



ВЛИЯНИЕ СЕВЕРОАТЛАНТИЧЕСКОГО И ВОСТОЧНОАТЛАНТИЧЕСКОГО КОЛЕБАНИЙ НА ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВОДОРОДНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ЧЁРНОГО МОРЯ

А.Б. Полонский, Е.А. Гребнева

Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: apolonsky5@mail.ru

Проанализировано влияние Североатлантического (САК) и Восточноатлантического колебаний (ВАК) на пространственно-временную изменчивость рН в поверхностном слое Черного моря с использованием регулярных данных черноморского ре-анализа с биогеохимическим блоком, доступных приблизительно за 30 лет. Это позволило получить значительно более детальные и достоверные закономерности воздействия этих крупномасштабных атмосферных мод межгодового масштаба на показатель кислотности вод Черного моря по сравнению с описанными в более ранних работах. Выявлено значимое влияние САК и ВАК на пространственно-временную изменчивость водородного показателя в Черном море как квазисинхронное, так и с характерным временным запаздыванием полей рН относительно индексов этих колебаний до 4 месяца. Подробно описан один из основных механизмов воздействия вариаций атмосферных характеристик на пространственно-временную структуру поля рН в поверхностном слое, обусловленный откликом водородного показателя на аномалии пространственно-неоднородного поля ветра и связанных с ними циркуляционных особенностей Черного моря. Показано, что в целом ВАК оказывает более значимое воздействие на характеристики поля рН, чем САК.

Ключевые слова: Черное море, водородный показатель (рН), Североатлантическое колебание (САК), Восточноатлантическое колебание (ВАК), Пространственно-временная изменчивость, биогеохимический ре-анализ, Основное черноморское течение (ОЧТ), циркуляция вод Черного моря

Поступила в редакцию: 10.10.2025. После доработки: 13.02.2026. Принята к печати: 23.03.2026.

Введение. Климат Европы и Средиземноморско-Черноморского региона во многом зависит от циркуляционных процессов в Северной Атлантике. Эти процессы определяют изменчивость гидрометеорологических характеристик в регионе на различных временных масштабах – от внутрисезонного до междесятилетнего [1–6].

Крупномасштабная циркуляция атмосферы в Северном полушарии, включая Атлантический сектор, представляет собой достаточно хорошо изученную систему, описанную в многочисленных фундаментальных работах [7–11]. Установлено, что Атлантико-Европейский регион характеризуется наличием устойчивых климатических мод, проявляющихся в барическом поле давления и обладающих выраженной квазипериодической изменчивостью с характерными временными масштабами от 2 до 10 лет

[12–14]. Эти моды влияют на режим циклогенеза и блокирующих антициклонов и оказывают воздействие на климат удаленных регионов, включая Евразию, Северную Америку и Гренландию.

Среди ключевых мод, воздействующих на Черноморский регион, выделяют Североатлантическое (САК) и Восточноатлантическое колебания (ВАК), а также Скандинавское (СК) и Восточноатлантическое – Западно-российское колебания (ВАЗРК) [6, 15–20]. В зависимости от фазы этих циркуляционных режимов наблюдаются аномалии в распределении атмосферного давления, температурного фона, количества выпадающих осадков, интенсивности ветрового воздействия на морскую поверхность, величины теплообмена между морской средой и приводным слоем атмосферы и т.д. Такие аномалии модифицируют процессы перемешивания вод, горизон-

тальную и вертикальную адвекцию термохалинных характеристик, трансформируя структуру водных масс, что проявляется практически во всех океанологических характеристиках [21–28].

Как установлено в работе [21], САК и ВАК существенно влияют на межгодовую изменчивость ветрового режима над акваторией Черного моря, что находит отражение в пространственно-временной изменчивости характеристик завихренности касательного напряжения трения ветра на морской поверхности. Согласно результатам исследования, опубликованным в работе [29], имеет место статистически значимая связь между фазовым состоянием САК и интенсивностью водообмена через Босфор. Авторы этой работы выявили, что в положительную фазу САК наблюдается усиление выноса черноморских водных масс через Босфорский пролив, что сопровождается колебаниями уровня моря с амплитудой 20–30 см, особенно выраженными в зимний период.

Индукцированные атмосферным воздействием изменения гидродинамических полей вод Черного моря оказывают каскадное воздействие и на региональные гидрохимические характеристики, включая и рН [30–34]. Установлено, в частности, что вариации региональных атмосферных полей, обусловленных крупномасштабными климатическими модами, оказывают влияние на формирование пространственно-временной изменчивости рН посредством несколько механизмов: (1) регулируя интенсивность горизонтальной и вертикальной циркуляции и перемешивания водных масс, что приводит к изменению скорости подъема промежуточных вод, поставляющего воды с пониженными значениями рН в поверхностные слои; (2) изменяя температуру фотического слоя, что влияет на продуктивность экосистемы, определяющей соотношение процессов фотосинтеза и респирации; (3) трансформируя режим речного стока, привносящего в поверхностный слой взвесь различного происхождения, биогенные элементы, множество неорганических веществ и др.

Таким образом, атмосферная изменчивость выступает важным драйвером формирования гидрохимического режима Черного моря, что особенно ярко проявляется в пространственно-временной изменчивости поля водородного показателя. Эти выводы согласуются с опубликованными ранее данными о существенной роли изменчивости атмосферной циркуляции в формировании квазипериодических колебаний кислотности поверхностных вод Черного моря, полученными на основе анализа доступных архивных данных прямых измерений величины рН [33, 34].

Несмотря на прогресс в понимании связи величины рН с крупномасштабной структурой циркуляции воздушных масс, количественная оценка вклада атмосферных факторов в изменчивость водородного показателя поверхностных вод Черного моря остается недостаточно изученной. Это связано, в первую очередь, с ограниченностью объема экспериментальных данных о пространственно-временной изменчивости величины рН в Черном море.

В настоящей работе проанализировано влияние САК и ВАК на пространственно-временную изменчивость рН в Черном море с использованием регулярных данных черноморского ре-анализа, доступных приблизительно за 30 лет, что позволяет получить значительно более детальные и достоверные закономерности воздействия этих крупномасштабных мод на гидрохимические характеристики вод Черного моря по сравнению с описанными в работах [33, 34].

Материалы и методы. В работе использованы среднемесячные данные по величине рН из черноморского ре-анализа CMEMS BS-Biogeochemistry (версия BLKSEA_MULTIYEAR_BGC_007_005) [35]. Этот ре-анализ выполнен на основе численной гидродинамической модели NEMO 4.2 с биогеохимическим блоком VAMNBI. Численные эксперименты с этим вариантом модели NEMO показали, что она достаточно точно воспроизводит гидрофизические процессы в Черном море, которые имеют решающее значение для адекватного моделирова-

ния биогеохимии вод. Используемый ре-анализ усваивает контактные и спутниковые данные по акватории Черного моря. Результатом ре-анализа являются поля на 59 горизонтах с пространственным разрешением ~ 2.5 км по горизонтали за период с 1992 по 2022 гг. [36–38]. Процедура верификации расчетных данных по величине рН, полученных в процессе численного моделирования, по натурным наблюдениям была выполнена нами в работе [39]. Она показала хорошее качество моделирования пространственно-временной изменчивости поля рН в Черном море.

