

На правах рукописи

Гурова Юлия Сергеевна

**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ОКИСЛИТЕЛЬНО-
ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ УСЛОВИЙ НА ГРАНИЦЕ ВОДА – ДОННЫЕ
ОТЛОЖЕНИЯ В ПРИБРЕЖНЫХ РАЙОНАХ РОССИЙСКОГО
СЕКТОРА АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКОГО БАССЕЙНА**

Специальность 1.6.17 – Океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Севастополь – 2023

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

Научный руководитель: кандидат географических наук **Орехова Наталья Александровна**

Официальные оппоненты:

Завьялов Петр Олегович, доктор географических наук, профессор, член-корреспондент РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, исполняющий обязанности заместителя директора по научно-организационной работе, руководитель Лаборатории взаимодействия океана с водами суши и антропогенных процессов

Тищенко Павел Яковлевич, доктор химических наук, старший научный сотрудник, 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 науки «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук»

Защита состоится **20 марта 2024 г. в 11 ч 00 мин** 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_202309151610.html

Автореферат разослан «25» октября 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.229.01
кандидат географических наук

Харитоновна Людмила Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности. Прибрежные экосистемы Черного моря характеризуются высоким биоразнообразием, активно используются в качестве площадки для выращивания марикультур и рыбного промысла, а также являются зонами рекреации, что обуславливает их значимую роль в социально-экономической сфере региона (Современное состояние..., 2003; Вселенцы в биоразнообразии..., 2010). Комплексное влияние факторов естественного характера (ограниченная динамика вод, поступление органического вещества (ОВ) и биогенных элементов с речным стоком), а также антропогенного происхождения (дополнительное поступление органического вещества и загрязнителей с коммунально-бытовыми и ливневыми стоками, а также в результате развития селитебных зон в береговой зоне) приводит к интенсивному заиливанию донных отложений (ДО), накоплению в них органического углерода, развитию дефицита кислорода в донных отложениях и придонном слое вод. В результате это отражается на гидрохимических характеристиках придонного слоя вод и может приводить к возникновению зон экологического риска и снижению социально-экономической и рекреационной привлекательности региона. Характерными примерами таких акваторий в пределах Российского сектора Азово-Черноморского бассейна являются Каркинитский, Феодосийский и Таманский заливы, а также бухты Севастопольского региона.

Неотъемлемой частью донных отложений являются поровые воды – жидкая фаза донных отложений (Розанов и Волков, 2009). По качественному и количественному составу поровых вод можно судить о протекающих в донных отложениях биогеохимических процессах, а также об окислительно-восстановительных условиях в них.

Наличие кислорода и его концентрация в верхнем слое донных отложений, содержание и реакционная способность органического вещества, гранулометрический состав позволяют изучить вклад их в формирование характеристик окислительно-восстановительных условий на границе вода – донные отложения. Дополнительным фактором, определяющим характеристики окислительно-восстановительных условий, является динамика вод – ограниченный водообмен и стратификация водной толщи способствуют смещению окислительно-восстановительных условий в сторону восстановленных (анаэробных), изменению гидрохимических характеристик придонного слоя вод и ухудшению экологического состояния морских прибрежных экосистем.

В настоящее время достаточно подробно рассмотрены особенности вертикального распределения кислорода в водной толще Черного моря, преимущественно в глубоководных районах, получены оценки положения границ субкислородной зоны (Кондратьев и Видничук, 2018, 2020; Видничук и Коновалов, 2021). Исследованию пространственного и вертикального распределения кислорода в водной толще прибрежных районов Крыма в настоящее время практически не уделено внимания (Кондратьев, 2009, 2018). Для Севастопольского региона исследование содержания кислорода в водной толще в

течение продолжительного времени проводится на примере Севастопольской бухты (Овсяный и др., 2000; Кондратьев, 2010; Свищев и др., 2011; Заика и др., 2011).

Гранулометрический состав, влажность, содержание органического углерода – важные геохимические характеристики отложений, которые дают основу для понимания протекающих в них биогеохимических процессов (Волков, 1973, 1979; Орехова и Коновалов, 2009; Розанов и Волков, 2009). Результаты ранних исследований этих характеристик для прибрежных районов Российского сектора Азово-Черноморского бассейна отражены в работах (Шимкус и Митропольский, 1979; Митропольский и др., 1982; Геология шельфа СССР..., 1985; Шнюков и др., 2003; Гуров и др., 2014; Овсяный и др., 2015; Овсяный и Гуров, 2016), а для бухт Севастопольского региона в работах (Osadchaya et al., 2003; Романов и др., 2007; Игнатьева и др., 2008; Овсяный и др., 2009).

Изучению химического состава поровых вод донных отложений посвящен ряд работ (Горшкова, 1970; Шишкина, 1972; Розанов и Вершинин, 2002; Гурский, 2003; Konovalov et al., 2007; Орехова и Коновалов, 2009, 2018; Orekhova and Konovalov, 2019). Однако результаты, полученные в некоторых из этих работ, устарели (Горшкова, 1970; Шишкина, 1972; Розанов и Вершинин, 2002; Гурский, 2003), а более поздние работы (Konovalov et al., 2007; Орехова и Коновалов, 2018) посвящены исследованию поровых вод донных отложений в глубоководных районах Черного моря. В настоящее время наиболее подробно исследован химический состав поровых вод донных отложений Севастопольской бухты (Орехова и Коновалов, 2009, 2018; Орехова и др., 2019а).

Кроме исследования геохимического состава твердой фазы и химического состава жидкой фазы отложений важно изучать процессы и потоки веществ на границе вода – донные отложения. Особенности протекания этих процессов играют важную роль в формировании биогеохимической структуры донных отложений и придонного слоя вод, прогноза устойчивости морских экосистем и вероятности формирования в них зон экологического риска. Ранние исследования потоков вещества на границе вода-донные отложения для прибрежных районов Российского сектора Азово-Черноморского региона представлены в работах (Розанов, 1995; Вершинин и Розанов, 2002; Пахомова и др., 2003; Розанов и др., 2010; Орехова и Коновалов, 2018; Чекалов, 2019). Однако выполненные исследования не регулярны по времени и пространству и поэтому требуют дополнения и уточнения.

В отличие от исследований гидрологических и гидродинамических характеристик вод, мониторинг геохимических характеристик донных отложений и химического состава поровых вод в настоящее время, как правило, проводится эпизодически, а анализ влияния гидролого-гидрохимических характеристик придонного слоя вод и геохимических характеристик донных отложений на формирование окислительно-восстановительных условий в них для прибрежных районов Черного моря ранее не проводился (Gurova et al., 2022). Таким образом, оценка влияния гидролого-гидрофизических факторов на формирование окислительно-восстановительных условий на границе вода – донные отложения представляет большой научный и практический интерес и является актуальной

задачей. Полученные результаты в дальнейшем могут быть использованы при постановке модельных экспериментов для оценки состояния морской среды и прогноза ее изменчивости, в частности, в условиях возрастающего антропогенного воздействия и изменения климата.

Стоит отметить, что на основе данных натуральных измерений можно получить важную информацию о современном состоянии акватории, но использование результатов численных расчетов позволяет получить более обобщенное и широкомасштабное (в пространстве и времени) представление о возможных изменениях характеристик экосистемы при изменении условий и дать оценку изменения распределения исследуемых параметров морской среды. Совместное использование данных натуральных наблюдений и результатов модельных расчетов дает возможность предсказать развитие анаэробных условий в акватории и образование зон экологического риска.

Применение методов математического моделирования для оценки гидролого-гидрохимических параметров вод, а также распространения загрязняющих примесей проводится на регулярной основе, как для Черного моря (Kononov et al., 2006; Yakushev et al., 2007; Pakhomova et al., 2014), так и для бухт Севастопольского региона (Кубряков, 2004; Михайлова и Шапиро, 2005; Алексеев и др., 2012; Рябцев и Лемешко, 2014; Белокопытов и др., 2019). Однако современных исследований окислительно-восстановительных процессов в донных отложениях и водной толще и их динамики с использованием методов математического моделирования для акваторий Севастопольских бухт не проводилось.

