



ВЛИЯНИЕ ВОСТОЧНО-АТЛАНТИЧЕСКОГО КОЛЕБАНИЯ НА АНОМАЛИИ рН В ВЕРХНЕМ СЛОЕ ОТКРЫТОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

А.Б. Полонский, Е.А. Гребнева

Институт природно-технических систем,
РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: apolonsky5@mail.ru, lenagrebneva12@gmail.com

Выполнен анализ влияния Восточно-Атлантического колебания (ВАК), на аномалии величины рН в поверхностных водах открытой части Черного моря. С использованием методики разностных композитов показано, что в зимний период ВАК оказывает значимое влияние на эти аномалии. С ноября по февраль в период отрицательной фазы ВАК получена положительная среднесезонная аномалия величины рН (около 0,09 ед. рН). При положительной фазе ВАК аномалия рН отрицательна и превышает (по абсолютной величине) –0,08 ед. рН. Таким образом, типичная разница между величиной рН поверхностных вод глубоководной части Черного моря в разные фазы ВАК составляет около 0,17 ед. рН. Анализируются вероятные причины обнаруженной изменчивости кислотности верхнего слоя вод моря.

Ключевые слова: глубоководная часть Черного моря, поверхностный слой, композитный анализ, величина рН, Восточно-Атлантическое колебание.

Поступила в редакцию: 20.02.2023. После доработки: 20.03.2023.

Введение. Известно, что на климат Европы, а также Средиземноморско-Черноморского региона существенное влияние оказывают циркуляционные процессы в Северной Атлантике. Причем эти процессы определяют изменчивость региональных гидрометеорологических характеристик на временных масштабах от нескольких до нескольких десятков лет [1–3].

Механизмы формирования и особенности общей циркуляции атмосферы Северного полушария, включая Атлантический регион, изучены достаточно хорошо. Этому вопросу посвящено множество публикаций, начиная с классических работ [4, 5]. Их авторами выделено несколько относительно устойчивых крупномасштабных климатических мод, проявляющихся в поле давления и характеризующихся циклическим поведением с периодами от 2 до 10 лет [6]. Показано, что эти моды регулируют изменения режима циклогенеза и антициклонического блокирования, оказывают удаленное влияние на климат в определенных районах Евразии, Северной Америки и Гренландии. Эти климатические моды характеризуются количе-

ственными циркуляционными индексами. Одни из основных мод, оказывающих влияние на Черноморский регион, – это Североатлантическое и Восточно-Атлантическое колебания (САК и ВАК), Скандинавское и Восточно-Атлантическое – Западнороссийское колебания (СК и ВАЗРК) [3, 7–11]. Для Черноморского региона изменение фазы таких климатических мод проявляется в аномалиях полей давления, температуры и осадков, касательного напряжения трения ветра на поверхности моря и других характеристик. Вследствие этого происходит изменение стратификации водной толщи, интенсивности вертикального перемешивания, скорости апвеллинга и даунвеллинга и других параметров морской среды [12–14].

В работе [12] по данным ре-анализа показано, что именно Восточно-Атлантическое колебание – ВАК в наибольшей степени регулирует межгодовую-квизидесятилетнюю изменчивость касательного напряжения трения ветра над Черноморским регионом, которое, в свою очередь, определяет интенсивность циркуляции вод.

Восточно-Атлантическое колебание – второй по значимости сигнал в Атлантико-Европейском регионе после САК [15–17]. Наряду с САК, ВАК определяет положение и интенсивность основных шторм-треков и струйных атмосферных течений в Северной Атлантике [18, 19]. Центры действия ВАК представлены диполем которые сдвинуты на юго-восток по отношению к центрам САК [20]. Во временном ходе индекса ВАК выделяют положительную и отрицательную фазы [15, 21]. 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 [22]. В отрицательную фазу ВАК, напротив, происходит ослабление зонального переноса, что сопровождается формированием отрицательных аномалий температуры над большей частью Европы, включая европейскую часть России [21].

Вариации региональных гидрометеорологических условий, связанные с описанной выше квазипериодической климатической модой, оказывают существенное влияние на гидрохимический состав вод и морские экосистемы Черного моря [23].

