

Гидрометеорология и экология. 2026. № 83. С. 323—339.
Hydrometeorology and Ecology. 2026;(83):323—339.

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Научная статья
УДК 551.513.7:551.464(262.5)
doi: 10.33933/2713-3001-2026-83-323-339

Связь Восточно-Атлантического колебания с аномалиями водородного показателя рН в глубоководной части Чёрного моря

Елена Александровна Гребнева^{1, 2}, Михаил Борисович Шилин²

¹ Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия, grebneva@ibss-ras.ru

² Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Проанализированы статистические взаимосвязи между состоянием Восточно-Атлантического колебания (ВАК) и изменениями водородного показателя (рН) в поверхностных водах глубоководной части Чёрного моря. На основе данных биогеохимического реанализа за период с 1992 г. по 2022 г. и методики разностных композитов установлено, что в холодное время года значительное повышение рН (до 0,028 единиц) обнаружено в феврале в ответ на январскую отрицательную аномалию ВАК. Отрицательная аномалия ВАК в ноябре и декабре сопровождается положительными аномалиями рН от 0,012 до 0,016 ед. в течение этих месяцев. В тёплый сезон, с мая по июль, положительные аномалии ВАК не проявляют синхронных изменений в поле рН. Однако через 3—6 месяцев формируются устойчивые отрицательные аномалии рН осенью и зимой. Эти отклонения постепенно увеличиваются от –0,014 до –0,022 единиц.

Ключевые слова: Чёрное море, водородный показатель рН, Восточно-Атлантическое колебание (ВАК), биогеохимический реанализ, сезонный отклик, фитопланктон.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственных заданий: ФИЦ ИнБЮМ по теме «Функциональные, метаболические и молекулярно-генетические механизмы адаптации морских организмов к условиям экстремальных экотопов Черного и Азовского морей и других акваторий Мирового океана» (№ гос. регистрации 124030100137-6); ФГБОУ ВО «РГГМУ» «Бесшовное 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» (№ FSZU-2023-0002).

Для цитирования: Гребнева Е. А., Шилин М. Б. Связь Восточно-Атлантического колебания с аномалиями водородного показателя рН в глубоководной части Чёрного моря // Гидрометеорология и экология. 2026. № 83. С. 323—339. doi: 10.33933/2713-3001-2026-83-323-339

Original article

Relationship between the East Atlantic Oscillation and pH anomalies in the deep-water part of the Black Sea

Elena A. Grebneva^{1,2}, *Mikhail B. Shilin*²

¹ A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia, E-mail: grebneva@ibss-ras.ru

² Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

Summary. The Black Sea, as a semi-enclosed basin, experiences anthropogenic acidification at rates comparable to those observed in the open waters of the North Atlantic. Against the background of a long-term downward trend in pH, quasi-periodic pH oscillations associated with natural climate variability are recorded in the deep-sea part of the basin. Based on the CMEMS BS-Biogeochemistry biogeochemical reanalysis (1992–2022), this study provides, for the first time, a statistically significant assessment of the East Atlantic Oscillation (EA) influence on the formation of pH anomalies in the Black Sea surface waters for all months of the year. The composite difference method was applied after removing the quadratic trend from both pH series and the EA index, which allowed for a correct isolation of interannual variability.

The relationship between the EA and pH is shown to have a pronounced seasonal character. During the cold period (November to March), the negative EA anomaly (EA⁻) induces an almost synchronous pH increase of 0.012–0.028 units, with a maximum in February (+0.028) in response to the January EA signal. Spatially, positive pH anomalies are predominantly localized in the central-western part of the sea. During the warm season, the positive EA anomaly (EA⁺) leads to a delayed (by 3–6 months) pH decrease ranging from –0.01 to –0.032 units. The strongest negative response is observed in December (–0.032) following the July EA⁺ signal, with anomalies consistently confined to the central-eastern part of the sea and intensifying from the first to the second month of manifestation. No statistically significant pH response was found for the positive EA phase in the cold season or for the negative EA phase in the warm season.

The proposed mechanism involves changes in atmospheric circulation, vertical mixing, production-destruction processes, and seasonal cyclonic circulation in the eastern part of the sea. However, it is emphasized that the identified relationships are purely statistical; the physical mechanisms remain hypothetical and require further verification using additional marine environment parameters.

Keywords: Black Sea, hydrogen index (pH), East Atlantic Oscillation (EAO), biogeochemical reanalysis, seasonal response, phytoplankton.

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of state assignments: the Federal Research Center «Institute of Biology of the Southern Seas» under the topic «Functional, metabolic and molecular genetic mechanisms of adaptation of marine organisms to the conditions of extreme ecotopes of the Black and Azov Seas and other areas of the World Ocean» (State Registration No. 124030100137-6); and the Russian State Hydrometeorological University under the topic «Seamless numerical modeling of simultaneous changes in climate, weather, gas and aerosol composition of the atmosphere on global and regional scales, and development of a digital geographic information system for processing databases on atmospheric composition and structure» (No. FSZU-2023-0002)

For citation: Grebneva E. A., Shilin M. B. Relationship between the East Atlantic Oscillation and pH anomalies in the deep-water part of the Black Sea *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2026;(83):(323–339). doi: 10.33933/2713-3001-2026-83-323-339. (In Russ.).

Введение

Формирование климата Европы и Средиземноморско-Черноморского бассейна в значительной мере обусловлено циркуляционными процессами Северной

Атлантики, которые задают основную пространственно-временную изменчивость региональных гидрометеорологических условий [1, 2]. Среди них наиболее значимыми для Атлантико-Европейского региона, включая акваторию Чёрного моря, являются Североатлантическое (САК), Восточно-Атлантическое (ВАК), Скандинавское (СК) и Восточно-Атлантическое — Западнороссийское (ВАЗРК) колебания, которые оказывают определяющее влияние на формирование погодных условий [1, 3]. Изменения состояния природных процессов в системе океан—атмосфера, которые отражаются в индексах этих колебаний, формируют аномалии атмосферного давления, температуры воздуха, количества осадков и скорости приповерхностного ветра. Для морских акваторий это приводит к модификации стратификации водной толщи, увеличению интенсивности вертикального перемешивания, усилению процессов апвеллинга и даунвеллинга [4, 5, 6].

Совокупное воздействие рассмотренных процессов оказывает значительное влияние как на гидрохимический режим акватории, так и на функционирование региональных экосистем [7, 8, 9]. Ключевым гидрохимическим показателем, наиболее чувствительным к таким изменениям, является водородный показатель (рН), который служит важным индикатором состояния морских экосистем. Значения рН интегрируют динамику биогеохимических процессов, происходящих в морской среде.

Современные исследования сфокусированы на глобальных трендах изменения рН поверхностных вод Мирового океана. Снижение значения рН связано с поглощением океаном атмосферного углекислого газа (CO_2) на фоне его роста в атмосфере. Примером такого изменения служит интенсивное закисление поверхностных вод Северной Атлантики. В субполярных районах этой акватории за 26-летний период наблюдений (1981—2007 гг.) был выявлен устойчивый тренд снижения рН со скоростью $-0,0022 \pm 0,0004$ единицы в год [10]. Снижение рН в Северной Атлантике за период с 1993 г. по 2017 г. достигло $-0,017$ единиц на десятилетие [11].