Бентосно-пелагическая модель *Bottom RedOx Model (BROM)* (Yakushev et al., 2017), в отличие от существующих биогеохимических моделей, содержит подробное описание многих химических реакций в различных окислительно-восстановительных условиях, а также учитывает изменения форм химических элементов (Mn, Fe и S) и их соединений ($MnCl_2$, FeS, S^0 , S_2O_3), что не учитывается в большинстве работ при математическом моделировании окислительно-восстановительных процессов (Yakushev et al., 2017). Исходя из этого в настоящей работе будет использована математическая модель *BROM*. При этом, если на глубоководную часть Черного моря антропогенное влияние практически не оказывается (Система Черного моря..., 2018), а для прибрежных районов уровень антропогенной нагрузки выше (Петренко и др., 2015; Тихонова и др., 2016), то бухты Севастопольского региона одни из наиболее загрязненных акваторий Черного моря (Орехова и др., 2018а; Гуров и Котельянец, 2022). Поэтому анализ современных окислительно-восстановительных условий на границе вода – донные отложения в Севастопольской бухте, полученных с использованием натуральных данных и результатов численных расчетов, является актуальным. Полученные результаты позволят в будущем оценить вероятность возникновения зон экологического риска в исследуемом районе.

Цель и задачи исследования – целью настоящей работы является выявление особенностей развития окислительно-восстановительных условий на границе вода – донные отложения в прибрежных районах Российского сектора

Азово-Черноморского бассейна с использованием натуральных данных и результатов численного моделирования.

Для достижения цели решались следующие задачи:

1. получить новые экспериментальные данные о качественном и количественном химическом составе поровых вод донных отложений (распределение кислорода, сероводорода, окисленных и восстановленных форм железа и марганца) и геохимических характеристиках донных отложений (гранулометрический состав, содержание органического углерода);
2. определить величину потока кислорода на поверхности и в верхнем слое донных отложений;
3. выделить особенности пространственной изменчивости изучаемых характеристик поровых вод и донных отложений исследуемых акваторий;
4. оценить влияние геохимических характеристик на формирование окислительно-восстановительных условий и поток кислорода в поверхностном слое донных отложений;
5. выполнить анализ изменчивости характеристик химического состава придонных и поровых вод Севастопольской бухты при изменении условий среды с использованием модели *BROM*, оценить динамику окислительно-восстановительных условий в донных отложениях с использованием данных натуральных наблюдений и численных расчетов.

Объект исследования – придонный слой вод, донные отложения и поровые воды северо-западного района, Южного берега Крыма, Керченского пролива, северо-восточного района и бухт Севастопольского региона.

Предмет исследования – гидрохимические характеристики придонного слоя вод, геохимические характеристики донных отложений, химический состав поровых вод.

Научная новизна полученных результатов. Впервые для прибрежных районов Российского сектора Азово-Черноморского бассейна получены особенности пространственного распределения химического состава (распределение O_2 , $Mn(II)$, $Fe(II, III)$, H_2S) поровых вод верхнего слоя донных отложений. Для прибрежных районов Черного моря и бухт Севастопольского региона сформирован и проанализирован уникальный массив данных о гранулометрическом составе донных отложений, их пористости и содержании в них органического углерода, что позволило определить особенности пространственного распределения этих характеристик.

Впервые для прибрежных районов Российского сектора Азово-Черноморского бассейна и бухт Севастопольского региона установлена связь между формированием окислительно-восстановительных условий на границе вода – донные отложения и гидрологическими (скорости течений), геоморфологическими (глубина, рельеф дна), гидрохимическими характеристиками вод (содержание кислорода, степень насыщения им придонного слоя вод), геохимическими характеристиками отложений (гранулометрический состав, пористость, содержание органического углерода), на основе сформированного уникального массива данных.

Впервые для исследуемых прибрежных районов Азово-Черноморского бассейна и бухт Севастопольского региона выявлены зависимости между вертикальным распределением органического углерода в отложениях и концентрациями сероводорода в поровых водах донных отложений. Установлено, что с глубиной возрастает, как содержание органического углерода в колонках, так и концентрация сероводорода. Для бухт Севастопольского региона получена высокая положительная линейная корреляционная зависимость концентрации кислорода от доли крупно- и среднезернистой фракций в донных отложениях.

Впервые получены и проанализированы величины потока кислорода в верхнем слое донных отложений для исследуемых районов. Подтверждена зависимость величины потока кислорода от содержания органического углерода и доли крупно- и среднезернистой фракции в отложениях.

Впервые для Севастопольской бухты на основе одномерной бентосно-пелагической модели *BROM* получена оценка воздействия поступления различного количества органического вещества в акваторию на окислительно-восстановительные условия в донных отложениях и придонном слое вод.

Теоретическая и практическая значимость работы. Полученные в диссертации результаты расширяют современные представления о структуре и пространственной изменчивости геохимического состава донных отложений, характере вертикального распределения растворенных O_2 , $Mn(II)$, $Fe(II, III)$, FeS , H_2S в поровых водах отложений для мелководных акваторий (Керченский пролив), акваторий с затруднённым водообменом (Таманский залив), открытых приглубых акваторий с интенсивной динамикой вод (Южный берег Крыма, северо-восточный район), высоким уровнем антропогенного воздействия (бухты Севастопольского региона).

Полученные натурные данные показали, что главными факторами, определяющими формирование анаэробных условий (Каркинитский и Феодосийский заливы) на границе вода – донные отложения являются преобладание мелкозернистой фракции в отложениях и интенсивное накопление органического углерода при слабой динамике вод. При формировании аэробных условий (Южный берег Крыма, северо-восточный район) главным фактором, определяющим окислительно-восстановительные условия, является динамика вод. Полученные результаты в дальнейшем могут быть использованы при оценке рисков формирования и развития зон дефицита кислорода в донных отложениях и придонном слое вод, а также при разработке мер, направленных на оценку рекреационной и социально-экономической привлекательности прибрежных акваторий.

Методология и методы исследования. Пробы поверхностного слоя донных отложений были отобраны в период с 2018 г. по 2021 г. В прибрежной части Азово-Черноморского бассейна было отобрано 90 проб воды из придонного горизонта, 169 проб поверхностного слоя (0–5 см) донных отложений и 49 колонок, в бухтах Севастопольского региона – 67 проб поверхностного слоя и 11 колонок.

Для получения качественного и количественного состава поровых вод донных отложений применялся полярографический метод анализа с

использованием стеклянного Au-Hg микроэлектрода. Для определения гранулометрического состава – комбинированный метод декантации и рассеивания. Содержание органического углерода ($C_{орг}$) определялось кулонометрически на экспресс-анализаторе АН-7529 по методике, адаптированной для морских донных отложений. Влажность донного осадка определяется как выраженное в % отношение массы воды, удаляемой из пробы при высушивании, к массе этой же пробы после сушки. Пористость отложений определялась как отношения массы отложений естественной влажности к массе высушенных отложений с учетом их плотностей. Содержание растворенного кислорода в пробах воды определяли методом объемного титрования по Винклеру в модификации Карпентера.

Расчеты и построение графиков проводились с помощью программ «*Microsoft Excel*» и «*Grapher*», картографическое представление – с помощью программы «*Surfer*». Коэффициенты корреляции, а также их достоверность рассчитывались с помощью программы *Statistica*. В данной работе предполагается, что коэффициент корреляции между рассматриваемыми параметрами является статистически значимым, если уровень достоверности равен или превышает 95% ($p \leq 0,05$).

При проведении численных экспериментов по оценке окислительно – восстановительных условий и их динамики в донных отложениях и придонном слое вод применялась одномерная бентосно-пелагическая модель *Bottom RedOx Model (BROM)*.

Положения, выносимые на защиту

1. Пространственная изменчивость растворенных O_2 , $Mn(II)$, $Fe(II, III)$, H_2S в поровых водах в условиях изменения гранулометрического состава и пористости донных отложений, а также содержания в них органического углерода для прибрежных экосистем Российского сектора Азово-Черноморского бассейна на основе новых данных экспедиционных исследований МГИ РАН за период с 2018 по 2022 гг.

2. Характеристики окислительно-восстановительных условий в верхнем слое донных отложений определяются динамикой вод: высокая динамика вод способствует развитию аэробных условий (Южный берег Крыма, северо-восточный район), низкая – анаэробных (Феодосийский и Таманский заливы, бухты Севастопольского региона). На развитие анаэробных условий также оказывает влияние высокое содержание мелкозернистой фракции (>90%) и органического углерода (>1,5%) в донных отложениях.