Одной из важнейших интегральных характеристик, выражающих направленность биогеохимических процессов в морской воде, является водородный показатель, характеризуемый величиной рН. В основном, современные исследования водородного показателя сосредоточены на получении глобальных климатических тенденций величины рН поверхностных слоев Мирового океана, которые являются прямым следствием поглощения морской водой возрастающего количества атмосферного CO_2 . Согласно опубликованным оценкам в поверхностных водах субполярной части Северной Атлантики за период с 1981 по 2007 гг. тренд рН составил $-0,0022 \pm 0,0004 \text{ год}^{-1}$ [24]. Для акватории всей Северной Атлантики за период с 1993 по

2017 гг. величина рН снижалась со скоростью $-0,017$ ед. рН за десятилетие [25].

Черное море – внутренний бассейн Атлантического океана. Естественно, оценки долгопериодного тренда величины рН поверхностного слоя черноморских вод близки к приведенным выше [26]. Вместе с тем обнаружено, что, наряду с климатической тенденцией понижения величины рН в поверхностном слое глубоководной части Черного моря, она подвержена квазипериодическим колебаниям с периодом порядка 10 лет [27].

С учетом полученных и опубликованных ранее результатов [12], в настоящей работе будет проверено предположение, что причина таких колебаний величины рН в верхнем слое вод открытой части Черного моря связана с вариациями региональных гидрометеорологических характеристик, в том числе, обусловленных изменениями циклонической активности в Атлантико-Европейском секторе (включая Черноморский регион) в различные фазы ВАК. В связи с этим выполнен анализ влияния ВАК на аномалии водородного показателя в поверхностных водах Черного моря с помощью композитного анализа архивных данных.

Материалы и методы. В работе рассматривается одна компонента разложения поля атмосферного давления в Атлантико-Европейском регионе – ВАК, а также данные по величине рН поверхностного слоя глубоководной части Черного моря. Среднемесячные данные по индексу взяты на сайте Национального управления океанических и атмосферных исследований США (NOAA) [28]. В качестве источника данных по величине рН был использован банк архивных данных Института природно-технических систем (ИПТС) [29]. Акватория исследования – поверхностный слой глубоководной части ($h > 1000$ м) Черного моря. Выбор акватории обусловлен пониженной пространственно-временной изменчивостью величины рН в этом регионе, по сравнению с прибрежной и шельфовой зонами. За период с 1957 по 1996 гг. в этой части Черного моря выполнено

6989 станций, на которых измерялась величина рН. Именно этот период наиболее полно обеспечен данными наблюдений. Подробная характеристика массива архивных данных, содержащихся в банке ИПТС дана в работах [26, 27]. Станции с измерениями рН распределены по акватории Черного моря и во времени крайне неравномерно. В связи с этим, для восстановления недостающих значений в узлах регулярной сетки за каждый месяц анализируемого периода использовался метод пространственной интерполяции данных на основе локального полинома второй степени, который дает результаты, близкие к оптимальной интерполяции [30]. Параметры полинома определялись по данным, попавшим в поисковый эллипс с центром в заданной точке расчетной области. Для определения коэффициентов полиномов применяется метод взвешенных наименьших квадратов. Во избежание резких изменений (разрыва производных) размеры поискового эллипса задавались таким образом, чтобы обеспечить частичное перекрытие наборов данных, используемых для интерполяции в соседних узлах сетки. Шаги сетки по осям X и Y задавались таким образом, чтобы общее количество узлов для каждого расчета составляло ~ 4550. Таким образом, поля восстанавливались для каждого месяца каждого года за период с 1957 по 1996 гг. Далее вычислялось среднее значение рН для каждого проинтерполированного поля.

В качестве основного метода статистической обработки в настоящей работе был выбран композитный анализ. С помощью данной методики можно выделить чистый сигнал, соответствующий влиянию определенного процесса на величину рН. Процедура получения сигналов на основе разностных композитов состояла из нескольких этапов:

Во-первых, для индекса ВАК и величины рН строился временной ряд. В связи с плохим временным разрешением данных по величине рН производилось усреднение по двухмесячным временным отрезкам (январь – февраль, март –

апрель и так далее). Временной ряд среднедвухмесячных данных индекса атмосферной циркуляции ВАК был рассчитан по аналогичному принципу.

