанским океанологическим институтом им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения РАН было выполнено 15 экспедиций в глубоководной части Черного моря в пределах экономической зоны России, где были получены современные натурные данные о распределении основных гидрохимических показателей. Систематизация и анализ полученных данных позволит выявить изменения в распределении кислорода, которые могли произойти за последние десятилетия.

Объект и предмет исследования

Объект исследования – глубоководная часть Черного моря. Предмет исследования – изменения распределения концентрации кислорода в основном пикноклине Черного моря и процессы, определяющие эти изменения.

Цель и задачи исследования

Целью исследования является изучение процессов, определяющих межгодовые изменения распределения концентрации кислорода в слое основного пикноклина Черного моря.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

1. Сбор, подготовка и обобщение современных и исторических натурных данных о пространственном распределении концентрации кислорода в глубоководной части Черного моря.

2. Оценка межгодовых изменений в пространственном распределении концентрации кислорода в водах Черного моря.

3. Оценка межгодовых изменений характеристик ХПС, как источника кислорода в воды оксиклина.

4. Анализ межгодовых изменений величины первичной продукции для оценки степени расходования кислорода.

5. Анализ межгодовых изменений концентрации нитратов в слое основного пикноклина как результата окисления органического вещества.

6. Оценка межгодовых изменений концентрации сероводорода как косвенной характеристики потока органического вещества.

Научная новизна полученных результатов

Впервые оценено совместное влияние физических и химико-биологических факторов, определяющих изменения концентрации кислорода в слое основного пикноклина. Выделены периоды, когда изменения концентрации кислорода определяются преобладанием различных процессов его поступления и расходования.

Впервые показано, что в современный период наблюдаемое потепление поверхностных вод моря и снижение физического потока кислорода в холодный промежуточный слой является главным фактором, определяющим межгодовые изменения распределения и низкое содержание кислорода в слое основного пикноклина Черного моря.

Впервые показано, что именно физические процессы и физический поток кислорода, а не биогеохимические процессы, являются определяющими для межгодовых изменений распределения кислорода в современный период, что определило «системный» сдвиг в биогеохимической структуре вод Черного моря.

Теоретическая и практическая значимость работы

Выполненный анализ межгодовых изменений концентрации кислорода, сероводорода, нитратов, первичной продукции, а также расчеты вертикальных потоков кислорода позволили показать, что, несмотря на тенденцию сокращения потока оседающего органического вещества, концентрация кислорода по всей толще аэробной зоны продолжает сокращаться. Это обусловлено действием климатических факторов. Снижение интенсивности вертикальной конвекции, вызванное потеплением верхних слоев вод Черного моря, приводит к уменьшению потока кислорода в более глубокие слои и подъему верхней границы субкислородной зоны. Продолжение долговременных научных исследований позволило проанализировать современное состояние гидрохимической структуры Черного моря и дать прогноз возможным изменениям.

Методология и методы исследования

Исследование проводилось на основе данных натурных наблюдений по распределению температуры, солености, концентрации кислорода, сероводорода, нитратов, полученных в период 1980–2019 гг. в 151 экспедиции МГИ НАН Украины и МГИ РАН. Для определения гидрохимических показателей использовались стандартные методики определения (Методы гидрохимических исследований..., 1978; Современные методы..., 1992). При построении вертикальных распределений гидрохимических параметров был использован изопикнический метод анализа. Средние профили гидрофизических и гидрохимических параметров рассчитывались в специально разработанной программе «meanprofile».

Основным инструментом для расчета физического потока кислорода и скорости продукции и потребления кислорода послужила 1,5-мерная стационарная модель вертикального обмена в Черном море (Samodurov and Ivanov, 1998; Ivanov and

Samodurov, 2001), разработанная С.К. Коноваловым, Л.И. Ивановым и А.С. Самодуровым.

Для расчета величины первичной продукции использовались спутниковые данные массива NASA (Архив Giovanni) о среднемесечных значениях поверхностной концентрации хлорофилла а, полученные сканерами цвета SeaWiFS и MODIS-Aqua.

Расчет величины первичной продукции в столбе воды производился по методике, предложенной А.Б. Демидовым (Демидов, 2008), где на основе данных о концентрации хлорофилла а в поверхностном слое вод по регрессионным уравнениям, связывающим первичную продукцию в столбе воды с концентрацией поверхностного хлорофилла, рассчитывались величины первичной продукции для глубоководной части Черного моря.

Положения, выносимые на защиту

1. Количественные оценки межгодовой динамики концентрации кислорода для различных временных периодов – до начала эвтрофикации, периода активной эвтрофикации, периода дистрофикации и современного периода.

2. Количественные оценки изменения величины первичной продукции, рассчитанной на основе данных о концентрации хлорофилла а в поверхностном слое моря, как показателя расходования кислорода в слое основного пикноклина.

3. Количественные оценки изменения концентрации нитратов, как показателя изменения потока органического вещества в слой основного пикноклина Черного моря.

4. Оценки межгодовых изменений физического потока кислорода из ХПС, рассчитанного на основе натурных данных о вертикальном распределении кислорода, коэффициентов турбулентной диффузии и скорости адвекции.

5. Анализ соотношения роли биогеохимических и физических процессов в межгодовой динамике кислорода за период с 1980 по 2019 гг.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов подтверждена методиками определения гидрохимических параметров в морской воде, используемыми в МГИ РАН на протяжении нескольких десятков лет (Методы гидрохимических исследований..., 1978; Современные методы..., 1992). Приборная база отдела биогеохимии моря (полуавтоматическая бюретка «Metrohm» Dosimat-765, весы лабораторные электронные «Ohaus» Adventurer AR2140, весы лабораторные «Kern» EW620-3NM, набутылочные дозаторы «Brand» Dispensette S, дозатор Thermo Scientific Finn timer F1) позволила проводить высокоточные определения основных гидрохимических элементов. Полученные с помощью CTD-зонда «Sea-Bird 911 plus CTD» (фирмы Sea Bird Electronics, США) данные по температуре, электропроводности и гидростатическому давлению дали возможность исследования вертикального распределения температуры, солености и плотности во всей толще вод Черного моря, а также использовать эти данные для дальнейших расчетов.

Результаты работы были представлены на следующих научных мероприятиях: Научная конференция «Моря России: наука, безопасность, ресурсы» (г. Севастополь,

2017 г.); Молодежная научная конференция «Морские исследования и рациональное природопользование» (г. Севастополь, 2018 г.); Всероссийская научная конференция «Моря России: методы, средства и результаты исследований» (г. Севастополь, 2018 г.); Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы рыболовства, рыбоводства (аквакультуры) и экологического мониторинга водных экосистем» (г. Ростов-на-Дону, 2018 г.); 26-ая Международная конференция RACON – 2019 «Морские науки и технологии для устойчивого развития» (г. Владивосток, 2019 г.); Всероссийская научная конференция «Моря России: фундаментальные и прикладные исследования» (г. Севастополь, 2019 г.); III Всероссийская конференция «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития» (г. Санкт-Петербург, 2019 г.); V Всероссийская научная конференция молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана» (г. Калининград, 2020 г.); Всероссийская научная конференция «Моря России: исследования береговой и шельфовой зон» (г. Севастополь, 2020 г.); Всероссийская научная конференция «Моря России: Год науки и технологий в РФ – Десятилетие наук об океане ООН» (г. Севастополь, 2021 г.).