Для анализа выбрана центральная часть Черного моря, ограниченная изобатой 1000 м и координатами 41.23° – 44.65° с.ш., 29° – 41.3° в.д. Выбор центральной глубоководной части моря в качестве исследуемого района обусловлен необходимостью минимизировать влияние прибрежных процессов, которые будут проанализированы в отдельной работе.

Среднемесячные значения индексов атмосферной циркуляции, получены из официального источника данных, находящихся в открытом доступе [40].

Методика расчета. На первом этапе были построены ежемесячные временные ряды индексов атмосферной циркуляции и значений рН на горизонте 0.25 м и в каждом узле расчетной сетки удален квадратичный тренд, описываемый полиномом второго порядка. После этого рассчитывались ежемесячные аномалии всех анализируемых величин. Мы не удаляли из первичных рядов тренды более высокого порядка (как это делалось, например, в работе [21]), поскольку при использовании в качестве аппроксимирующей функции полинома 3-его и более высоких порядков (дающих, естественно, большие величины коэффициенты детерминации - R_2 , по сравнению с квадратичным трендом) часть квазипериодических сигналов, являющихся предметом настоящего исследования, может быть отфильтрована.

На следующем этапе был проведен корреляционный анализ между аномалиями индексов циркуляции и полями

аномалий рН, включая как синхронные, так и асинхронные связи, в которых индексы атмосферной циркуляции выступали в качестве опережающего параметра. Для всех рассчитанных коэффициентов корреляции выполнена оценка статистической значимости [41]. Как правило, при расчете доверительных интервалов при корреляционном анализе использовался вероятностный уровень в 90%. Общая оценка количественной связи между аномалиями атмосферных индексов (САК и ВАК) и аномалиями величин рН выражалась через долю узлов сетки со статистически значимыми коэффициентами корреляции между ними относительно общего числа узлов в исследуемой акватории (см., например, рис. 1).

Для уточнения структуры пространственного распределения аномалий водородного показателя в глубоководной части Черного моря, формирующейся в результате воздействия аномальной атмосферной циркуляции в период противоположных фаз САК и ВАК, был применен метод композитного анализа. Для этого по ежемесячным данным за 1992–2022 гг. были выделены аномальные значения индексов, превышающие по абсолютной величине пороговое значение в одно СКО (σ). Данный критерий использовался для объективного разделения положительных и отрицательных фаз колебаний. Для каждого выделенного экстремума во временном ходе обоих атмосферных индексов были рассчитаны соответствующие поля аномалий рН, как синхронные, так и с запаздыванием от одного до шести месяцев. Далее в каждом узле расчетной сетки была найдена полуразность между аномалиями рН, относящимися к положительной и отрицательной фазам САК и ВАК. Затем выполнялась оценка статистической значимости рассчитанных величин полуразности в каждом узле пространственной сетки [41]. Это позволило выделить области с достоверным откликом поля рН на вариации характеристик атмосферной циркуляции. В отличие от расчета корреляционных параметров в основном применялся доверительный уро-

вень в 80%. Это связано со значительно меньшей величиной выборок, использованных при композитном анализе, по сравнению с корреляционным. Типичное

количество случаев, относящихся к противоположным фазам анализируемых колебаний для каждого месяца, не превышало 5-ти.

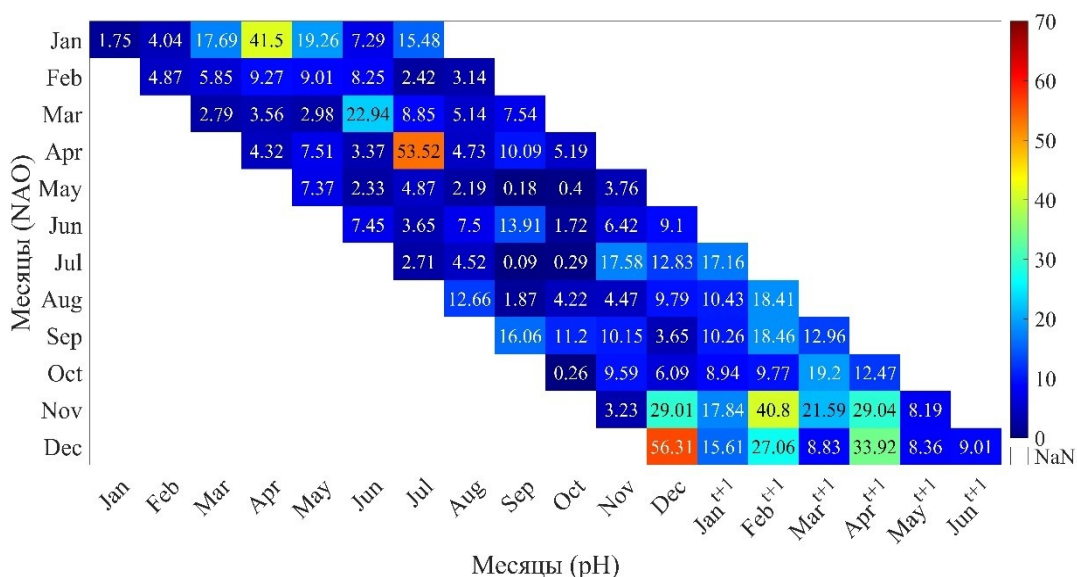


Рис. 1. Доля узлов расчетной сетки (в %) со значимой корреляцией между аномалиями индекса САК и водородного показателя в глубоководной части Чёрного моря за 1992–2022 гг. Запаздывание временных рядов аномалий рН относительно аномалий индекса САК составляет от 0 до 6 месяцев

Fig. 1. The share of nodes in the calculation grid (in %) with a significant correlation between the anomalies of the NAO index and the hydrogen index in the deep-sea part of the Black Sea for the period 1992–2022. The lag of the time series of pH anomalies relative to the anomalies of the NAO index is between 0 and 6 months

Результаты и их анализ. Влияние САК на водородный показатель рН в Черном море. На основании множества исследований, проведенных различными авторами, установлено, что одним из наиболее важных и устойчивых режимов изменчивости в атмосфере Атлантико-Европейского сектора является САК [14, 24, 42, 43]. Максимальное влияние САК на атмосферные характеристики этого сектора наблюдается в зимний период, когда атмосфера в средних широтах динамически более активна [6, 16, 29, 44]. Что касается черноморского региона, то для него результаты, демонстрирующие влияние САК на аномалии атмосферных полей, не так однозначны и, в целом, характеризуются меньшим уровнем значимости, чем для Северной Атлантики и большей части Европы, располагающей-

ся к северу и северо-западу от Черного моря [6, 15, 16, 21, 43, 45]. Это косвенно подтверждается и нашими результатами.

Действительно, в результате проведенного нами анализа получено, что САК в период с ноября по январь оказывает значимое влияние на возникновение зимне-весенних аномалий водородного показателя в поверхностном слое Черного моря. Причем, согласно данным, приведенным на рисунке 1, в декабре максимальное влияние САК на поле аномалий рН на горизонте 2.5 м проявляется квазисинхронно, поскольку именно в этом месяце более 56% всей исследуемой акватории характеризуется значимыми аномалиями рН. Вариации САК в другие месяцы наиболее значимо проявляются в поле рН с запаздыванием от одного до нескольких месяцев. Так, напри-

мер, в марте почти 18% всей исследуемой акватории глубоководной части Черного моря находится под влиянием январских аномалий САК, в апреле эта область увеличивается до 41.5%, достигнув максимума, а в мае уменьшается до 19.3%. Отметим вместе с тем, что максимальный процент рассматриваемой акватории моря, охваченный значимыми аномалиями рН в поверхностном слое (более 53.5%), запаздывающими по фазе относительно САК, наблюдается в июле вследствие воздействия на черноморский регион апрельских САК (рисунок 1). Вероятные причины отмеченных особенностей статистических характеристик аномалий в поле рН будут обсуждаться ниже.