Одним из наиболее ощутимых последствий закисления является сокращение концентрации карбонат-ионов в морской воде. Поскольку карбонаты необходимы для формирования и поддержания кальциевых структур у ряда морских организмов (например, кораллов и моллюсков), их дефицит представляет серьёзную угрозу для морской биоты [12, 13]. Помимо этого, закисление оказывает угнетающее воздействие на некоторые физиологические функции морских обитателей, особенно рыб. Уменьшение рН может нарушать работу хеморецепторных систем рыб, включая системы обоняния. Это может ухудшить их способность распознавать ключевые сигналы окружающей среды: наличие хищников, источников пищи или особей для размножения, что непосредственно угрожает устойчивости популяций [14, 15].

Не менее важным аспектом закисления являются его долгосрочные последствия для полузамкнутых морей. Чёрное море как внутриконтинентальный бассейн Атлантического океана также демонстрирует устойчивую тенденцию к уменьшению рН равную $-0,024$ ед. рН за 10 лет, сопоставимую по скорости с процессами закисления в Северной Атлантике [16]. Однако помимо глобального

антропогенного тренда в глубоководных частях Чёрного моря фиксируются выраженные квазипериодические колебания значений рН с периодичностью около 10 лет [17]. Наложение этих естественных квазипериодических флуктуаций значительной амплитуды на общий отрицательный тренд создаёт условия для достижения экстремально низких значений рН в отдельные периоды. Это может значительно увеличивать нагрузку на уязвимые морские экосистемы.

Таким образом, возникает необходимость определить, какая доля общей изменчивости рН в Чёрном море связана с описанными квазипериодическими климатическими процессами. Этот анализ позволит дать точную оценку климатических изменений величин рН и улучшить прогнозирование их динамики. Одним из подходов для решения этой задачи является изучение статистической связи между изменениями величины рН и состоянием основных крупномасштабных атмосферных циркуляционных мод. Например, в исследовании [18] было проверено предположение о том, что квазипериодические колебания рН могут быть связаны с гидрометеорологическими вариациями, обусловленными воздействием таких атмосферных мод, как САК, ВАК, СК и ВАЗПК. На основе архивных данных за период с 1957 г. по 1996 г. обнаружено, что ВАК оказывает статистически значимое влияние на формирование аномалий рН в зимний период. Однако эта взаимосвязь была установлена только для данных, усреднённых за четырёхмесячный зимний сезон (ноябрь—февраль), что связано с недостаточной плотностью и однородностью имеющегося архива измерений.

Целью данного исследования является выполнение углублённого анализа и обеспечение надёжной статистической оценки связи между состоянием ВАК и значениями рН в поверхностном слое Чёрного моря во все месяцы года. Для достижения этой цели использованы однородные данные современного биогеохимического реанализа за период с 1992 г. по 2022 г. [19].

Данные

Среднемесячные данные о величине рН за период с января 1992 г. по декабрь 2022 г. были выбраны из массива биогеохимического реанализа CMEMS BS-Biogeochemistry (BLKSEA_MULTIYEAR_BGC_007_005) [19]. Реанализ основан на ассимиляции данных натурных и спутниковых наблюдений с использованием численной модели, объединяющей гидродинамический модуль NEMO 4.2 и биогеохимический блок VAMNBI [8, 20]. В результате получен согласованный трёхмерный набор данных с горизонтальным разрешением около 2,5 км и 59 вертикальными уровнями [8, 19, 20]. Сравнительный анализ величин рН, полученных в рамках данного биогеохимического реанализа, с натурными измерениями за период с 2019 г. по 2020 г., выполненный в работе [21], подтвердил достаточную точность воспроизведения величин рН для Чёрного моря.

Исследуемый регион охватывает центральную часть Черного моря, ограниченную изобатой 1000 м и координатами 42,23°—44,65° с.ш. 29°—41,3° в.д. Выбор данной области обусловлен необходимостью минимизации влияния прибрежных процессов, которые могут исказить климатические изменения величины рН. Кроме того, в работе использован среднемесячный индекс ВАК, рассчитанный

за аналогичный временной интервал. Данные индекса были получены в NOAA Climate Prediction Centre [22].

Методика. Композитный анализ

В рамках анализа связи между состоянием ВАК и величиной рН в Черном море использовался метод композитного анализа. Расчёт включал несколько последовательных этапов.

Аномалии рН были определены для каждого узла пространственной сетки путём удаления долгопериодного тренда. Проведена проверка долгопериодной изменчивости рН по всем узлам сетки (493 узла по широте × 138 узлов по долготе) исследуемого региона. Для демонстрации динамики рН в указанный период на рис. 1 приведены временные ряды январских значений в четырех узлах сетки.

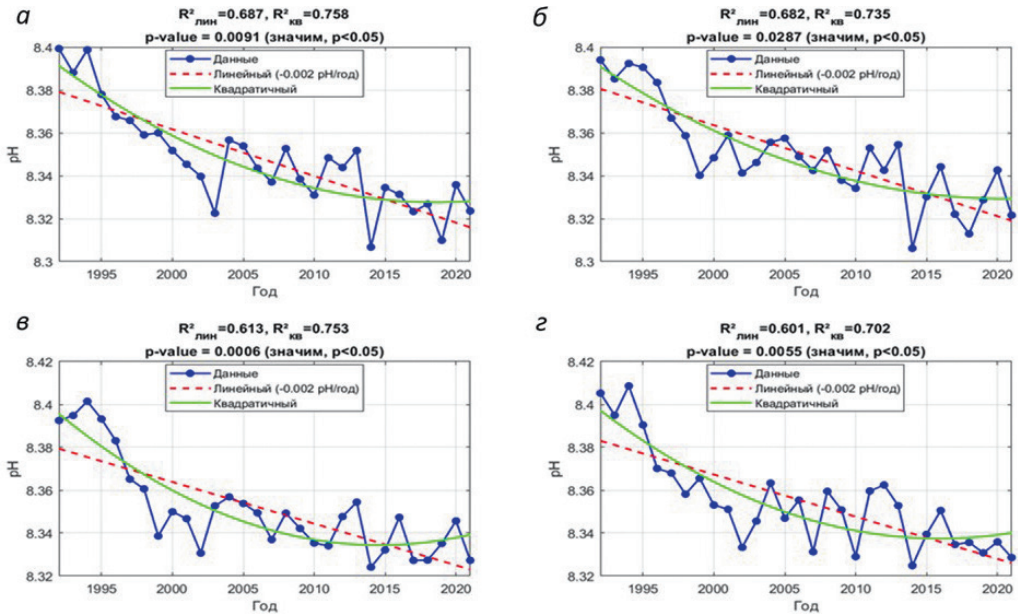


Рис. 1. Временные ряды рН среднемесячных значений в январе (синие маркеры) с наложенными линейным (красный пунктир) и квадратичным (зелёная сплошная линия) трендами для четырёх узлов глубоководной части Чёрного моря. Координаты выбранных репрезентативных узлов: 41,82° с.ш., 29,70° в.д. (а); 42,35° с.ш., 32,20° в.д. (б); 43,00° с.ш., 35,00° в.д. (в); 43,80° с.ш., 37,30° в.д. (з). Подписи содержат значения R^2 и p -value для квадратичного члена.