Связь с научными программами, планами, темами

Работа выполнена в соответствии с научными планами и программами исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН» в рамках следующих научно-исследовательских проектов и грантов:

- тема «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем Черного и Азовского морей, на основе современных методов контроля состояния морской среды и гридтехнологий», № 0827-2014-0010 (2016–2017 гг.), исполнитель;

- тема «Фундаментальные исследования океанологических процессов, определяющих состояние и эволюцию морской среды под влиянием естественных и антропогенных факторов, на основе методов наблюдения и моделирования», № 0555-2021-0004 (2018–2022 гг.), исполнитель;

- проект РФФИ «Процессы и характеристики многолетних изменений структуры оксиклина, субкислородной зоны и распределения сероводорода в водах Черного моря», № 19-35-90062 Аспиранты (2019–2022 гг.), исполнитель.

Личный вклад соискателя

Соискатель принимал участие в 14 экспедициях Морского гидрофизического института РАН в Черном море, в ходе которых были получены натурные данные, составляющие основу исследования. Соискателем производились отбор проб воды, лабораторный анализ растворенного кислорода и сероводорода, обработка и анализ полученных и архивных данных. Анализ качества гидрохимических данных проводился при личном участии автора.

Соискателем собран и проанализирован массив данных о концентрации хлорофилла а в поверхностном слое вод глубоководной части Черного моря, включающий как судовые измерения, так и данные о поверхностной концентрации

хлорофилла а, полученные с помощью дистанционного зондирования сканерами цвета SeaWiFS и MODIS-Aqua. Выбор методики и расчет величины первичной продукции для глубоководной части Черного моря были также произведены автором.

Обсуждение основных выводов и результатов проведенных исследований осуществлялось соискателем совместно с научным руководителем и соавторами научных публикаций.

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано в соавторстве 19 научных работ, из них 6 статей в рецензируемых научных журналах, 1 раздел монографии и 12 тезисов докладов и материалов конференций.

Требованиям ВАК при Минобрнауки России удовлетворяют 6 [1–6] работ в рецензируемых научных изданиях. В их числе 3 [1, 4, 5] работы в рецензируемых научных изданиях, входящих в наукометрическую базу Web of Science, 5 [1, 2, 4–6] работ, входящих в наукометрическую базу SCOPUS, 1 [3] работа в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень изданий ВАК при Минобрнауки России, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Благодарности

Автор выражает признательность и искреннюю благодарность своему научному руководителю чл.-кор. РАН, д-ру геогр. наук С.К. Коновалову за общее руководство работой, плодотворные обсуждения результатов работы, ценные советы, конструктивную критику при написании работы. Соискатель благодарит канд. хим. наук Кондратьева С.И. (МГИРАН) за неоценимый вклад в становление соискателя, как квалифицированного специалиста, за переданные практические навыки, опыт и знания. Автор признательна канд. геогр. наук Тищенко П.П. (ТОИ ДВО РАН) за плодотворные обсуждения, ценные комментарии и проявленный интерес к работе. Автор выражает благодарность Ингеру А.В. (МГИ РАН) за оперативность в разработке программного пакета для обработки массивов экспедиционных данных. Соискатель также благодарит соавторов публикаций за плодотворное сотрудничество, и всех, с кем посчастливилось работать в экспедициях по Черному морю.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка литературы. Объем работы составляет 151 страницу и содержит 5 таблиц и 38 рисунков. Библиографический список включает в себя 170 наименований, в том числе 78 на английском языке.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** раскрыта актуальность и степень разработанности темы, сформулированы цель и задачи исследования. Определена научная новизна работы и ее практическая значимость, приводятся: положения, выносимые на защиту, основные

материалы и методы, используемые в работе, степень достоверности и апробация результатов, личный вклад автора и список публикаций по теме диссертации.

В **Разделе 1** дан краткий обзор современного состояния проблемы, рассмотрены причины глобального снижения содержания кислорода в водах Мирового океана. В **подразделе 1.1** перечислены процессы, определяющие содержание кислорода в морской воде, а также представлены особенности вертикального распределения кислорода в морской воде.

В **подразделе 1.2** представлено физико-географическое описание Черного моря, рассмотрены характеристики его гидрологической структуры, описаны особенности сезонной и межгодовой изменчивости холодного промежуточного слоя, приведены особенности гидрохимической структуры вод Черного моря. Проведен анализ литературных источников, посвященных рассмотрению причин межгодовых изменений содержания кислорода в основном пикноклине Черного моря. Показано, что основными процессами, определяющими многолетние изменения в распределении кислорода, были химико-биологические процессы расходования кислорода в результате эвтрофирования Черного моря, а физические процессы вентилирования водной толщи не могли компенсировать увеличившуюся скорость расходования кислорода. Однако эти работы охватывали период до начала существенных климатических изменений (потепления вод) в Черном море (Murray et al., 1989; Konovalov and Murray, 2001; Yunev et al., 2002; Yunev et al., 2005; Oguz and Gilbert, 2007; Mikaelyan et al., 2013; Tugrul et al., 2014; Capet et al., 2016; Юнев и др., 2019). Отмечено, что процессы потребления кислорода были рассмотрены достаточно подробно, тогда как влияние климатических изменений на физический поток кислорода подробного рассмотрения не получило.

В **Разделе 2** представлены методы определения гидрохимических параметров, используемых в работе, приведены особенности изопикнического метода анализа, описываются данные, на которых основаны все полученные результаты, приводится описание методики расчета потоков кислорода, а также описание методики расчета величины первичной продукции.

В **подразделе 2.1** приведены главные принципы методик определения содержания кислорода, сероводорода, нитратов в морской воде, приведена формула расчета степени насыщения.

В **подразделе 2.2** рассмотрены особенности изопикнического метода анализа. Показано, что вертикальное распределение гидрохимических параметров относительно условной плотности в водах Черного моря идентично для всей глубоководной части (Безбородов, 1990; Виноградов и Налбандов, 1990; Saydam et al., 1993; Еремеев и др., 1996; Konovalov and Murray, 2001; Якушев и др., 2002; Сапожников и Сапожников, 2002). Экстремумы в распределении гидрохимических параметров всегда соответствуют одним и тем же изопикническим поверхностям. Поэтому при исследовании гидрохимической структуры вод Черного моря в настоящее время используют шкалу условной плотности. Отмечено, что использование шкалы условной плотности позволяет в значительной мере решить проблему

пространственно-временной неоднородности массивов экспедиционных данных (Рисунок 1).

В подразделе 2.3 описываются данные, используемые в работе, приведены схемы расположения океанографических станций, на которых выполнялись определения содержания кислорода, нитратов, сероводорода. Дано описание метода получения средних профилей гидрохимических параметров.

В подразделе 2.4 приводится описание методики расчета вертикальных потоков и скорости потребления/продукции кислорода с использованием профилей вертикальной скорости и коэффициента турбулентной диффузии. Данная методика расчета предложена в (Samodurov and Ivanov, 1998; Ivanov and Samodurov, 2001; Еремеев и др., 2001) и основана на данных о вертикальном распределении кислорода, коэффициентов диффузии и скорости адвекции. Расчет потоков (F) кислорода проводился по уравнению (1), скорости продукции/потребления (R) кислорода рассчитывались по уравнению (2) (Kononov et al., 2000; Еремеев и др., 2001):

$$F = -k \frac{\partial C}{\partial z} + wC \quad (1)$$

$$R = \left(\frac{\partial}{\partial z} \left(-k \frac{\partial C}{\partial z} \right) + w \frac{\partial C}{\partial z} \right) - \frac{\partial w}{\partial z} (C_b - C), \quad (2)$$

где F – поток вещества, моль/год;

R – скорость биогеохимического потребления/продукции вещества, моль/(м·год);

w – скорость вертикальной адвекции, м/с;

k – величина коэффициента диффузии, м²/с;

C – величина концентрации рассматриваемого вещества в окружающей воде, моль;

C_b – концентрация того же вещества в воде смеси средиземноморских и черноморских вод, моль.