Анализ карт распределения коэффициентов корреляции зимних аномалий индекса САК и зимне-весенних аномалий рН выявил пространственную преемственность полей изокорр от месяца к месяцу. Для примера на рис. 2 (а, в) приведены соответствующие карты за период март–апрель, из которых хорошо видно, что максимальные величины коэффициентов корреляции между аномалиями индекса САК в январе и аномальными значениями рН в весенние месяцы варьируют в диапазоне от -0.5 до -0.6 и приурочены, в основном, к западной и северной частям Черного моря.

Как показывают композитные карты аномалий рН, статистически значимые величины отрицательных аномалий рН в период положительной фазы САК (САК+) достигают здесь -0.016 (рис.2, б, г). В мае количество узлов со значимыми коэффициентами корреляции между аномалиями индекса САК и аномалиями рН падает до 19% (рисунок 1). Также, как и в предыдущие два месяца, области значимого воздействия САК на поле рН располагаются, главным образом, в западной и северной частях моря. Максимальные (по абсолютной величине) значения коэффициентов корреляции достигают -0.5 , а в поле полуразностного композита аналогичные районы характеризуются отрицательными аномалиями рН при САК+, до -0.01 (рисунок не приведен).

В целом, результаты корреляционного и композитного анализа демонстрируют выраженное влияние положительной фазы САК на снижение водородного показателя поверхностных вод моря в зимне-весенний период, начиная с января. В марте поле полуразностных аномалий рН в юго-западном регионе характеризуется значениями от -0.006 до -0.016 (рис. 2, б). К апрелю область отрицательных аномалий расширяется, охватывая юго-западный и северо-восточный районы моря ($-0.008...-0.016$ рН) (рис. 2, г), при этом коэффициенты корреляции в этих зонах достигают -0.6 (рис. 2, в).

Подчеркнем, что отрицательные аномалии величины рН (т.е. подкисление поверхностных вод) при положительной фазе САК приурочены главным образом к периферии крупномасштабных полужамкнутых циклонических круговоротов (известных как “очки Книповича”), оконтуренных Основным Черноморским течением [19]. В центральных частях круговоротов отмечены аномалии рН противоположного знака, хотя статистическая значимость большинства из них невелика. Особенно ярко эта особенность проявляется в Западном циклоническом круговороте, где величины аномалий рН достигают 0.1 (рис. 2, г). Причина такого различия между центральными частями и периферией крупномасштабных циклонических круговоротов в Черном море связана с противоположными по знаку вертикальными движениями в окрестности этих акваторий. В центральной части каждого циклонического круговорота преобладают восходящие упорядоченные потоки, выносящие к поверхности более кислые промежуточные воды, а на периферии – нисходящие, что и приводит к аномалиям величины рН противоположного знака [46]. Описанная закономерность проявляется более значимо в Западном циклоническом круговороте, поскольку именно здесь более выражено усиление атмосферной циклонической активности в отрицательную фазу САК [45].

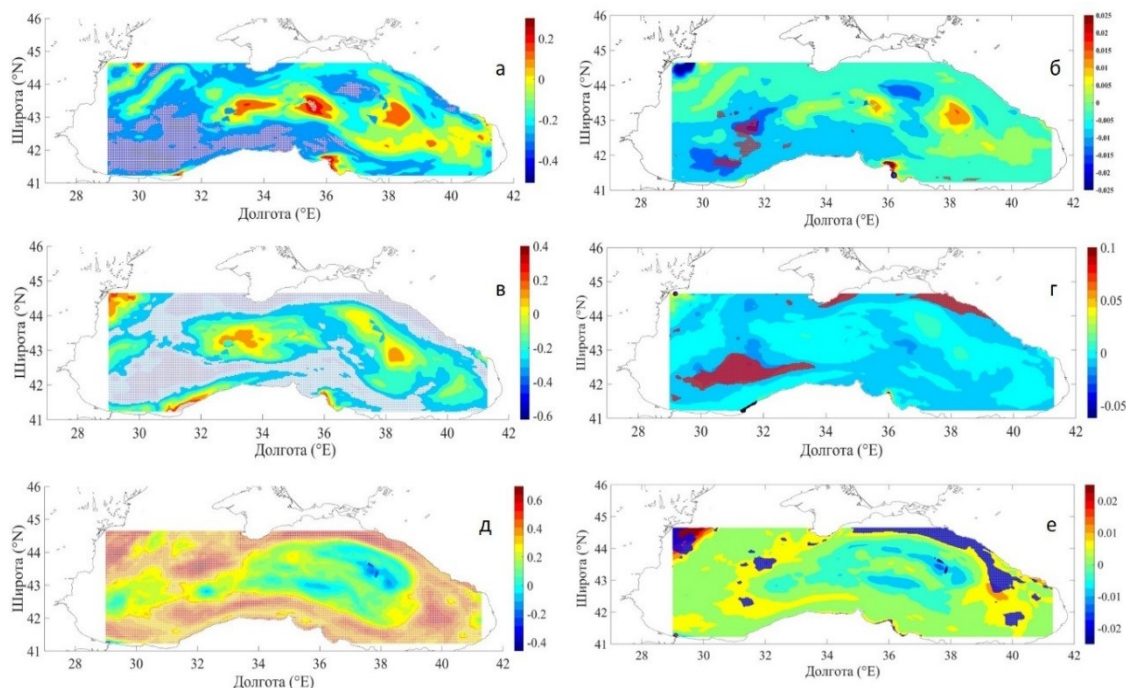


Рис. 2. Пространственное распределение коэффициентов корреляции между аномалиями индекса САК в январе и аномалиями водородного показателя в марте (а) и апреле (в), а также синхронными аномалиями индекса САК и водородного показателя в декабре (д), соответствующие полуразностные композиты (б, г, е). В поле коэффициентов корреляции заштрихованные области значимы на доверительном уровне 90%. Красные области на рис. 2, б и г указывают на значимые величины композита в положительную фазу САК, синие на рис. 2, е в отрицательную фазу САК. Порог значимости композита принимался на уровне 80%

Fig. 2. Spatial distribution of correlation coefficients between anomalies of the NAO index in January and anomalies of the hydrogen index in March (a) and April (c), as well as synchronous anomalies of the NAO index and the hydrogen index in December (d), corresponding semi-difference composites (b, g, e). In the field of correlation coefficients, the shaded areas are significant at the 90% confidence level. The red areas at the fig. 2, b and g show the significant composite values in the positive phase of NAO, while the blue ones at the fig. 2, e are in the negative NAO phase (e). The composites' significance level was accepted at the level 80%

Аналогичная закономерность, но противоположного знака проявляется в поле декабрьских аномалий водородного показателя, формирующихся квазисинхронно с вариациями индекса САК. Действительно, на рисунке 2, д, е, представлены карты, демонстрирующие квазисинхронную реакцию водородного показателя поверхностного слоя вод на декабрьские вариации САК. Хорошо видно, что практически сразу после достижения декабрьским индексом САК экстремальной фазы формируется область значимых положительных корреляций между вариациями индекса САК и аномалиями величины рН в поверхност-

ном слое (до 0.6), располагающихся вдоль периферии ОЧТ. Пространственное распределение аномалий рН в поле разностного композита согласуется с описанным корреляционным полем. В положительную фазу САК фиксируются устойчивые положительные аномалии рН (до величин, превышающих 0.01) в указанном районе (рис. 2, е). При этом в окрестности центральной части крупномасштабных круговоротов отмечаются аномалии противоположного знака.

