

На правах рукописи



ГРЕБНЕВА ЕЛЕНА АЛЕКСАНДРОВНА

ОЦЕНКА ВОДОРОДНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ pH КАК ИНДИКАТОРА
ИЗМЕНЕНИЙ ГЕОСИСТЕМЫ ЧЁРНОГО МОРЯ ПОД ВЛИЯНИЕМ
КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ И БИОГЕОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Специальность 1.6.21 – Геоэкология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата географических наук

Санкт-Петербург – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет»

**Научный
руководитель:**

Шилин Михаил Борисович,
доктор географических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Российский государственный
гидрометеорологический университет»

**Официальные
оппоненты:**

Холодкевич Сергей Викторович,
доктор технических наук, главный научный
сотрудник, руководитель Лаборатории
биоэлектронных методов геоэкологического
мониторинга ФГБУН «Санкт-Петербургский
Федеральный исследовательский центр Российской
академии наук»

Андрианова Мария Юрьевна,
кандидат технических наук, доцент высшей школы
гидротехнического и энергетического
строительства инженерно-строительного института
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургского
политехнического университета Петра Великого»

**Ведущая
организация:**

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет», Кафедра
ихтиологии и гидробиологии

Защита диссертации состоится **17 июня 2026 г. в 15 ч 00 мин** на заседании диссертационного совета 24.2.365.01 по адресу: 195196, г. Санкт-Петербург, пр. Малоохтинский, д. 98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <https://rshu.ru/university/dissertations/> ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет».

Автореферат разослан «_____»

2026 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
24.2.365.01, к.т.н.



Я.А. Петров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень её разработанности.

Функционирование экосистемы Мирового океана неразрывно связано с абсорбцией углекислого газа, поступающего в приземный слой атмосферы. Значительная доля (порядка 30%) антропогенного CO₂ абсорбируется водной толщей. В исследовании [Quéré et al., 2018] показано, что в период 1960–2017 гг. зафиксирован трёхкратный рост объёмов выбросов этого парникового газа. Возрастающая нагрузка на карбонатную систему океана провоцирует нарушение кислотно-щелочного равновесия, что находит отражение в долгопериодном понижении водородного показателя [Gattuso, Hansson, 2011].

Водородный показатель pH – важнейшая интегральная характеристика, выражающая направленность биогеохимических процессов в морской среде. Тенденцию изменения pH, наряду с глобальным потеплением, признано считать одним из основных индикаторов антропогенного изменения климата [Schulz et al., 2009; Gattuso, Hansson, 2011; Gattuso et al., 2015]. Имеются многочисленные свидетельства долговременного подкисления поверхностного слоя вод Мирового океана. В глобальном масштабе, за период 1950–2020 гг., средняя величина pH уменьшилась с 8,15 ед. до 8,05 ед., что соответствует понижению примерно на 0,014 ед. за 10 лет [Terhaar et al., 2023]. Согласно результатам исследования [Jiang et al., 2023], с 1750 по 2000 год средний pH Мирового океана понизился на 0,11 ед. В частности, в верхнем слое вод Тихого океана между Гавайями и Аляской количество ионов водорода с 1995 по 2010 год увеличилось на 6%. В водах Северной Атлантики с 1993 по 2017 год величина pH понижалась со скоростью 0,017 ед. за десятилетие [Leseurre et al., 2020].

Повышение кислотности океанических вод приводит к уменьшению насыщения карбонатом кальция. Понижение pH уменьшает доступность карбонат-ионов CO₃²⁻, необходимых для формирования раковин из CaCO₃. Морские виды, использующие карбонат кальция для формирования защитных покровов или скелетных элементов, сталкиваются с серьёзной опасностью на протяжении всего жизненного цикла [Ross et al., 2011; Bechmann et al., 2011; Gazeau et al., 2013; Thomsen et al., 2013; Parker et al., 2013]. Понижение концентрации карбонат-ионов способно не только осложнять процесс образования кальцийсодержащих биологических структур, но и повышать риск их разрушения [Fitzer et al., 2015; Zhao et al., 2017; Wang et al., 2020]. Истончение раковины приводит к уязвимости перед хищниками и механическими повреждениями [Michaelidis et al., 2005]. В значительной степени именно поэтому анализу долгопериодной изменчивости pH в океанических водах в настоящее время уделяется большое внимание. Многочисленные исследования подтверждают, что скорость изменения pH беспрецедентна и потенциально опасна для многих кальцифицирующих морских видов.

Эти выводы актуальны для экосистемы Чёрного моря. В описанных условиях особенно уязвимыми становятся популяции мидий *Mytilus*

galloprovincialis [Michaelidis et al., 2005]. Двустворчатые моллюски *M. galloprovincialis* выполняют функцию биологических фильтров и представляют собой важнейший компонент прибрежной экосистемы. Они доминируют в макрофауне лиманов и заливов. Наряду с этим, морские хозяйства выращивают данный основной промысловый вид мидии. Большое количество ферм расположено вдоль береговой линии Чёрного моря, включая Крымский полуостров и Краснодарский край [Вялова, 2023; Набоженко, 2011; Шилин и др., 2009]. Таким образом, изучение влияния закисления на черноморскую мидию *M. galloprovincialis* приобретает не только научную, но и практическую значимость, поскольку этот доминирующий вид представляет как экологическую, так и экономическую ценность.

Отметим, что в водах Мирового океана пространственно-временная изменчивость рН хорошо изучена, и получены оценки её долгопериодной тенденции. Однако комплексные исследования климатических изменений величины рН в Чёрном море ранее не проводились. Имеющиеся данные о рН носят преимущественно эпизодический характер [Чигирин, 1930; Бруевич, 1953; Скопинцев, 1975; Куфтаркова, 1980; Коновалов, Рябинин, 1987; Симонов, Альтман, 1992], а тенденции изменения рН, представленные в работах [Polonsky, 2012; Elge, 2021], ограничены периодом второй половины XX века в связи с недостатком региональных данных. Между тем, Чёрное море представляет собой уникальную морскую геосистему [Дроздов, 2015], характеризующуюся сложным взаимодействием гидрологических, биогеохимических и климатических процессов [Yücel et al., 2026]. Являясь меромиктическим бассейном, оно обладает высокой чувствительностью к внешним воздействиям, включая климатические колебания и антропогенную нагрузку.

В связи с этим, комплексный анализ пространственно-временной изменчивости рН в Чёрном море и учёт ключевых факторов, таких как климатические изменения и биогеохимические процессы, позволит не только сформировать целостное представление о состоянии геосистемы, но и спрогнозировать её дальнейшую динамику, а также дать актуальную оценку последствий закисления для коммерчески значимых видов.

Объект исследования – водородный показатель рН в Чёрном море.

Предмет исследования – пространственно-временная изменчивость водородного показателя рН и его роль как индикатора состояния геосистемы Чёрного моря под влиянием климатических факторов и биогеохимических процессов.

Цель исследования – оценка водородного показателя рН как индикатора изменений геосистемы Чёрного моря, обусловленных климатическими факторами и биогеохимическими процессами.

В соответствии с поставленной целью сформулированы и решены следующие **научные задачи**:

1. Установить среднемноголетние характеристики пространственно-временной изменчивости рН в глубоководной части Чёрного моря, включая

особенности его распределения на различных горизонтах, вертикальную структуру и сезонную динамику.

2. Установить среднемноголетние характеристики пространственно-временной изменчивости рН в северо-западной части Чёрного моря, приустьевой акватории р. Дунай, включая особенности сезонной динамики в поверхностном и придонном горизонтах, а также определить роль речного стока в формировании выявленных закономерностей сезонного и климатического распределения рН.

3. Оценить влияние региональных гидрометеорологических характеристик, формируемых циклонической активностью в различные фазы климатических мод: Северо-Атлантическое колебание, Восточно-Атлантическое колебание, Восточно-Атлантическое–Западно-Российское и Скандинавское колебание, на пространственно-временную изменчивость водородного показателя рН в глубоководной части Чёрного моря.