Полученные данные о вертикальных потоках и скорости потребления/продукции кислорода позволили оценить их согласованность с наблюдаемой термохалинной структурой и физическими процессами вентилирования вод Черного моря.

В подразделе 2.5 методика расчета величины первичной продукции на основе данных о концентрации хлорофилла a в поверхностном слое вод для глубоководной части Черного моря (Демидов, 2008). Расчет величины первичной продукции производился по регрессионным уравнениям вида $y = a + bx$, связывающим первичную продукцию в столбе воды с концентрацией поверхностного хлорофилла.

В Разделе 3 анализируются межгодовые изменения распределения кислорода, величины первичной продукции, концентрации нитратов и концентрации сероводорода в верхней части анаэробной зоны.

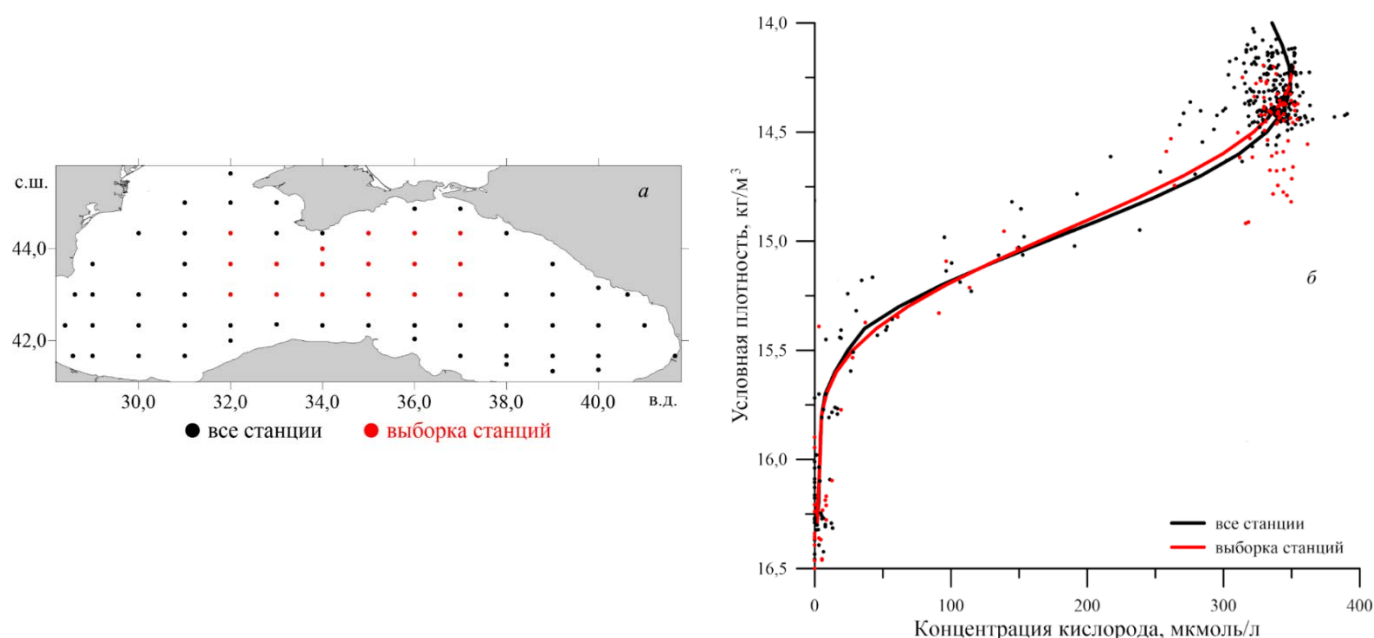


Рисунок 1 – Карта станций для экспедиции 1985 г. (а) и вертикальное распределение кислорода для этой же экспедиции (б)

В подразделе 3.1 рассмотрены межгодовые изменения содержания кислорода в слое основного пикноклина Черного моря. Проведен анализ межгодовых изменений вертикального распределения кислорода для отдельных характерных периодов эволюции черноморской экосистемы (Рисунок 2). Периоды были выбраны по следующим причинам:

1. Данные 1969 года относятся к наиболее раннему из рассмотренных периодов, который характеризуется отсутствием значимого антропогенного влияния (отсутствием значимого поступления биогенных элементов антропогенного происхождения) и отсутствием значимых отклонений термохалинных характеристик вод ХПС от средних значений (Белокопытов, 2017).

2. Интервал 1980–1992 годов представляет собой период максимально интенсивной эвтрофикации (Юнев и др., 2019).

3. Интервал 1993–2005 годов представляет собой период дистрофикации (Юнев и др., 2019), т.е. снижение уровня трофности (дистрофикации) системы Черного моря (уменьшение потока органического вещества, поступающего в Черное море в результате первично-продукционных процессов и из береговых источников).

4. Интервал 2007–2019 годов выделен в данной работе. Для этого периода характерно снижение уровня трофности вод, но при этом регистрируется никогда прежде не наблюдавшийся интенсивный прогрев и распреснение вод верхней части основного пикноклина (Полонский и др., 2013; Miladinova et al., 2017; Akpınar et al., 2017; Белокопытов, 2017).

Концентрация кислорода в верхней части основного пикноклина ($\sigma_t = 14,6$ кг/м³) в 1980–1992 гг. в среднем составляла 229 ± 15 мкмоль/л, что на 45 мкмоль/л меньше, чем в 1969 г. (Рисунок 2). В 1993–2005 гг. она увеличилась до 241 ± 34 мкмоль/л, а в

2007–2019 гг. сократилась до 194 ± 25 мкмоль/л. По всей толщине оксиклина между профилями 1980–1992 гг. и профилем 1969 г. наблюдалась разница концентрации кислорода ~ 46 –63 мкмоль/л.

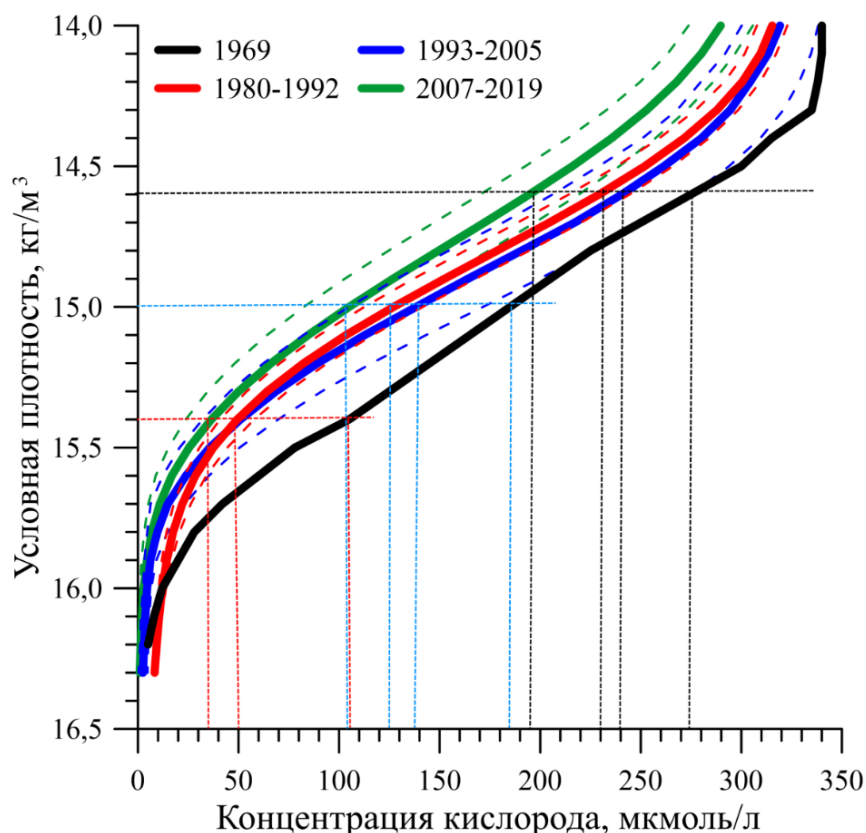


Рисунок 2 – Средние для выбранных периодов профили концентрации кислорода относительно условной плотности для выделенных периодов