Описанная структура аномалий в декабрьском поле рН является следствием интенсивного аномального квазисинхронного атмосферного воздействия,

которое характеризуется противоположной полярностью по сравнению с большинством других месяцев года, что подтверждается данными, приведенными в работе [21]. При этом структура аномального поля рН существенно видоизменяется по сравнению с приведенными на рис. 2 (а, б, в, г) весенними аномалиями. Происходит не просто изменение знака аномалий на противоположный, но и явное интенсификация генерации этих аномалий в Восточном циклоническом круговороте. Такой результат подтверждает отмеченное в приведенной выше работе усиление антициклонической завихренности поля ветра над этим круговоротом в положительную фазу САК в декабре.

Различное запаздывание реакции водородного показателя поверхностного слоя Черного моря на атмосферное воздействие для разных месяцев объясняется двумя обстоятельствами. Во-первых, неодинаковой интенсивностью такого воздействия и, во-вторых, различием в вертикальной структуре гидролого-гидрохимических полей. Максимальные величины межгодовых аномалий вертикальной скорости на нижней границе экмановского слоя (превышающие 1 м/сут), генерируемых аномальной завихренностью поля ветра, достигается в начале зимы, когда региональная циклоническая активность в атмосфере и ее аномальность максимальны. При этом толщина верхнего перемешанного слоя в Черном море еще не превышает толщины слоя Экмана и запаздывание реакции поля рН в поверхностном слое на аномальные атмосферные воздействия составляет порядка 10 суток (т.е., квазисинхронно при дискретности анализируемых полей в 1 месяц). Во второй половине зимы верхний перемешанный слой заглубляется на десятки метров, амплитуда аномалий атмосферных полей уменьшается и типичное время такого запаздывания существенно увеличивается [19, 21, 43, 47]. Отметим, что межгодовые вариации вертикальной скорости на нижней границе экмановского слоя в Черном море значительно превышают аналогичные вариации междесятилетне-

го масштаба [33, 34]. Именно с этим связана намного более быстрая реакция рН поверхностного слоя вод на межгодовые вариации регионального поля ветра, чем на междесятилетние.

Влияние ВАК на водородный показатель рН в Черном море. Восточно-атлантическое колебание – второй по значимости сигнал в Атлантико-Европейском регионе после САК [24, 25, 26] Наряду с САК, ВАК определяет положение и интенсивность основных шторм-треков и струйных атмосферных течений в Северной Атлантике [27, 28]. Центры действия ВАК представлены диполем которые сдвинуты на юго-восток по отношению к центрам САК [40].

Во временном ходе индекса ВАК выделяют положительную и отрицательную фазы [24]. Во время положительной фазы ВАК в зимний период преобладает зональный тип циркуляции, наблюдаются аномальное повышение приземной температуры воздуха над большей частью Европы и дефицит осадков в Южной Европе [14]. В отрицательную фазу ВАК, напротив, происходит ослабление зонального переноса, что сопровождается формированием отрицательных аномалий температуры над большей частью Европы, включая европейскую часть России [48]. Вариации региональных гидрометеорологических условий, связанные с описанной выше квазипериодической климатической модой, оказывают существенное влияние на гидрохимический состав вод и морские экосистемы Черного моря [32–34].

Что касается влияния ВАК на региональные атмосферные поля, определяющие циркуляцию и структуру вод Черного моря, то оно наиболее выражено в холодное полугодие, когда интенсивность атмосферных процессов над Атлантико-Европейском сектором максимальна [19, 21]. Наши результаты по анализу влияния ВАК на водородный показатель в Черном море, полученные на основе ограниченного массива инструментальных данных по величине рН, показали, что значимое воздействия такого типа в холодное полугодие дей-

ствительно наблюдается. С учетом запаздывания реакции морской среды на атмосферные воздействия, можно ожидать, что и в весенне-летний период будет наблюдаться значимый отклик в поле рН на воздействие ВАК в предыдущий сезон, что и подтверждается данными, приведенными на рис. 3. Видно, например, что в июне почти 38% площади анализируемой акватории моря покрыто изокоррами, характеризующими значимую корреляционную связь между аномалиями индекса ВАК в марте и величины рН в начале лета. К августу процент акватории моря, занимаемой значимыми изокоррами между мартовскими аномалиями индекса рН и аномалиями величины рН, увеличивается до более чем 57%. Значимое воздействие апрельских аномалий атмосферных полей на поле рН в Черном море ослабевает, а отклик на майские аномалии практиче-

ски отсутствует, что связано с уменьшением амплитуды региональных атмосферных аномалий. Интересно, что максимальный процент акватории моря, на которой имеет место значимая корреляция между изучаемыми параметрами, относится к отклику именно на мартовские экстремумы индекса ВАК.

Влияние зимних аномалий индекса ВАК (в декабре) на поле рН весной следующего года в 2 с лишним раза меньше (в терминах площади акватории, покрытой значимыми изокоррами, рис. 3). Это не согласуется с данными, приведенными в работе [21], в которой показано, что амплитуда декабрьских аномалий атмосферных полей превышает амплитуду мартовских аномалий. Возможно, это обусловлено отмеченной выше разницей в вертикальной структуре гидролого-гидрохимических полей в начале и конце зимнего периода.

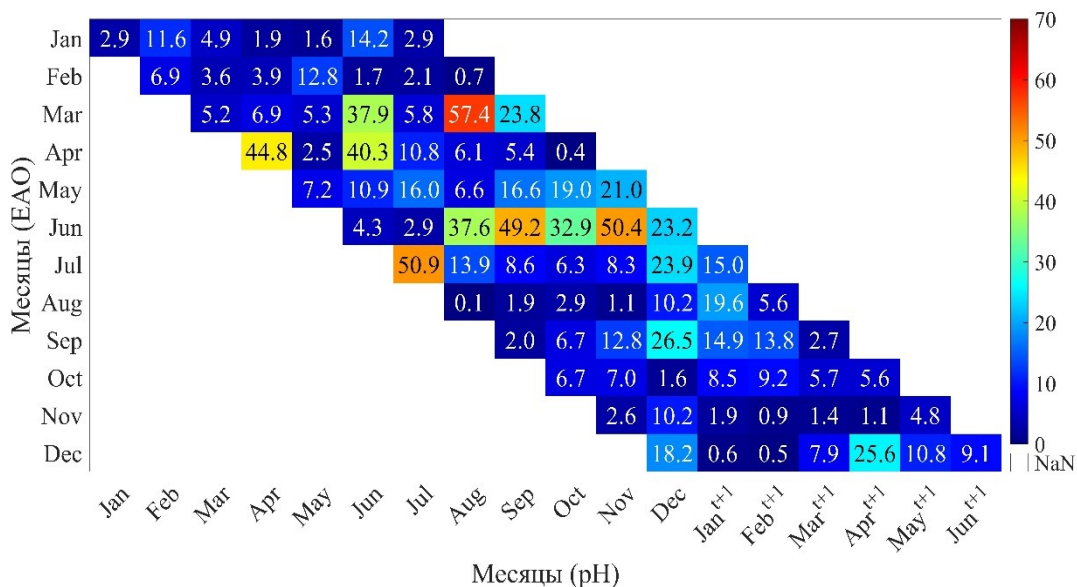


Рис. 3. Доля узлов расчетной сетки (в %) со значимой корреляцией между аномалиями индекса ВАК и водородного показателя в глубоководной части Чёрного моря