Fig. 1. Time series of January mean pH values (blue markers) with superimposed linear (red dashed line) and quadratic (green solid line) trends for four sites in the deep-water part of the Black Sea. Coordinates of the selected representative sites: 41.82° N, 29.70° E (a); 42.35° N, 32.20° E (b); 43.00° N, 35.00° E (c); 43.80° N, 37.30° E (d).

The labels include R^2 and p -values for the quadratic term.

Анализ показал, что долгопериодное снижение рН имеет нелинейный характер: с 1992 г. по 2005 г. отмечалось более интенсивное подкисление, а после 2005 г. темпы снижения замедлились. Точка перехода подкисления большинства узлов пространственной сетки была зафиксирована в интервале с 2004 г. по 2006 г. Это подтверждает, что выявленный характер изменчивости является устойчивым и не связан со случайными флуктуациями выборки.

За каждый месяц периода с 1992 г. по 2021 г. выполнен расчет трендов. Средний коэффициент детерминации R^2 для 12 месяцев квадратичной модели составил 0,67, тогда как для линейной модели он был равен 0,54. То есть, нелинейные модели существенно лучше описывают дисперсию временных рядов рН. Статистическая значимость квадратичной модели была подтверждена F-тестом [23] ($p < 0,05$) практически для всех узлов исследуемой акватории.

На следующем этапе для каждого месяца года был составлен временной ряд индекса ВАК за период с 1992 г. по 2022 г. Для достижения сопоставимости методик обработки данных из временных рядов для каждого календарного месяца был удален квадратичный тренд. Такая операция направлена на выделение межгодовых колебаний индекса и сохранение положительных и отрицательных отклонений относительно долгопериодной тенденции. После удаления квадратичного тренда межгодовые колебания индекса ВАК остались неизменными, сохраняя значительные отклонения от нейтрального состояния (рис. 2 а, б). Данный подход позволяет эффективно фильтровать долгопериодные изменения, которые недостаточно разрешимы при рассматриваемой длительности временного ряда и не входят в область настоящего исследования.

На следующем этапе анализа для детрендрованных временных рядов индекса ВАК было рассчитано среднеквадратическое отклонение (σ) [26]. В ходе работы проводился отбор лет, в которые значения индекса были выше или ниже среднего уровня на 1σ (рис. 2). Это позволило выделить две группы лет: с положительными и отрицательными аномалиями. Количество таких лет варьируется от 5 до 8 для каждого месяца года, что составляет не менее 17 % общего объема данных во временных рядах. Для каждой из отобранных групп лет рассчитывались средние значения, среднеквадратические отклонения и дисперсии аномальных величин рН. На завершающем этапе исследования определялся «чистый» климатический сигнал изменений рН в Чёрном море, вызванный воздействием ВАК. Этот сигнал оценивался как полуразность между средними по выборке значениями для каждого узла пространственной сетки (так называемый полуразностный композит). Статистическую значимость различий между композитными аномалиями проверяли методом t -критерия Стьюдента при уровне доверия $p < 0,1$.

Проведенный анализ выполнялся как синхронно, так и с учетом временного сдвига. В рамках синхронного анализа композитные карты значений рН строились на тот же период, что и положительные или отрицательные аномалии ВАК. Для изучения задержанного отклика повторный анализ проводили с временным сдвигом до шести месяцев, учитывая лидерование индекса ВАК. Например, при сдвиге на шесть месяцев данные рН за июль сопоставлялись с состоянием индекса ВАК в январе того же года.

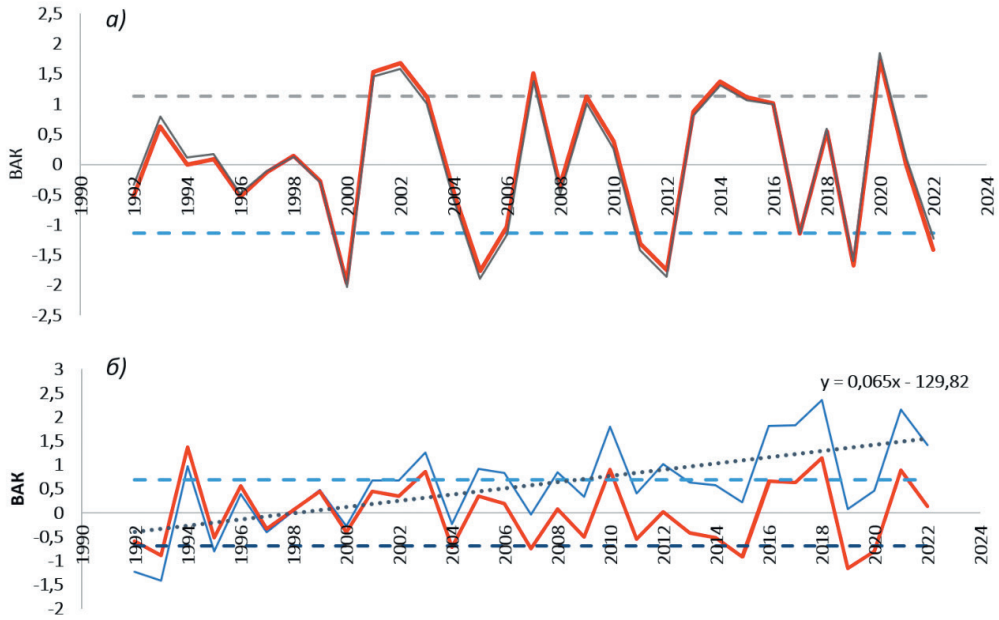


Рис. 2. Временной ряд среднемесячных значений индекса Восточно-Атлантического колебания (ВАК) в январе (а) и июле (б) за период с 1992 г. по 2022 г.

Пунктирная линия — линия тренда, голубой график — исходный ряд; красный график — ряд после удаления долгопериодного тренда квадратичной модели и прямые линии пороговые значения $\pm 1\sigma$.

Fig. 2. Time series of the East Atlantic Oscillation (EAO) index mean monthly values in January (a) and July (b) for the period 1992—2022.

Dashed line – trend line; blue line — original series; red line — series after removing the long-term quadratic trend; straight lines — threshold values $\pm 1\sigma$.

Результаты и обсуждение

Связь между состоянием ВАК и значениями рН в поверхностном слое Чёрного моря имеет выраженную сезонную зависимость (рис. 3).

