

ОТЗЫВ

официального оппонента,

кандидата технических наук, доцента **Андриановой Марии Юрьевны**
на диссертацию **Гребневой Елены Александровны** на тему:

«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

Актуальность темы диссертации. Диссертация Гребневой Елены Александровны на тему: «Роль водородного показателя как индикатора изменений морской среды Чёрного моря под влиянием климатических факторов и биогеохимических процессов» направлена на решение задач, связанных с изучением пространственно-временной динамики водородного показателя в условиях глобального антропогенного воздействия на морскую среду. Цель работы состояла в выявлении роли pH как геоэкологического фактора Черного моря.

Водородный показатель (pH) отражает концентрацию ионов водорода в растворе. В поверхностных водных объектах pH является интегральным показателем, значение которого формируется под влиянием ряда физических, химических и биологических процессов с участием атмосферы, гидросферы и литосферы. Снижение pH среды (закисление или подкисление) угнетает развитие и жизнедеятельность гидробионтов. Особенно уязвимы кальцифицирующие организмы (формирующие скелеты или раковины из карбоната кальция).

В 20 веке зарегистрирован тренд на снижение pH в водах Мирового океана со скоростью около 0,014 ед. за 10 лет. Однако в морях ситуация имеет местные особенности, требующие тщательного изучения массива результатов наблюдений с выявлением многолетнего тренда, на который наложены циклические изменения (сезонные и более длительные циклы). Выявление этих закономерностей позволят прогнозировать динамику pH воды на долгосрочную перспективу, что имеет большое значение для морских экосистем и марикультуры.

Глобальное изменение климата и подкисление верхнего слоя морских вод взаимосвязаны, поскольку общим биогеохимическим фактором в этих процессах является рост концентрации углекислого газа в тропосфере. Для Черного моря комплексные исследования пространственно-временной изменчивости pH с учётом климатических факторов ранее не проводились, а имеющиеся данные носят фрагментарный характер. Представленная диссертация Гребневой Е.А. восполняет этот пробел, что позволит сформировать целостное представление о состоянии экосистемы Черного моря, спрогнозировать ее дальнейшую динамику, а также дать актуальную оценку последствий закисления для черноморской мидии. Таким образом, тема диссертации имеет большое практическое значение и является актуальной.

Научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов. В диссертации Гребневой Е.А. представлены результаты, обладающие **научной новизной** в области выявления закономерностей пространственно-временной динамики водородного показателя для вод Черного моря и прогнозирования его значений в условиях глобального антропогенного воздействия на морскую среду.

- На глубоководной акватории Черного моря (в границах изобаты 100 м, где мало влияние шельфа и рек) установлены численные значения и закономерности пространственно-временной изменчивости рН воды в слое 0-100 м по результатам совокупности наблюдений за 1957-1996 гг.. На горизонте 0 м рН изменяется в пределах от 8,35 до 8,41 (среднее по полю 8,38) и снижается с глубиной до значений менее 8,0 на горизонте 150 м. Пространственное распределение рН определяется динамической структурой водных масс с минимумом в центрах циклонических круговоротов.

- Для поверхностной зоны глубоководной части моря оценен сезонный ход рН. Размах сезонных колебаний составил 0,05 ед рН и обусловлен биологической активностью (максимумы соответствуют периодам «цветения» фитопланктона). Методом спектрального анализа выявлена квазипериодическая компонента (период около 10 лет), которая связана с региональными гидрометеорологическими условиями в различные фазы Восточно-атлантического колебания (ВАК), приводящим к повышению рН на 0,09 ед. при ВАК(-), снижению рН на 0,08 ед. при ВАК(+). Оценка долгосрочного тренда за период 1957–2022 гг. показала снижение рН со скоростью 0,024 ед. за десятилетие.

- Определён диапазон значений среднегодовых величин рН в поверхностных и придонных водах (горизонты 0 м и 20 м) в северо-западной части Черного моря, акватории приустьевоего взморья реки Дунай. Он составил от 8,42 до 8,47 (среднее по полю 8,46 ед. рН), причем максимальные значения сосредоточены в районе перемешивания речных и морских вод, а минимальные – в области превалирования речных вод. Сезонная динамика рН на поверхности определяется биопродукционными процессами и демонстрирует максимальную связь со стоком Дуная при его запаздывании на два месяца. В придонном слое сезонный ход противоположен поверхностному и характеризуется летним минимумом, обусловленным процессами деструкции.

- Разработана прогностическая модель долгосрочной динамики рН, учитывающая региональные особенности (Крым – Краснодарский край) для слоя глубиной 0,25-30 м. При разработке модели выявлены устойчивые сезонные колебания рН (с периодом 12 месяцев, средней амплитудой 0,055 единиц рН). Также обнаружено семь циклических компонент с меньшей амплитудой и периодами от 8,3 месяца до 2,5 лет. Вычислена компонента отрицательного линейного тренда, составившая (–0,024) единицы рН за десятилетие, что отражает процесс прогрессирующего подкисления водной среды. Согласно этой модели к 2300 году прогнозируется снижение рН до 7,5-7,65, что меньше известного прогноза для Мирового океана (до 7,3-7,4). Прогнозируется снижение средних размеров раковины мидий *Mytilus galloprovincialis* с 55,71 мм до 42,04 мм.