3. Изменчивость величин потока кислорода в верхнем слое донных отложений определяется, преимущественно, долей мелкозернистой фракции, влажностью, пористостью, и в меньшей степени – содержанием органического углерода в верхнем слое отложений и кислорода в придонном слое вод.

4. По результатам численного моделирования для акватории Севастопольской бухты осуществлен прогноз изменчивости характеристик окислительно-восстановительных условий (концентрация кислорода, сероводорода, железа, содержание органического углерода). Показано, что при увеличении концентрации органического вещества в 2 раза развиваются

субкислородные условия в придонном слое вод и анаэробные условия в донных отложениях, а при уменьшении в 2 раза – аэробные условия в водной толще и субкислородные условия в отложениях.

Степень достоверности результатов проведенных исследований. Отбор донных отложений проводился с помощью дночерпателя Петерсона в соответствии с требованиями нормативных документов и межгосударственного стандарта (ГОСТ, 1984; ISO, 2004). Отбор проб морской воды из придонного горизонта осуществляли с помощью батометра.

Для получения качественного и количественного состава поровых вод (содержание растворенных O_2 , $Mn(II)$, $Fe(II, III)$, FeS , H_2S) применялся полярографический метод анализа с использованием стеклянного $Au-Hg$ микроэлектрода, соединенного с потенциостатом DLK-60 (*Analytical Instrument Systems, Inc.*). При калибровке рабочего электрода, используемого для определения растворенных кислорода и сероводорода, использовались йодометрические методы прямого и обратного объемного титрования (РД 52.10.742-2010, РД 52.10.736-2010), а для определения восстановленных железа и марганца были приготовлены калибровочные растворы. Достоверность результатов, полученных в диссертационной работе, подтверждается тем обстоятельством, что способ подготовки электрода, используемого в работе, является общепризнанным в области геохимии поровых вод и донных отложений.

Полученные в работе натурные данные не противоречат результатам исследований, опубликованных другими авторами в современных рецензируемых публикациях, для районов с похожими физико-географическими и океанологическими условиями.

Результаты расчетов получены с помощью одномерной бентосно-пелагической модели *BROM* – свободно распространяемого программного продукта с открытым кодом (<https://github.com/BottomRedoxModel>). Работы по верификации результатов численных расчетов с использованием модели *BROM* широко представлены в публикациях российских и зарубежных авторов для различных прибрежных районов по всему миру, включая Черное море.

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» (2018–2022), а также в рамках научно-исследовательского проекта РФФИ (№ 20-35-90103).

Апробация результатов. Основные результаты диссертационной работы представлялись на семинарах отдела биогеохимии моря ФГБУН ФИЦ МГИ, а также на 10 Всероссийских и международных научных конференциях.

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано в соавторстве 15 научных работ, из них 5 статей в рецензируемых научных изданиях [1–5] и 10 тезисов и материалов докладов на Всероссийских и Международных научных конференциях.

Требованиям ВАК при Минобрнауки России удовлетворяют 5 работ в рецензируемых научных изданиях [1–5]. В их числе 3 работы в рецензируемых

научных изданиях, входящих в наукометрическую базу Web of Science [2–4], 5 работ в изданиях, входящих в наукометрическую базу SCOPUS [1–5].

Личный вклад автора. Постановка задач диссертационной работы проводилась соискателем совместно с научным руководителем к. геогр. н. Н.А. Ореховой. Аналитический обзор работ по теме исследования проводился соискателем лично. Совместно с научным руководителем осуществлялся отбор проб из поверхностного слоя (0–5 см) донных отложений и их колонок в экспедициях в Камышовой и Балаклавской бухтах, а также в прибрежных районах Азово-Черноморского бассейна. Выбор методики полярографического анализа, выполнение анализа, а также расчет количественных характеристик химического состава поровых вод (содержание растворенных O_2 , Mn(II), Fe(II, III), FeS, H_2S) проводились соискателем совместно с научным руководителем. Интерпретация данных натурных измерений, а также выявление основных особенностей пространственной изменчивости геохимических характеристик донных отложений и химического состава поровых вод в прибрежных акваториях Азово-Черноморского бассейна и бухтах Севастопольского региона, отличающихся глубиной, а также особенностями гидродинамики, проводились соискателем самостоятельно. Выделение особенностей геохимической структуры донных отложений и оценка влияния различных гидролого-гидрохимических и геохимических параметров на формирование химического состава поровых вод и окислительно-восстановительных условий в них для различных районов шельфа Черного моря с использованием данных натурных наблюдений проводилось соискателем самостоятельно.

Соискателем были подготовлены массивы данных для валидации результатов численных расчетов по модели *Bottom RedOx Model (BROM)*: оценки концентрации кислорода, щелочности, pH, биогенных элементов в морской воде и содержание растворенных O_2 , Mn(II), Fe(II, III), FeS, H_2S в поровых водах по данным экспедиционных исследований. Соискатель принимал участие в проведении численных экспериментов, обработке, визуализации и анализе выходных данных модели, а также интерпретации полученных результатов.

Обсуждение результатов отдельных этапов исследования осуществлялось соискателем совместно с научным руководителем и соавторами научных публикаций. Соискатель лично представлял результаты работы на российских и международных конференциях и семинарах.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю к. геогр. наук Н.А. Ореховой (ФГБУН ФИЦ МГИ) за неоценимую помощь и ценные советы при подготовке работы, а также д-ру физ.-мат. наук Е.В. Якушеву (ФГБУН ИО РАН) за неоценимый вклад и помощь при формулировке и постановке численных расчётов, а также советы на разных этапах выполнения работы. Автор искренне признательна К.И. Гурову (ФГБУН ФИЦ МГИ) за предложения и замечания о работе, помощь при отборе проб, а также сотрудникам отдела биогеохимии моря (ФГБУН ФИЦ МГИ) за помощь в экспедиционных работах и анализ проб.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из Введения, пяти Разделов, Заключение, Списка сокращений и условных обозначений, Списка

использованных источников и Приложения. Объем диссертации составляет 182 страницы, содержит 3 таблицы и 59 рисунков. Библиографический список включает в себя 283 наименования, в том числе 57 на английском языке.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации, рассмотрена степень ее разработанности, сформулированы цели и задачи работы, методы исследования, научная новизна, основные положения, выносимые на защиту. Приводится информация о теоретической и практической значимости работы, связь с научными программами, сведения о степени достоверности и апробации результатов исследования, личный вклад автора и список публикаций по теме диссертации.

В **Разделе 1** описаны основные характеристики донных отложений.

В *подразделе 1.1* описаны твердая и жидкая фазы донных отложений. Отмечено, что твердая фаза донных отложений представлена минеральным веществом и органическими осадками, а жидкая – поровыми водами, захваченными донными отложениями в процессе их формирования (Орехова и Коновалов, 2018).

В *подразделе 1.2* рассмотрены особенности формирования окислительно-восстановительных условий в донных отложениях и механизм их смены при влиянии различных факторов. Установлено, что возникновение градиентов концентрации различных веществ (в частности кислорода) на границе вода – донные отложения приводит к формированию потоков этих веществ, тем самым влияя на океанологические характеристики придонного слоя вод. Отмечено, что донные отложения могут в значительной степени определять гидрохимическую структуру придонного слоя вод и являться источником растворенных веществ, в том числе металлов, биогенных элементов и восстановленных форм серы (Rakhomova et al., 2007; Розанов и др., 2010; Тищенко и др., 2022).

В *подразделе 1.3* выделены прямые и косвенные факторы, определяющие формирование окислительно-восстановительных условий в донных отложениях. К прямым факторам относят содержание кислорода в придонном слое вод, гранулометрический состав и пористость отложений, а также содержание в них органического углерода. К косвенным – динамику вод, глубину и рельеф дна (Геохимия..., 1979).

Отмечено, что постоянное увеличение антропогенной нагрузки на прибрежные акватории проявляется в увеличении концентрации биогенных и органических веществ. Это приводит к интенсивному накоплению органического углерода в донных отложениях и его вовлечению в биогеохимические процессы. Так, деструкция органического вещества сопровождается потреблением кислорода в поверхностном слое донных отложений и придонном слое вод, крайним случаем которого является развитие гипоксии и аноксии, появление восстановленных форм серы и железа.