Анализ показал, что в холодный период года практически одновременно с отрицательными аномалиями ВАК возникают положительные аномалии рН. Так, при отрицательных значениях ВАК в январе, феврале, марте, ноябре и декабре отмечаются устойчивые положительные аномалии рН в пределах от +0,012 до +0,028 (рис. 3). В тёплое время года, напротив, положительные аномалии ВАК сопровождаются отрицательными отклонениями рН с задержкой от 3 до 6 месяцев (рис. 3). Например, при майской положительной аномалии ВАК отмечается снижение рН в октябре в диапазоне от –0,008 до –0,01 и в ноябре — от –0,008 до –0,014. При положительной аномалии ВАК в июне фиксируются отрицательные отклонения рН с сентября по декабрь в пределах от –0,014 до –0,022 (рис. 3). При аномалии ВАК в июле формируются отрицательные отклонения рН в ноябре

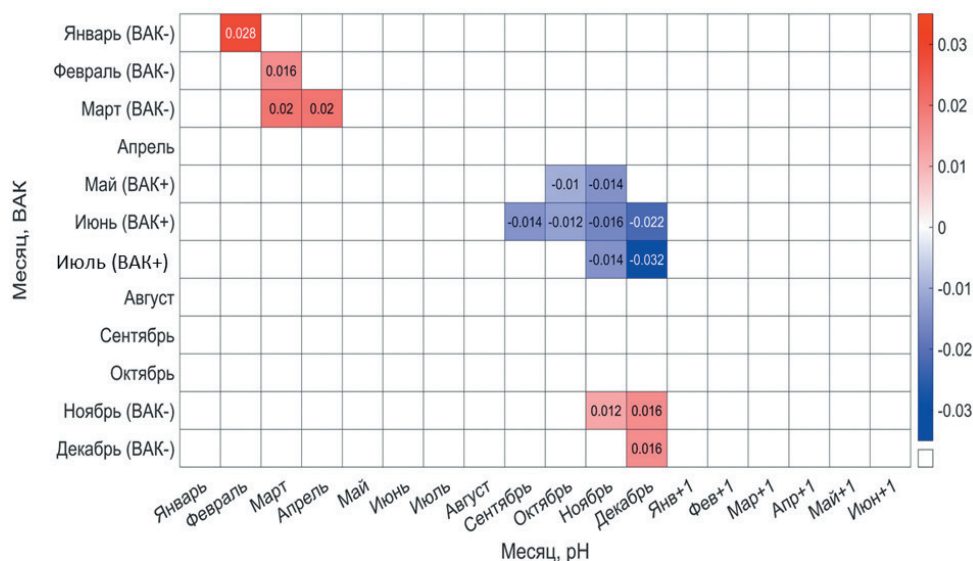


Рис. 3. Максимальные величины аномалий полуразностного композита, характеризующие отклик водородного показателя на изменчивость ВАК, по месяцам года.

Fig. 3. Maximum anomaly values of the half-difference composite characterizing the response of the hydrogen index to EAO variability by month of the year.

(от $-0,008$ до $-0,014$) и декабре (от $-0,02$ до $-0,032$) (рис. 3). В описанных случаях, при запаздывающем отклике прослеживается устойчивая тенденция к усилению отрицательных аномалий рН от первого месяца их возникновения ко второму.

Дополнительно анализ пространственных данных на основе карт полуразностного композита показал преобладание изменения полей от одного месяца к другому. В частности, на рис. 4 а и рис. 4 б демонстрируются поля для холодного периода. На рис. 4 а видно, что при синхронном сигнале область значимых положительных аномалий рН (от $0,008$ до $0,012$) охватывает центральную часть моря. При запаздывающем отклике (индекс ВАК в ноябре, а значение рН в декабре) величина положительных аномалий рН увеличивается до $0,016$ в центральной части моря, при этом область статистически значимых отклонений смещается западнее относительно исходного положения синхронного сигнала (рис. 4 б).

Выявленная почти синхронная реакция рН на зимнюю отрицательную аномалию индекса ВАК в холодный сезон согласуется с ранее полученными результатами, основанными на данных натурных наблюдений за период с 1957 г. по 1996 г. В работе [18] с применением композитного анализа временных рядов было установлено, что в период отрицательной аномалии индекса ВАК фиксируется положительная аномалия рН (около $+0,09$ ед.), а при положительной аномалии индекса ВАК обнаружена отрицательная аномалия рН (в среднем $-0,08$ ед.). Важно отметить, что из-за ограниченности данных в [18] анализ проводился на величинах, усреднённых за четырёхмесячные интервалы, причем

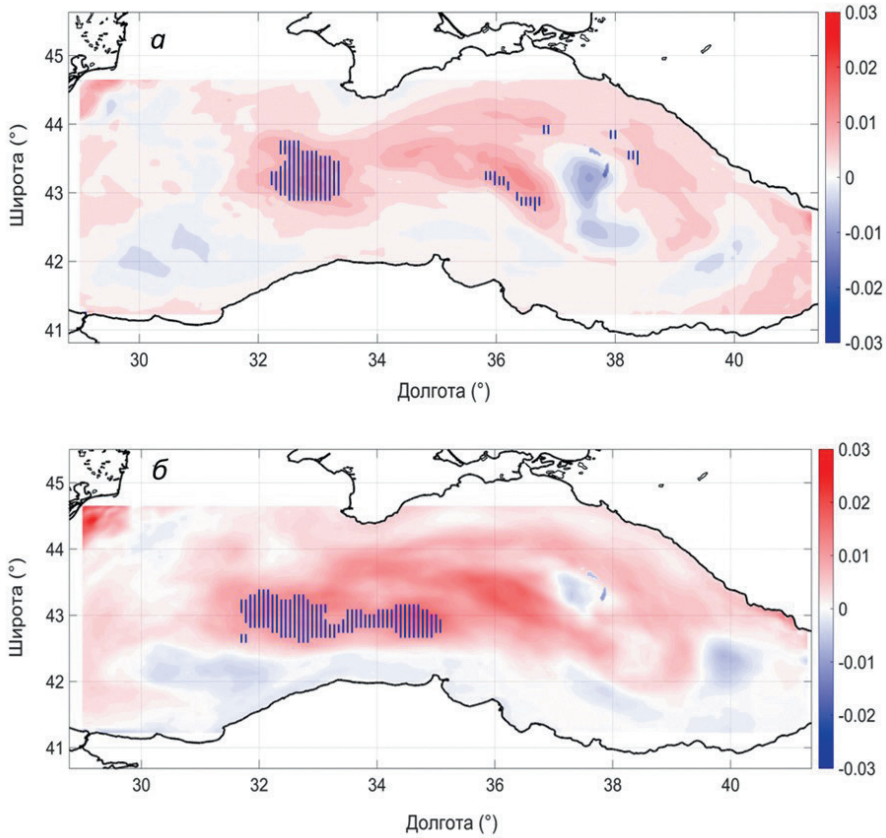


Рис. 4. Поле полуразностного композита для Восточно-Атлантического колебания в ноябре — синхронный сигнал (а) и поле полуразностного композита водородного показателя рН в декабре на сигнал ВАК в ноябре — запаздывающий сигнал (б).