Установлены закономерности пространственно-временной изменчивости рН, в том числе выявленный тренд снижения на 0,024 единицы за десятилетие и связь межгодовых колебаний рН с циклическими климатическими процессами, является важным вкладом в **развитие теории геоэкологических изменений** морской среды. Также работа вносит вклад в **развитие методологии** геоэкологических исследований морских экосистем.

Полученные результаты, разработанные программы и модели имеют **практическую ценность**, так как позволяют оценить масштабы и последствия антропогенного воздействия на экосистему Черного моря. Это особенно важно для разработки стратегий адаптации к глобальным изменениям климата, а также управления природно-хозяйственными системами Черноморского региона.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов подтверждается:

использованием современных данных из независимого массива реанализа, исторических данных контактных наблюдений из обширного числа источников, международных баз океанографических данных, научных публикаций, отчетов, сборников, монографий и статей советских и иностранных ученых, а также данных современных экспедиционных исследований;

применением методов математической статистики;

Краткая характеристика основного содержания диссертации

Диссертация написана на 122 страницах машинописного текста, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (156 источников) и одного приложения.

Во введении диссертации обосновывается актуальность исследования; описывается объект и предмет исследования; формулируется цель и задачи работы; приводится научная и практическая значимость результатов; кратко перечислены источники данных для компьютерной обработки; приведены научные положения, выносимые на защиту; приведена информация о достоверности полученных результатов, личном вкладе автора, об апробации результатов работы, публикациях автора.

В первой главе автор рассматривает литературные данные о долгосрочных изменениях pH в водах Мирового океана, о развитии методик измерения pH и глобальных гидрографических исследований, описывает негативное влияние подкисления воды на кальцифицирующие организмы, в том числе на объект марикультуры – черноморскую мидию *Mytilus galloprovincialis*. Согласно прогнозам при сохранении текущих темпов антропогенных выбросов CO₂ к 2100 году ожидается снижение среднего значения pH океана на 0,3-0,5 единиц по сравнению с доиндустриальным уровнем, а к 2300 году на 0,7-0,8 единиц. Автор указывает, что Черное море обладает уникально гидрохимической структурой, и pH его вод значительно отличается от океанских, а также что данные по pH его воды обладают пространственной и временной неоднородностью, что затрудняет выявление достоверных долгосрочных трендов, которые могут сигнализировать о глобальных изменениях в экосистеме Черного моря.

Во второй главе подробно описаны исходные данные и методы их обработки. Автором использованы многочисленные научные публикации, архивные отчеты и сборники, результаты и базы данных международных научных исследований. Наиболее обеспечен данными был период с 1957 по 1996 гг, массив данных содержит 6989 станций. Из выборки значений pH удалялись первые и последние 10% ранжированного ряда (что составило около 10% выборки). Кроме того, использованы результат реанализа Black Sea Biogeochemical Reanalysis с января 1992 по декабрь 2022 гг, а также экспедиционные данные, полученные в 2019-2022 г.

В главе 3 анализируется связь климатических характеристик с распределением pH для двух зон: глубоководной (ограниченной изобатой 100 м, где минимально влияние шельфа и рек) и устья Дуная. Установлены численные значения и закономерности пространственно-временной изменчивости pH воды в этих зонах на разных горизонтах (до 100 м). Для зоны устья Дуная выявлено влияние речных вод (их pH 7,50-8,30), кроме того, сезонная динамика pH демонстрирует тесную корреляцию ($r=0.95$) с объемом речного стока при двухмесячном временном лаге.

Для поверхностных вод глубоководной акватории выполнено восполнение недостающих данных путем интерполяции для анализа межгодовой изменчивости. Методом спектрального анализа выявлена квазипериодическая (период около 10 лет) компонента, которую автор связывает с действием климатических явлений, а именно с восточно-атлантическим колебанием (ВАК). Повышение рН на 0,09 ед. связывается с отрицательной фазой ВАК, а снижение рН на 0,08 ед. – с положительной фазой ВАК. С участием автора разработаны две программы для ЭВМ: 1) для учета влияния глобальных климатических мод на гидрохимические режимы морей и океанов, 2) для получения численных оценок распределения полей аномалий величин рН в поверхностных водах по данным реанализа.

В главе 4 автор разрабатывает прогностическую модель изменения рН для региона, включающего Крым и Краснодарский край, для слоя глубиной 0,25-30 м. При разработке модели выявлены устойчивые сезонные колебания рН (с периодом 12 месяцев, средней амплитудой 0,055 единиц рН). Также обнаружено семь циклических компонент с меньшей амплитудой и периодами от 8,3 месяца до 2,5 лет. Вычислена компонента отрицательного линейного тренда, составившая (–0,024) единицы рН за десятилетие, что отражает процесс прогрессирующего подкисления водной среды. Согласно этой модели к 2300 году прогнозируется снижение рН до 7,5-7,65, что меньше известного прогноза для Мирового океана (до 7,3-7,4). Рассчитано прогнозируемое снижение средних размеров раковины мидий *Mytilus galloprovincialis* с 55,71 мм до 42,04 мм.