В **Разделе 2** приведены физико-географические характеристики исследуемых районов. Выделены пространственные особенности гидродинамики,

гидрохимических (концентрация кислорода и степень насыщения им придонного слоя вод) и геохимических (гранулометрический состав, содержание органического углерода) характеристик, а также особенности формирования донных отложений исследуемых районов.

Подраздел 2.1 посвящен характеристике прибрежных районов Российского сектора Азово-Черноморского бассейна с различными гидродинамическим режимом и уровнем антропогенного воздействия. Отмечено, что динамика вод северо-западного района Черного моря определяется преимущественно влиянием ветровых течений (Кондратьев, 2018). Донные отложения представлены, в большей степени, средне- и мелкозернистой фракциями (Тримонис, 1976; Шнюков и др., 2003; Малахова, 2012; Гуров и др., 2014). Систематических исследований содержания $S_{орг}$ в отложениях не проводилось (Губанов и др., 2008; Котельянец и Коновалов, 2008; Овсяный и Гуров, 2016; Орехова и Овсяный, 2020; Немировская и Завьялов, 2022). Для района Южного берега Крыма характерен узкий шельф, высокая динамика вод, интенсивное антропогенное воздействие (Блатов и Иванов, 1992; Пенно и Панченко, 2014; Петренко и др., 2015; Артамонов и др., 2020). Данные о пространственном распределении фракций донных осадков и содержания в них $S_{орг}$ представлены фрагментарно (Шнюков и др. 2003; Губанов и др., 2008; Котельянец и Коновалов, 2008; Овсяный и Гуров, 2016; Орехова и Овсяный, 2020; Немировская и Завьялов, 2022). Содержание $S_{орг}$ на данном участке значительно ниже по сравнению с антропогенно нагруженными акваториями Черного моря (Митропольский и др., 1982). Район Керченского пролива является мелководным. Динамика вод в проливе и предпроливной зоне определяется ветровыми условиями (Еремеев и др., 2003). Донные отложения Керченского пролива представлены преимущественно мелкозернистым материалом, а в предпроливье – ракушей и ракушечным детритом вблизи берега (Шнюков и Паланский, 1979; Геология шельфа УССР. Керченский пролив..., 1981; Колючкина, 2008; Овсяный и др., 2015). Отмечено, что содержание $S_{орг}$ колеблется от 0,12 до 5,08% сух. масс (Шнюков и Паланский, 1979; Митропольский и др., 1982; Овсяный и др., 2015). Северо-восточный район Черного моря характеризуется узким шельфом (Качество морских вод..., 2011). Высокая динамика вод обусловлена взаимодействием Основного черноморского течения с прибрежными антициклоническими вихрями (Овчинников и др., 1996; Артамонов и др., 2017). Данные о геохимических характеристиках донных отложений представлены фрагментарно и в обобщённом виде (Глаголева, 1961; Миловидова и Кирюхина, 1985; Чаленко, 2003; Селифонова и Часовников, 2013; Евсеева и др., 2020).

Подраздел 2.2 посвящен характеристике бухт Севастопольского региона. Отмечено, что они подвержены значительной антропогенной нагрузке. Во всех бухтах ограничен водообмен (Санитарно-биологические..., 2018). В Севастопольской, Круглой, Казачьей, Камышовой и Балаклавской бухтах донные отложения представлены преимущественно песчаными алеврито-пелитовыми илами, а среднее содержание $S_{орг}$ в отложениях существенно превышает его среднюю концентрацию в донных отложениях черноморского шельфа (Миронов и Алёмов, 2003; Куфтаркова и др., 2008; Гуров и др., 2015; Котельянец и др., 2017,

2019; Соловьёва и Тихонова, 2018; Орехова и Коновалов, 2018; Миронов и др., 2018; Орехова и др., 2018, 2019).

Раздел 3 посвящен методам исследования придонного слоя вод, донных отложений и поровых вод.

В *подразделе 3.1* представлена методика отбора проб поверхностного (0–5 см) слоя и колонок донных отложений.

Подраздел 3.2 посвящен определению химического состава морской воды. Содержание растворенного кислорода в пробах воды определяли методом объемного титрования по Винклеру в модификации Карпентера (Eremeev et al., 1998). Степень насыщения кислородом придонного слоя вод (%) рассчитывали по формуле Вейса (Weiss, 1970).

В *подразделе 3.3* описан метод определения химического состава поровых вод. В настоящей работе применялся метод полярографического профилирования поровых вод донных отложений с использованием стеклянного Au-Hg микроэлектрода. Данный метод был разработан в конце 90-х гг. XX века (Brendel and Luther, 1995; Luther et al., 1998; Luther, 2008). С помощью этого метода возможно исследовать качественный и количественный состав поровых вод донных отложений и получать вертикальные профили распределения компонентов, вступающих в окислительно-восстановительные реакции, с высоким разрешением (от 0,5 мм и более). Главное достоинство метода – возможность проводить анализ в условиях, максимально приближенных к естественным (различие состоит только в давлении, что отражается на донных отложениях, отобранных с больших глубин, для прибрежных экосистем этот эффект незначителен) без разрушения пробы и дополнительной пробоподготовки (Brendel and Luther, 1995; Luther et al., 1998; Luther, 2008; Орехова и Коновалов, 2009).

В *подразделе 3.4* описаны методики определения геохимических характеристик донных отложений. Отмечено, что для исследования состава донных отложений применялся комбинированный ситовой анализ (метод декантации и рассеивания). Определение $C_{орг}$ в пробах донных отложений проводили методом сухого сжигания на экспресс анализаторе АН-7560 по методике, адаптированной для морских донных отложений. Пористость донных отложений рассчитывалась, как отношение массы отложений естественной влажности к массе высушенных отложений с учетом их плотностей.

Подраздел 3.5 посвящен оценке потоков кислорода в верхнем слое донных отложений. Потоки кислорода в поровых водах донных отложений были рассчитаны с использованием первого закона диффузии Фика путем вычисления градиента диффузии через диффузионный пограничный слой и с использованием коэффициента диффузии кислорода (Ullman and Aller, 1982; Nyacinthe et al., 2001).

Подраздел 3.6 посвящен описанию бентосно–пелагической модели *Bottom RedOx Model (BROM)* (Yakushev et al., 2017), которая в настоящей работе использовалась для моделирования динамики окислительно-восстановительных условий в толще вод и верхнем слое донных отложений. В качестве входных данных в гидрофизический блок *BROM* были использованы результаты расчета модели *Princeton Ocean Model (POM)*, адаптированной для бухт Севастопольского региона (Кубряков, 2004). Вертикальная сетка в гидрофизическом блоке модели

разделена на водную толщу, придонный слой вод и донные отложения. Шаг сетки изменяется от 2 м в водной толще до нескольких см в придонном слое вод, а на поверхности донных отложений – от 1 мм до нескольких см глубже в осадке.

В разделе 4 рассмотрены основные особенности геохимического состава донных отложений и химического состава поровых вод прибрежных районов Азово-Черноморского бассейна и бухт Севастопольского региона. Показаны особенности пространственного и вертикального распределения исследуемых параметров. Представлены основные факторы, определяющие формирование характеристик окислительно-восстановительных условий в донных отложениях исследованных районов.

В подразделе 4.1 рассмотрены особенности геохимического состава донных отложений и химического состава поровых вод прибрежных районов Азово-Черноморского бассейна.

Пункт 4.1.1 посвящен материалу исследования донных отложений прибрежных районов Азово-Черноморского бассейна. Показано, что данные были получены в ходе экспедиционных исследований на НИС «Профессор Водяницкий» в 103, 108, 110, 114, 115, 117, 122 рейсах в летний и осенний периоды 2018–2021 гг., а также в ходе экспедиций в Керченском проливе в июле и сентябре 2020 г.