В подразделе 3.2 рассмотрены межгодовые изменения величины первичной продукции. Для целей данной работы, исследования особенностей и причин многолетних изменений распределения кислорода, были восстановлены изменения величины первичной продукции в водах Черного моря (Рисунок 3) с использованием всех имеющихся данных (спутниковые наблюдения, прямые экспедиционные наблюдения, литературные данные). Показано, что в 1981–1982 гг. величина первичной продукции значительно возросла и достигала значений $400 \text{ г С/м}^2 \cdot \text{год}$, тогда как в 1960-е гг. она изменялась в пределах $40\text{--}63 \pm 18 \text{ г С/м}^2 \cdot \text{год}$, а в 1970-е гг. составляла $220\text{--}250 \text{ г С/м}^2 \cdot \text{год}$ (Рисунок 3). Во второй половине 1980-х годов наблюдалось снижение величин первичной продукции. Начиная с 1985 г. и до 1995 г. величина первичной продукции колебалась в пределах $100\text{--}180 \text{ г С/м}^2 \cdot \text{год}$ и в среднем составляла $140 \text{ г С/м}^2 \cdot \text{год}$. С 1998 г. и по настоящее время величина первичной продукции находится на уровне $\sim 100 \text{ г С/м}^2 \cdot \text{год}$. Это в 2,5 раза выше средней величины первичной продукции для первой половины 1960-х годов (Сорокин, 1962), но в 4 раза ниже максимальной величины первичной продукции, полученной нами, а также опубликованной в (Lein and Ivanov, 1991).

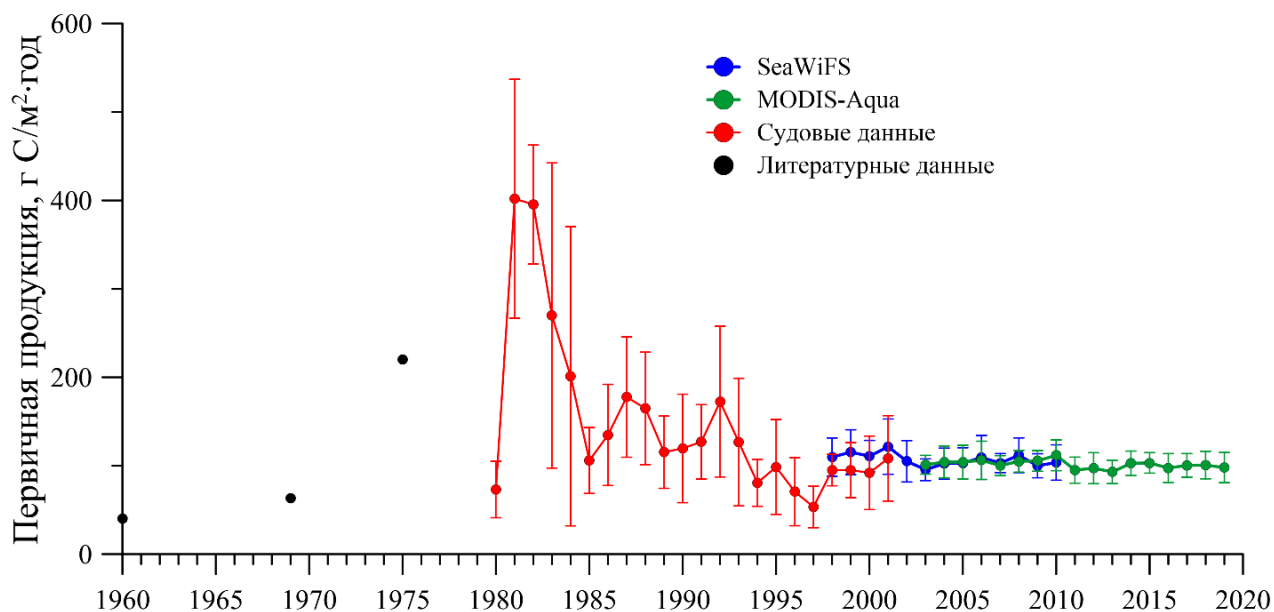


Рисунок 3 – Среднегодовая величина первичной продукции для глубоководной части Черного моря, рассчитанная по регрессионным уравнениям (для каждой точки показано среднеквадратичное отклонение) (Масевич и Коновалов, 2022)

В подразделе 3.3 проанализированы межгодовые изменения концентрации нитратов, как показателя поступления органического вещества в слой основного пикноклина. Все профили можно разделить на три периода. Первый период (1984–1991 гг.) характеризуется высокой концентрацией нитратов в слое их глубинного максимума, в среднем составляющей $7 \pm 1,3$ мкмоль/л, что в 4 раза превышает концентрацию нитратов, наблюдающуюся в 1969 г. (Рисунок 4). Во второй период (1992–2004 гг.) концентрация нитратов в слое их максимума снизилась по сравнению с предыдущим периодом и в среднем составляла $4,5 \pm 0,5$ мкмоль/л. Для третьего периода (2013–2019 гг.) характерно дальнейшее снижение концентрации нитратов в слое их глубинного максимума, в среднем для периода она составляет $3 \pm 0,7$ мкмоль/л. В целом концентрация нитратов в слое их глубинного максимума после стремительного роста в середине 1980-х – начале 1990-х гг. снижается и практически достигла значений периода до начала эвтрофикации черноморского бассейна.

В подразделе 3.4 рассмотрены межгодовые изменения концентрации сероводорода в верхней части анаэробной зоны как косвенного показателя количества оседающего органического вещества. Для оценки межгодовых изменений концентрации сероводорода были выбраны значения его концентраций для верхней части анаэробной зоны – для глубины залегания условной плотности $\sigma_t = 16,4$ кг/м³ (Рисунок 5). Показано, что в первый период с 1964 по 1978 гг. концентрации сероводорода вблизи границы анаэробной зоны в среднем составляли 11 ± 2 мкмоль/л.

Начиная с 1980-го года и до середины 2000-х гг. концентрации сероводорода стали возрастать и в среднем для этого периода составили 19 ± 3 мкмоль/л. В третий период с 2007 по 2019 гг. концентрация сероводорода вблизи границы анаэробной зоны стабилизировалась и составила в среднем 21 ± 2 мкмоль/л. По сравнению с периодом

1985–1995 гг. в современный период эволюции черноморской экосистемы резкого прироста концентрации сероводорода вблизи границы анаэробной зоны не наблюдается (Видничук и Коновалов, 2018). Это позволяет сделать вывод, что поток органического вещества из аэробной зоны стабилизировался, а система находится вблизи нового (современного) равновесного состояния.