Далее из временных рядов ВАК и величины рН были удалены линейные тренды. Параметры линейных трендов рассчитаны с помощью метода наименьших квадратов. Статистической обработке временного ряда величины рН и удалению линейного тренда посвящено отдельное исследование [27]. Затем ряды проверялись на стационарность методом проверки гипотезы о постоянстве дисперсии временного ряда при разбиении исходного интервала на две равные части с использованием двухстороннего критерия Фишера [31]. При сравнении дисперсий двух независимых выборок одной генеральной совокупности гипотеза о постоянстве дисперсии подтверждается – исследуемые временные ряды стационарны при уровне значимости 0,05.

На следующем этапе для каждого ряда было рассчитано среднеквадратическое отклонение (σ). В процессе формирования выборок для расчета композитов (рис. 1) половина среднеквадратического отклонения ($0,5 \sigma$) принималась за пороговое значение абсолютной величины аномалий индекса и величины рН. Анализ проводился отдельно для двух периодов года – теплого (с мая по август) и холодного (с ноября по февраль). Далее формировался массив положительных и отрицательных аномалий индекса ВАК (превышающие по абсолютной величине $0,5 \sigma$) и соответствующие массивы аномалий величины рН для каждого периода года. Затем вычислялось среднее значение по каждой выборке. Для массива отклика величины рН на аномальные значения индекса ВАК находилось точечное среднее значение для всей глубоководной части Черного моря и его уровень значимости по критерию Стьюдента [32]. Подобная процедура нахождения сигнала рН и проверка его на значимость выполнялась для каждой фазы климатического сигнала и двух периодов года.

На следующем этапе был получен чистый сигнал посредством определения разности между средними по выборкам величинами рН при положительных и отрицательных аномалиях временного ряда индекса ВАК (то есть, разностный композит временного ряда). Затем была определена статистическая значимость полученного сигнала по стандартному алгоритму с использованием критерия Стьюдента.

Для получения пространственного разностного композита для теплого и холодного периодов года были построены поля аномалий рН для противоположных фаз ВАК (ВАК+ и ВАК-). Далее путем нахождения полуразности значений в каждом узле регулярной сетки между полями аномалий в разные фазы ВАК был получен пространственный композит величины рН. Для расчета значимости композита в каждой точке открытой части Черного моря выбирались только те участки акватории, которые обеспечены не менее чем 4-мя независимыми измерениями величины рН на каждый узел регулярной сетки. Для примера на рис. 2 показано типичное распределение станций с измерениями величины рН для одного из двухмесяч-

ных периодов при отрицательной фазе ВАК. В связи с ограниченным пространственным разрешением данных [27] на некоторой части акватории определить значимость композита не удалось.

Недостаток обеспечения акватории данными измерений в некоторые периоды времени может приводить к возникновению ложного сигнала при анализе временной изменчивости величины рН, поскольку пространственное распределение водородного показателя в Черном море характеризуется выраженной неоднородностью (рис. 3). Для оценки величины этого ложного сигнала производилась следующая процедура. Для каждого анализируемого поля после проведения интерполяционной процедуры вычислялась средняя по этому полю величина рН с использованием значений, полученных в узлах регулярной сетки. Затем рассчитывалась разница полученного среднего и средней климатической величины рН во внутренней части Черного моря. После этого строился временной ход этой разницы, величина которой и является оценкой амплитуды ложного сигнала в предположении о «замороженности» (постоянстве во времени) климатического поля рН.