4. Выполнить количественную оценку долгосрочного тренда рН в поверхностных водах Чёрного моря за период 1957–2022 гг.

5. Разработать прогностическую модель многолетней динамики рН для северо-восточной части Чёрного моря и выполнить оценку прогнозируемого воздействия снижения рН на морфометрические показатели черноморской мидии *Mytilus galloprovincialis* в долгосрочной перспективе.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертация соответствует паспорту научной специальности 1.6.21 – «Геоэкология» по пунктам:

1. «Изучение состава, строения, свойств, процессов, физических и геохимических полей геосфер Земли как среды обитания человека и других организмов»;

5. «Природная среда и индикаторы ее изменения под влиянием естественных природных процессов и хозяйственной деятельности человека (химическое и радиоактивное загрязнение биоты, почв, пород, поверхностных и подземных вод), наведенных физических полей, изменения состояния криолитозоны»;

14. «Научные основы организации геоэкологического мониторинга природотехнических систем и обеспечение их экологической безопасности, разработка средств контроля состояния окружающей среды».

Научная значимость результатов. Настоящее исследование вносит вклад в развитие геоэкологии, раскрывая комплексные взаимосвязи между климатическими изменениями и состоянием морских экосистем Чёрного моря. Работа посвящена решению актуальной научной проблемы – изучению пространственно-временной динамики водородного показателя рН под действием биогеохимических и климатических процессов в условиях изменения климата, обусловленного глобальным антропогенным воздействием на морскую среду.

Практическая значимость. Выявленные закономерности могут быть использованы при разработке стратегий адаптации прибрежных зон и морских экосистем к изменению климата, а также в системах экологического

мониторинга и прогнозирования состояния морской среды Черноморского региона.

На примере черноморской мидии *Mytilus galloprovincialis* показано, что установленные закономерности долгосрочной динамики рН и её связь с состоянием биоты демонстрируют каскадный характер антропогенного воздействия в системе «атмосфера – гидросфера – биота». Аномалии рН, формирующиеся под влиянием климатических факторов на фоне устойчивого отрицательного тренда, могут достигать экстремально низких значений в отдельные периоды. Выявленные зависимости создают основу для прогнозирования таких событий и оценки их потенциального воздействия на морские экосистемы.

Материалы и методы исследования. Работа выполнена на основе данных реанализа BLKSEA_MULTITYEAR_BGC_007_005 [Grégoire et al., 2020], исторических данных контактных наблюдений [PANGAEA Data Publisher, 2019; World Ocean Database WOD, 2019; EMODnet, 2019; SeaDataNet, 2020; Отчёт, 1963; Палубный журнал, 1963; Отчёт, 1973; Научно-технический отчет, 1974; Отчёт, 1974; Суммарное содержание взвешенного вещества, 1976; Отчёт, 1976a; Отчёт, 1976b; Отчёт, 1976c; Отчёт, 1976d; Отчёт, 1976e; Отчёт, 1976f; Отчёт, 1976g; Отчёт, 1976h; Отчёт, 1976i; Отчёт, 1976j; Отчёт, 1976k; Отчёт, 1978; Отчёт, 1991] и данных актуальных экспедиционных исследований [Отчёт, 2019, Отчёт, 2020a; Отчёт, 2020b; Отчёт, 2021a; Отчёт, 2021b; Отчёт, 2022a; Отчёт, 2022b; Отчёт, 2022c] с применением современных объективных методов обработки данных и математической статистики.

Основные положения, выносимые на защиту, содержат результаты, полученные автором впервые, что и определяет их научную новизну.

1. Закономерности пространственно-временной изменчивости рН в глубоководной части Чёрного моря, раскрывающие особенности его климатического режима, включая пространственное распределение на поверхности и в слое 50–150 м, сезонную изменчивость пространственного распределения, вертикальную структуру и внутригодовую динамику.

2. Закономерности пространственно-временной изменчивости рН в северо-западной части Чёрного моря и приустьевой акватории р. Дунай, раскрывающие особенности его климатического режима, включая пространственное распределение в зоне смешения речных и морских вод, а также сезонную динамику в поверхностном и придонном слоях.

3. Оценка вклада атмосферных процессов в формирование пространственно-временной изменчивости водородного показателя рН в поверхностном слое глубоководной части Чёрного моря.

4. Оценка климатического тренда рН в поверхностных водах глубоководной части Чёрного моря с 1957 по 2022 гг.

5. Разработка прогностической модели долгосрочной динамики рН вод северо-восточной части Чёрного моря и количественная оценка влияния прогнозируемой динамики рН на рост раковин мидии *Mytilus galloprovincialis*.

Личный вклад автора заключается в непосредственном участии на всех этапах исследования, включая подготовку и обработку исходных данных,

проведение расчётов с применением методов математической статистики и анализ полученных результатов. Автор участвовал в представлении, обсуждении и интерпретации результатов, подготовке научных публикаций. Автор лично представлял все результаты на научных конференциях, семинарах и школах.

Степень достоверности и апробация результатов исследования.

Достоверность полученных результатов обеспечивается:

1. Использованием современных данных численного моделирования из независимого массива реанализа;

2. Привлечением исторических данных контактных наблюдений из обширного числа источников: международные базы океанографических данных, научные публикации, отчёты, сборники, монографии и статьи советских и иностранных учёных, а также данные современных экспедиционных исследований;

3. Применением аппарата математической статистики;

4. Оценкой погрешностей расчета.

Основные результаты диссертационной работы выполнены при исполнении темы НИР № FSZU-2023-0002 «Беспшовное численное моделирование одновременного изменения климата, погоды, газового и аэрозольного состава атмосферы в глобальном и региональном масштабах и создание цифровой географической информационной системы обработки баз данных о составе и структуре атмосферы» ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет».

Проведенные исследования были выполнены с использованием данных наблюдений, полученных в Центре коллективного пользования НИС «Профессор Водяницкий» ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН».

Основные результаты диссертационной работы докладывались на объединённом семинаре Кафедр: Информационные технологии и системы безопасности; Высшей математики и физики Института информационных систем и геотехнологий ФГБОУ ВО «РГГМУ».

Апробация материалов исследования проведена на следующих международных и всероссийских научных конференциях и школах: Международная научно-практическая конференция «Системы контроля окружающей среды» (Севастополь, 2016–2024 гг.); Всероссийская конференция «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития» (Санкт-Петербург, 2018 г.); Всероссийская научная конференция «Моря России» (Севастополь, 2019–2024 гг.); Всероссийская онлайн научная конференция «Актуальные проблемы изучения черноморских экосистем-2020» (Севастополь, 2020 г.); VI всероссийская научная конференция молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана» (Москва, 2021 г.); 3rd Euro-Mediterranean Conference for Environmental Integration (EMCEI-3) «Recent Advances in Environmental Science from the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions» (Tunisia, 2021 г.); Международная конференция «Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования».

Климат–2023» (Москва, 2023 г.); XII и XIII международные научно-практические конференции «Морские исследования и образование: MARESEDU» (Москва, 2023–2024 гг.); всероссийская научная конференция «Неделя науки Инженерно-строительного института 2025» (Санкт-Петербург, 2025 г.); Международная научно-практическая конференция «ИНФОГЕО 2025: Единое геоинформационное пространство для обеспечения устойчивого развития регионов: от сбора данных к интеграции» (Санкт-Петербург, 2025 г.).

Публикации. Научные результаты диссертации опубликованы в 3 статьях рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, входящих в наукометрическую базу РИНЦ по специальности 1.6.21 – «Геоэкология», и опубликовано 22 тезиса докладов, представленных на всероссийских и международных конференциях.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка использованных источников. Каждая глава разбита на параграфы и завершается выводами. Диссертационная работа содержит 148 страниц машинописного текста, 44 рисунка и 8 таблиц в основном тексте работы, список использованных источников включает 206 наименований.