Пункт 4.1.2 посвящен северо-западному району Черного моря. В данной работе в северо-западный район Черного моря объединены взморье Каламитского залива и юго-западная часть Каркинитского залива. Показано, что в северо-западном районе поверхностный слой осадка образован преимущественно илистым материалом, состоящим в большей степени из пелито-алевритовой фракции. Содержание $S_{орг}$ в поверхностном слое осадка изменялось от 0,3–0,8% сух. масс. для мелководных отложений песков и ракушняка до 2,4–3,3% сух. масс. для мелкозернистых илистых осадков мористой части Каламитского залива и открытой юго-западной части Каркинитского залива. Концентрация кислорода в придонном слое вод северо-западного района в летний период 2019 г. изменялась от 164 до 287 мкМ (от 50 до 94% нас.).

Химия поровых вод в районе Каркинитского залива определялась процессами с участием сульфатов, одним из продуктов восстановления которых являлся сероводород (Рисунок 1, а), что указывало на развитие анаэробных условий. В районе Каламитского залива отмечен дефицит кислорода и развитие субкислородных условий (Рисунок 1, б).

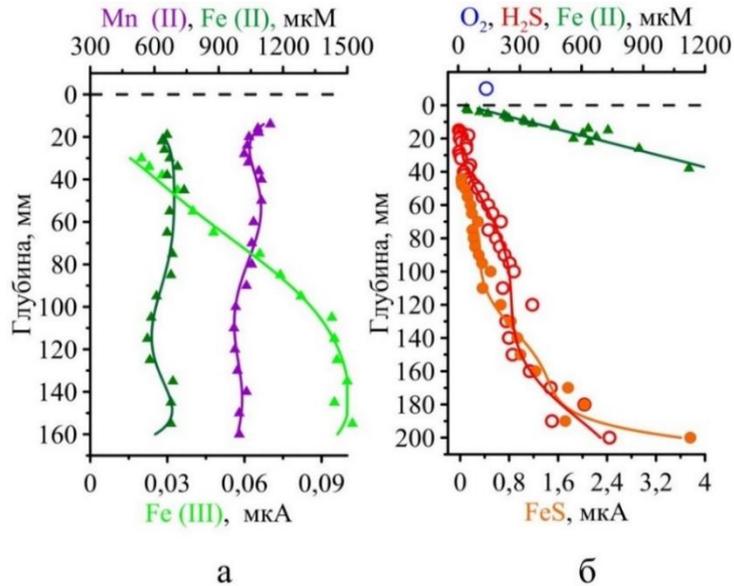


Рисунок 1 – Вертикальное распределение компонентов поровых вод донных отложений северо-западного района: а) ст. 12.1, б) ст. 158

В пункте 4.1.3 представлены результаты исследований донных отложений Южного берега Крыма (ЮБК) и Феодосийского залива. Показано, что гранулометрический состав донных отложений ЮБК разнообразен, с преобладанием доли пелитовой фракции от 55% до 89%. Максимальное содержание илистого материала (97%) отмечено для центральной части Феодосийского залива (Рисунок 2, а).

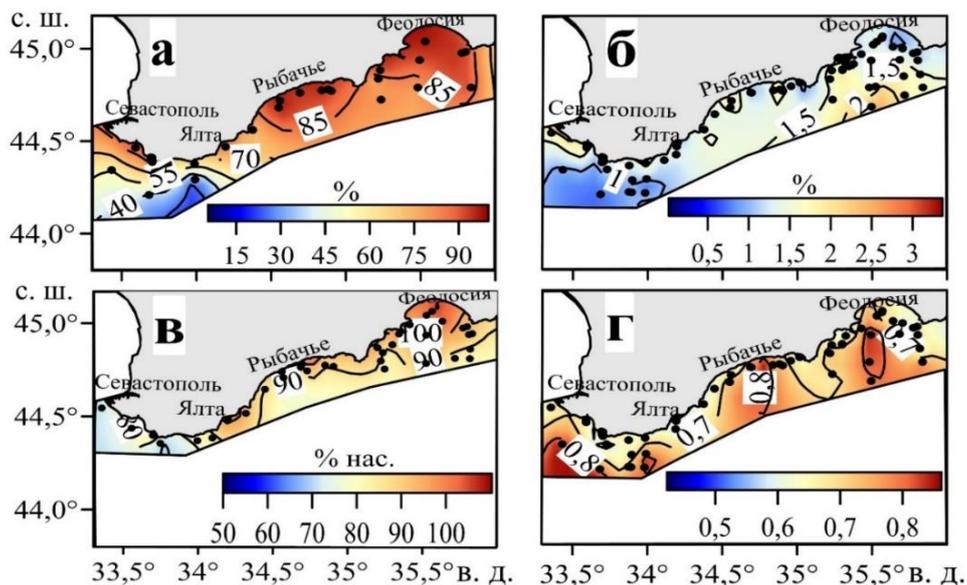


Рисунок 2 – Пространственное распределение исследуемых характеристик: а) илистой фракции, %, б) $C_{орг}$ в поверхностном слое отложений, % сух. масс., в) степени насыщения кислородом придонного слоя вод, % нас., г) пористости донных отложений для района Южного берега Крыма

Содержание $C_{орг}$ в поверхностном слое донных отложений изменялось от 2,4–2,7% сух. масс. на участке от Севастополя до залива Ласпи до 1,5% сух. масс.

в среднем на участке ЮБК от г. Ялта до г. Судак и ~1% сух. масс. в отложениях Феодосийского залива (Рисунок 2, б).

На участке ЮБК интенсивная гидродинамика способствовала насыщению придонных вод кислородом до 105% нас. (Рисунок 2, в). На большинстве станций кислород проникал в осадок до 20 мм [3] (Рисунок 3, а). Основные процессы окисления органического вещества в верхнем слое отложений происходили с участием кислорода.

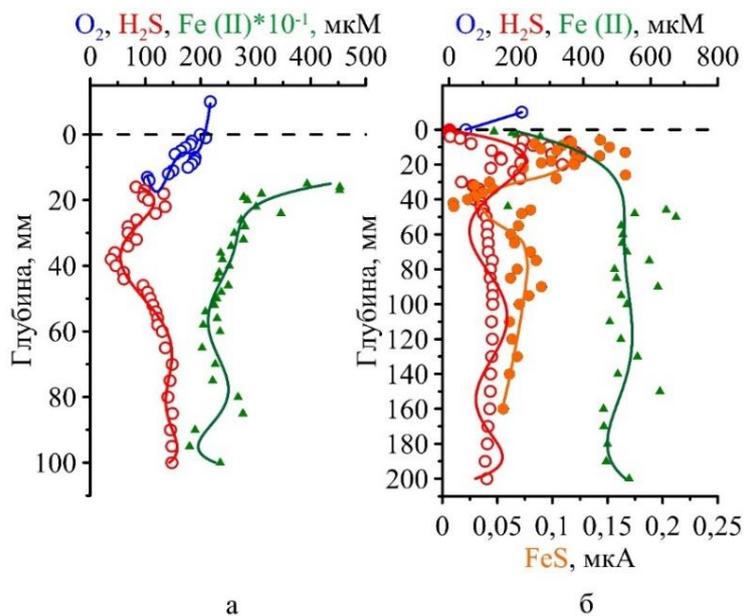


Рисунок 3 – Вертикальное распределение компонентов поровых вод донных отложений района Южного берега Крыма: а) ст. 41, б) ст. 57

Однако, несмотря на насыщение придонного слоя вод кислородом на участке ЮБК на отдельных станциях в районе г. Алушта (Рисунок 3, б) и в Феодосийском заливе сероводород присутствовал уже в поверхностном слое отложений. Основными компонентами поровых вод являлись восстановленные формы железа и серы [3].

В *пункте 4.1.4* рассмотрены особенности геохимического состава поровых вод и донных отложений Керченского пролива и предпроливья. Показано, что на участке предпроливья со стороны Черного моря преобладал крупнозернистый материал (47%), а в самом проливе, в том числе в акватории Таманского залива, преобладала фракция пелито-алевритовых илов (до 96%) (Рисунок 4, а). Такие неоднородности фракционного состава осадка определили изменчивость содержания $C_{\text{орг}}$ от 0,2–0,6% сух. масс. для песков и ракушечников предпроливной зоны до 2,3–2,8% сух. масс. для илистых отложений Таманского залива [2] (Рисунок 4, б).