Синие вертикальные линии обозначают область значимости при отрицательной аномалии ВАК–.

Fig. 4. (a) Half-difference composite field of the hydrogen index (pH) for the East Atlantic Oscillation in November — synchronous signal; (b) half-difference composite field of the hydrogen index (pH) for the EAO signal in November — delayed signal in December.

Blue vertical lines indicate the significance area for the negative EAO anomaly (EAO–).

аномалии индекса ВАК рассматривались после удаления долгопериодного линейного тренда.

Предполагаемый механизм влияния ВАК на рН можно объяснить изменениями в атмосферной циркуляции и связанными с этим биогеохимическими процессами. При отрицательной аномалии индекса происходит ослабление зонального переноса воздушных масс и усиление циклонической активности в Черноморско-Средиземноморском регионе [27, 28]. Это приводит к увеличению ветрового воздействия и, соответственно, к усилению вертикального турбулентного

перемешивания в верхнем слое моря. Результаты других исследований показывают, что в такие зимы, особенно в восточной части Черного моря, происходит существенный рост биомассы фитопланктона за счёт поступления биогенных элементов из подповерхностных слоёв моря [29]. Поскольку процесс активного фотосинтеза сопровождается потреблением растворённого углекислого газа, то это вызывает повышение рН в поверхностных водах, что согласуется с результатами [30].

В тёплый период года статистически значимый сигнал выявляется для положительной аномалии ВАК (рис. 3). Этот сигнал проявляется с запаздывающим откликом, который выражается через отрицательные аномалии рН. Положительные аномалии индекса ВАК, фиксируемые в мае, июне и июле, не вызывают немедленного изменения величины рН. Соответствующий отклик в виде отрицательных аномалий формируется с задержкой от трех до шести месяцев, достигая наибольших значений в декабре (рис. 3).

Пространственная структура данного воздействия сохраняет устойчивость при различных временных интервалах запаздывания. Анализ композитных полей указывает на их отчетливую взаимосвязь между последовательными месяцами, аналогично наблюдениям, сделанным для холодного периода года. Отрицательные аномалии рН устойчиво приурочены к центральным и восточным частям акватории (рис. 5 а, б).

Дополнительно был проанализирован отклик рН на июльский сигнал ВАК. В ноябре средняя отрицательная аномалия рН варьируется от $-0,008$ до $-0,014$ единиц рН, достигая максимума в центральной и восточной частях акватории (рис. 5 а). К декабрю значения аномалий возрастают до $-0,016 \dots -0,032$ единиц рН, что делает данный сигнал наиболее выраженным среди всех запаздывающих реакций (рис. 5 б). При этом пространственная структура отрицательных аномалий остается неизменной, что свидетельствует о продолжении развития и возможной адвекции модифицированных водных масс.

Потенциальный механизм выявленных запаздывающих связей может быть объяснён следующим образом. Преобладание положительной аномалии ВАК обуславливает доминирование зональной атмосферной циркуляции. В свободной атмосфере это явление сопровождается крупномасштабной отрицательной барической аномалией над акваторией Северной Атлантики, в то время как над регионом Средиземного и Чёрного морей формируется область повышенного атмосферного давления [22]. Такой устойчивый антициклонический режим в тёплый сезон благоприятствует формированию положительных температурных аномалий, маловетреной погоды и уменьшению интенсивности вертикального перемешивания морских вод, создавая условия для прогрева поверхностного слоя воды [22, 27].

Согласно классическим представлениям, подобные условия в весенне-летний период могут существенно изменять сезонный цикл развития фитопланктона [29], способствуя развитию сообществ, адаптированных к условиям летней стратификации (например, кокколитофорид) [32], и обеспечивая предпосылки для накопления органического вещества в фотическом слое. Впоследствии органическое

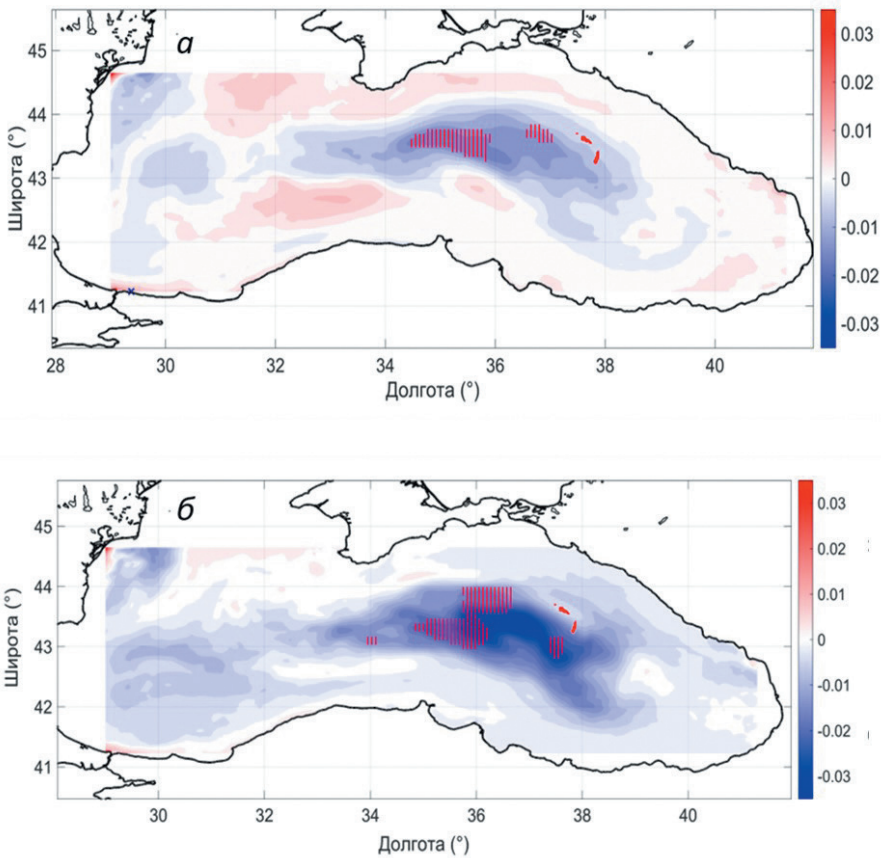


Рис. 5. Поле полуразностного композита водородного показателя рН в ноябре на сигнал ВАК в июле — запаздывание 4 м (а) полуразностного композита водородного показателя рН в декабре на сигнал ВАК в июле — запаздывание 5 м (б).

Красные вертикальные линии обозначают область значимости при ВАК+.

Fig. 5. Half-difference composite fields of the hydrogen index (pH):
 (a) November response to the July EAO signal (4-month lag);
 (b) December response to the July EAO signal (5-month lag).

Red vertical lines indicate the significance area for the positive EAO anomaly (EAO +).