В Заключение приведены основные выводы по диссертации. В целом диссертация Е.А Гребневой является законченным исследованием, которое представляет решение актуальных практических задач, предлагает новые решения с серьезным теоретическим и научным обоснованием.

Автореферат на 29 страницах полностью отражает содержание диссертации.

Замечания по оформлению и содержанию

1. В работе найден ряд досадных опечаток, например:
Стр. 17 – в химической формуле для HCO_3^- использованы верхние индексы для числа 3 вместо нижних;
Стр. 25 – «с применением кАлориметрического метода определения рН» вместо кОлориметрического;
Стр. 33 – несогласование слов по родам и лишний предлог «точность... мог достигать до 0,1 ед.»;
Стр. 89 – «декомпозиция ременного ряда» вместо временного ряда;
Стр. 92 – «оценка трудовой компоненты» вместо трендовой.

2. Работа написана сжато, с большим количеством математических формул, причем в некоторых формулах пояснены далеко не все переменные. Также в отдельных местах хотелось бы видеть краткое пояснение смысла для формул.

3. На рис. 3.14 показан временной ряд и линейные тренды величины рН поверхностного слоя вод глубоководной части Черного моря за период с 1957 по 1996 гг. На рисунке отчетливо видно две прямые линии тренда: первая почти горизонтальная с небольшим ростом от 1957 до 1977 года, вторая со снижением от 1978 до 1996 г.

На рис. 3.23 показан график временного хода рН и уравнение линейного тренда за 1957–2022 гг., причем тренд нарисован одной снижающейся прямой линией. Хотелось бы

пояснений насчет различных вариантов интерпретации данных с получением разных трендов.

4. В Главе 3 стр. 72-75 указано, что в отрицательную фазу Восточно-атлантического колебания (ВАК) происходит усиленное штормовое перемешивание черноморских вод в зимний период, что приводит к вспышке роста фитопланктона зимой и весной, сопровождающееся положительным отклонением pH в поверхностном слое. Возможно ли столь активное развитие фитопланктона и фотосинтез в холодный период года (с ноября по февраль), чтобы вызвать выявленное автором подщелачивание воды (на 0,09 ед. pH)?

5. При описании эпизодов снижения или повышения pH автор поясняет биогеохимический механизм этих явлений примерно такими фразами: «это происходит из-за подъема кислых глубинных вод» или «это происходит из-за интенсификации фотосинтеза». Хотелось бы подтвердить эти фразы данными по другим показателям воды, которые также определялись наряду с pH в пробах воды (и поэтому они должны быть в базах данных).

6. В главе 4 выполнен прогноз уменьшения размеров черноморской мидии на основе анализа данных из статьи Михаэлидиса и др., который провел лабораторные опыты с этими моллюсками. К сожалению, автор не нашла и не проанализировала данные о других представителях бентоса Черного или Средиземного моря.

Указанные замечания не снижают значимости полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертационного исследования Е.А. Гребневой. Основные положения и выводы диссертации достаточно хорошо обоснованы. Полученные результаты соответствуют поставленной цели и задачам работы. Высказанные замечания не затрагивают методологическую основу, достоверность выводов и общую научную значимость проведенного исследования. Указанные рекомендации по оформлению не умаляют ценности полученных результатов и не влияют на обоснованность выводов диссертации.

Общее заключение

Основные научные результаты, полученные автором диссертации, достаточно полно отражены в 13 публикациях в рецензируемых журналах (в том числе 2-х статьях по специальности 1.6.21 – «Геоэкология») и 2 статьях, проиндексированных в наукометрических базах Scopus и Web of Science. Зарегистрировано 2 результата интеллектуальной деятельности (РИД). Опубликовано 22 тезиса докладов, представленных на всероссийских и международных конференциях.

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 природно-технических систем и обеспечение их экологической безопасности, разработка средств контроля состояния окружающей среды».

Проведённое исследование представляет собой самостоятельное и целостное научное изыскание, обладающее значительной практической ценностью. Полученные результаты открывают новые возможности для решения прикладных задач в сфере природопользования, внося заметный вклад в развитие геоэкологического инструментария изучения морских акваторий. Разработанные в работе подходы формируют научный фундамент для принятия управленческих решений, направленных на адаптацию хозяйственной деятельности в Черноморском регионе к вызовам глобального изменения 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 степени кандидата географических наук по специальности 1.6.21 – Геоэкология.

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

Официальный оппонент,

Доцент Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства Инженерно-строительного института, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», кандидат технических наук, доцент

07.11.2025
(дата)

Подпись Андриановой Марии Юрьевны заверяю

Андрианова Мария Юрьевна
Подпись
УДОСТОВЕРЯЮ
(подпись)

(дата, подпись, печать организации)

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Почтовый адрес: 195251, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, Политехническая ул., д. 29.

Тел.: +7 (812) 297-59-28

e-mail: andrianova_myu@spbstu.ru