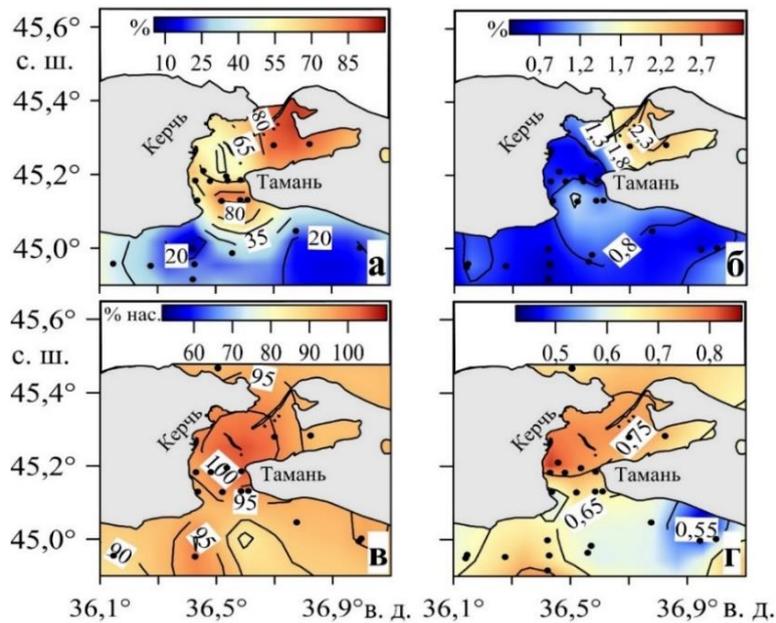


Рисунок 4 – Пространственное распределение исследуемых характеристик: а) илистой фракции, %, б) $C_{орг}$ в поверхностном слое отложений, % сух. масс., в) степени насыщения кислородом придонного слоя вод, % нас., г) пористости донных отложений для района Керченского пролива и предпроливья

Полученные данные по изменению химических характеристик поровых вод позволили выделить районы, где формирование донных отложений происходит в субкислородных и анаэробных условиях. В районе Керченского пролива со стороны Черного моря в придонном слое вод и верхнем слое донных отложений преобладали аэробные условия (Рисунок 5, б), а со стороны Азовского моря отмечено отсутствие кислорода в верхнем слое донных отложений, основные процессы протекали с участием восстановленных форм железа и марганца (Рисунок 5, а).

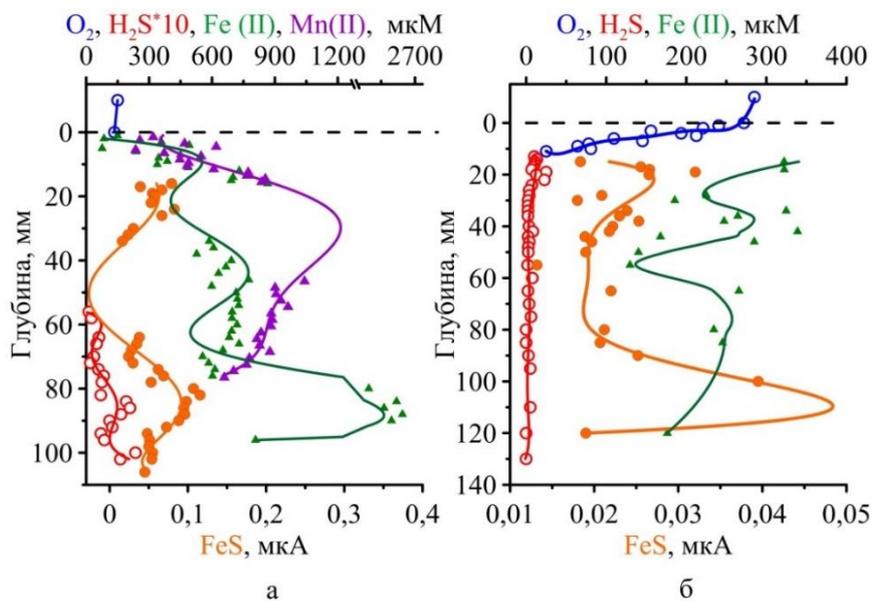


Рисунок 5 – Вертикальное распределение компонентов поровых вод донных отложений Керченского предпроливья: а) ст. 115, б) ст. 89

В юго-западной части Керченского пролива отмечены субкислородные условия, а в районе Таманского залива – анаэробные. Установлено, что затрудненный водообмен в районе Таманского залива и накопление органического вещества в донных отложениях за счет поступления значительного количества взвеси, привели к ограничению потока кислорода в придонный слой вод, а мелкодисперсный характер осадков затруднял поступление кислорода в донные отложения. В результате, это привело к заилению Таманского залива, интенсивному потреблению кислорода на окисление органического вещества и развитию анаэробных условий, появлению сероводорода уже в поверхностном слое донных отложений [2].

В *пункте 4.1.5* представлены результаты исследования геохимических характеристик донных отложений и поровых вод северо-восточного района Черного моря. Показано, что поверхностный слой осадка в северо-восточном районе образован преимущественно илистым материалом (79%), повышенная доля которого (83–97%) отмечается в районах впадения крупных рек Краснодарского края (Пшада, Туапсе, Сочи, Мзымта). Содержание $C_{орг}$ в поверхностном слое осадка в данном районе в среднем, составило 1,0% сух. масс., что практически в 2 раза ниже, чем в отложениях северо-западного района и ЮБК, а также незначительно выше, чем в районе Керченского пролива и предпроливья. В верхнем слое отложений были отмечены аэробные условия (Рисунок 6). При этом в более глубоких слоях условия в осадке изменялись от субкислородных (район г. Анапа и на участке между г. Геленджик и г. Туапсе) (Рисунок 6, а) до анаэробных (район г. Новороссийск и г. Туапсе) (Рисунок 6, б) [4].

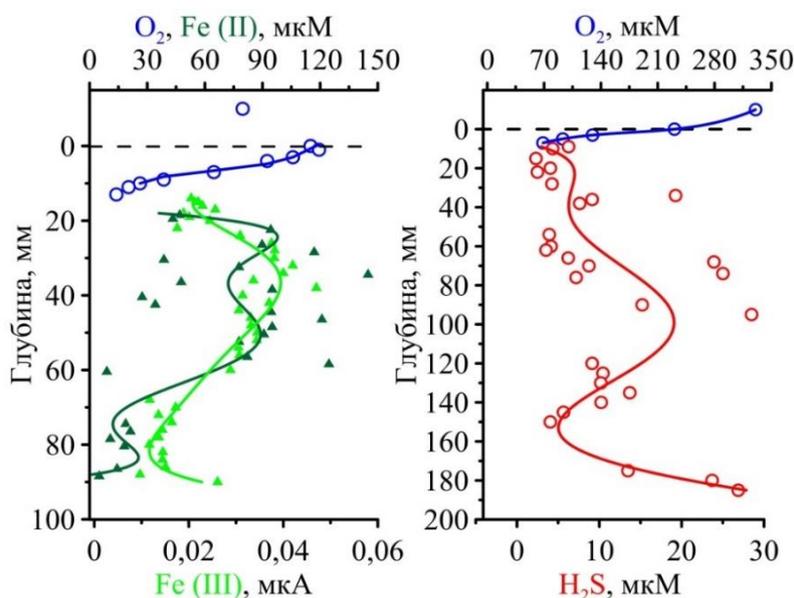


Рисунок 6 – Вертикальное распределение компонентов поровых вод донных отложений северо-восточной части Черного моря: а) ст.320, б) ст. 335

В *подразделе 4.2* рассмотрены основные особенности геохимического состава донных отложений и химического состава поровых вод бухт Севастопольского региона. Установлено, что в антропогенно нагруженных прибрежных районах (бухты Севастопольского региона) ограниченный водообмен

привел к накоплению органического вещества в донных отложениях и расходованию кислорода на его окисление, как в толще донных отложений, так и в придонном слое вод. Преобладание илистой фракции наблюдалось в среднем от 55–60% для Камышовой и Казачьей бухт до 80–84% для Круглой и Севастопольской. Это отразилось на величинах содержания $S_{орг}$ в донных отложениях: минимальные величины были отмечены для Камышовой (1,2% сух. масс.) и Круглой (1,4% сух. масс.) бухт, а максимальные для Казачьей (2,7% сух. масс.) и Севастопольской (3,7% сух. масс.). Как результат, в верхнем слое донных отложений преобладали субкислородные или анаэробные условия. Основные процессы контролировались реакциями с участием растворенных форм железа, восстановленных форм серы и продуктов их взаимодействия [1].