Fig. 3. The proportion of nodes in the calculated grid (in %) with a significant correlation between the anomalies of the EAO index and the hydrogen index in the deep-sea part of the Black Sea

В целом, влияние ВАК на аномалии поля рН в глубоководной части Черного моря более выражено, чем влияние САК. Об этом свидетельствует тот факт,

что средняя площадь акватории со значимым коэффициентом корреляции, рассчитанная по данным, приведенным на рисунках 1 и 3 для тех случаев, когда

этот процент превышает 20%, составляет для пары индекс САК – аномалии рН 35.6% а для пары индекс ВАК – аномалии рН – 36.4%. Это незначительное превышение само по себе не является доказательством более существенного влияния ВАК на аномалии поля рН, но важно, что при этом для второй пары переменных число анализируемых случаев достигает 15, тогда как для первой пары оно не превышает 10-ти и средняя абсолютная величина значимых аномалий рН, связанных с ВАК, больше соответствующих аномалий рН, обусловленных САК.

Пространственная структура корреляционного поля между анализируемыми параметрами и соответствующих полей аномалий рН в целом подтверждает полученный нами ранее в работе [34] вывод, о том, что в положительную фазу ВАК (ВАК+) в зимне-весенний период на акватории открытой части Черного моря преобладают отрицательные аномалии рН, а в летне-осенний – положительные. Типичная структура рассчитанных полей такого типа приведена на рис.

4. Как и в случае с САК, знаки аномалий величины рН в окрестности центров крупномасштабных круговоротов противоположны знакам аномалий на их периферии. Это вполне естественно, поскольку знак вертикальной скорости в этих 2-х структурных областях противоположен друг другу (см. выше). Отметим, что использование ограниченного числа натуральных данных о величине рН для построения соответствующего композита в работе авторов [34] не позволило разрешить эту принципиальную особенность поля аномалий рН. В нашем случае пространственно-временное разрешение данных ре-анализа позволяет явно ее описать. Хорошо видна разница между 2-мя анализируемыми сезонами. Она заключается в том, что полярность (знаки) аномалий величины рН в этих 2-х случаях противоположны друг другу, что обусловлено противоположным характером влияния ВАК на поле ветра над Черным морем в зимне-весенний и летне-осенний периоды. Более подробно этот результат описан в работе [21].

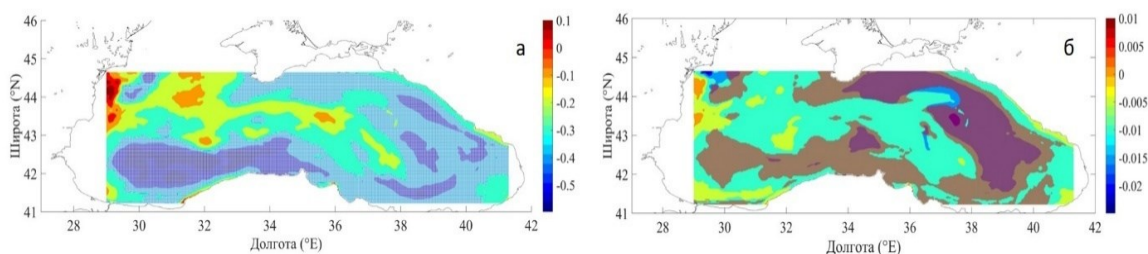


Рис. 4. Пространственное распределение коэффициентов корреляции между индексом ВАК в марте и водородным показателем в августе (а) и соответствующий разностный композит (б). Заштрихованные области указывают на значимые корреляции на доверительном уровне 90 % (а) и на значимые полуразностные композиты на доверительном уровне 80% (б).

Синие области обозначают значимые участки с отрицательными величинами

Fig. 4. Spatial distribution of correlation coefficients between the EAO index in March and the hydrogen index in August (a) and the corresponding difference composite (b). Shaded areas indicate significant correlations at a confidence level of 90% (a) and significant semi-difference composites at a confidence level of 80% (b). The blue areas are of significant negative areas

Заключение. Использование регулярных данных черноморского ре-анализа с биогеохимическим блоком, доступных приблизительно за 30 лет, позволило получить значительно более детальные и достоверные закономерности

воздействия САК и ВАК на показатель кислотности вод Черного моря по сравнению с описанными в более ранних работах. Выявлено статистически значимое влияние этих крупномасштабных атмосферных мод на пространственно-

временную изменчивость водородного показателя в Черном море как квазисинхронное, так и с характерным временным запаздыванием полей рН относительно индексов этих колебаний до 4 месяцев. Подробно описан один из основных механизмов воздействия вариаций атмосферных характеристик на пространственно-временную структуру поля рН в поверхностном слое, обусловленный откликом циркуляционных особенностей в Черном море и связанных с ними аномалий водородного показателя на вариации пространственно-неоднородного поля ветра.

Показано, что наиболее значимое влияние оказывает САК в зимний период на поле рН поверхностного слоя в Западном циклоническом круговороте Черного моря в весенние месяцы. Поскольку в большинстве зимних месяцев (кроме декабря) САК+ сопровождается ослаблением региональной циклонической активности в атмосфере, особенно выраженным над этим круговоротом, эта фаза САК приводит к ослаблению ОЧТ и вертикальных скоростей и, как следствие, к формированию положительных аномалий рН в центральной части круговоротов и отрицательных – на их периферии (из-за противоположного знака вертикальных движений в этих структурных динамических зонах). Абсолютная величина аномалий рН, генерируемых САК, превышает 0.01 единиц рН.

Показано, что в целом ВАК оказывает воздействие на формирование аномалий в поле рН поверхностного слоя вод в Черном море, которые характеризуются более высоким уровнем статистической значимости по сравнению с аномалиями, обусловленными САК. При этом наиболее интенсивное воздействие ВАК на поле рН реализуется в другие месяцы по сравнению с САК. Так, например, наиболее значимый сигнал, связанный с ВАК в марте, проявляется в июне-сентябре с максимальным охватом акватории статистически достоверными изокоррами (57%) в августе. Положительная фаза ВАК сопровождается в основном формированием значимых отрицательных аномалий рН до -0.015 единиц рН, а

отрицательная фаза – положительных аномалий с близкой по абсолютной величине амплитудой.

