

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Гребневой Елены Александровны на тему «Оценка водородного показателя рН как индикатора изменений геосистемы Чёрного моря под влиянием климатических факторов и биогеохимических процессов», представленной на соискание ученой степени кандидата географических наук по научной специальности

1.6.21 – Геоэкология (географические науки)

В диссертационном исследовании Гребневой Е.А. изучены пространственно-временные закономерности изменчивости водородного показателя (рН) в акватории Чёрного моря под влиянием климатических фактов и биогеохимических процессов.

**Актуальность работы** обусловлена тем, что воды Мирового океана абсорбируют порядка 30% антропогенного углекислого газа. Это провоцирует закисление поверхностного слоя вод. За период с 1950 по 2020 год средняя величина рН в поверхностных водах Мирового океана сократилась с 8,15 до 8,05. Такое изменение создаёт угрозу для гидробионтов, в том числе для черноморской мидии *Mytilus galloprovincialis*. Данный вид играет ключевую роль в экосистемах и марикультуре Чёрного моря. При этом сведения о рН в Чёрном море носят фрагментарный характер, а долговременные тренды остаются недостаточно изученными. Системный анализ изменчивости рН с учётом воздействия климатических и природных факторов позволит оценить экологические риски для морской экосистемы и промыслово значимых видов, что приобретает особую актуальность для регионов с развитой аквакультурой, в частности для Крымского полуострова и Краснодарского края.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников. Каждая глава разбита на параграфы и завершается выводами. Диссертационная работа содержит 148 страницы машинописного текста, 44 рисунка и 8 таблиц в основном тексте работы. Список использованных источников включает 206 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 природотехнических систем и обеспечение их экологической безопасности, разработка средств контроля состояния окружающей среды».

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, 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 (рН) как фундаментальной характеристики кислотно-щелочного баланса водной среды, рассматривается его роль в природных процессах и влияние антропогенных факторов на его динамику. Дано классическое определение рН, освещена история введения этого показателя в науку и раскрыты основные механизмы, определяющие его изменчивость в морской среде, включая растворимость  $\text{CO}_2$  и биогеохимические процессы (фотосинтез и дыхание организмов).

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

различных регионах. Приведены доказательства антропогенного подкисления океана, выражающегося в снижении среднего рН на 0,1 единицы с доиндустриального периода. Приоритетное рассмотрение получили последствия подкисления, включая негативное воздействие на кальцифицирующие организмы, и даны прогнозы дальнейшего снижения рН при сохранении текущих темпов выбросов  $\text{CO}_2$ .

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

В главе 2 представлен детальный анализ исходных данных и методов их обработки, используемых для исследования пространственно-временной изменчивости водородного показателя рН 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 рН, 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 ( $R = 0,75\text{--}0,91$ ).

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

Сделан вывод о применимости использованных методов и достоверности полученных данных для последующего анализа долгосрочных изменений рН в Черном море.

В главе 3 проведен комплексный анализ климатических характеристик водородного показателя рН в Черном море. Исследовано пространственное распределение, и сезонная изменчивость рН 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 до менее 8,00 на горизонте 150 м. Установлено, что сезонная динамика рН в поверхностном слое хорошо описывается годовой и полугодовой гармониками с амплитудой 0,05 единиц, при этом максимальные значения наблюдаются в марте и октябре, что связано с фотосинтетической активностью фитопланктона.

Приведён анализ динамики рН в северо-западной части Чёрного моря, в приустьевой акватории р. Дунай, где выявлено влияние речного стока на формирование пространственного распределения рН. Показано, что сезонная динамика в этом регионе в значительной степени определяется годовым циклом развития фитопланктона и температурным режимом. В поверхностном слое максимум рН наблюдается летом и достигает 8,57, тогда как в придонном горизонте фиксируется летний минимум — 8,24. При этом сезонный ход рН демонстрирует тесную корреляцию ( $r \approx 0,95$ ) с объёмом речного стока при двухмесячном временном лаге. В непосредственной близости к дельте Дуная сезонный ход рН аппроксимируется суммой двух гармоник: годовой и четырёхмесячной. Четырёхмесячный сигнал с минимумом в мае (8,47 ед.) отсутствует в зоне смешения речных и морских вод, что, вероятно, связано с сезонной динамикой речного стока. Максимальные значения рН отмечаются летом (июль — 8,6 ед.), минимальные — зимой (январь — 8,29 ед., декабрь — 8,32 ед.). При этом корреляционный анализ сезонного хода

pH и стока Дуная в данном районе выявил максимальную связь при запаздывании pH на три месяца.

В этой главе изложен результат, согласно которому среди крупномасштабных атмосферных процессов значимая связь с аномалиями pH по данным наблюдений за 1957–1996 гг. выявлена только для Восточно-Атлантического колебания (ВАК) в зимний период. Положительная фаза ВАК сопровождается понижением pH на 0,08 ед., отрицательная — повышением на 0,09 ед. По данным ре-анализа за 1992–2022 гг., отклик pH на ВАК проявляется практически синхронно (с запаздыванием 0–1 месяц) и локализован преимущественно в центральной и западной частях глубоководной акватории Чёрного моря.

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 главе 4 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.

В заключении представлены основные научные результаты, полученные в диссертации.

К диссертации имеются 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 pH 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)?

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

**Заключение оппонента.** Работа является самостоятельным, уникальным и завершённым научным исследованием. 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 Гребневой Е.А. « Оценка водородного показателя рН как индикатора изменений геосистемы Чёрного моря под влиянием климатических факторов и биогеохимических процессов» удовлетворяет требованиям п. 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям. Соискатель Гребнева Елена Александровна заслуживает присуждения ей искомой степени кандидата географических наук по специальности 1.6.21 – Геоэкология.

Официальный оппонент:

**Холодкевич Сергей Викторович,**

профессор, доктор технических наук,

главный научный сотрудник,

руководитель Лаборатории биоэлектронных

методов геоэкологического мониторинга,

Федерального государственного

бюджетного учреждения науки «Санкт-

Петербургский Федеральный

исследовательский центр Российской

академии наук» (ФГБУН СПб ФИЦ РАН)

197110, Санкт-Петербург,

ул. Корпусная, д. 18

Телефон: +7-911-227-39-48

E-mail: [kholodkevich@mail.ru](mailto:kholodkevich@mail.ru)

«14» мая 2026 г.

С. В. Холодкевич

Я, Холодкевич Сергей Викторович, согласен на включение в аттестационное дело и дальнейшую обработку моих персональных данных, необходимых для процедуры защиты кандидатской диссертации Гребневой Елены Александровны, в том числе на размещение их в сети Интернет.

«14» мая 2026 г.

С. В. Холодкевич

Подпись Холодкевича Сергея Викторовича заверяю:

Подпись руки С. В. Холодкевич заверяю  
Начальник отдела кадров СПб ФИЦ РАН  
А. В. Сидорова  
«14» мая 2026 г.