В *подразделе 4.3* рассмотрены факторы, определяющие современные окислительно-восстановительные условия в донных отложениях. В качестве основных факторов, определяющих окислительно-восстановительные условия в донных отложениях выделены гидрологические (динамика вод), геоморфологические (глубина и рельеф дна), гидрохимические (содержание кислорода в придонном слое вод) и геохимические (гранулометрический состав, содержание $S_{орг}$).

Благодаря полученным данным во всех исследуемых районах были выделены окислительно-восстановительные условия. Отмечено, что в верхнем слое отложений преобладали аэробные и субкислородные условия. Исключение составили Феодосийский и Таманский заливы, где были отмечены анаэробные условия (Рисунок 7) [3].

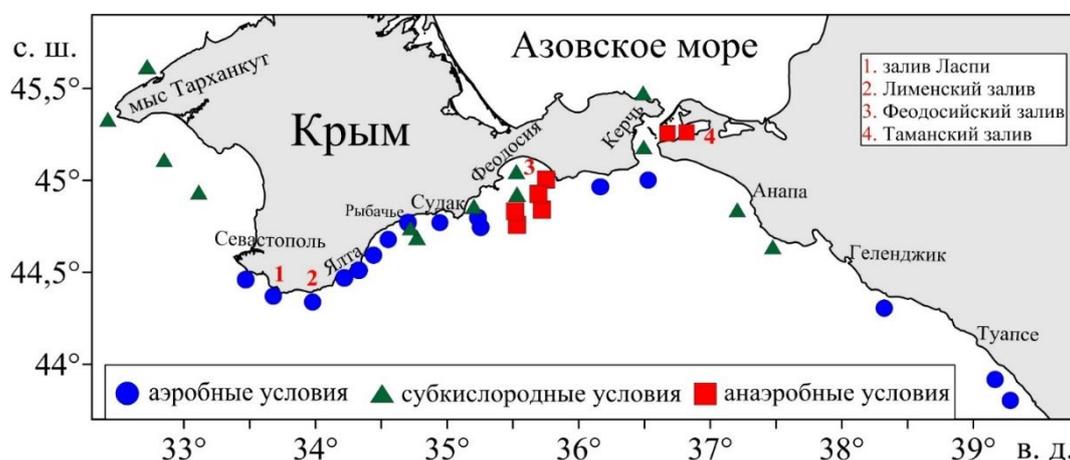


Рисунок 7 – Пространственные оценки окислительно-восстановительных условий в поверхностном слое донных отложений прибрежных районов Азово-Черноморского бассейна

Приведены оценки корреляционной зависимости распределения с глубиной степени насыщения кислородом придонного слоя вод и такие геохимические характеристики, как доля пелитовой фракции и содержание $S_{орг}$. Полученные результаты позволили подтвердить, что с глубиной уменьшается степень насыщения вод кислородом, а содержание мелкодисперстной фракции и органического углерода увеличивается. Установлены зависимости между

распределением в отложениях $C_{\text{орг}}$ и концентрациями H_2S в поровых водах донных отложений для прибрежных районов шельфа. Установлено, что с глубиной возрастает, как содержание органического углерода в колонках, так и концентрации сероводорода. Величины корреляционной зависимости исследованных параметров изменялись от 0,7 до 0,99, что указывает на взаимосвязь геохимических характеристик отложений и химического состава поровых вод. Для бухт Севастопольского региона была получена высокая (0,81) положительная линейная корреляционная зависимость концентрации кислорода от доли крупно- и среднезернистой фракций ($>0,1$ мм), а также высокая положительная линейная корреляция (0,97) между концентрацией сероводорода и содержанием $C_{\text{орг}}$ в поверхностном слое (0–5 см) отложений [3].

Подраздел 4.4 посвящен оценке потоков кислорода в верхнем слое донных отложений. Максимальные величины потока кислорода отмечены в Феодосийском заливе и на некоторых участках Южного берега Крыма (Рисунок 8). Установлена зависимость величины потока кислорода от содержания $C_{\text{орг}}$ и доли крупно- и среднезернистой фракции в отложениях. Результаты корреляционного анализа позволили подтвердить, что фракционный состав отложений определяет поток кислорода, концентрацию и глубину его проникновения, а интенсивное поступление и накопление органического углерода приводит к исчерпанию кислорода на его окисление и к появлению, в конечном итоге, сероводорода.

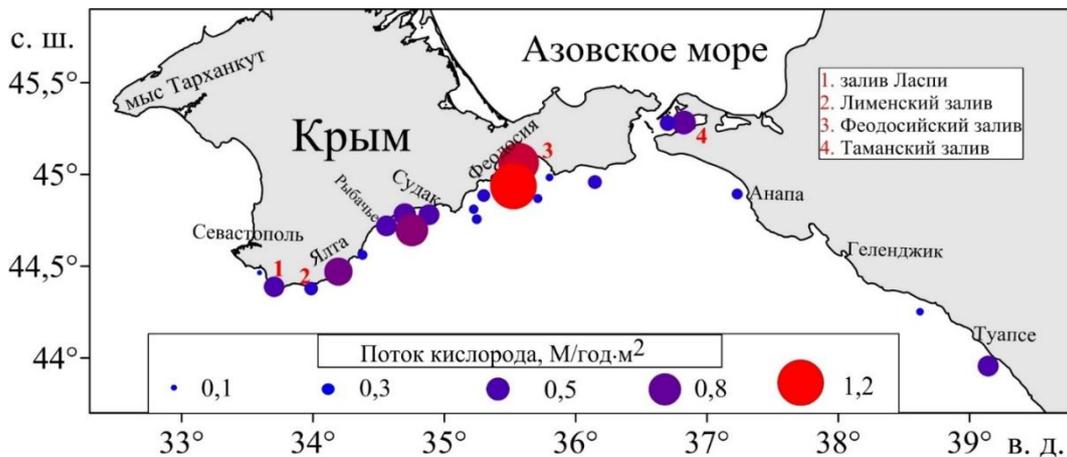


Рисунок 8 – Пространственное распределение и величина потоков кислорода в верхнем слое донных отложений

В Разделе 5 с использованием математической модели *Bottom RedOx Model (BROM)* рассмотрены характеристики окислительно-восстановительных условий на границе вода – донные отложения в Севастопольской бухте (Южная бухта).

Подраздел 5.1. посвящен валидации используемой математической модели. Для валидации модели использовались натурные данные (O_2 , Alk, pH, SiO_3 , NO_2+NO_3 , NH_4 , PO_4 – для водной толщи, Alk, pH, NO_2+NO_3 , $C_{\text{орг}}$ – для донных отложений и O_2 , Fe(II), Mn(II), H_2S – для поровых вод), полученные в ходе экспедиций по Севастопольской бухте (Южная бухта) на НИС «Гидрограф 4» в 2017–2022 гг. Показано, что модель *BROM*, использованная в работе для оценки окислительно-восстановительных условий в донных отложениях и придонном

слое вод Южной бухты, хорошо воспроизводит сезонный ход гидрохимических параметров [5].

В *подразделе 5.2* представлены результаты, полученные для Южной бухты. Смоделированное увеличение антропогенной нагрузки (увеличение концентрации ОВ в два раза от текущих условий в акватории) приводит к накоплению ОВ и снижению концентрации кислорода (до 12 мкМ), нарушению сезонного хода кислорода в придонном слое вод и развитию анаэробных условий в донных отложениях. Уменьшение поступления ОВ в два раза, способствовало тому, что в течение всего года концентрация кислорода не опускалась ниже 142 мкМ, в водной толще и придонном слое вод сохраняются аэробные условия. При этом в поровых водах отмечены восстановленные формы железа и марганца, что указывает на развитие в них субкислородных условий [5].

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы.