Выражаем признательность анонимному рецензенту за полезные замечания, учет которых позволил улучшить качество статьи.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПТС по теме «Фундаментальные исследования процессов в климатической системе, определяющих пространственно-временную изменчивость морской среды и прилегающих территорий в широком диапазоне масштабов» (№ 124020100120-9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kozuchowski K.M.* Variations of hemispheric zonal index since 1899 and its relationships with air temperature // *International Journal Climatology*. 1993. V. 13. P. 853–864.
2. *Rogers J.C.* North Atlantic Storm Track Variability and Its Association to the North Atlantic Oscillation and Climate Variability of Northern Europe // *Journal Climate*. 1997. V. 7. P. 1635–1647.
3. *Ulbrich U., Christoph M.* A shift of the NAO and increasing storm track activity over Europe due to anthropogenic greenhouse gas forcing // *Climate Dynamics*. 1999. V. 15. № 7. P. 551–559.
4. *Hurrell J.W., Kushnir Y., Ottersen G., Visbeck M.* An Overview of the North Atlantic Oscillation // *The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact* / Eds. by J.W. Hurrell et al. Washington. DC: American Geophysical Union. 2003. P. 1–35.
5. *Trigo R.M., Osborn T.J., Corte-Real J.M.* The North Atlantic Oscillation influence on Europe: Climate impacts and associated physical mechanisms // *Climate Research*. 2002. V. 20. № 1. P. 9–17.
6. *Polonsky A.B.* *The Ocean's Role in Climate Change*/ Cambridge Scholars Publishing. Newcastle. UK. 2019. 294 p. ISBN: 978-1-5275-2389-0.

7. Пальмен Э., Ньютон Ч. Циркуляционные системы атмосферы. Л.: Гидрометеиздат. 1973. 465 с.
8. Wallace J.M., Gutzler D.S. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter // *Monthly Weather Review*. 1981. V. 109. № 4. P. 784–812.
9. Woollings T., Hannachi A., Hoskins B. Variability of the North Atlantic eddy-driven jet stream // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2010. V. 136. № 649. P. 856–868.
10. Walker G.T., Bliss E.W. World weather V // *Roy Meteorol. Soc.* 1932. V. 36. P. 53–84.
11. Lorenz E.N. The Nature and Theory of the General Circulation of the Atmosphere – Geneva: World Meteorological Organization. 1967. 161 p.
12. Barnston A.G., Livezey R.E. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns // *Monthly Weather Review*. 1987. V. 115. No. 6. P. 1083–1126.
13. Feldstein S.B. The timescale, power spectra, and climate noise properties of teleconnection patterns // *Journal of Climate*. 2000. V. 13. № 24. P. 4430–4440.
14. Полонский А.Б., Башарин Д.В. Влияние климатического сдвига 1976–1977 гг. на крупномасштабную структуру приземных метеорологических полей Евразии // *Метеорология и гидрология*. 2008. № 5. С. 16–30.
15. Hurrell J.W. Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation: Regional Temperatures and Precipitation // *Science*. 1995. No. 5224. P. 676–679.
16. Полонский А.Б. Североатлантическое колебание: описание, механизмы и влияние на климат Евразии / А.Б. Полонский, Д.В. Башарин, Е.Н. Воскресенская [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2004. № 2. С. 42–57.
17. Нестеров Е.С. Особенности состояния океана и атмосферы в разных фазах североатлантического колебания // *Метеорология и гидрология*. 1998. № 8. С. 74–82.
18. Thompson D.W., Wallace J.M. The Arctic Oscillation signature in the winter-time geopotential height and temperature fields // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. No. 9. P. 1297–1300.
19. Иванов В.А., Белокопытов В.Н. Океанография Черного моря. Морской гидрофизический институт. Севастополь. 2011. 209 с.
20. 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.
21. 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.
22. Ветроволновые условия прибрежной зоны Азово-Черноморского региона / В.П. Евстигнеев, В.А. Наумова, Е.Н. Воскресенская [и др.]. Севастополь: ИПТС. 2017. 320 с.
23. Lionello P., Bhand J., Buzzi A., Della-Marta P., Krichak S., Jansà A., Maheras P., Sanna A., Trigo I., Trigo R. Cyclones in the Mediterranean region: Climatology and effects on the environment // *Developments in earth & environmental sciences*. 2006. V. 14. P. 325–372.
24. Вязилова Н.А. Циклоническая активность и колебания циркуляции в Северной Атлантики // *Метеорология и гидрология*. 2012. № 7. С. 5–14.
25. Mellado-Cano J., Barriopedro D., Garcia-Herrera R., Trigo R., Hernández A. Examining the North Atlantic Oscillation, East Atlantic pattern, and jet variability since 1685. // *J. Climate*. 2019. V. 32. No. 19. P. 6285–6298. DOI: 10.1175/JCLI-D-19-0135.1.
26. Moore G.W.K., Renfrew I. Cold European winters: Interplay between the NAO and the East Atlantic mode // *Atmos. Sci. Lett.* 2012. V. 13. No. 1. P. 1–8. DOI: 10.1002/asl.356.
27. Woollings T., Blackburn M. The North Atlantic jet stream under climate change, and its relation to the NAO and EA

patterns // *J. Climate*. 2012. V. 25. P. 886–902.

28. *Franzke C., Feldstein S.B.* The continuum and dynamics of Northern hemisphere teleconnection patterns // *J. Atmos. Sci.* 2005. V. 62. No. 9. P. 3250–326.

29. *Emil V. Stanev, Elissaveta L. Peneva.* Regional sea level response to global climatic change: Black Sea examples // *Global and Planetary Change*. V. 32 (1). P. 33–47.

30. *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*. P.121–135. DOI:10.1007/698_2011_122.

31. *Oguz T., Dippner J.W., Kaymaz Z.* Climatic regulation of the Black Sea hydro-meteorological and ecological properties at interannual-to-decadal time scales // *Journal of Marine Systems*. 2006. V. 60 (3–4). P. 235–254. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2005.11.011.

32. *Oguz T.* Black Sea Ecosystem Response to Climatic Teleconnections // *Oceanography*. 2005. V.18. No. 2. P. 122–133.

33. *Полонский А.Б., Гребнева Е.А.* О межгодовой изменчивости величины рН в поверхностном слое глубоководной части Черного моря // *Системы контроля окружающей среды*. 2022. Вып. 2 (48). С. 12–21. DOI: 10.33075/2220-5861-2022-2-12-21.

34. *Полонский А.Б., Гребнева Е.А.* Влияние Восточно-Атлантического колебания на аномалии рН 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.

35. *Grégoire M., Vandenbulcke L., Capet A.* Black Sea Biogeochemical Reanalysis (CMEMS BS-Biogeochemistry) (Version 1) [Data set]. Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS). 2020. https://doi.org/10.25423/CMCC/BLKSEA_REANALYSIS_BIO_007_005_VAMHBI (дата обращения: 13.01.2025).

36. *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. V. 221. No. 19. P. 2287–2301.

37. *Capet A. et al.* Integrating sediment biogeochemistry into 3D oceanic models: A study of benthic-pelagic coupling in the Black Sea // *Ocean Modelling*. 2016. V. 101. P. 83–100.

38. *Grégoire M., Raïck 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.

39. *Полонский А.Б., Гребнева Е.А.* Верификация данных ре-анализа CMEMS BS-Biogeochemistry по величине рН 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.

40. NOAA/National Weather Service, Center for Climate Prediction. https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/ea_map.shtml (дата последнего обращения: 06.09.2022 г.).

41. *Харькова О.А., Соловьев А.Г.* Статистические методы и математическое моделирование: учебное пособие: СГМУ. 2017. 164 с.

42. *Glowienka-Hense R.* The North Atlantic Oscillation in the Atlantic European SLP / *Glowienka-Hense R.* // *Tellus*. 1990. No. 5. P. 497–507.

43. *Маслова В.Н., Воскресенская Е.Н.* Детерминированность временной изменчивости повторяемости циклонов в Черноморско-Средиземноморском регионе // *Фундаментальная и прикладная климатология*. Т. 11. № 1. 2025. С. 75–114. DOI:10.21513/2410-8758-2025-1-75-114.