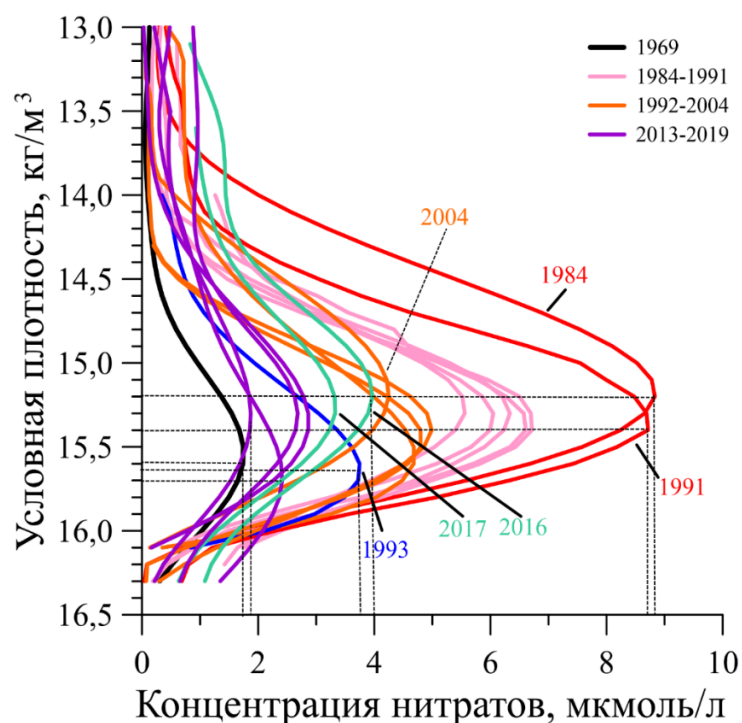


Рисунок 4 – Вертикальное распределение нитратов в глубоководной части Черного моря

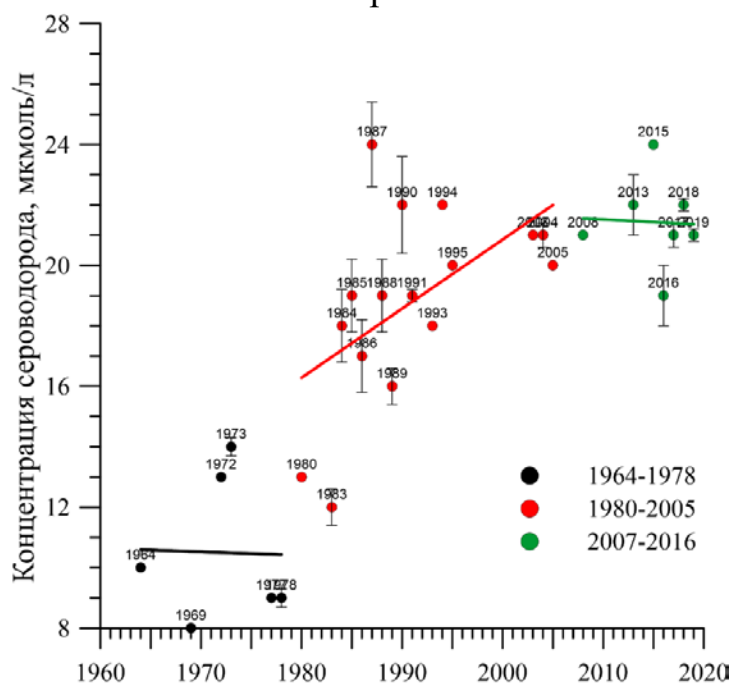


Рисунок 5 – Межгодовые изменения концентрации сероводорода вблизи верхней границы анаэробной зоны ($\sigma_t = 16,4 \text{ кг/м}^3$)

В Разделе 4 рассматриваются факторы межгодовой изменчивости содержания кислорода в глубоководной части Черного моря: влияние процесса эвтрофикации на кислородный режим Черного моря; изменение характеристик холодного промежуточного слоя, как основного источника кислорода в воды основного пикноклина Черного моря; межгодовые изменения потоков кислорода в водах глубоководной части Черного моря; запас кислорода в слое основного пикноклина.

В подразделе 4.1 приводятся оценки влияния процесса эвтрофикации на содержание кислорода в основном пикноклине Черного моря. До середины 1980-х гг. в глубоководной части Черного моря наблюдалось активное первичное продуцирование (Рисунок 3). Это отразилось на содержании кислорода в слое основного пикноклина и на характеристиках оксиклина (Рисунок 2). Концентрации кислорода в середине 1980-х гг. заметно сократились по сравнению с периодом до эвтрофикации со 185 мкмоль/л до 127 мкмоль/л соответственно. Окисление увеличившегося потока оседающего органического вещества в период интенсивной эвтрофикации привело к преобладанию процессов потребления кислорода над его поступлением, что, в свою очередь, вызвало увеличение концентрации нитратов в слое их глубинного максимума (Рисунок 4) от 2 мкмоль/л в 1969 г. до $7 \pm 1,3$ мкмоль/л в 1984–1991 гг. Показано, что, начиная с середины 2000-х гг. и до настоящего времени, интенсивность процесса первичного продуцирования стабилизировалась, величина годовой первичной продукции изменялась незначительно и составляла 100 ± 8 г С/м²·год (Рисунок 3). Концентрации сероводорода в верхней части анаэробной зоны также изменялись в узких пределах и составляли 21 ± 2 мкмоль/л (Рисунок 6), что свидетельствует о стабильности потока органического вещества. Концентрации нитратов в их глубинном максимуме продолжали снижаться и достигли уровня близкого к наблюдавшемуся до начала интенсивной эвтрофикации – $3 \pm 0,7$ мкмоль/л (Рисунок 4). В то же время, начиная с середины 2000-х гг., концентрации кислорода в слое основного пикноклина стали сокращаться и достигли уровня еще меньшего, чем в период интенсивной эвтрофикации Черного моря в 1980-х гг. – 105 ± 22 мкмоль/л на глубине условной плотности $\sigma_t = 15,0$ кг/м³ (Рисунок 2).

Таким образом, имеющиеся данные об изменении величины первичной продукции и вертикальном распределении нитратов в слое основного пикноклина, а также данные о концентрации сероводорода в верхней части анаэробной зоны показывают, что в последние 20 лет биогеохимические процессы характеризуются постоянством и невысокой интенсивностью по сравнению с периодом эвтрофикации 1980-х гг. Из этого следует, что изменения распределения кислорода в современный период должны в значительной степени определяться изменениями интенсивности вентиляции вод.

В подразделе 4.2 рассмотрены изменения характеристик холодного промежуточного слоя, как основного источника кислорода в воды основного пикноклина. Показано, что в период эвтрофикации 1980–1992 гг. температура ядра ХПС снижалась и изменялась в пределах 6,25–7,5°C, интенсивность вентиляции ХПС увеличилась в результате холодных зим (Титов, 2003b). Зависимость концентрации

кислорода от температуры в ядре ХПС является статистически незначимой, коэффициент корреляции Пирсона $r = -0,07$ (Рисунок 6). Это говорит о том, что изменения концентрации кислорода определяются не изменениями растворимости. В этот период основным процессом, определяющим изменения концентрации кислорода в слое основного пикноклина, является процесс его расходования на окисление органического вещества.