Благодарность. Автор выражает искреннюю признательность своему научному руководителю, д.г.н., проф. М.Б. Шилину, а также глубокую благодарность д.т.н., проф. Е.П. Истомину за внимательное отношение и ценные советы при обсуждении результатов работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена актуальность выбранной темы исследования, поставлены цель и задачи, описаны теоретическая и практическая значимость работы, приведены основные положения, выносимые на защиту определяющие новизну диссертационного исследования, а также личный вклад автора, апробация полученных результатов и публикации по теме диссертации.

Глава 1 посвящена анализу водородного показателя рН как ключевой характеристики кислотно-щелочного баланса водной среды, его роли в природных процессах и влиянию антропогенных факторов на его изменчивость. Рассматриваются исторические и современные методы измерения рН, его пространственно-временная динамика в Мировом океане и специфика распределения в Чёрном море. Особое внимание уделено проблеме подкисления океана, вызванного увеличением концентрации CO_2 в атмосфере, а также сложностям интерпретации долгопериодных тенденций изменения рН в Чёрном море из-за недостаточного количества данных наблюдений.

В параграфе 1.1 дано классическое определение водородного показателя рН, приведены химические уравнения процессов, влияющих на его величину: растворение CO_2 , фотосинтез и дыхание. Показано, что естественные биологические и физико-химические факторы могут вызывать колебания рН на единицу и более.

В параграфе 1.2 приведён исторический обзор исследований рН в Мировом океане – от первых измерений Рингера (1908 г.) до современных глобальных программ мониторинга (WOCE–JGOFS). Описано пространственное распределение рН в диапазоне 7,8–8,4 ед. для поверхностных вод и его вертикальная структура. Приведены доказательства антропогенного подкисления: понижение среднего рН на 0,1 ед. с начала индустриальной эры или рост концентрации H^+ на 26%, скорость изменений рН от –0,0014 до –0,0024 ед. в год. Показано негативное воздействие понижения рН на кальцифицирующие организмы, особенно на двустворчатые моллюски. Согласно результатам численных экспериментов к 2100 году ожидается понижение рН на 0,3–0,5 ед., а скорость современного подкисления в 100 раз превышает естественные колебания рН за последние 300 млн лет.

В параграфе 1.3 проанализированы особенности распределения рН в Чёрном море как крупнейшем меромиктическом бассейне. Приведены исторические измерения рН от экспедиции Н.И. Андрусова 1890–1891 гг. до работ 1950–1980-х гг. По данным экспедиций 1970–1980-х гг. на северо-западном шельфе рН составляет 7,8–8,0 ед.; на Крымском и Кавказском побережьях – летом 8,1–8,4 ед., зимой 7,9–8,1 ед. По сравнению с водами Тихого океана в поверхностном слое Чёрного моря обнаружены более высокие значения рН (на 0,1–0,3 ед.), а в глубинном слое – более низкие (на 0,3 ед.). Описана роль редокс-стратификации и сероводородной зоны в формировании вертикального распределения рН.

Установлена высокая чувствительность черноморской мидии *Mytilus galloprovincialis* к изменениям рН, что создаёт серьёзные угрозы для экосистемы и аквакультуры региона. Приведены данные о масштабах регионального производства мидий. Так, например, в Краснодарском крае в 2025 году выращено 281 т мидий. В Крыму на 2025 год работает 137 предприятий аквакультуры, включая 25 мидийно-устричных ферм.

Для оценки реальной опасности закисления необходимо знать, как изменяется рН в Чёрном море в долгосрочной перспективе. Однако опубликованные оценки трендов рН противоречивы: понижение на –0,2 ед. за 10 лет в 1980–2000 гг. и рост на 0,104 ед. в 2005–2014 гг., что объясняется естественной изменчивостью и неоднородностью данных.

Таким образом, недостаточное количество данных измерений рН в регионе и их высокая пространственная неоднородность затрудняет выявление достоверных долгосрочных тенденций, которые могут сигнализировать о глобальных изменениях в экосистеме Чёрного моря.

Глава 2 посвящена характеристике собранного материала и методов его обработки. В параграфе 2.1 описаны источники данных и методы определения рН в Чёрном море. Для диссертационного исследования объём первичной гидрохимической информации по водородному показателю рН был извлечён из архивных фондов, содержащих материалы экспедиций научно-исследовательских судов «Миклухо-Маклай», «Михаил Ломоносов», «Академик Вернадский», «Академик Ковалевский» и «Профессор

Водяницкий», а также из международных баз данных PANGAEA, WOD, EMODnet и SeaDataNet.

Приведён обзор основных этапов изучения рН в Чёрном море. Ранние экспедиции 1920–1950-х годов осуществлялись под руководством Н.И. Чигирина. В советский период 1960–1980-х годов масштабные исследования Института океанологии АН СССР проводились с борта научно-исследовательских судов «Академик Курчатов», «Михаил Ломоносов» и «Витязь». Международный этап исследований 1990–2010-х годов проходил с участием научно-исследовательских судов R/V Knorr и R/V Bilim. В современный период 2019–2022 годов традицию комплексных наблюдений продолжили регулярные экспедиции на научно-исследовательском судне «Профессор Водяницкий».

В данном параграфе также описаны методы определения рН. До второй половины 1970-х годов использовался колориметрический метод с точностью до 0,1 ед. За тем было принято использовать потенциометрический метод с абсолютной средней систематической погрешностью от 0,01 до 0,04 ед., а серийные рН-метры обеспечивали точность не более 0,02 ед.

В параграфе 2.1.1 приводится детальная характеристика массива данных о рН для глубоководной части Чёрного моря за период с 1957 по 1996 год. Акватория исследования ограничена изобатой 1000 метров с координатами 41,23°–44,65° с. ш. 29°–41,3° в. д. (рис. 1). Представлена методология контроля качества и пространственно-временной обработки данных. Описан алгоритм получения среднемноголетних полей и сезонной динамики. Анализ внутригодовой эволюции величин рН выполнялся методом гармонического анализа. Массив данных включает 6989 стационарных наблюдений. В период 1957–1976 гг. наибольшее количество измерений в Чёрном море приходилось на четыре месяца с июня по сентябрь (51%), а в период 1977–1996 гг. измерения внутри года распределены более равномерно. Пространственное распределение станций для каждого отдельного месяца неравномерно. Для иллюстрации на рисунке 1 показаны два типичных пространственных распределения станций с регистрацией величины рН, выполненных на протяжении месяца в августе 1966 г. (рис. 1, а) и в декабре 1988 г. (рис. 1, б).

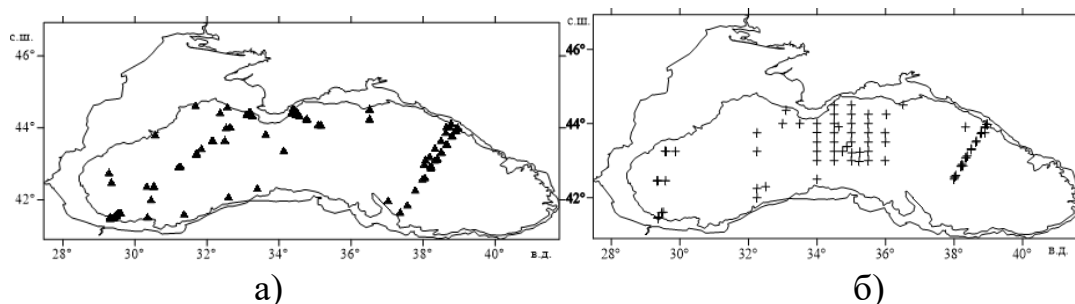


Рисунок 1 – Пространственное распределение станций, на которых измерялась величина рН на поверхности моря в августе 1966 г. (а) и декабре 1988 г. (б)

В параграфе 2.1.2 приведены характеристики данных наблюдений рН в северо-западной части Чёрного моря, приустьевой акватории реки Дунай. Район исследования (рис. 2) охватывает акваторию от дельты Дуная до зоны преобладания морских вод, ограниченную координатами 44,9°–45,8° с. ш. и 29,7°–30,8° в. д., а также участок, непосредственно примыкающий к дельте в пределах изогалины 6‰ с координатами 45°–45,55° с. ш. и 29,7°–30,2° в. д.