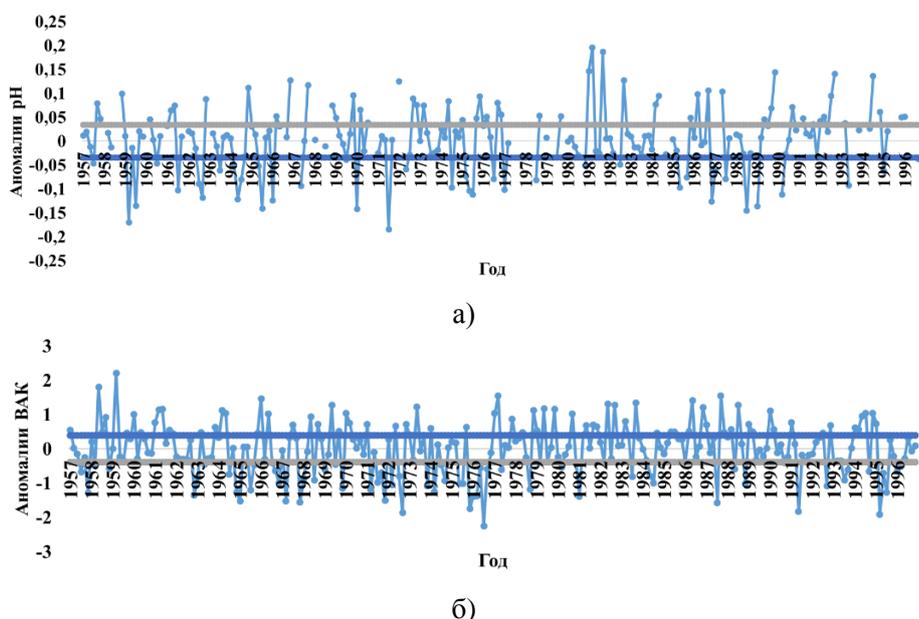


Рис. 1. График усредненного по двухмесячным временным отрезкам, квазистационарного временного ряда за период с 1957 по 1996 гг. а) – величины рН поверхностного слоя вод глубоководной части Черного моря и б) – индекса ВАК. Серая и синяя линии $\pm 0,5$ СКО
Fig. 1. Graph of the averaged over two-month time intervals, quasi-stationary time series for the period from 1957 to 1996. а) – pH values of the surface water layer of the deep part of the Black Sea and б) – EAO index. Gray and blue lines ± 0.5 standard deviation

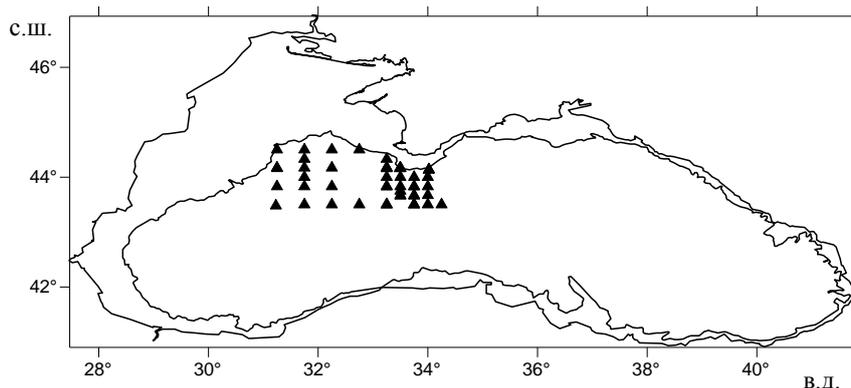


Рис. 2. Пространственное распределение станций, на которых определялась величина рН в отрицательную фазу ВАК в январе-феврале 1994 года. Показана изобата 1000 м
Fig. 2. Spatial monetary content, which accounts for the pH value in the negative phase of the EAO in January-February 1994. Depth 1000 m is shown