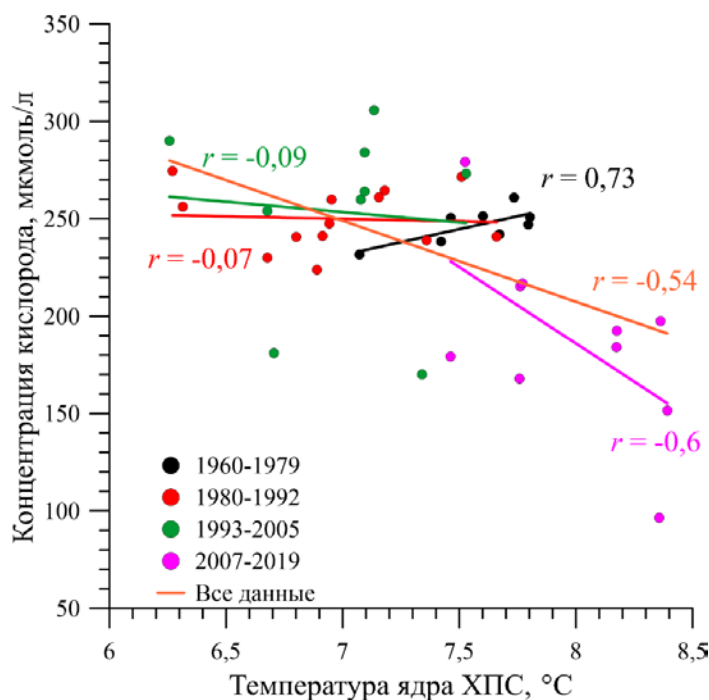


Рисунок 6 – Зависимость концентрации кислорода от температуры в ядре ХПС для различных периодов

В период дистрофикации 1993–2005 гг. температура ядра ХПС начинает повышаться по сравнению с предыдущим периодом и изменяется в пределах 7–7,5°C (Белокопытов, 2017). Как и в предыдущий период, зависимость концентрации кислорода от температуры является статистически незначимой, коэффициент корреляции Пирсона $r = -0,09$ (Рисунок 6), что свидетельствует о сокращении физического потока кислорода из ХПС и одновременном снижении трофического уровня глубоководной части Черного моря в результате сокращения потока органического вещества. Наблюдается тенденция увеличения концентрации кислорода в слое основного пикноклина по сравнению с периодом эвтрофикации. Данный период можно назвать переходным от периода эвтрофикации к современному периоду.

В современный период 2007–2019 гг. температура ядра ХПС продолжает повышаться и изменяется в пределах 7,5–8,5°C (Белокопытов, 2017), поэтому запас кислорода в ХПС значительно ниже по сравнению с предыдущими периодами. Потепление ХПС и снижение интенсивности пополнения запаса кислорода в ХПС приводит к значительному сокращению физического потока кислорода в слой основного пикноклина. В данный период наблюдается статистически значимая

($r = -0,6$, $p = 0,05$) обратная корреляционная зависимость концентрации кислорода от температуры в слое ядра ХПС (Рисунок 6). Это свидетельствует о том, что в современный период концентрация кислорода в слое основного пикноклина определяется физическими процессами растворимости газа в воде и его физического потока из ХПС при сохраняющейся низкой и достаточно постоянной величине потребления кислорода на окисление органического вещества.

В подразделе 4.2 оцениваются межгодовые изменения потоков кислорода в слое основного пикноклина. Показаны профили потоков и продукции/потребления кислорода для каждого из выделенных периодов. Для периода эвтрофикации 1980–1992 гг. характерен достаточно интенсивный поток кислорода, который убывает с глубиной (Рисунок 7, а). При этом потребление кислорода преобладает над его продукцией во всем слое пикноклина, начиная с глубины залегания условной плотности $\sigma_t = 14,6$ кг/м³, практически сразу ниже ядра ХПС, поскольку поток органического вещества очень высокий (Рисунок 7, б). Т.е. в период эвтрофикации физические процессы поступления кислорода не могут компенсировать действие химико-биологических процессов его расходования. Несмотря на экстремально холодные зимы начала 1990-х гг., которые привели к тому, что физический поток кислорода значительно возрос в начале периода дистрофикации в 1993 г. (Рисунок 7, а), его потребление остается достаточно высоким и начинает преобладать над его физическим поступлением на глубине условной плотности $\sigma_t = 15,4$ кг/м³ (Рисунок 7, б), т.к. поток органического вещества остается еще достаточно интенсивным. К концу периода дистрофикации (профиль 2004 г. на Рисунке 7) наблюдается сокращение потока кислорода. Характер профиля потребления/продукции кислорода не изменяется, однако потребление начинает преобладать уже на изопикнической поверхности $\sigma_t = 15,2$ кг/м³.

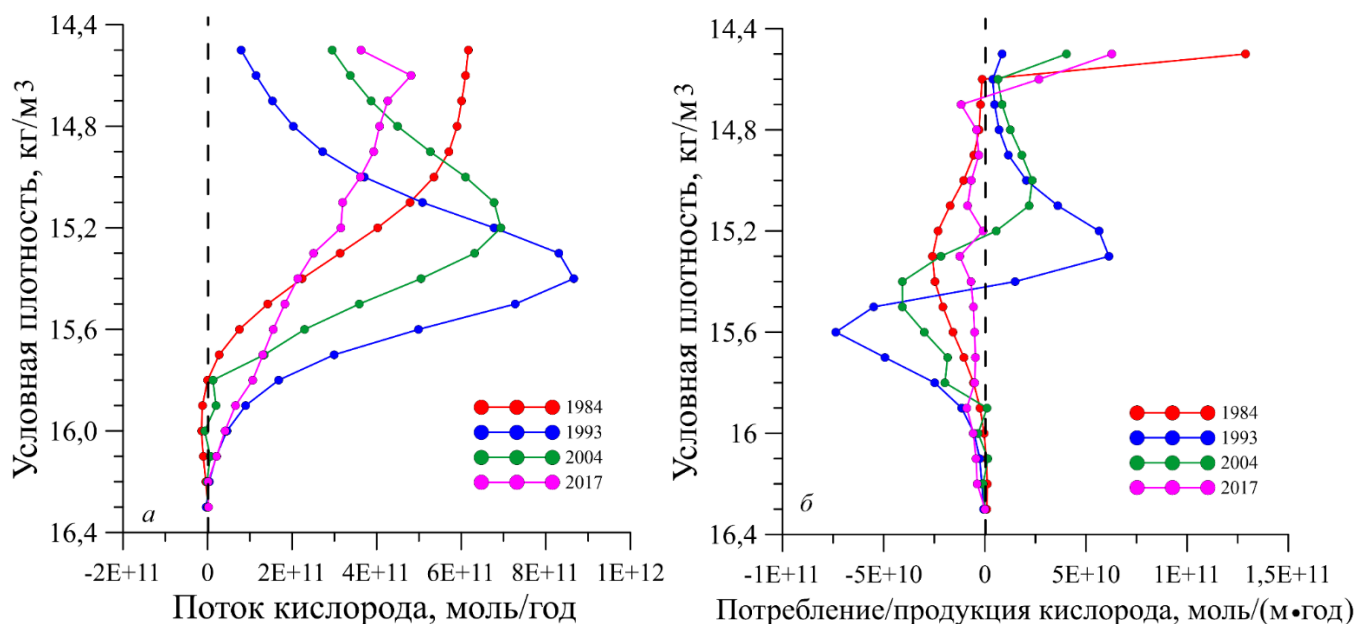


Рисунок 7 – Профили вертикальных потоков (а) и скорости потребления/продукции кислорода (б) для различных периодов

Для современного периода 2007–2019 гг. характерно дальнейшее снижение потока кислорода и его убывание с глубиной за счет снижения интенсивности вентиляции вод и повышения температуры ядра ХПС (Рисунок 7). Поступление кислорода сокращается, как и потребление, что вызвано как слабым потоком органического вещества в слой основного пикноклина, так и малым его запасом в слое ХПС, т.е. в этот период преобладающими процессами, определяющими содержание кислорода, становятся физические процессы вентиляции вод.

В **подразделе 4.3** приведен анализ изменений запаса кислорода в слое основного пикноклина. Зависимость концентрации кислорода от температуры является практически линейной (Рисунок 8). Для периода до начала активной эвтрофикации 1960–1970-х гг. характерно относительно стабильное состояние, когда его содержание определялось физическими процессами вентилирования вод. Затем начинается переход системы в другое состояние, характерное для периода эвтрофикации 1980-х – начала 1990-х гг. Период дистрофикации 1993–2005 гг. характеризуется снижением интенсивности обновления ХПС, увеличением его температуры, а также сокращением потока органического вещества в слой основного пикноклина. Т.е. система стала возвращаться к исходному состоянию по уровню первичной продукции, однако содержание кислорода остается низким по сравнению с тем, которое наблюдалось в период до эвтрофикации (Рисунок 8). Такие низкие концентрации кислорода определяются его слабым физическим потоком.