вещество погружается и претерпевает реминерализацию в подповерхностных слоях, что приводит к снижению значений рН в этих зонах [8, 9].

С началом осенне-зимнего периода усиление ветров вызывает активацию вертикального перемешивания и общей циклонической циркуляции в Чёрном море [33]. Однако эти процессы характеризуются пространственной неоднородностью. Наиболее интенсивный и устойчивый подъём глубинных вод отмечается в восточной части моря, что объясняется наличием постоянной области циклонической

активности, существующей здесь круглый год и резко усиливающейся в холодные месяцы года [34]. Начиная с ноября—декабря, происходит переход к стадии доминирования интенсивной циклонической циркуляции, максимум которой приходится на восточную часть моря в период с января по март [33]. Этот вывод подтверждается анализом сезонных изменений динамических высот водной толщи [32].

Таким образом, усиливающаяся к осени и зиме циклоническая циркуляция в восточной части Чёрного моря выполняет ключевую роль в процессе вертикального поднятия вод из подповерхностных слоёв к поверхности моря. Этот усиленный вертикальный обмен способствует выносу богатых продуктами реминерализации летнего органического вещества масс воды с низкими значениями рН. Следовательно, летний атмосферный режим (положительное состояние ВАК), способствовавший аккумуляции органического вещества на поверхности, через механизмы сезонной вертикальной циркуляции приводит к проявлению сигнала подкисления поверхностных вод в конце осени и начале зимы, особенно выраженному в восточной части моря.

Заключение

В результате выполненного анализа удалось подробно описать статистические взаимосвязи между фазами ВАК и изменениями рН в поверхностных водах Чёрного моря, подчеркнув их сложный и сезонно обусловленный характер.

Установлено, что в холодный период года отрицательная аномалия ВАК сопровождается статистически значимым откликом в виде положительных аномалий рН, которые проявляются как одновременно, так и с задержкой на следующий месяц. Наиболее заметное увеличение рН фиксируется в феврале в ответ на январский сигнал ВАК (до +0,028 единиц). Устойчивые 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. Отрицательная фаза ВАК в ноябре и декабре вызывает возникновение положительных аномалий рН от 0,012 до 0,016 ед. в течение ноября и декабря. Эти изменения пространственно локализуются преимущественно в центральной и западной частях акватории. Для положительной фазы ВАК статистически значимого отклика рН в холодный период выявлено не было.

В тёплый период года характер связей изменяется. Положительные аномалии ВАК, обнаруживаемые с мая по июль, не являются причиной немедленных откликов поля рН, однако спустя 3–6 месяцев формируются устойчивые отрицательные аномалии. Так, майская фаза ВАК+ коррелирует с появлением аномалии рН в октябре (–0,01 единиц) и ноябре (–0,014 единиц), июньская — с сентября по декабрь с постепенным увеличением аномалии от –0,014 до –0,022 единиц, а июльская — с максимальным снижением рН в ноябре (–0,014 единиц) и декабре (–0,032 единиц). В каждом из этих случаев прослеживается тенденция к усилению отрицательных аномалий от первого месяца ко второму. Пространственная структура данных изменений сосредоточена преимущественно в центральной и восточной частях акватории Чёрного моря.

Таким образом, результаты исследования подтверждают выраженную сезонную динамику связи рН с фазами ВАК. В холодное время года выражена доминирующая синхронная положительная зависимость с отрицательной фазой ВАК, тогда как положительная фаза ВАК в летний период демонстрирует отсроченный отрицательный сигнал, усиливающийся осенью и зимой.

Важно отметить, что выявленные связи имеют исключительно статистический характер и не подтверждают наличие причинно-следственной зависимости. Совпадения результатов могут быть обусловлены влиянием сторонних факторов или являться следствием ложной корреляции. Физическое объяснение предполагает косвенное влияние фаз ВАК на гидрометеорологические условия и биогеохимические процессы, но остаётся на уровне гипотезы. Дальнейшее исследование с привлечением дополнительных параметров морской среды необходимо для проверки причинно-следственных механизмов данного явления.

Список литературы

1. Белокопытов В. Н. Климатические изменения гидрологического режима Черного моря: Дисс. д-ра геогр. наук (спец. 25.00.28). Севастополь: ФГБУН «Морской гидрофизический институт РАН». 2007. 377 с.
2. Полонский А. Б., Башарин Д. В., Воскресенская Е. Н. и др. Североатлантическое колебание: описание, механизмы и влияние на климат Евразии // Морской гидрофизический журнал. 2004. № 2. С. 42—57.
3. Barnston A. G., Livezey R. E. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns // Monthly Weather Review. 1987. Vol. 115, № 6. P. 1083—1126.
4. Аверьянова Е. А., Губарев А. В., Полонский А. Б. Влияние североатлантического и восточно-атлантического колебаний на завихренность касательного напряжения трения ветра над Черным морем // Метеорология и гидрология. 2022. № 1. С. 24—35.
5. Евстигнеев В. П., Наумова В. А., Воскресенская Е. Н. и др. Ветроволновые условия прибрежной зоны Азово-Черноморского региона. С.: ИПТС, 2017. 320 с.
6. Lionello P., Bhend J., Buzzi A., et al. Cyclones in the Mediterranean region: Climatology and effects on the environment // Developments in earth & environmental sciences. 2006. Vol. 14. P. 325—372.
7. Oguz T., Dippner J. W., Kaymaz Z. Climatic regulation of the Black Sea hydro-meteorological and ecological properties... // Journal of Marine Systems. 2006. Vol. 60. Iss. 3-4. P. 235—248. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2005.11.011.
8. Grégoire M., Soetaert K. Carbon, nitrogen, oxygen and sulfide budgets in the Black Sea: A biogeochemical model of the whole water column coupling the oxic and anoxic parts // Ecological Modelling. 2010. Vol. 221. No. 19. P. 2287—2301.
9. Podymov O. I., Yakushev E. V., Kostyleva A. V. On Interannual Variability of Chemical Characteristics of Redox Layer and Cold Intermediate Layer of the Black Sea // Chemical Structure of Pelagic Redox Interfaces. 2013. P. 121—135. DOI: 10.1007/978_2011_122.
10. Lauvset S. K., Gruber N. Long-term trends in surface ocean pH in the North Atlantic // Marine Chemistry. 2014. Vol. 162. P. 71—76.
11. Leseurre C., Monaco Cl. Lo., Reverdin G., et al. Ocean carbonate system variability in the North Atlantic Subpolar surface water (1993–2017) // Biogeosciences. 2020. Vol. 17. P. 2553—2577.
12. Ross P. M., Parker L., Byrne M. The impact of ocean acidification on reproduction, early development and settlement of marine organisms // Water. 2011. Vol. 3. no. 4. P. 1005-1030. <https://doi.org/10.3390/w3041005>.
13. Zhao X., Guo C., Han Y., et al. Ocean acidification decreases mussel byssal attachment strength and induces molecular byssal responses // Marine Ecology Progress Series. 2017. Vol. 565. P. 67—77. DOI: 10.3354/meps11992.

