

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Гребневой Елены Александровны
«Роль водородного показателя
как индикатора изменений морской среды Чёрного моря под влиянием
климатических факторов и биогеохимических процессов»,
представленную на соискание ученой степени кандидата географических
наук по специальности 1.6.21 – Геоэкология

В диссертационной работе Гребневой Е.А. представлены исследования пространственно-временной изменчивости Водородного показателя (рН) в водах Чёрного моря и его связь с климатическими факторами и биогеохимическими процессами.

Актуальность исследования определяется тем, что моря и океаны поглощают около 30% антропогенных выбросов CO_2 , что приводит к снижению рН поверхностных вод. С 1950 по 2020 гг. среднее значение рН поверхностных вод Мирового океана уменьшилось с 8,15 до 8,05, что угрожает кальции

фицирующим организмам, включая мидий *Mytilus galloprovincialis* — ключевой вид для экосистем и аквакультуры Чёрного моря. Однако данные о рН в Чёрном море фрагментарны, а долгосрочные тенденции недостаточно изучены. Комплексный анализ изменчивости рН с учётом климатических и природных факторов позволит оценить риски для экосистемы и экономически значимых видов, что особенно важно для регионов с развитой марикультурой – таких, как Крым и Краснодарский край.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и одного приложения. Каждая глава разбита на параграфы и завершается выводами. Диссертационная работа содержит 122 страницы машинописного текста, 39

рисунков и 9 таблиц в основном тексте работы. Список использованных источников включает 156 наименований.

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

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи следования, определена его научная новизна, фундаментальная и практическая значимость, дана оценка достоверности полученных результатов. Приведены сведения о личном вкладе автора, апробации работы, публикациях по теме диссертации и информация о структуре диссертации.

В главе 1 представлен комплексный анализ водородного показателя (pH) как фундаментальной характеристики кислотно-щелочного баланса водной среды, рассматривается его роль в природных процессах и влияние антропогенных факторов на его динамику. Дано классическое определение pH, освещена история введения этого показателя в науку и раскрыты основные механизмы, определяющие его изменчивость в морской среде, включая растворимость CO_2 и биогеохимические процессы (фотосинтез и дыхание организмов).

Приведен исторический обзор исследований pH в Мировом океане, начиная с первых измерений в начале XX века и заканчивая современными стандартизированными методами мониторинга. Обобщены данные о

пространственно-временной изменчивости pH в различных регионах. Приведены доказательства антропогенного подкисления океана, выражающегося в снижении среднего pH на 0,1 единицы с доиндустриального периода. Приоритетное рассмотрение получили последствия подкисления, включая негативное воздействие на кальцифицирующие организмы, и даны прогнозы дальнейшего снижения pH при сохранении текущих темпов выбросов CO₂.

Освещаются уникальные характеристики pH Черного моря, обусловленные меромиктическим режимом. Проанализированы исторические и современные данные, выявлены региональные различия в вертикальном распределении pH, а также противоречия в оценках долгосрочных трендов, связанные с естественной изменчивостью и неоднородностью наблюдений. В этой же главе подчеркивается значимость достоверного определения трендов pH для прогнозирования состояния экосистем, учитывая высокую чувствительность ключевых видов, таких как *M. galloprovincialis*, к изменениям кислотности.

Во второй главе представлен детальный анализ исходных данных и методов их обработки, используемых для исследования пространственно-временной изменчивости водородного показателя pH в Черном море. Дана характеристика массивов исторических 1957–1996 гг. и современных 2019–2022 гг. экспедиционных наблюдений, включая их пространственное распределение, сезонную динамику и особенности методик измерений. Особое внимание уделено методам контроля качества данных и алгоритмам их интерполяции на регулярную сетку с использованием локальных полиномов второй степени.

В этой главе рассмотрены современные экспедиционные исследования, проведенные в российской экономической зоне Черного моря, с описанием методики отбора проб и лабораторного определения pH, включая температурные поправки. Проведен анализ данных ре-анализа CMEMS BS-

Biogeochemistry, основанного на гидродинамической модели NEMO с биогеохимическим модулем VAMNBI, и выполнена его верификация с натурными измерениями, показавшая высокую степень согласованности ($R = 0,75-0,91$).

Дополнительно приведены данные по стоку реки Дунай и размерным характеристикам двустворчатых моллюсков *M. galloprovincialis*.

В главе сделан вывод о применимости использованных методов и достоверности полученных данных для последующего анализа долгосрочных изменений pH в Черном море.