44. https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/nao_map.shtml (дата обращения 02.03.2025).

45. *Полонский А.Б., Бардин М.Ю., Воскресенская Е.Н.* Статистические характеристики циклонов и антициклонов над Черным морем во второй половине XX века // *Морской гидрофизический журнал*. 2007. № 6. С. 47–58.

46. Polonsky A.B., Grebneva E.A. The spatiotemporal variability of pH in waters of the Black sea // *Doklady Earth Sciences*. 2019. V. 486. № 2. P. 669–674. DOI: 10.1134/S1028334X19060072.

47. Полонский А.Б., Серебренников А.Н. О низкочастотной изменчивости полей ветра и геострофических течений Черного моря по спутниковым данным.

Часть 1: сезонный цикл // Системы контроля окружающей среды. 2019. Вып. 2(36). С. 64–72. DOI: 10.33075/2220-5861-2019-2-64-72.

48. Нестеров Е.С. О восточно-атлантическом колебании циркуляции атмосферы // *Метеорология и гидрология*. 2009. № 12. С. 32–40.

THE INFLUENCE OF THE NORTH ATLANTIC AND EAST ATLANTIC OSCILLATIONS ON THE VARIABILITY OF THE HYDROGEN INDEX IN THE BLACK SEA SURFACE LAYER

A.B. Polonsky, E.A. Grebneva

Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28
E-mail: apolonsky5@mail.ru

The influence of the North Atlantic (NAO) and East Atlantic oscillations (EAO) on the spatiotemporal variability of pH in the surface layer of the Black Sea has been analyzed using regular data from the Black Sea reanalysis with a biogeochemical block, available over approximately 30 years. This made it possible to obtain much more detailed and reliable patterns of the impact of these large-scale atmospheric interannual modes on the acidity index of the Black Sea waters compared with those described in the earlier works. A significant effect of the NAO and EAO on the spatiotemporal variability of the hydrogen index in the Black Sea was revealed, both quasi-synchronous and with a characteristic time delay of the pH fields relative to the indices of these oscillations up to 4 months. One of the main mechanisms of the impact of variations in atmospheric characteristics on the spatio-temporal structure of the pH field in the surface layer, due to the response of the hydrogen index to anomalies of the spatially inhomogeneous wind field and related circulation features of the Black Sea, is described in detail. It has been shown that, in general, the EAO has a more significant effect on the characteristics of the pH field than the NAO. **Keywords:** Black Sea, hydrogen index (pH), North Atlantic Oscillation (NAO), East Atlantic Oscillation (EAO), spatial and temporal variability, biogeochemical reanalysis, Rim Black Sea Current, circulation of the Black Sea waters

REFERENCES

1. Kozuchowski K.M. Variations of hemispheric zonal index since 1899 and its relationships with air temperature. *International Journal Climatology*, 1993, Vol. 13, pp. 853–864.
2. Rogers J.C. North Atlantic Storm Track Variability and Its Association to the North Atlantic Oscillation and Climate Variability of Northern Europe. *Journal Climate*, 1997, Vol. 7, pp. 1635–1647.
3. Ulbrich U. and Christoph M. A shift of the NAO and increasing storm track activity over Europe due to anthropogenic greenhouse gas forcing. *Climate Dynamics*, 1999, Vol. 15, No. 7, pp. 551–559.
4. Hurrell J.W., Kushnir Y., Ottersen G., and Visbeck M. An Overview of the North Atlantic Oscillation. *The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact*. Eds. by J.W. Hurrell et al. Washington, DC: American Geophysical Union, 2003, pp. 1–35.
5. Trigo R.M., Osborn T.J., and Corte-Real J.M. The North Atlantic Oscillation influence on Europe: Climate impacts and associated physical mechanisms. *Climate Research*, 2002, Vol. 20, No. 1, pp. 9–17.
6. Polonsky A.B. *The Ocean's Role in Climate Change*. Cambridge Scholars Publishing, Newcastle, UK, 2019, 294 p. ISBN: 978-1-5275-2389-0.
7. Pal'men E. and N'yuton Ch. *Cirkulyacionnye sistemy atmosfery (Atmospheric circulation systems)*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1973, 465 p.
8. Wallace J.M. and Gutzler D.S. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. *Monthly Weather Review*, 1981, Vol. 109, No. 4, pp. 784–812.
9. Woollings T., Hannachi A., and Hoskins B. Variability of the North Atlantic eddy-driven jet stream. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2010, Vol. 136, No. 649, pp. 856–868.

10. Walker G.T. and Bliss E.W. World weather V. *Royal Meteorological Society*, 1932, Vol. 36, pp. 53–84.
11. Lorenz E.N. The Nature and Theory of the General Circulation of the Atmosphere. Geneva: World Meteorological Organization, 1967, 161 p.
12. Barnston A.G. and Livezey R.E. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Monthly Weather Review*, 1987, Vol. 115, No. 6, pp. 1083–1126.
13. Feldstein S.B. The timescale, power spectra, and climate noise properties of teleconnection patterns. *Journal of Climate*, 2000, Vol. 13, No. 24, pp. 4430–4440.
14. Polonskij A.B. and Basharin D.V. Vliyanie klimaticheskogo sdviga 1976–1977 gg. na krupnomasshtabnuyu strukturu prizemnyh meteorologicheskikh polej Evrazii (The influence of the 1976–1977 climate shift on the large-scale structure of surface meteorological fields in Eurasia). *Meteorologiya i gidrologiya*, 2008, No. 5, pp. 16–30.
15. Hurrell J.W. Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation: Regional Temperatures and Precipitation. *Science*, 1995, No. 5224, pp. 676–679.
16. Polonskij A.B., Basharin D.V., Voskresenskaya E.N., and Worli S. Severoatlanticheskoe kolebanie: opisanie, mekhanizmy i vliyanie na klimat Evrazii (North Atlantic Oscillation: Description, Mechanisms, and Impact on the Climate of Eurasia). *Morskoj gidrofizicheskij zhurnal*, 2004, No. 2, pp. 42–57.
17. Nesterov E.S. Osobennosti sostoyaniya okeana i atmosfery v raznyh fazah severoatlanticheskogo kolebaniya (Features of the Ocean and Atmosphere State in Different Phases of the North Atlantic Oscillation). *Meteorologiya i gidrologiya*, 1998, No. 8, pp. 74–82.
18. Thompson D.W. and Wallace J.M. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophysical Research Letters*, 1998, Vol. 25, No. 9, pp. 1297–1300.
19. Ivanov V.A. and Belokopytov V.N. Okeanografiya Chernogo moraya (Oceanography of the Black Sea). Morskoj gidrofizicheskij institut, Sevastopol', 2011, 209 p.
20. Bardin M.YU., Platova T.V., and Samohina O.F. Osobennosti izmenchivosti ciklonicheskoy aktivnosti v umerennykh shirotah Severnogo polushariya, svyazannye s vedushchimi modami atmosfernoj cirkulyacii v Atlantiko-Evropejskom sektore (Features of the variability of cyclonic activity in the temperate latitudes of the Northern Hemisphere associated with the leading modes of atmospheric circulation in the Atlantic-European sector). *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, 2015, Vol. 2, pp. 14–40.
21. Aver'yanova E.A., Gubarev A.V., and Polonskij A.B. Vliyanie severoatlanticheskogo i vostochnoatlanticheskogo kolebanij na zavihrennost' kasatel'nogo napryazheniya treniya vetra nad Chernym morem (The influence of the North Atlantic and East Atlantic oscillations on wind stress curl over the Black Sea). *Meteorologiya i gidrologiya*, 2022, No. 1, pp. 24–35.
22. Evstigneev V.P., Naumova V.A., Voskresenskaya E.N., Evstigneev M.P., and Lyubarec E.P. Vetrovolnovnye usloviya pribrezhnoj zony Azovo-Chernomorskogo regiona (Wind and wave conditions of the coastal zone of the Azov-Black Sea region). Sevastopol': IPTS, 2017, 320 p.
23. Lionello P., Bhand J., Buzzi A., Della-Marta P., Krichak S., Jansà A., Maheras P., Sanna A., Trigo I., and Trigo R. Cyclones in the Mediterranean region: Climatology and effects on the environment. *Developments in earth & environmental sciences*, 2006, Vol. 14, pp. 325–372.
24. Vyazilova N.A. Ciklonicheskaya aktivnost' i kolebaniya cirkulyacii v Severnoj Atlantiki (Cyclonic activity and circulation fluctuations in the North Atlantic). *Meteorologiya i gidrologiya*, 2012, No. 7, pp. 5–14.
25. Mellado-Cano J., Barriopedro D., Garcia-Herrera R., Trigo R., and Hernández A. Examining the North Atlantic Oscillation, East Atlantic pattern, and jet variability since 1685. *J. Climate*, 2019, Vol. 32, No. 19, pp. 6285–6298. DOI: 10.1175/JCLI-D-19-0135.1.
26. Moore G.W.K. and Renfrew I. Cold European winters: Interplay between the NAO and the East Atlantic mode. *Atmos. Sci. Lett*, 2012, Vol. 13, No. 1, pp. 1–8. DOI: 10.1002/asl.356.
27. Woollings T. and Blackburn M. The North Atlantic jet stream under climate change, and its relation to the NAO and EA patterns. *J. Climate*, 2012, Vol. 25, pp. 886–902.
28. Franzke C. and Feldstein S.B. The continuum and dynamics of Northern hemisphere teleconnection patterns. *J. Atmos. Sci*, 2005, Vol. 62, No. 9, pp. 3250–326.
29. Emil V. Stanev and Elissaveta L. Peneva. Regional sea level response to global climatic change: Black Sea examples. *Global and Planetary Change*, Vol. 32(1), pp. 33–47.
30. Podymov O.I., Yakushev E.V., and 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, pp.121–135. DOI:10.1007/698_2011_122.