Рисунок 2 – Карта-схема северо-западной части Чёрного моря и района исследования приустьевой акватории реки Дунай

Анализ выполнен для двух горизонтов: поверхностного (0 метров) и придонного (40 метров). Количество измерений в окрестности приустьевого взморья составило 4549 на поверхности и 2499 на горизонте 40 метров, а в дельтовой зоне – 1826 на поверхности.

Пространственно-временное распределение станций характеризуется выраженной неоднородностью. Наибольшая обеспеченность измерениями приходится на тёплый период года с мая по октябрь. Для восстановления пропущенных значений применялся метод оптимальной интерполяции, на основе которого получено среднемноголетнее поле рН. Сезонный ход рассчитан методом гармонического анализа.

В параграфе 2.2 описаны данные современных экспедиционных исследований рН в Чёрном море за период 2019–2022 гг. Исследуемая акватория ограничена координатами 43°–46° с. ш. и 31,5°–40° в. д. и включает шельфовые зоны Крымского и Кавказского побережий, а также глубоководные участки в пределах исключительной экономической зоны Российской Федерации (рис. 3).

Определение рН на борту судна проводилось потенциометрическим методом. Для решения поставленных задач использовались станции только в глубоководной части моря с глубинами более 1000 метров, что обеспечивает сопоставимость результатов с историческими наблюдениями. В заключительной части параграфа 2.2 представлена обобщающая таблица, содержащая периоды исследований, количество станций и основные статистические характеристики значений рН, рассчитанные по каждой съёмке.

Эти материалы составляют эмпирическую основу для последующего анализа современных тенденций изменения рН вод Чёрного моря.

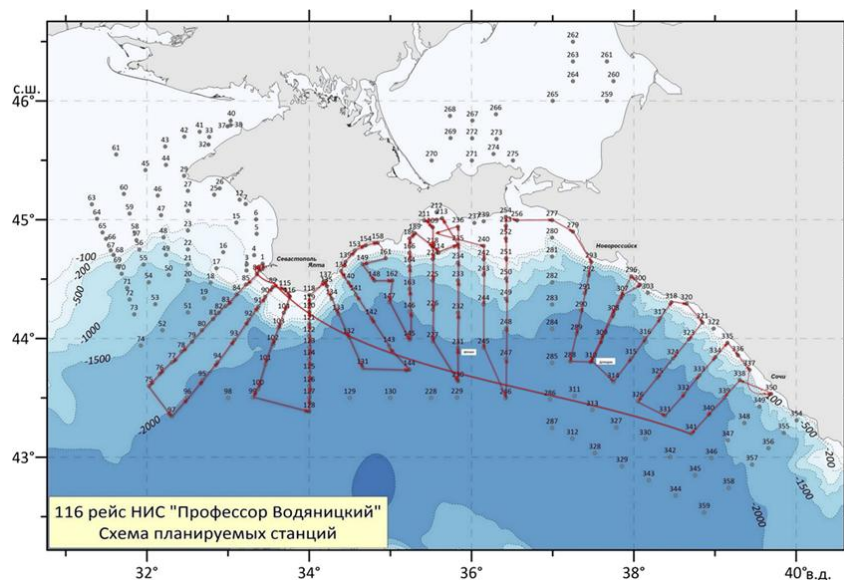


Рисунок 3 – Схема района исследований и выполненных станций в экспедиции 116-го рейса НИС «Профессор Водяницкий» 22 апреля – 15 мая 2021 г.

В параграфе 2.3 приводится описание реанализа CMEMS BS-Biogeochemistry (версия BLKSEA_MULTIYEAR_BGC_007_005). Численное моделирование изменчивости водородного показателя рН в Чёрном море выполнено на основе гидродинамической модели NEMO 4.2 с биогеохимическим модулем VAMNVI с усвоением доступных натуральных и спутниковых наблюдений. Массив реанализа содержит среднемесячные и среднесуточные поля данных с высоким пространственным разрешением (~2,5 км) на 59 горизонтах за период 1992–2022 гг.

В параграфе 2.4 описана процедура верификации данных реанализа CMEMS BS-Biogeochemistry с экспедиционными измерениями рН 2019–2020 гг. Сопоставимость данных выполнена на основе пространственно-временной интерполяции экспедиционных измерений в узлы пространственной сетки реанализа. Изменчивость среднесуточных величин рН по двум выборкам характеризуется высокой степенью согласованности. Коэффициент корреляции между ними для разных месяцев года составляет 0,75–0,91. Анализ возможных источников расхождений указывает на потенциальные погрешности экспедиционных измерений, включая особенности калибровки электродов и температурные эффекты. Несмотря на выявленное отклонение, величины рН, воспроизводимые моделью, хорошо согласуются с натурными измерениями, что подтверждает адекватность использования данных реанализа для изучения изменчивости рН в Чёрном море.

В параграфе 2.5 приводится информация об использованных дополнительных источниках данных. Это данные по объёму стока реки Дунай и размерные характеристики двустворчатых моллюсков *Mytilus*

galloprovincialis. Оценка сезонного хода реки Дунай рассчитана с использованием гармонического анализа.

В главе 3 проанализированы среднемноголетние характеристики водородного показателя рН в Чёрном море. В параграфе 3.1 рассматриваются его пространственное распределение и внутригодовая динамика в глубоководной части моря. В параграфе 3.1.1 описано среднемноголетнее поле рН на поверхности моря. Анализ показал, что среднее значение составляет 8,38 ед., а пониженные величины от 8,33 ед. до 8,41 ед. соответствуют центрам циклонических круговоротов, связанных с подъёмом глубинных вод (рис. 4).

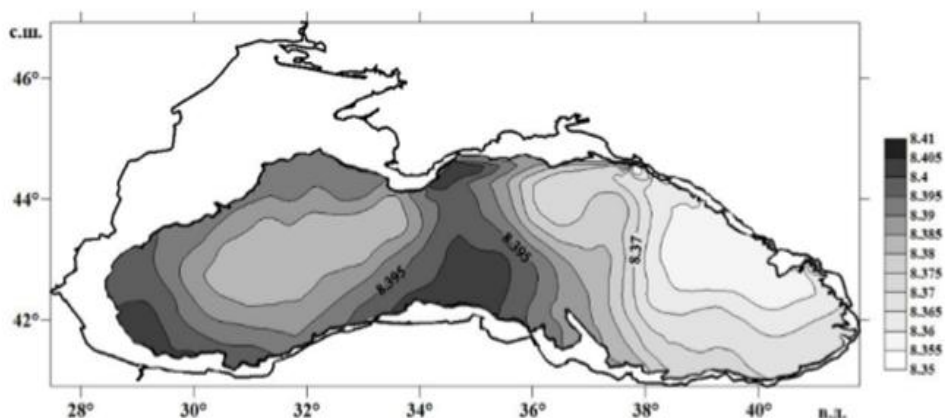


Рисунок 4 – Среднемноголетнее распределение величины рН на поверхности в центральной глубоководной части Чёрного моря

В параграфе 3.1.2 описано пространственное распределение рН в слое 50–150 метров. Обнаружено понижение значений рН с глубиной от 8,22–8,38 ед. на горизонте 50 метров до 7,86–8,22 ед. на горизонте 100 метров. Показано, что минимальные значения рН приурочены к центрам циклонических круговоротов: от 8,22–8,26 ед. на глубине 50 метров до 7,86–7,98 ед. на глубине 100 метров. Причём усиление этих экстремумов с глубиной выражено ярче (рис. 5).

Параграф 3.1.3 посвящён сезонной изменчивости горизонтального распределения рН, которая определяется изменениями циркуляции вод и интенсивностью вертикальных движений в верхнем слое моря. Установлено, что в феврале–марте в период максимальной активности циклонической циркуляции зафиксированы наиболее низкие значения рН от 8,15 ед. до 8,25 ед., тогда как в августе–сентябре при ослаблении восходящих потоков диапазон значений смещается в сторону более высоких величин от 8,26 ед. до 8,30 ед. Выявленные закономерности подтверждают связь пространственно-временной изменчивости рН с динамическими процессами в Чёрном море.