14. Munday P. L., Dixon D. L., McCormick M. I. et al. Replenishment of fish populations is threatened by ocean acidification // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2010. Vol. 107(29). P. 12930—12934. DOI: 10.1073/pnas.1004519107.
15. Cripps I. L., Munday P. L., McCormick M. I. Ocean acidification affects prey detection by a predatory reef fish // *PLoS ONE*. 2011. Vol. 6, № 7. Art. e22736. DOI: 10.1371/journal.pone.0022736.
16. Гребнева Е. А., Шилин М. Б. Анализ долгосрочных изменений pH в Чёрном море: Верификация данных реанализа Cmems BS-Biogeochemistry и натуральных измерений // *Естественные и технические наук*. 2025. №3. С. 198—211. DOI: 10.25633/ETN.2025.03.19.
17. Полонский А. Б., Гребнева Е. А. О межгодовой изменчивости величины pH в поверхностном слое глубоководной части Черного моря // *Системы контроля окружающей среды*. 2022. № 2(48). С. 12—21.
18. Полонский А. Б., Гребнева Е. А. Влияние Восточно-Атлантического колебания на аномалии pH в верхнем слое открытой части Черного моря // *Системы контроля окружающей среды*. 2023. Вып. 1 (51). С. 15—26. DOI: 10.33075/2220-5861-2023-1-15-26.
19. Grégoire M., Vandenbulcke L., Capet A. Black Sea Biogeochemical Reanalysis (CMEMS BS-Biogeochemistry) (Version 1) [Data set]. Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS). 2020: [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://doi.org/10.25423/CMCC/BLKSEA_REANALYSIS_BIO_007_005_BAMHBI (Дата обращения: 13.01.2025).
20. Grégoire M., Raick C., Soetaert K. Numerical modeling of the deep Black Sea ecosystem functioning during the late 80's (eutrophication phase) // *Progress in Oceanography*. 2008. No. 76 (9). P. 286—333.
21. Полонский А. Б., Гребнева Е. А. Верификация данных ре-анализа CMEMS BS-Biogeochemistry по величине pH в Черном море с использованием результатов прямых измерений // *Системы контроля окружающей среды*. 2024. № 1(55). С. 112—118. DOI: 10.33075/2220-5861-2024-1-112-118.
22. NOAA/National Weather Service, Center for Climate Prediction: [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/ea_map.shtml (дата последнего обращения: 06.09.2022 г.).
23. Харьков О. А., Соловьев А. Г. Статистические методы и математическое моделирование: учебное пособие. А.: СГМУ, 2017. 164 с.
24. Thoning K. W., Tans P. P., Komhyr W. D. Atmospheric carbon dioxide at Mauna Loa Observatory, 2. Analysis of the NOAA/GMCC data, 1974–1985 // *Journal of Geophysical Research*. 1989. Vol. 94. P. 8549–8565. DOI: 10.1029/JD094iD06p08549.
25. Jenkins G. M., Watts D. G. *Spectral Analysis and Its Applications*. San Francisco: Holden-Day. 1968. Pp. 243—238.
26. Школьный Е. П. Обработка и анализ гидрометеорологической информации / Е. П. Школьный, И. Д. Лоева, Л. Д. Гончарова. Одесса, 2000. 600 с.
27. Бардин М. Ю., Платова Т. В., Самохина О. Ф. Особенности изменчивости циклонической активности в умеренных широтах Северного полушария, связанные с ведущими модами атмосферной циркуляции в Атлантико-Европейском секторе // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2015. Т. 2. С. 14—40.
28. Нестеров Е. С. О восточно-атлантическом колебании циркуляции атмосферы // *Метеорология и гидрология*. 2009. № 12. С. 32—40.
29. Грезе В. Н. Основы биологической продуктивности Черного моря. К.: Наук. Думка, 1979. 392 с.
30. Добржанская М. А. Основные черты гидрохимического режима Черного моря // *Труды СБС ЛИ СССР*. 1960. Т. 13. С. 325—378.
31. Cokacar T., Oguz T., Kubilay N. Satellite-detected early summer coccolithophore blooms and their interannual variability in the Black Sea // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2004. Vol. 51. Issue 8. P. 1017—1031. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2004.03.007>.
32. Иванов В. А., Белокопытов В. Н. Океанография Чёрного моря. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 210 с.
33. Ефимов В. В., Анисимов А. Е. Климатические характеристики изменчивости поля ветра в Черноморском регионе — численный реанализ региональной атмосферной циркуляции // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2011. Т. 47. № 3. С. 1—13.

