

## ОТЗЫВ

официального оппонента кандидата технических наук Андриановой Марии Юрьевны  
на диссертацию Гребневой Елены Александровны  
**«Оценка водородного показателя рН как индикатора изменений геосистемы 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: «Оценка водородного показателя рН как индикатора изменений геосистемы 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 оценке водородного показателя рН как индикатора изменений геосистемы Чёрного моря под влиянием климатических факторов и биогеохимических процессов.

Водородный показатель (рН) отражает концентрацию ионов водорода в растворе. В поверхностных водных объектах рН является интегральным показателем, значение которого формируется под влиянием ряда физических, химических и биологических процессов с участием атмосферы, гидросферы и литосферы. Снижение рН 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 рН в водах Мирового океана со скоростью около 0,014 ед.рН 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 рН 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 рН 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).

В многолетней динамике восстановленного ряда рН за 1957–1996 гг. выявлены значимые межгодовые и десятилетние осцилляции. Эти колебания связаны с изменчивостью гидрометеорологических условий, обусловленной такими атмосферными модами, как Северо-Атлантическое колебание, Восточно-Атлантическое колебание, Восточно-Атлантическо-Западно-Российское колебание и Скандинавское колебание. Смена фаз этих климатических индексов приводит к изменению стратификации водной толщи, интенсивности вертикального перемешивания, процессов апвеллинга и даунвеллинга, что в свою очередь влияет на гидрохимический режим моря.

Установлено, что из всех крупномасштабных атмосферных процессов значимая связь с аномалиями рН по данным натурных наблюдений выявлена только с Восточно-Атлантическим колебанием (ВАК) в зимний период. Положительная аномалия этого колебания сопровождается понижением рН на 0,08 ед., а отрицательная — повышением на 0,09 ед. Анализ данных реанализа за период 1992–2022 гг. позволил детализировать эти закономерности. Наиболее заметное увеличение рН (до 0,028 ед.) фиксируется в феврале в ответ на январский сигнал Восточно-Атлантического колебания. Значимые положительные аномалии сохраняются и далее: 0,016 ед. в марте при февральском сигнале, а также 0,02 ед. рН в марте и апреле в связи с мартовской отрицательной аномалией ВАК. Описанные закономерности проявляются преимущественно в центральной и западной частях глубоководной акватории Чёрного моря. 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 40 м) в северо-западной части Черного моря, акватории приустьевых 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 в северо-восточной части Черного моря для слоя глубиной 0,25–30 м. При разработке модели выявлены устойчивые сезонные колебания рН (с периодом 12 месяцев, средней амплитудой 0,065 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 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, российских и иностранных ученых, а также данных современных экспедиционных исследований;

- применением методов математической статистики.

#### **Краткая характеристика основного содержания диссертации**

Диссертация написана на 148 страницах машинописного текста, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (206 источников).

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 CO<sub>2</sub> 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 уникальной гидрохимической структурой, и pH его вод значительно отличается от океанских, а также о том, что пространственная и временная неоднородность данных по pH 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 третьей главе** проанализированы среднеголетние характеристики водородного показателя pH в Чёрном море. Для глубоководной части (в границах изобаты 100 м) установлено, что среднее значение pH на поверхности составляет 8,38 ед., а пониженные величины приурочены к центрам циклонических круговоротов. С глубиной pH снижается от 8,22-8,38 ед. на 50 метрах до 7,86-8,22 ед. на 100 метрах глубины.

Сезонный ход рН описывается суммой годовой и полугодовой гармоник с амплитудой 0,05 ед., максимумы приходятся на март и октябрь, минимумы – на июль и декабрь – январь. Вертикальная структура рН демонстрирует понижение с глубиной до менее 8,0 ед. на 150 м, при этом в верхнем 30-метровом слое выражен сезонный подповерхностный максимум, связанный с фотосинтезом.

Для северо-западной части моря и приустьевой акватории Дуная показано, что средние значения рН в поверхностных водах варьируют от 8,42 до 8,47 ед. с максимумом в зоне смешения речных и морских вод. Внутригодовая динамика в поверхностном слое на 83% описывается годовой гармоникой с амплитудой 0,22 ед. (летний максимум до 8,57 ед.), тогда как в придонном слое летний минимум рН может снижаться до 7,40 ед. Установлена тесная корреляция ( $r = 0,95$ ) между сезонным ходом рН и стоком Дуная с двухмесячным запаздыванием.

В межгодовой изменчивости рН глубоководной части выявлены значимые осцилляции, связанные с крупномасштабными атмосферными процессами. Значимая связь аномалий рН установлена с Восточно-Атлантическим колебанием (ВАК) в зимний период: положительная фаза сопровождается понижением рН на 0,08 ед., отрицательная — повышением на 0,09 ед. Анализ данных реанализа за 1992–2022 гг. позволил детализировать эти закономерности. Наиболее заметное увеличение рН (до 0,028 ед.) фиксируется в феврале в ответ на январский сигнал ВАК. Значимые положительные аномалии сохраняются 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 глубоководной акватории Чёрного моря. Наконец, комплексная оценка климатического тренда рН за 1957–2022 гг. показала значимое подкисление со скоростью 0,024 ед. за десятилетие (снижение на 0,16 ед. за 65 лет).

**В четвертой главе** 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 0,065 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 воды. 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 Заключении** 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 23 страницах полностью отражает содержание диссертации.

#### **Замечания по содержанию:**

1. 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.

2. На рис. 3.14 и 3.16 показан временной ряд и линейные тренды рН поверхностного слоя вод глубоководной части Черного моря с 1957 по 1996 гг. На рисунке 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. 3.26 показан

график хода рН и уравнение линейного тренда за 1957–2022 гг., тренд нарисован одной снижающейся прямой. Поясните различные варианты интерпретации данных.

3. В Главе 3 стр. 83-85 указано, что в отрицательную фазу Восточно–Атлантического колебания (ВАК) происходит усиленное штормовое перемешивание черноморских вод в зимний период, что приводит к росту фитопланктона зимой и весной, сопровождающемуся положительным отклонением рН 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. рН)?

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

5. 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 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 3 публикациях в рецензируемых журналах по специальности 1.6.21 – «Геоэкология». 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 геосферы 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».

Проведенное 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 Черноморской регионе к вызовам глобального изменения климата.