Диссертационная работа посвящена комплексному исследованию влияния различных факторов на формирование окислительно-восстановительных условий на границе вода – донные отложения в прибрежных районах Азово-Черноморского бассейна и бухтах Севастопольского региона. По данным литературных источников выделены гидрологические и геохимические особенности исследуемых районов. Установлены основные факторы, определяющие характеристики окислительно-восстановительных условий на границе вода – донные отложения. С использованием данных натурных наблюдений проведена оценка влияния различных гидролого-гидрохимических и геохимических характеристик на формирование окислительно-восстановительных условий для исследуемых районов. Получены новейшие экспедиционные данные, с помощью адаптированной методики полярографического анализа исследованы особенности вертикального и пространственного распределения химического профиля поровых вод донных отложений прибрежных районов Азово-Черноморского бассейна, сформирована база данных о количественных характеристиках геохимического состава отложений.

Проведена валидация численных расчетов модели *Bottom RedOx Model (BROM)* по моделированию динамики окислительно-восстановительных условий на границе вода – донные отложения при использовании сформированных массивов данных натурных наблюдений. На примере Севастопольской бухты (Южной бухты), с использованием данных натурных наблюдений и результатов численного моделирования изучена изменчивость характеристик окислительно-восстановительных условий в водной толще и поверхностном слое отложений при меняющейся антропогенной нагрузке.

Основные результаты данного исследования состоят в следующем:

1. По данным экспедиционных исследований установлено, что в районах Южного берега Крыма, северо-восточном и Керченском предпроливье сформированы аэробные условия, основные процессы окисления органического вещества контролируются, преимущественно, реакциями с участием кислорода. В северо-западном районе, Керченском проливе, Севастопольской и Балаклавской бухтах сформированы субкислородные условия, основными компонентами поровых вод, участвующими в окислительно-восстановительных процессах,

являются окисленные и восстановленные формы железа. В Феодосийском и Таманском заливах, а также в Круглой, Камышовой и Казачьей бухтах сформированы анаэробные условия, основные процессы окисления органического вещества контролируются, преимущественно, реакциями с участием сероводорода.

2. Показано влияние изменения процентного соотношения илистого материала в донных отложениях исследуемых прибрежных районов Азово-Черноморского бассейна на содержание в них органического вещества. Так, в районе Керченского предпроливья со стороны Черного моря доля илистого материала составила 28%. В Таманском и Феодосийском заливах – выросла до 96%. В бухтах доля илистой фракции изменяется от 55% в Казачьей до 84% в Круглой. В прибрежных районах Азово-Черноморского бассейна среднее содержание $C_{орг}$ в верхнем слое донных отложений изменяется от 0,6% сух. масс. в районе Керченского предпроливья до 3,3% сух. масс. в северо-западном районе, а в бухтах Севастопольского региона – от 1,2% сух. масс. в Камышовой до 3,7% сух. масс. в Севастопольской.

3. На основе данных натуральных наблюдений установлена положительная линейная зависимость между величинами потока кислорода на границе вода – донные отложения и влажностью, пористостью, а также долей мелкозернистой фракции в отложениях. Показано, что содержание органического углерода в верхнем слое отложений и концентрация кислорода в придонном слое вод не являются факторами, определяющими величины его потока.

4. Установлено, что главными факторами, определяющими формирование анаэробных условий на границе вода – донные отложения, отмеченные для Каркинитского залива и Феодосийского залива, в первом случае определяются интенсивным накоплением $C_{орг}$ (>2% сух. масс.) при низкой динамике вод, а во втором – преобладанием мелкозернистой фракции в отложениях (до 97 %). Для бухт Севастопольского региона наличие анаэробных условий обусловлено высокой долей илистой фракции и повышенным содержанием $C_{орг}$.

5. В акваториях с аэробными условиями (Южный берег Крыма, северо-восточный район) основным фактором, определяющим окислительно-восстановительные условия, является динамика вод, способствующая насыщению кислородом верхнего слоя отложений. Однако в случае изменения условий и ограничения водообмена в этих акваториях могут появиться зоны дефицита кислорода.

6. По результатам численного моделирования, увеличение концентрации органического вещества в акватории Южной бухты в два раза приводит к накоплению ОВ и снижению концентрации кислорода (до 12 мкМ), а также к нарушению сезонного хода кислорода в придонном слое вод. Результаты численных экспериментов показали, что, если среднегодовая концентрация ОВ в верхнем слое отложений увеличивается с 107 мкМ до 195 мкМ в придонном слое вод развиваются анаэробные условия.

7. По результатам численных расчетов, уменьшение поступления органического вещества в акваторию Южной бухты в два раза, способствует тому,

что в водной толще и придонном слое вод сохраняются аэробные условия в течение всего года. Однако для донных отложений подобного снижения нагрузки недостаточно. Вследствие высоких концентраций $C_{орг}$ в верхнем слое отложений (>4% сух. масс.) кислорода не хватает на его окисление, в поровых водах всё еще образуются восстановленные формы железа и марганца, что указывает на развитие там субкислородных условий.

ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ РАБОТЫ

1. **Куринная Ю.С. (Гурова Ю.С.)** Окислительно-восстановительные условия и характеристики донных отложений бухт Севастопольского региона / Ю.С. Куринная, К.И. Гуров, И.А. Забегаев, Н.А. Орехова // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2022. – № 1. – С. 42–54. doi: 10.22449/2413-5577-2022-1-42-54. (**Kurinnaya Yu.S. (Gurova Yu.S.)** Redox Conditions and Characteristics of Bottom Sediments in the Bays of the Sevastopol Region / Yu.S. Kurinnaya, K.I. Gurov, I.A. Zabegaev, N.A. Orekhova // Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea. – 2022. – 1. – P. 42–54. doi: 10.22449/2413-5577-2022-1-42-54).
2. Гуров К.И. Формирование зон экологического риска в прибрежных акваториях Керченского пролива / К.И. Гуров, **Ю.С. Гурова**, Н.А. Орехова, С.К. Коновалов // Морской гидрофизический журнал. – 2022. – Т. 38, №6. – С. 637–654. doi: 10.22449/0233-7584-2022-6-637-654. (Gurov K.I. Formation of the Ecological Risk Zones in the Coastal Water Areas of the Kerch Strait / K.I. Gurov, **Yu.S. Gurova**, N.A. Orekhova, S.K. Konovalov // Physical Oceanography. – 2022. – 29(6). – P. 619–635. doi:10.22449/1573-160X-2022-6-619-635).
3. **Gurova Y.S.** Characteristics of Bottom Sediments in the Coastal Areas of the Crimean Peninsula / Y.S. Gurova, K.I. Gurov, N.A. Orekhova // Land. – 2022. – 11. – P. 1884. doi: 10.3390/land11111884
4. Гуров К.И. Физико-химические характеристики придонных, поровых вод и донных отложений шельфа северо-восточной части Черного моря / К.И. Гуров, **Ю.С. Гурова**, Н.А. Орехова // Морской гидрофизический журнал. – 2023. – Т. 39, №4. – С. 497–511. EDN: NGXQIH. (Gurov K.I. Physical and Chemical Characteristics of the Near-Bottom and Pore Waters, and the Bottom Sediments in the Northeastern Part of the Black Sea Shelf / K.I. Gurov, Yu.S. Gurova, N.A. Orekhova // Physical Oceanography. – 2023. – 30(4). – P. 454–467.).
5. **Гурова Ю.С.** Численное моделирование динамики окислительно-восстановительных условий на границе вода – донные отложения в Севастопольской бухте / Ю.С. Гурова, Е.В. Якушев, А.В. Березина, М.О. Новиков, К.И. Гуров, Н.А. Орехова // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2023. – №2. – С. 71–90. doi: 10.29039/2413-5577-2023-2-71-90. (**Gurova Yu.S.** Numerical Modelling of RedOx Condition Dynamics at the Water-Sediment Interface in Sevastopol Bay / Yu.S. Gurova, E.V. Yakushev, A.V. Berezina, M.O. Novikov, K.I. Gurov, N.A. Orekhova // Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea. – 2023. – 2. – P. 71–90. doi: 10.29039/2413-5577-2023-2-71-90).

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук
Гуровой Юлии Сергеевны

Подписано к печати 25 сентября 2023 г.

Объем 0,9 п.л.

Заказ № 18

Формат бумаги 60×84 1/16

Тираж 100 экз.

Напечатано в типографии СРОО «Дом Солнца»
299055

г. Севастополь, ул. Хрусталева, 143

Тел.: +7 (8692) 65-60-11

cpdi@rambler.ru