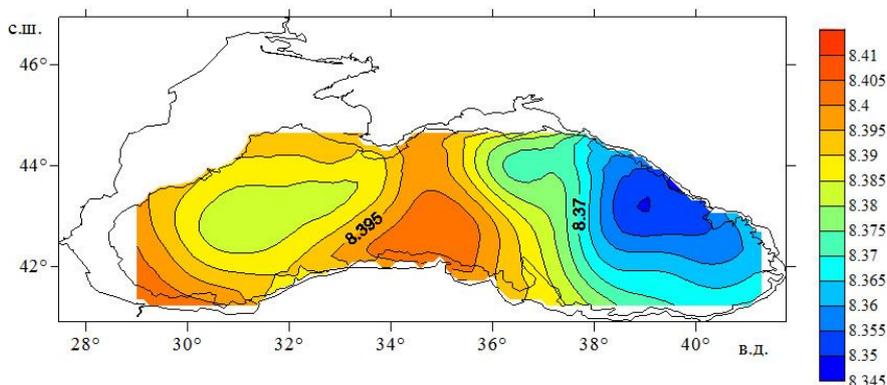


Рис. 3. Климатическое поле величины рН в глубоководной части Черного моря по данным работы [26]
Fig. 3. Climatic field of pH values in the deep part of the Black Sea according to [26]

Результаты и их анализ. Авторами данной работы ранее исследована долго-периодная тенденция величины рН в глубоководной части Черного моря [26]. Было получено, что в поверхностных водах открытой части выделяется значимый отрицательный линейный тренд рН, величина которого близка к $-0,06$ ед. рН за 50 лет. Тренд, рассчитанный по более точным данным измерений величины рН, начиная с 1970-х гг., был примерно 1,5 раза больше (по абсолютной величине). Этот результат соответствует оценкам тенденций увеличения кислотности поверхностных вод других регионов Мирового океана в эпоху наблюдаемой антропогенной нагрузки [33, 34]. Вместе с тем, было подтверждено наличие отрицательного тренда во времен-

ном ходе рН в промежуточном слое вод Чёрного моря (50–150 м), причем его абсолютная величина оказалась максимальной на горизонте 75 м ($-0,57$ ед. рН за 50 лет), где она на порядок превышает абсолютную величину тренда на поверхности. На других горизонтах промежуточного слоя тренды рН превышают поверхностный тренд в 5 раз и более. Вероятной причиной такого относительно быстрого подкисления промежуточных вод служит интенсификация подъема вод, выносящая в окрестность холодного промежуточного слоя (ХПС) воды с более низкими величинами рН. Оценка скорости такого подъема составляет ~ 1 м/год [26]. Следовательно, для того чтобы воды поднялись с глубины ~ 75 м (где отмечаются максимальные по

абсолютной величине вертикальные градиенты рН) к основанию верхнего промежуточного слоя необходимо около 55 лет. Следует обратить внимание на методику расчёта долговременных трендов, использованную в работе [26]. Для оценки трендов ежегодные данные усреднялись по десятилетним периодам с пятилетним сдвигом. Расчёт среднего за 10 лет значения рН для каждого стандартного горизонта в отдельности выполнялся на основе средних по акватории моря значений, полученных из восстановленных в узлах регулярной сетки полей рН за каждые три месяца (или за каждый год, начиная с горизонта 50 м и глубже). В настоящем исследовании анализируется природа возникновения положительных и отрицательных аномалий величины рН в поверхностном слое при двухмесячном временном осреднении (см. материалы и методы).

Перейдем к анализу результатов расчетов.

Влияние Восточно-Атлантического колебания на величину рН в холодный период года (с ноября по февраль). ВАК в первую очередь проявляется в холодный период года и его воздействие на гидрохимические свойства морской среды также более выражено зимой. Это хорошо видно по величине разностного композита временного ряда рН анализируемого региона в период с ноября по февраль. Согласно полученным результатам (табл. 1), для холодного периода года получен значимый на 90% уровне разностный композит величины рН между противоположными фазами ВАК. Разность между аномалиями величины рН на поверхности моря с ноября по февраль в положительную и отрицательную фазы ВАК составляет около 0,17 ед. рН. При отрицательной фазе ВАК аномалии рН положительны (около 0,09), а при положительной фазе ВАК – отрицательны (-0,08).

Вероятный механизм воздействия ВАК на величину рН верхнего слоя открытой части Черного моря в холодный период года заключается в следующем.