В параграфе 3.1.4 обсуждается сезонный ход водородного показателя рН в поверхностном слое глубоководной части Чёрного моря. Внутригодовая эволюция рН хорошо аппроксимируется суммой годовой и полугодовой гармоник, совокупный вклад которых в дисперсию среднемесячных значений

превышает 85%, составляя 49% и 36% соответственно. Амплитуда внутригодового хода достигает 0,05 ед.

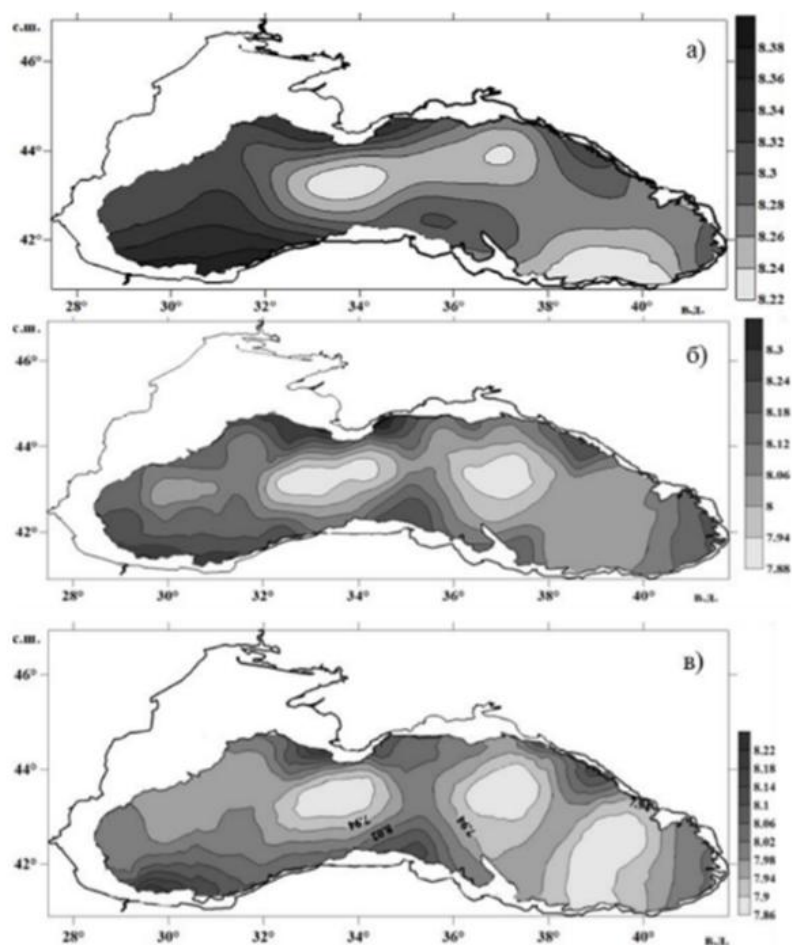


Рисунок 5 – Среднегодовое распределение величины рН на горизонтах 50 м (а); 75 м (б); 100 м (в) в глубоководной части Чёрного моря

В годовом цикле рН выделяются два максимума – март и октябрь, обусловленные активизацией фотосинтеза фитопланктона, и два минимума. Основной минимум приходится на июль и связан с летней депрессией фитопланктона, а вторичный минимум наблюдается в декабре–январе из-за низкой интенсивности фотосинтеза и усиления вертикального перемешивания, выносящего на поверхность воды с пониженным рН (рис. 6).

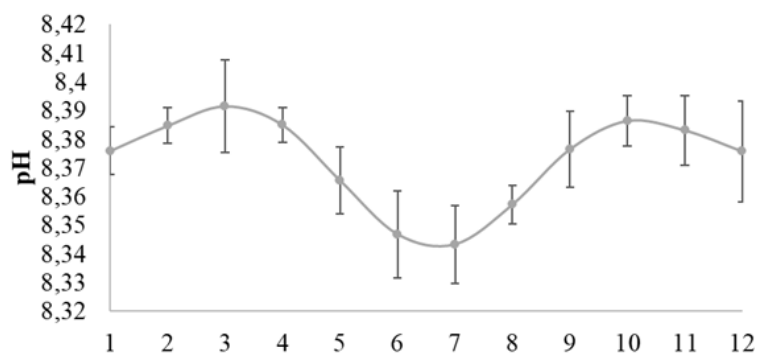


Рисунок 6 – Внутригодовая динамика величины рН поверхностного слоя вод глубоководной части Чёрного моря. Вертикальные отрезки – среднеквадратическое отклонение среднемесячной величины рН

В параграфе 3.1.5 приводится вертикальная структура рН и её сезонная изменчивость. Продемонстрировано понижение рН с глубиной от 8,38 ед. на поверхности до менее 8,0 ед. на горизонте 150 м. Сезонная изменчивость рН наиболее выражена в верхнем 30 м слое, а на глубинах свыше 50 м рН испытывает монотонное понижение до 7,97 ед. на горизонте 150 м (рис. 7, а). На горизонте 10 м зафиксирован слабый подповерхностный максимум (до 8,39 ед.), который имеет сезонный характер (рис. 7, б).

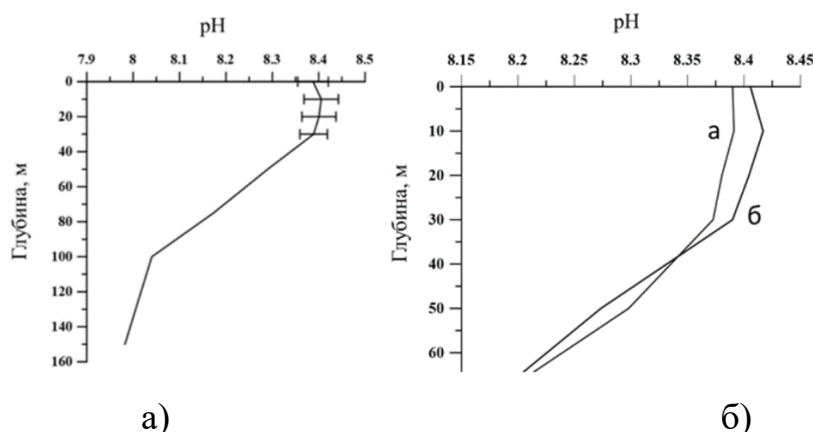


Рисунок 7 – (а) Климатическое распределение величины рН в слое 0–150 м с обозначенной величиной стандартного отклонения, обусловленного сезонной изменчивостью рН в верхнем 30-метровом слое. (б) Усредненные профили величины рН в глубоководной части Чёрного моря: а) январь – март; б) сентябрь – ноябрь

Природа этого максимума связана с процессами фотосинтеза, так как в фотическом слое на динамику рН оказывают влияние биологические процессы – дыхание и фотосинтез, интенсивность которых зависит от сезона. В осенний период при активном развитии фитопланктона рН в подповерхностном слое может локально достигать 8,42 ед. Тогда как зимой, вследствие интенсивного перемешивания водной толщи, сезонный максимум рН сглаживается и не выражен (рис. 7, б).

В параграфе 3.2 рассмотрены среднееголетние характеристики водородного показателя рН в северо-западной части Чёрного моря, включая приустьевую акваторию р. Дунай. В параграфе 3.2.1 описано пространственное распределение рН в поверхностных водах. Средние значения рН здесь варьируют в пределах от 8,42 ед. до 8,47 ед., достигая максимума в зоне смешения речных и морских вод (рис. 8). Пониженные величины рН (от 8,42 ед. до 8,44 ед.) вблизи дельты Дуная объясняются влиянием речных вод, обладающих более низкими значениями рН (от 7,50 ед. до 8,30 ед.). Формирование локального максимума рН к востоку и юго-востоку от дельты р. Дунай обусловлено поступлением биогенно обогащённых речных вод, способствующих усилению стратификации и интенсивному развитию фитопланктона, что в отдельные периоды может повышать рН до 9,00 ед.