В главе 3 проведен комплексный анализ климатических характеристик водородного показателя pH в Черном море. Исследовано пространственное распределение, и сезонная изменчивость pH в глубоководной части моря, где выявлены характерные особенности: среднее поверхностное значение 8,38 с пониженными величинами в центрах циклонических круговоротов, а также четко выраженное уменьшение значений с глубиной. Установлено, что сезонная динамика pH в поверхностном слое хорошо описывается годовыми и полугодовыми гармониками с амплитудой 0,05 единиц, при этом максимальные значения наблюдаются в марте и октябре, что связано с фотосинтетической активностью фитопланктона.

Приведен анализ динамики pH в северо-западной части Черного моря, где выявлено влияние речного стока Дуная на формирование пространственного распределения показателя. Показано, что сезонная динамика в этом регионе в значительной степени определяется годовым циклом развития фитопланктона и температурным режимом, демонстрируя тесную корреляцию ($r \approx 0,95$) с объемом речного стока при двухмесячном временном лаге.

На основе разработанной методики восстановления временных рядов проведен анализ межгодовой изменчивости pH, выявивший значимую квазипериодическую компоненту с периодом около 10 лет. Установлено влияние крупномасштабных атмосферных процессов (Восточно-

Атлантического колебания) на формирование аномалий pH в холодный период года.

Комплексная оценка долгосрочных изменений pH за период 1957-2022 годов, основанная на интеграции экспедиционных данных и результатов численного ре-анализа, позволила выявить статистически значимый отрицательный тренд со скоростью $-0,024$ единицы pH за десятилетие. Полученные результаты свидетельствуют об устойчивом процессе подкисления вод Черного моря, согласующемся с глобальными тенденциями.

В четвертой главе представлена разработка прогностической модели, связывающей долгосрочную динамику закисления вод Черного моря с изменениями морфометрических показателей раковины *M. galloprovincialis*. На основе анализа данных ре-анализа за 1992–2022 гг. выделены трендовая, сезонная и циклическая компоненты изменчивости pH, что позволило осуществить прогноз до 2300 года. Установлено, что ожидаемое снижение pH до 7,5–7,65, хотя и менее выраженное, чем глобальные оценки, в сочетании с региональными стресс-факторами может существенно повлиять на биологические процессы.

Экстраполяция экспериментальных данных на черноморскую популяцию мидий прогнозирует сокращение максимального размера раковины на 24,5% вследствие нарушений кальцификации при дальнейшем подкислении. Полученные результаты подчеркивают значимость учета региональных особенностей при оценке последствий закисления морской среды для ключевых видов-кальцификаторов.

Заключение содержит основные научные результаты, полученные в диссертации.

К диссертации маются следующие вопросы и замечания.

1. В главе 1 упомянуты первые измерения и развитие методик определения pH, но не проведен критический анализ их точности. Например, не обсуждаются погрешности колориметрического метода в морской воде.

2. Не вполне понятно, почему выбран именно метод локального полинома 2-й степени? Проводилось ли автором сравнение с другими методами (кригинг, сплайны)?

3. Отсутствует четкое обоснование выбора именно 1000-метровой изобаты как границы для анализа глубоководной части.

4. В главе 3 не ясно, почему сезонный ход рН описывается именно годовыми и полугодовыми гармониками? Проводилось ли сравнение с другими гармониками?

5. В главе 4, стр. 94 не объясняется, почему для проверки нормальности выбран тест Лиллиефорса (а не, например, Шапиро-Уилка)?

6. Стр. 92, формулы 4.8–4.16 нет ссылок на источники литературы.

7. Стр.99–100 в формулах пропущены пробелы после операторов.

Сделанные замечания не умаляют достоинств работы. Основные положения и выводы диссертации достаточно хорошо обоснованы. Полученные результаты соответствуют поставленной цели и задачам работы.

Заключение.

Работа является самостоятельным, уникальным и завершенным научным изысканием. Она имеет важное практическое значение, поскольку ее результаты могут быть использованы для решения актуальных задач природопользования, что вносит существенный вклад в развитие методологии геоэкологических исследований морских экосистем и создает научную основу для управления природно-хозяйственными системами Черноморского региона в условиях глобальных изменений климата.

Считаю, что диссертационная работа удовлетворяет требованиям п. 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Автор Гребнева Елена

Александровна заслуживает присуждения ей искомой степени по специальности 1.6.21 – Геоэкология.

Согласен на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент:

Холодkevич Сергей Викторович,

доктор технических наук, главный научный сотрудник, руководитель лаборатории биоэлектронных методов геоэкологического мониторинга ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН)

« 05 » 11 2025 г.

Подпись руки

С.В. Холодkevич

заверяю

Начальник отдела кадров СПб ФИЦ РАН

И.И. Шекун

« 5 » июля 2025 г.