Таблица 1. Средняя величина аномалий индекса ВАК и рН для двух (положительной и отрицательной) фаз ВАК холодного периода года (с ноября по февраль). Пороговое значение абсолютной величины аномалий индекса и величины рН равная $0,5\sigma$. Значимые (на уровне 90%) результаты выделены жирным шрифтом

Кол-во случаев 10	
ВАК–	рН+
-1,1	0,09
Кол-во случаев 11	
ВАК+	рН–
0,93	-0,08

При отрицательной фазе ВАК происходит ослабление зональной циркуляции. В этой фазе колебания, дипольная структура аномалий атмосферного давления проявляется в виде обширной положительной аномалией между Исландией и Великобританией и отрицательной в Восточной части Субтропической Атлантики [21]. При этом в Черноморско-Средиземноморском регионе происходит рост циклонической активности [12, 13, 35]. Это вызывает интенсификацию вертикального турбулентного перемешивания верхнего слоя моря. По данным, опубликованным в работе [36], в восточной части Черного моря в зимы с повышенной штормовой активностью наблюдаются значительные зимне-весенние пики численности фитопланктона. Авторы объясняют наличие таких пиков тем обстоятельством, что усиленное штормовое перемешивание способствует мобилизации запасов биогенов и поступлению их с подповерхностных горизонтов в фотический слой. Этот вывод подтвержден данными, опубликованными в работе [37]. Отметим, что недавно опубликованные результаты указывают, что именно в восточной части Черного моря сигнал, связанный с интенсификацией циклонической деятельности наиболее выражен [12]. При цветении фитопланктона уровень рН может повышаться на величину порядка 0,1 ед. рН [38]. В результате, в зимний период при отрицательной среднесезонной аномалии индекса ВАК (- 1,1) получена по-

ложительная среднесезонная аномалия величины рН⁺ которая достигает 0,09 ед. рН (табл. 1). Что касается интенсификации восходящих движений при усилении циклонической активности, то она сказывается на величине рН на более долгопериодных (междесятилетних) масштабах. Об этом свидетельствуют приведенные в начале настоящего раздела оценки. На точечной диаграмме (рис. 4а) видно, что амплитуда ложного сигнала, обусловленного пространственной неоднородностью в распределении станций, на которых производилось измерение величины рН, как минимум в 2–3 раза меньше амплитуды выделенного сигнала.

В положительную фазу ВАК (ВАК⁺) преобладает зональный тип циркуляции [21, 35]. Структура поля давления в свободной атмосфере для января характеризуется обширной областью отрицательной аномалии в районе Северной Атлантики и областью положительного давления над Средиземным и Черным морями [20]. Преобладание антициклонических

условий является основной причиной ясной и тихой погоды в зимний период. В такие зимы при менее эффективном вертикальном турбулентном перемешивании количественные показатели фитопланктона уменьшаются как минимум на половину [36]. Уровень метаболизма фитопланктона в зимний период также достигает минимальных значений, но значительно возрастает в последующий весенний сезон [23]. При больших величинах индекса ВАК (до 0,93) среднесезонная аномалия рН составляет -0,08 ед. рН (табл. 1). Отметим, что по сравнению с отрицательной фазой ВАК статистическая значимость полученных аномалий величины рН существенно ниже. В трех из семи случаев аномалий рН, которые удалось рассчитать при ВАК⁺ с использованием описанной методики обработки данных наблюдений, средние их значения статистически неотличимы от ложного сигнала (рис. 4б). При этом разностный композит, оцененный по временному ряду рН, значим на уровне 90% доверительного интервала.