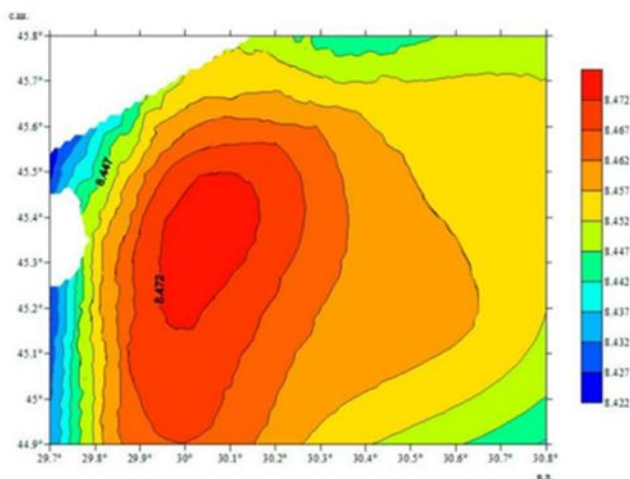


Рисунок 8 – Среднемноголетнее поле рН в акватории приустьевого взморья р. Дунай

В параграфе 3.2.2 проанализирована внутригодовая динамика рН в приустьевой акватории р. Дунай (рис. 9). Сезонная эволюция рН в поверхностном слое в значительной степени (более 83%) описывается годовой гармоникой с амплитудой 0,22 ед. Установлено, что рост рН весной и летом до 8,57 ед. обусловлен прогревом вод, поступлением биогенов с речным стоком и последующим цветением фитопланктона, сопровождающимся усилением фотосинтеза. Летний максимум рН также частично объясняется снижением растворимости CO_2 при повышении температуры воды. В придонном слое на горизонте 40 м годовая гармоника объясняет 78% дисперсии при амплитуде 0,16 ед. Фотосинтетическая активность здесь практически отсутствует из-за высокой мутности воды, а процессы деструкции органического вещества доминируют, что сопровождается выделением CO_2 и понижением рН. В период летней стратификации в придонном слое рН может снижаться до 7,40 ед. Сезонная динамика в придонном горизонте характеризуется летним минимумом рН в августе (до 8,24 ед.) и зимним максимумом в феврале (до 8,40 ед.) (рис. 9).

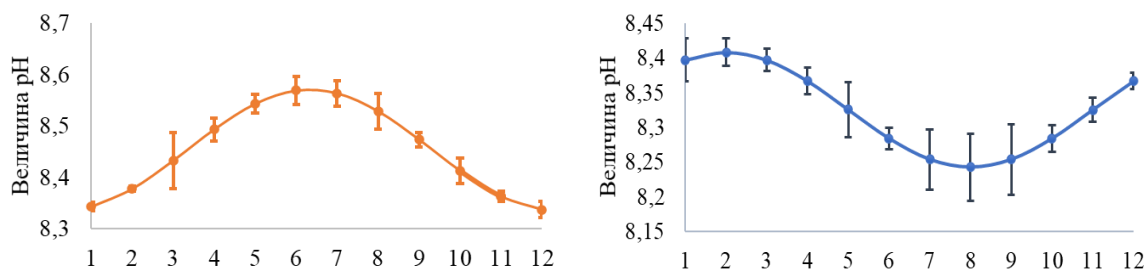


Рисунок 9 – Внутригодовой цикл рН в северо-западной части Чёрного моря, приустьевой акватории р. Дунай в поверхностном слое (слева) и в придонном слое моря (справа). Вертикальные отрезки – стандартное отклонение

В непосредственной близости к дельте реки (45° – $45,55^{\circ}$ с. ш., $29,7^{\circ}$ – $30,2^{\circ}$ в. д.), сезонный ход рН аппроксимирует сумма двух гармоник: годовая с вкладом 73% и четырехмесячная с вкладом 12,5%. Четырехмесячный сигнал

характеризуется минимумом в мае с величиной рН равной 8,47 ед. Этот сигнал отсутствует в области смешения двух водных масс речных и морских (приустьевом взморье). Вероятно, это обусловлено сезонной динамикой стока реки. Максимальные значения рН отмечаются летом, в июле – 8,6 ед., минимальные зимой, январь – 8,29 ед., декабрь – 8,32 ед. (рис. 10).

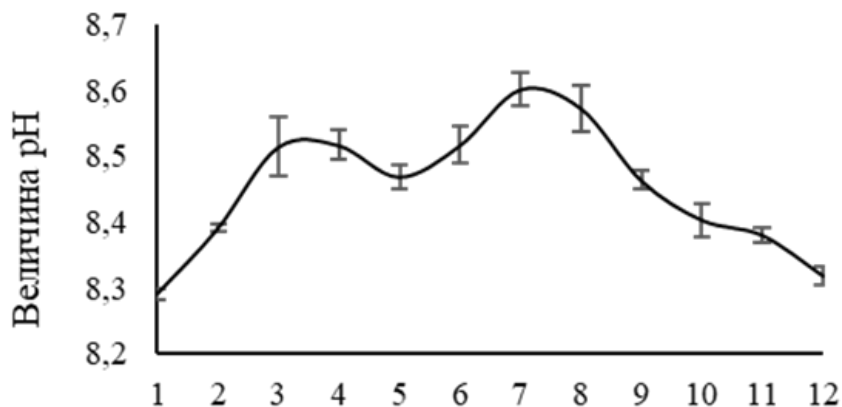


Рисунок 10 – Сезонный ход величины рН в акватории, прилегающей к устью р. Дунай

Корреляционный анализ выявил тесную положительную связь ($r = 0,95$) между сезонным ходом рН и стоком Дуная с двухмесячным запаздыванием в зоне смешения вод, что связано с динамикой хлорофилла-а. В зоне прямого влияния стока, близ дельты, временное запаздывание увеличивается до трёх месяцев.

Параграф 3.3 посвящён межгодовой изменчивости рН в глубоководной части Чёрного моря и её связи с крупномасштабными атмосферными процессами. Эквидистантный временной ряд рН по данным натурных наблюдений за период 1957–1996 гг. восстановлен с учетом эволюции климатического внутригодового цикла, долгопериодной тенденции и добавления белого шума.

В **параграфе 3.3.1** приведены результаты анализа квазипериодических колебаний рН восстановленного ряда. На основе спектрального анализа установлено наличие значимых межгодовых-десятилетних осцилляций. Колебания рН указанного масштаба могут быть связаны с гидрометеорологическими вариациями, обусловленными воздействием таких атмосферных мод, как Северо-Атлантическое колебание (САК), Восточно-Атлантическое колебание (ВАК), Западно-Российское – Восточно-Атлантическое колебание (ВАЗРК) и Скандинавское колебание (СК). Изменение фаз этих климатических колебаний сопровождается изменчивостью гидрометеорологических условий. В свою очередь это приводит к модификации стратификации водной толщи, увеличению интенсивности вертикального перемешивания, усилению процессов апвеллинга и даунвеллинга, что сказывается на гидрохимическом режиме моря.

В параграфе 3.3.2 исследуется роль крупномасштабных атмосферных процессов в формировании аномалий рН в поверхностном слое глубоководной части Чёрного моря. Значимая связь с аномалиями рН по данным натурных наблюдений выявлена только с ВАК в зимний период. Положительное состояние ВАК сопровождается понижением рН на 0,08 ед., а отрицательное – повышением рН на 0,09 ед. Использование данных реанализа за период 1992–2022 гг. позволило детализировать обнаруженные закономерности и определить пространственную структуру отклика рН. Наиболее заметное увеличение рН фиксируется в феврале в ответ на январский сигнал ВАК (до 0,028 ед.). Значимые положительные аномалии обнаруживаются и далее: 0,016 ед. в марте при февральском сигнале ВАК, а также 0,02 ед. рН в марте и апреле в связи с мартовской фазой ВАК. Описанные закономерности локализованы преимущественно в центральной и западной частях акватории.