References

1. Belokopytov V. N. Klimaticheskie izmeneniya gidrologicheskogo rezhima Chernogo mory. Climate changes in the hydrological regime of the Black Sea. Dr. Sci. (Geogr.) Dissertation (spec. 25.00.28). Sevastopol: MGI RAN, 2007: 377 p. (In Russ.).
2. Polonsky A. B., Basharin D. V., Voskresenskaya E. N., et al. The North Atlantic Oscillation: description, mechanisms, and impact on the climate of Eurasia. *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal = Marine Hydrophysical Journal*. 2004; (2):(42—59). (In Russ.).
3. Barnston A. G., Livezey R. E. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Monthly Weather Review*. 1987; 115(6): 1083—1126. DOI: 10.1175/1520-0493(1987)115<1083:CSAPOL>2.0.CO;2.
4. Averyanova E. A., Gubarev A. V., Polonsky A. B. Influence of the North Atlantic and East Atlantic oscillations on the vorticity of wind stress over the Black Sea. *Meteorologiya i gidrologiya = Russian Meteorology and Hydrology*. 2022; (1): (24—35). (In Russ.).
5. Yevstigneyev V. P., Naumova V. A., Voskresenskaya Ye. N. et al. *Vetrovolnovyye usloviya pribrezhnoy zony Azovo-Chernomorskogo regiona = Wind and wave conditions of the coastal zone of the Azov-Black Sea region*. Sevastopol: IPTS, 2017: 320 p. (In Russ.).
6. Lionello P., Bhend J., Buzzi A. et al. Cyclones in the Mediterranean region: Climatology and effects on the environment. *Developments in earth & environmental sciences*. 2006; (14): 325—372. DOI: 10.1016/S1571-9197(06)80009-1.
7. Oguz T., Dippner J. W., Kaymaz Z. Climatic regulation of the Black Sea hydro-meteorological and ecological properties. *Journal of Marine Systems*. 2006; 60(3-4):235—248. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2005.11.011.
8. Grégoire M., Soetaert K. Carbon, nitrogen, oxygen and sulfide budgets in the Black Sea: A biogeochemical model of the whole water column coupling the oxic and anoxic parts. *Ecological Modelling*. 2010; 221(19):2287—2301. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2010.06.007.
9. Podymov O. I., Yakushev E. V., Kostyleva A. V. On Interannual Variability of Chemical Characteristics of Redox Layer and Cold Intermediate Layer of the Black Sea. In: Yakushev E.V. (ed.), *Chemical Structure of Pelagic Redox Interfaces: Observation and Modeling*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2013: 121—136. DOI: 10.1007/978-2011-122.
10. Lauvset S. K., Gruber N. Long-term trends in surface ocean pH in the North Atlantic. *Marine Chemistry*. 2014; (162): 71—76. DOI: 10.1016/j.marchem.2014.03.009.
11. Leseurre C., Monaco C. Lo., Reverdin G. et al. Ocean carbonate system variability in the North Atlantic Subpolar surface water (1993—2017). *Biogeosciences*. 2020; (17):2553—2577. DOI:10.5194/bg-17-2553-2020.
12. Ross P. M., Parker L., Byrne M. The impact of ocean acidification on reproduction, early development and settlement of marine organisms. *Water*. 2011; 3(4):1005—1030. DOI:10.3390/w3041005.
13. Zhao X., Guo C., Han Y. et al. Ocean acidification decreases mussel byssal attachment strength and induces molecular byssal responses. *Marine Ecology Progress Series*. 2017; 565(6): 7—77. DOI: 10.3354/meps11992.
14. Munday P. L., Dixon D. L., McCormick M. I., et al. Replenishment of fish populations is threatened by ocean acidification. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2010; 107(29):12930—12934. DOI: 10.1073/pnas.1004519107.
15. Cripps I. L., Munday P. L., McCormick M. I. Ocean acidification affects prey detection by a predatory reef fish. *PLoS ONE*. 2011; 6(7): e22736. DOI: 10.1371/journal.pone.0022736.
16. Grebneva E. A., Shilin M. B. Analysis of long-term pH changes in the Black Sea: Verification of Cmems BS-Biogeochemistry reanalysis data and field measurements. *Yestestvennyye i tekhnicheskkiye nauki = Natural and technical sciences*. 2025; (4): (198—211). doi: 10.25633/ETN.2025.03.19. (In Russ.).
17. Polonsky A. B., Grebneva E. A. On interannual variability of pH in the surface layer of the deep-water part of the Black Sea. *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy = Environmental Control Systems*. 2022; 2(48): (12—21). DOI: 10.33075/2220-5861-2026-1-08-22. (In Russ.).
18. Polonsky A. B., Grebneva E. A. Influence of the East Atlantic Oscillation on pH anomalies in the upper layer of the open part of the Black Sea. *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy = Environmental Control Systems*. 2023; 1(51): (15—26). DOI: 10.33075/2220-5861-2023-1-15-26. (In Russ.).

19. Grégoire M., Vandenbulcke L., Capet A. Black Sea Biogeochemical Reanalysis (CMEMS BS-Biogeochemistry) (Version 1) [Data set]. Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS). 2020. Available at: https://doi.org/10.25423/CMCC/BLKSEA_REANALYSIS_BIO_007_005_BAM-HBI (accessed on: 13.01.2025).
20. Grégoire M., Raick C., Soetaert K. Numerical modeling of the central Black Sea ecosystem functioning during the eutrophication phase. *Progress in Oceanography*. 2008; 76(9): 286—333. DOI: 10.1016/j.pocan.2008.01.002
21. Polonsky A. B., Grebneva E. A. Verification of the CMEMS BS-Biogeochemistry reanalysis data on pH in the Black Sea using direct measurement results. *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy = Environmental Control Systems*. 2024; 1(55): (112—118). DOI: 10.33075/2220-5861-2024-1-112-118. (In Russ.).
22. NOAA/National Weather Service, Center for Climate Prediction. Available at: https://www.epc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/ea_map.shtml (accessed on: 06.09.2022).
23. Kharkova O. A., Solov'ev A. G. *Statisticheskie metody i matematicheskoe modelirovanie: uchebnoe posobie = Statistical methods and mathematical modeling: textbook*. Arkhangel'sk: SGMA, 2017: 164 p. (In Russ.).
24. Thoning K. W., Tans P. P., Komhyr W. D. Atmospheric carbon dioxide at Mauna Loa Observatory, 2. Analysis of the NOAA/GMCC data, 1974—1985. *Journal of Geophysical Research*. 1989; (94): 8549—8565. DOI: 10.1029/JD094iD06p08549.
25. Jenkins G. M., Watts D. G. *Spectral Analysis and Its Applications*. San Francisco: Holden-Day, 1968: 525 p.
26. Shkol'nyy E. P., Loeva I. D., Goncharova L. D. *Obrabotka i analiz gidrometeorologicheskoy informatsii = Processing and analysis of hydrometeorological information*. Odessa, Ministry of Education of Ukraine; 2000: 600 p. (In Russ.).
27. Bardin M. Yu., Platova T. V., Samokhina O. F. Features of the variability of cyclonic activity in the Northern Hemisphere mid-latitudes associated with the leading modes of atmospheric circulation in the Atlantic-European sector. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya = Fundamental and Applied Climatology*. 2015; (2): (14—40). (In Russ.).
28. Nesterov E. S. On the East Atlantic Oscillation of atmospheric circulation. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2009; (12): (32—40). (In Russ.).
29. Greze V. N. *Osnovy biologicheskoy produktivnosti Chernogo moraya = Fundamentals of biological productivity of the Black Sea*. K.: Naukova Dumka, 1979: 392 p. (In Russ.).
30. Dobrzhanskaya M. A. Main Features of the Hydrochemical Regime of the Black Sea. *Trudy SBS LI SSSR = Proceedings of the Sevastopol Biological Station LI USSR*. 1960; (13): (325—378). (In Russ.).
31. Cokacar T., Oguz T., Kubilay N. Satellite-detected early summer coccolithophore blooms and their interannual variability in the Black Sea. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2004; 51(8): 1017—1031. DOI: 10.1016/j.dsr.2004.03.007.
32. Ivanov V. A., Belokopytov V. N. *Okeanografiya Chornogo moraya = Oceanography of the Black Sea*. Sevastopol: ECOSY-Hydrophysica. 2011: 210 p. (In Russ.).
33. Efimov V. V., Anisimov A. E. Climatic Parameters of WindField Variability in the Black Sea Region: Numerical Reanalysis of Regional Atmospheric Circulation. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2011; 47(3): 350—361. DOI: 10.1134/S0001433811030030.

Информация об авторах

Гребнева Елена Александровна, младший научный сотрудник Отдела функционирования морских экосистем, Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН, grebneva@ibss-ras.ru.

Шилин Михаил Борисович, доктор географических наук, профессор Российский государственный гидрометеорологический университет, shilin@rshu.ru.

Information about authors

Grebneva Elena Aleksandrovna, Junior Researcher, Department of Marine Ecosystem Functioning, A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russia.

Shilin Mikhail Borisovich, doctor of Geographical Sciences, Professor, Russian State Hydrometeorological University.

Конфликт интересов: Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 12.02.2026

Принята в печать после доработки 22.05.2026

The article was received on 12.02.2026

The article was accepted after revision on 22.05.2026