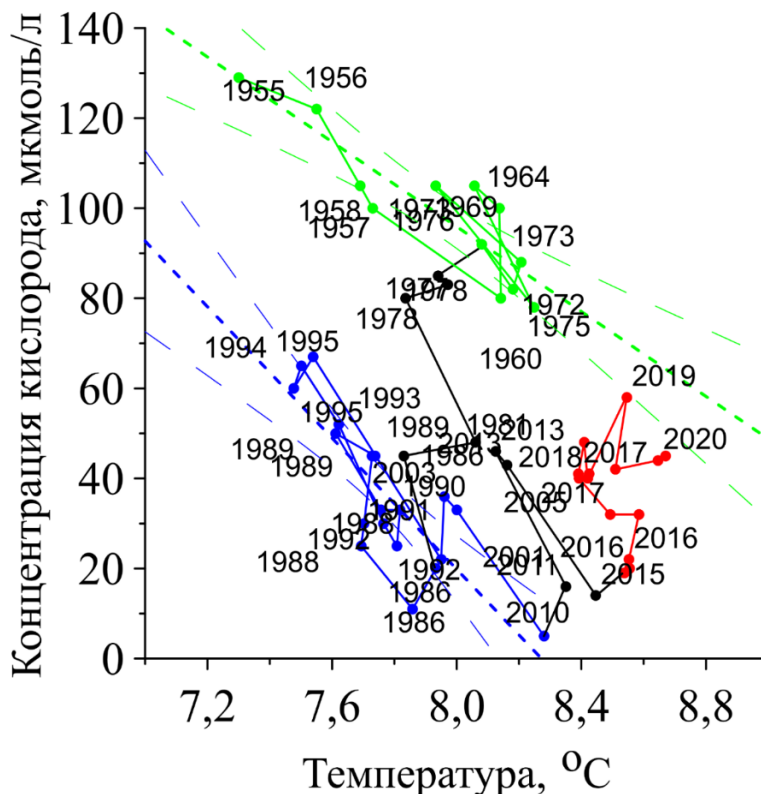


Рисунок 8 – Т-О-диаграмма вод Черного моря на глубине залегания средней части основного пикноклина ($\sigma_t = 15,4 \text{ кг/м}^3$) по многолетним данным (Масевич и Коновалов, 2022)

Начиная с 2000-х гг. поток органического вещества, продуцируемого фитопланктоном, стабилизировался, величина годовой первичной продукции колеблется в узких пределах (100 ± 8 г С/м²·год) (Рисунок 3). Однако в этот период наблюдается слабое поступление кислорода в воды ХПС. Для 2010 г. характерно самое низкое содержание кислорода (5 мкмоль/л) в средней части основного пикноклина ($\sigma_t = 15,4$ кг/м³) при высоких значениях температуры в этом слое (Рисунок 8). Однако, начиная с 2010 г., наблюдается постепенный рост содержания кислорода в средней части основного пикноклина. Концентрация кислорода увеличивается с 5 мкмоль/л в 2010 г. до 60 мкмоль/л в 2019 г. (Рисунок 8), несмотря на продолжающееся увеличение температуры в этом слое вод моря. Более того, данные современного периода о содержании кислорода указывают на то, что Черное море как единая система приближается по своим характеристикам к состоянию, характерному для периода до начала эвтрофикации в начале 1970-х гг.

В **Заключении** приводятся основные результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Диссертационная работа посвящена изучению процессов, определяющих межгодовые изменения распределения кислорода в водах глубоководной части Черного моря в современный период, в сравнении с предыдущими периодами эволюции биогеохимической структуры вод моря. Межгодовые изменения концентрации кислорода обусловлены совокупным действием изменения физического потока кислорода в результате различных условий вентиляции верхних слоев вод, а также количества поступающего органического вещества, образованного в результате первичного продуцирования фитопланктона. Именно эти процессы определяют баланс поступления и расходования кислорода в глубинных слоях вод.

Основные научные результаты представленной работы могут быть сформулированы следующим образом:

1. В 14-ти научно-исследовательских экспедициях при непосредственном участии автора были получены натурные данные о пространственном распределении концентрации кислорода и сероводорода в глубоководной части Черного моря. Это позволило пополнить базу данных современными данными. Также был обработан и подготовлен к анализу массив исторических экспедиционных данных о пространственном распределении гидрологических и гидрохимических параметров (температуре, солености, условной плотности, концентрации кислорода, сероводорода, нитратов, величины первичной продукции).

2. Проанализированы межгодовые изменения концентрации кислорода в глубоководной части Черного моря в разных слоях основного пикноклина аэробной зоны. Выделено четыре периода, отличающихся условиями вентиляции верхних слоев моря и интенсивностью поступления органического вещества в слой основного пикноклина: 1) начальный период, когда поток органического вещества низкий и термохалинные условия не отличаются от среднемноголетних значений; 2) период

эвтрофикации, отличающийся увеличенным потоком органического вещества и интенсификацией процессов вентиляции вод; 3) период дистрофикации, для которого характерно сокращение потока органического вещества и начало увеличения температуры верхних слоев вод; 4) современный период, когда трофический уровень бассейна невысок, однако наблюдается повышение температуры верхних слоев вод и снижение интенсивности их вентиляции.

3. Показано, что концентрация кислорода снижается во всех слоях основного пикноклина. Выявлена динамика межгодовой изменчивости концентрации кислорода. На горизонте верхней границы оксиклина ($\sigma_t = 14,6 \text{ кг/м}^3$) концентрация кислорода в период до эвтрофикации составляла 275 мкмоль/л, в период эвтрофикации концентрация кислорода в среднем составляла 229 ± 15 мкмоль/л, в период дистрофикации – 241 ± 34 мкмоль/л, в современный период – 194 ± 25 мкмоль/л. В центральной части оксиклина ($\sigma_t = 15,0 \text{ кг/м}^3$) концентрация кислорода в период до эвтрофикации составляла 185 мкмоль/л, в период эвтрофикации – в среднем составляла 127 ± 15 мкмоль/л, в период дистрофикации – 138 ± 33 мкмоль/л, в современный период – 105 ± 22 мкмоль/л. В нижней части оксиклина ($\sigma_t = 15,4 \text{ кг/м}^3$) концентрация кислорода в период до эвтрофикации составляла 105 мкмоль/л, в период эвтрофикации – в среднем составляла 49 ± 8 мкмоль/л, в период дистрофикации – 51 ± 19 мкмоль/л, в современный период – 36 ± 13 мкмоль/л.

Таким образом, в период эвтрофикации 1980–1992 гг. концентрации кислорода во всем слое пикноклина снизились в среднем на 45–65 мкмоль/л по сравнению с доэвтрофикационным периодом, что было вызвано увеличением потока органического вещества, на окисление которого расходовался кислород. При этом интенсификация процессов вентилирования ХПС и увеличение потока кислорода из верхних слоев не смогли компенсировать его расходование. В период дистрофикации 1993–2005 гг. концентрации кислорода во всей толще пикноклина увеличились в среднем на 10–15 мкмоль/л. Это было вызвано снижением потока органического вещества, что привело к снижению скорости расходования кислорода. В современный период 2007–2019 гг. концентрации кислорода во всей толще пикноклина снизились в среднем на 35–45 мкмоль/л по сравнению с периодом дистрофикации. Такие изменения были вызваны значительным увеличением температуры верхних слоев моря и снижением интенсивности вентиляции ХПС.