31. Oguz T., Dippner J.W., and Kaymaz Z. Climatic regulation of the Black Sea hydro-meteorological and ecological properties at interannual-to-decadal time scales. *Journal of Marine Systems*, 2006, Vol. 60 (3–4), pp. 235–254. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2005.11.011.
32. Oguz T. Black Sea Ecosystem Response to Climatic Teleconnections. *Oceanography*, 2005, Vol. 18, No. 2, pp. 122–133.
33. Polonskij A.B. and Grebneva E.A. O mezhgodovoj izmenchivosti velichiny rH v poverhnostnom sloe glubokovodnoj chasti Chernogo moray (On the interannual variability of the pH value in the surface layer of the deep-sea part of the Black Sea). *Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy*, 2022, No. 2 (48), pp. 12–21. DOI: 10.33075/2220-5861-2022-2-12-21.
34. Polonskij A.B. and Grebneva E.A. Vliyanie Vostochno-Atlanticheskogo kolebaniya na anomalii pH v verhnem sloe otkrytoj chasti Chernogo morya (The influence of the East Atlantic Oscillation on pH anomalies in the upper layer of the open part of the Black Sea). *Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy*, 2023, No. 1 (51), pp. 15–26. DOI: 10.33075/2220-5861-2023-1-15-26.
35. Grégoire M., Vandenbulcke L., and Capet A. Black Sea Biogeochemical Reanalysis (CMEMS BS-Biogeochemistry) (Version 1) [Data set]. Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS). 2020. https://doi.org/10.25423/CMCC/BLKSEA_REANALYSIS_BIO_007_005_BAMHBI (January 13, 2025).
36. Grégoire M. and 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, pp. 2287–2301.
37. Capet A. et al. Integrating sediment biogeochemistry into 3D oceanic models: A study of benthic-pelagic coupling in the Black Sea. *Ocean Modelling*, 2016, Vol. 101, pp. 83–100.
38. Grégoire M., Raick C., and 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), pp. 286–333.
39. Polonskij A.B. and Grebneva E.A. Verifikaciya dannyh re-analiza CMEMS BS-Biogeochemistry po velichine rN v Chernom more s ispol'zovaniem rezul'tatov pryamyh izmerenij (Verification of CMEMS BS-Biogeochemistry reanalysis data on pH in the Black Sea using direct measurements). *Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy*, 2024, No. 1(55), pp. 112–118. DOI: 10.33075/2220-5861-2024-1-112-118.
40. NOAA/National Weather Service, Center for Climate Prediction. https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/ea_map.shtml (September 06, 2022).
41. Har'kova O.A. and Solov'ev A.G. Statisticheskie metody i matematicheskoe modelirovanie: uchebnoe posobie (Statistical methods and mathematical modelling). Arhangelsk: SGMU, 2017, 164 p.
42. Glowienka-Hense R. The North Atlantic Oscillation in the Atlantic European SLP. *Tellus*, 1990, No. 5, pp. 497–507.
43. Maslova V.N. and Voskresenskaya E.N. Determinirovannost' vremennoj izmenchivosti povtornyayemosti ciklonov v Chernomorsko-Sredizemnomorskom regione (Determinism of temporal variability of cyclone frequency in the Black Sea-Mediterranean region). *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, 2025, Vol. 11, No. 1, pp. 75–114. DOI:10.21513/2410-8758-2025-1-75-114.
44. https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/nao_map.shtml (March 02, 2025).
45. Polonskij A.B., Bardin M.Yu., and Voskresenskaya E.N. Statisticheskie harakteristiki ciklonov i anticiklonov nad Chernym morem vo vtoroj polovine XX veka (Statistical characteristics of cyclones and anticyclones over the Black Sea in the second half of the 20th century). *Morskoj gidrofizicheskij zhurnal*, 2007, No. 6, pp. 47–58.
46. Polonsky A.B. and Grebneva E.A. The spatiotemporal variability of pH in waters of the Black sea. *Doklady Earth Sciences*, 2019, Vol. 486, No. 2, pp. 669–674. DOI: 10.1134/S1028334X19060072.
47. Polonskij A.B. and Serebrennikov A.N. O nizkochastotnoj izmenchivosti polej vetra i geostroficheskikh techenij Chernogo morya po sputnikovym dannym. Chast' 1: sezonnyj cikl (Low-frequency variability of wind fields and geostrophic currents in the Black Sea based on satellite data. Part 1: Seasonal cycle). *Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy*, 2019, No. 2(36), pp. 64–72. DOI: 10.33075/2220-5861-2019-2-64-72.
48. Nesterov E.S. O vostochno-atlanticheskom kolebanii cirkulyacii atmosfery (On the East Atlantic Oscillation of Atmospheric Circulation). *Meteorologiya i gidrologiya*, 2009, No. 12, pp. 32–40.