В параграфе 3.4 представлена комплексная оценка климатического тренда рН в поверхностных водах глубоководной части Чёрного моря, основанная на анализе экспедиционных данных в 1957–1996 гг. и 2019–2022 гг. и результатов реанализа в 1992–2022 гг. (рис. 11). Сопоставимость использованных данных за разные временные интервалы обеспечена за счет учета закономерностей пространственного распределения и внутригодового хода рН при расчете средних величин в условиях ограниченности данных наблюдений. Анализ консолидированного массива данных показал значимый отрицательный тренд рН с коэффициентом $-0,16$ ед. за 65 лет, что соответствует средней скорости подкисления 0,024 ед. за десятилетие. Согласно данным реанализа скорость понижения рН аналогична.

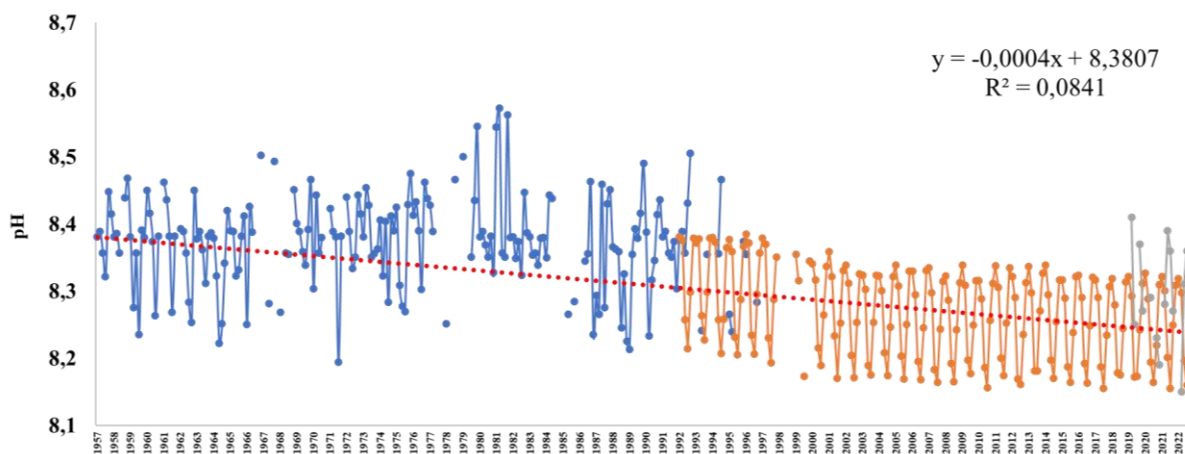


Рисунок 11 – Временная эволюция рН в поверхностном слое глубоководной части Чёрного моря за 1957–2022 гг. по данным архивных наблюдений в период 1957–1996 гг. (синий), данным современных наблюдений в период 2019–2022 гг. (серый) и данным реанализа в период 1992–2022 гг. (оранжевый) Прямая точечная линия – линейная аппроксимация (красный). Уравнение линейного тренда и коэффициент детерминации показаны в правом верхнем углу

В главе 4 представлена прогностическая модель, связывающая долгосрочную динамику закисления вод Чёрного моря с изменениями морфометрических показателей раковины *Mytilus galloprovincialis* до 2300 года. Количественная оценка потенциального воздействия прогнозируемого понижения рН на морфометрические характеристики черноморской мидии *Mytilus galloprovincialis* получена с учётом результатов экспериментального исследования по изучению влияния гиперкапнии на биоминерализацию [Michaelidis et al., 2005]. Разработанная модель усваивает среднемесячные данные реанализа за 1992–2022 гг. в северо-восточной части Чёрного моря в слое 0,25–32 м. В этом регионе располагается большое число объектов аквакультуры. В исторический период установлен статистически значимый отрицательный тренд рН $-0,024$ ед. за десятилетие, устойчивые сезонные колебания с амплитудой 0,065 и циклические компоненты с характерными периодами, варьирующимися от краткосрочных около 8 месяцев до колебаний свыше 2 лет (рис. 12). Полученная аддитивная модель прогностической изменчивости рН позволяет отдельно выделять трендовую, сезонную и циклическую компоненты.

Верификация модели подтвердила её адекватность: тесты Голдфелда-Квандта и Лиллиефорса не выявили нарушений гомоскедастичности и нормальности распределения остатков. Прогноз до 2300 года (рис. 11), основанный на экстраполяции компонент, показывает менее выраженное понижение рН (до 7,5–7,65 ед.) по сравнению с глобальными оценками (7,3–7,4 ед.), что можно объяснить повышенной буферной ёмкостью черноморских вод. Однако даже это умеренное подкисление в сочетании с региональными стресс-факторами (гипоксия, эвтрофикация) может привести к значительным биологическим последствиям. Экстраполяция экспериментальных данных из работы [Michaelidis et al., 2005] на черноморскую популяцию мидий (средний размер 56 мм) позволяет спрогнозировать сокращение максимального размера раковины на 25% (до 42 мм) из-за нарушений кальцификации, возникающих при величинах рН $\leq 7,5$.

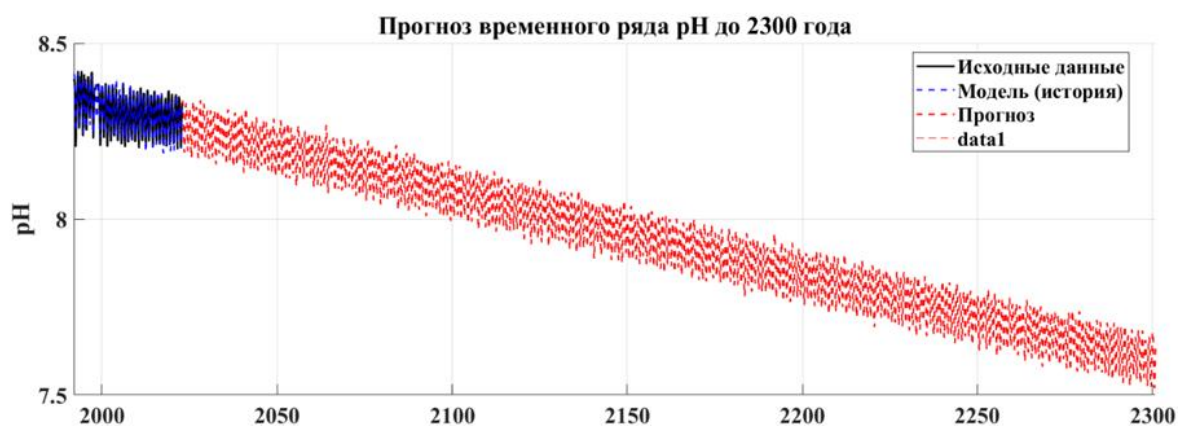


Рисунок 12 – График временного хода рН в северо-восточной части Чёрного моря в период 1992–2022 гг. (синий) и график прогноза, основанный на суперпозиции компонент: тренд, сезонность, циклическость до 2300 г. (красный)

Заключение. В диссертационной работе на основе анализа данных наблюдений установлены ключевые закономерности пространственно-временной изменчивости водородного показателя рН Чёрном море. Для глубоководной части моря получены закономерности среднемноголетнего распределения рН в верхнем стометровом слое и его сезонная изменчивость. Определен сезонный ход и вертикальное климатическое распределение рН в слое 0–150 м.

Определены квазидекадные циклические колебания рН и оценена их связь с климатическими процессами. Показано, что изменчивость водородного показателя в геосистеме Чёрного моря обусловлена влиянием крупномасштабной атмосферной циркуляции, что подтверждается значимыми результатами композитного анализа с индексом Восточно-Атлантического колебания (ВАК).

На основе интеграции натурных данных и численного моделирования впервые проведена точная оценка скорости подкисления вод Чёрного моря за 65-летний период 1957–2022 гг. На основе данных численного моделирования создана региональная прогностическая модель подкисления, учитывающая специфические гидрологические и биогеохимические особенности Чёрного моря, что обеспечивает более точные прогнозы по сравнению с глобальными моделями.