4. Проведена оценка межгодовых изменений поступления органического вещества в глубинные слои вод. Выполнен расчет величины первичной продукции на основе данных о поверхностной концентрации хлорофилла а. Показано, что в 1981–1982 гг. величина первичной продукции достигала значений $400 \text{ г С/м}^2 \cdot \text{год}$, тогда как в 1960-е гг. она изменялась в пределах $40\text{--}63 \pm 18 \text{ г С/м}^2 \cdot \text{год}$, а в 1970-е гг. составляла $220\text{--}250 \text{ г С/м}^2 \cdot \text{год}$. Во второй половине 1980-х годов наблюдалось снижение величин первичной продукции. Начиная с 1985 г. и до 1995 г. величина первичной продукции колебалась в пределах $100\text{--}180 \text{ г С/м}^2 \cdot \text{год}$ и в среднем составляла $140 \text{ г С/м}^2 \cdot \text{год}$. С 1998 г. и по настоящее время величина первичной продукции находится на уровне $\sim 100 \text{ г С/м}^2 \cdot \text{год}$. Это в 2,5 раза выше средней величины первичной продукции для

первой половины 1960-х годов, но в 4 раза ниже максимальной величины первичной продукции, наблюдавшейся в 1981–1982 гг. Таким образом, весь диапазон величин предполагает 10-ти кратное изменение интенсивности первично-продукционных процессов в Черном море за рассматриваемый период.

5. Проанализированы межгодовые изменения концентрации нитратов в слое их глубинного максимума, как показателя разложения оседающего органического вещества. Период эвтрофикации 1984–1991 гг. характеризуется высокой концентрацией нитратов в слое их глубинного максимума, в среднем составляющей $7 \pm 1,3$ мкмоль/л, что в 4 раза превышает концентрацию нитратов, наблюдающуюся в 1969 г. до начала активной эвтрофикации. В период дистрофикации 1992–2004 гг. концентрация нитратов в слое их максимума снизилась по сравнению с предыдущим периодом и в среднем составляла $4,5 \pm 0,5$ мкмоль/л. Для современного периода 2013–2019 гг. характерно дальнейшее снижение концентрации нитратов в слое их глубинного максимума, в среднем для периода она составляет $3 \pm 0,7$ мкмоль/л. Таким образом, можно сказать, что глубинный максимум нитратов имеет тенденцию к сокращению и на современном этапе практически достиг уровня значений доэвтрофикационного периода.

6. Проанализированы межгодовые изменения концентрации сероводорода в верхней части сероводородной зоны, как показателя потока органического вещества в глубинные слои вод. В период 1964–1978 гг. концентрации сероводорода в среднем составляли 11 ± 2 мкмоль/л, причем выделить статистически достоверный тренд изменения не удалось. Начиная с 1980-го года и до середины 2000-х гг. концентрации сероводорода стали возрастать и в среднем для этого периода составили 19 ± 3 мкмоль/л. В период 2007–2019 гг. концентрация сероводорода стабилизировалась и составила в среднем 21 ± 2 мкмоль/л, статистически достоверный тренд изменения концентрации сероводорода в этот период отсутствует, что свидетельствует о том, что поток органического вещества из аэробной зоны стабилизировался, а система находится вблизи равновесного состояния.

7. Поступление кислорода в глубинные слои обусловлено физическими процессами вентилирования водной толщи. По литературным данным рассмотрены межгодовые изменения температуры и вентиляции ХПС, как основного источника поступления кислорода. За последние 40 лет температура ядра ХПС возросла и в последнее десятилетие превысила 8°C . Интенсивность вентиляции глубинных слоев снижается, уровень холодозапаса ХПС падает. Это приводит к сокращению вертикальных потоков кислорода в глубинные слои в период 2007–2019 гг., его концентрации в слое основного пикноклина снижаются, по сравнению с периодом дистрофикации.

8. Анализ соотношения роли биолого-химических и физических процессов в динамике кислорода показал, что на современном этапе в экосистеме глубоководной части черноморского бассейна произошел «системный» сдвиг, обусловленный снижением интенсивности гидродинамических процессов вентилирования вод из-за потепления поверхностных вод моря.

ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ РАБОТЫ

1. Kondratev S.I., **Vidnichuk A.V. (Masevich A.V.)** Features of the Oxygen and Sulfide Vertical Distribution in the Black Sea Based on the Expedition Data Obtained by Marine Hydrophysical Institute in 1995-2015 // *Physical Oceanography*. 2018. Vol. 25. № 5. P. 390–400. doi: 10.22449/1573-160X-2018-5-390-400 (Кондратьев С.И., **Видничук А.В. (Масевич А.В.)** Особенности вертикального распределения кислорода и сероводорода в Черном море по экспедиционным данным Морского гидрофизического института в 1995–2015 годах // *Морской гидрофизический журнал*. 2018. Т. 34, № 5. С. 422–433. doi: 10.22449/0233-7584-2018-5-422-433).

2. Kondratev S.I., Vidnichuk A.V. (**Masevich A.V.**) Vertical distribution of oxygen and hydrogen sulphide in the Black Sea in 2016 // *Vestnik Moskovskogo Universiteta, Seriya 5: Geografiya*. 2020. Т. 2020, № 3. С. 91–99. (Кондратьев С.И., **Видничук А.В. (Масевич А.В.)** Вертикальное распределение кислорода и сероводорода в Черном море в 2016 г. // *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2020. №3. С. 91–99).

3. Кондратьев С.И., **Видничук А.В. (Масевич А.В.)** Локальная сезонная гипоксия и образование сероводорода в придонных водах Севастопольской бухты в 2009–2019 годах // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2020. № 2. С. 107–121. doi: 10.22449/2413-5577-2020-1-107-121.

4. **Vidnichuk A.V. (Masevich A.V.)**, Konovalov S.K. Changes in the Oxygen Regime in the Deep Part of the Black Sea in 1980–2019 // *Physical Oceanography*. 2021. Vol. 28. № 2. P. 180–190. doi: 10.22449/1573-160X-2021-2-180-190 (**Видничук А.В. (Масевич А.В.)**, Коновалов С.К. Изменение кислородного режима глубоководной части Черного моря за период 1980–2019 годы // *Морской гидрофизический журнал*. 2021. Т. 37, № 2. С. 195–206. doi: 10.22449/0233-7584-2021-2-195-206).

5. **Masevich A.V.**, Konovalov S.K. Oxygen Dynamics during the Period of Dystrophic Processes in the Black Sea // *Physical Oceanography*. 2022. Vol. 29. № 1. P. 83–97. doi: 10.22449/1573-160X-2022-1-83-97 (**Масевич А.В.**, Коновалов С.К. Динамика содержания кислорода в период дистрофических процессов в Черном море // *Морской гидрофизический журнал*. 2022. Т. 38, № 1. С. 89–104. doi: 10.22449/0233-7584-2022-1-89-104).

6. Kondratev S.I., **Masevich A.V.**, Belokopytov V.N. Position of the top boundary of the hydrogen sulfide zone over the shelf edge of the Crimea // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya*. 2022. (3). P. 97-107. (Кондратьев С.И., **Масевич А.В.**, Белокопытов В.Н. Положение верхней границы сероводородной зоны над бровкой шельфа Крыма по натурным данным 2015–2019 гг. // *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2022. №3. С. 97–107).

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук
Масевич Анны Владимировны

Подписано к печати 21.12.2022 г. Формат бумаги 60×84 1/16
Объем 0,9 п.л. Заказ № 1133 Тираж 100 экз.

Напечатано в типографии «КУПОЛ»
299053

г. Севастополь, ул. Муссонная, 46
Тел.: +7 978 784 66 32
kupol.sevastopol@mail.ru