Основные научные результаты диссертационной работы могут быть сведены к следующему.

1. Выявлены характеристики климатического поля рН в глубоководной части Чёрного моря и его сезонные вариации. На горизонте 0 м климатическая величина рН изменяется в пределах от 8,22 до 8,38 при среднем по полю значении 8,3. На этом горизонте, так же, как и на других глубинах, решающее значение в формировании пространственной неоднородности поля рН имеет динамическая структура вод. Области с невысокими средними значениями рН (от 8,22 до 8,26) приурочены к центрам циклических круговоротов. В центрах циклонических круговоротов практически на всех горизонтах имеет место уменьшение величины водородного показателя по сравнению с периферийными водами. На горизонте 75 м диапазон значений рН по полю составляет 7,88–8,30 при среднем рН = 8,17. На горизонте 100 м области с пониженными величинами рН (7,86–8,00) сосредоточены также в циклонических круговоротах и выражены даже лучше, чем на вышележащих горизонтах. Значения рН по полю изменяются от 7,86 до 8,22, среднее значение рН составляет 7,96.

Определено, что сезонные вариации рН в подповерхностном слое главным образом обусловлены сезонной изменчивостью геострофической циркуляции и связанной с ней скорости вертикальных движений. В центрах циклонических круговоротов на востоке и западе моря отмечаются пониженные значения рН, особенно хорошо выраженные в период интенсификации циркуляционных процессов в конце зимы – начале весны. Определено, что среднее значение рН уменьшается от 8,38 на поверхности до величин менее 8,0 на горизонте 150 м. Показано, что на фоне падения рН с

глубиной отмечается слабый подповерхностный максимум, имеющий сезонный характер и обусловленный процессами фотосинтеза. Начиная с горизонта 50 м и глубже, диапазон сезонных изменения рН уменьшается по сравнению с верхним 30-метровым слоем.

Получено, что осредненный сезонный ход величины рН в поверхностном слое открытой части моря хорошо описывается суперпозицией годовой и полугодовой гармоник. Размах осредненной сезонной изменчивости величины рН в поверхностном слое достигает 0,05 ед. и характеризуется двумя максимумами: весенним и осенним, которые отмечаются в марте и октябре. Наличие максимумов в эти периоды связано с процессами фотосинтеза, что согласуется с весенним и осенним пиками цветения фитопланктона. Основной минимум рН в водах поверхностного слоя открытой части моря приходится на июль, вторичный – на декабрь–январь.

2. Определён диапазон климатических значений среднегодовых величин рН в поверхностных водах северо-западной части Чёрного моря, акватории приустьевого взморья р. Дунай. Величины рН изменяются в пределах 8,42–8,47 при среднем по полю значении 8,46. Максимальные значения 8,45–8,47 сосредоточены в районе трансформации и перемешивания речных и морских вод, тогда как вблизи дельты р. Дунай, в области превалирования речных вод, наблюдаются более низкие величины – 8,42–8,44.

Установлено, что в поверхностном слое зоны смешения сезонная динамика рН имеет выраженный годовой цикл (вклад 83% дисперсии) с летним максимумом до 8,57 и зимним минимумом 8,33–8,34, что обусловлено развитием фитопланктона, стимулируемым поступлением биогенов со стоком реки. В придонном слое динамика (77,9% дисперсии) контролируется преимущественно процессами деструкции органического вещества, приводящими к снижению рН в летний период до 8,24 при максимуме в феврале 8,40.

В акватории непосредственной близости к дельте, находящейся под прямым влиянием стока, сезонный ход рН аппроксимируется суммой двух гармоник: годовой (73%) и четырёхмесячной (12,5%). Вклад годовой гармоники здесь снижен, а сигнал усложняется, что указывает на более сложную и быструю реакцию гидрохимического режима на локальные изменения речного стока. Характерной особенностью является майский минимум рН = 8,47, отсутствующий в зоне смешения, максимальные значения отмечаются летом: июнь, до 8,6, минимальные – зимой: январь – 8,29, декабрь – 8,32.

Количественная оценка временной связи между гидрологическим и биогеохимическим циклами показала, что отклик экосистемы на сток происходит с характерным запаздыванием. В зоне смешения речных и морских вод максимум корреляции достигается через 2 месяца, что соответствует периоду трансформации биогенной нагрузки в биомассу фитопланктона. В зоне прямого влияния стока (близ дельты) временное запаздывание увеличивается до 3 месяцев.

3. По данным наблюдений 1957–1996 гг. получено, что в зимний период, ВАК оказывает значимое влияние на возникновение аномалий рН в поверхностном слое центральной части Чёрного моря. Положительная фаза (ВАК+) вызывает снижение рН на 0,08 ед., а отрицательная фаза (ВАК–) – повышение на 0,09 ед. Данные реанализа за период 1992–2022 гг. детализировали выявленные закономерности. В холодный период года установлено, что значимый отклик формируется преимущественно под воздействием отрицательной фазы ВАК, проявляясь как синхронно, так и с пролонгацией на следующий месяц. Наиболее выраженные положительные аномалии рН (до +0,028 ед.) наблюдаются в феврале в ответ на январский сигнал ВАК–. Устойчивые положительные аномалии величиной +0,016 ед. фиксируются в марте на сигнал ВАК– в феврале, а также +0,02 ед. рН в марте и апреле на сигнал ВАК– в марте. Отрицательные аномалии индекса ВАК– в ноябре и декабре приводят к возникновению положительных аномалий рН с ноября по декабрь величиной от 0,012 до 0,016 ед. рН. Пространственно данный сигнал устойчиво локализован в центрально-западной части моря. При этом для положительной фазы ВАК+ в холодный сезон статистически значимого отклика рН не обнаружено.

4. Объединённые данные контактных наблюдений и результатов численного моделирования подтвердили наличие устойчивого отрицательного тренда рН в поверхностных водах глубоководной части Чёрного моря. Величина тренда составила –0,024 ед. рН за 10 лет как для длительного периода 1957–2022 гг., так и для более короткого 1992–2022 гг., что свидетельствует о высокой устойчивости выявленной тенденции и её независимости от периода осреднения.

5. Разработанная прогностическая модель рН, учитывающая региональные особенности в северо-восточной части Чёрного моря, выявила выраженную сезонную цикличность с амплитудой колебаний 0,065 единиц рН, значимые циклические компоненты с характерными периодами, варьирующимися от краткосрочных (около 8 месяцев) до колебаний (свыше 2 лет). Также в акватории исследования установлен статистически значимый тренд подкисления со скоростью 0,024 единицы рН за десятилетие. Согласно прогнозу, к 2300 году ожидается снижение рН до 7,5–7,65, что, хотя и менее выражено по сравнению с глобальными оценками 7,3–7,4, но в сочетании с другими стресс-факторами может вызвать существенные экологические последствия. Для мидии *M. galloprovincialis* моделирование предсказывает уменьшение максимального размера раковины на 24,5% с 55,71 мм до 42,04 мм, что свидетельствует о потенциально значительном воздействии на кальцифицирующие организмы даже при умеренном снижении рН.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Гребнева Е.А.,** Шилин М.Б. Долгосрочные изменения водородного показателя (рН) в водах Мирового океана и Чёрного моря: от первых исследований до современных тенденций // Естественные и технические науки. – 2025. – № 3. – С. 212–221.

2. **Гребнева Е.А.,** Шилин М.Б. Анализ долгосрочных изменений рН в Чёрном море: верификация данных реанализа CMEMS BS-Biogeochemistry и натуральных измерений // Естественные и технические науки. – 2025. – № 3. – С. 198–211.

3. **Гребнева Е.А.,** Шилин М.Б. Воздействие динамики водородного показателя рН на кальцифицирующие организмы на примере черноморской мидии *Mytilus galloprovincialis* // Грозненский естественнонаучный бюллетень. – 2026. – Т. 11, № 1 (43). – С. 20–28.

Иные публикации: по теме диссертации опубликовано 22 тезиса докладов на всероссийских и международных конференциях.