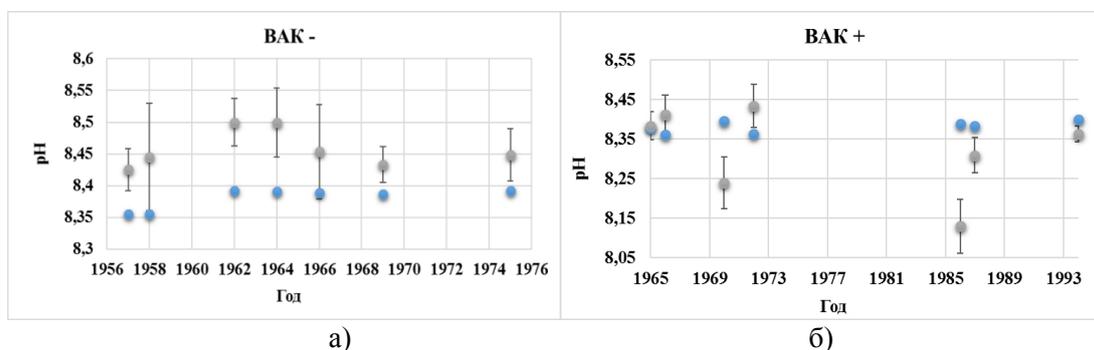


Рис. 4. Точечная диаграмма средних значений рН (серые точки), рассчитанных по пространственным областям, в которых производилась основная часть измерений рН в разные годы, при ВАК⁻ – а) и ВАК⁺ – б), синие точки – средние значения по соответствующим участкам акватории для климатического поля рН, характеризующие амплитуду ложного сигнала. Вертикальные отрезки – среднее квадратическое отклонение величины рН, проинтерполированной по анализируемой пространственной области

Fig. 4. Scatter plot of mean values (gray dots) over the spatial region of the pH sampling for EAO⁻ – а) and EAO⁺ – б), blue dots are the average values over the corresponding parts of the water areas of the climatic pH field, which characterizes the amplitude of the false signal.

Vertical segments are the standard deviation of the pH value interpolated over the analyzed spatial region

Диапазон пространственных изменений величин полуразностного композита рН в противоположные фазы ВАК ((ВАК⁺ минус ВАК⁻)/2) в целом по внутренней части моря составляет от

–0,18 до 0,02 (рис.5). В структуре этого композита (также, как и в среднем для всей внутренней части Черного моря) преобладают отрицательные значения.

Наиболее значимая (на уровне 90% доверительного интервала или выше) область отрицательных величин полуразностного композита рН располагается в восточной части моря, в районе так называемого «векового» разреза, выполняемого от побережья Кавказа до берегов Турции (рис. 5). В западной части акватории область отрицательных величин в поле композита рН характеризуется величинами от $-0,06$ до $-0,18$ ед. рН.

Значимость полученного сигнала оценена для района, ограниченного координатами 31° – 34° в.д. и $43,5^{\circ}$ – $44,8^{\circ}$ с.ш., достаточно полно обеспеченного данными измерений. Оказалось, что этот результат тоже значим на уровне 90% доверительного интервала. Подчеркнем еще раз, что значимость сигнала рассчитывалась только для районов, обеспеченных необходимым количеством данных наблюдений.

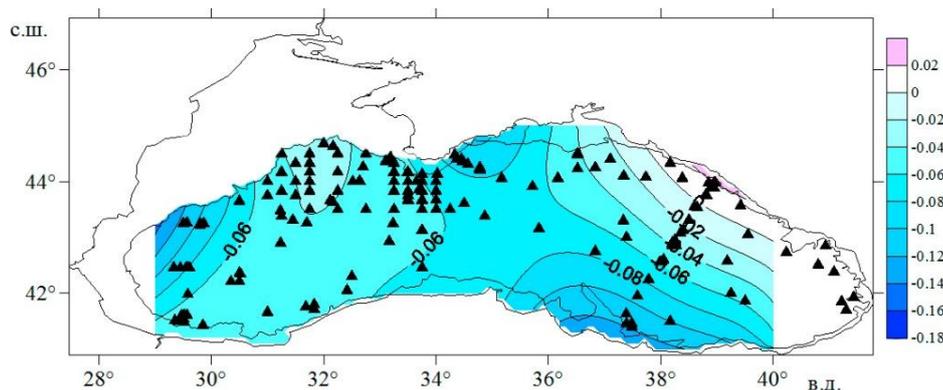


Рис. 5. Поле полуразностного композита величины рН для противоположных фаз ВАК в период с ноября по февраль за период с 1957 по 1996 г. (ВАК+ минус ВАК-). Количество случаев 7

Fig. 5. The field of the half-difference composite of the pH value for the opposite phases of the East Atlantic Oscillation in the period from November to February for the period from 1957 to 1996. (EAO + minus EAO -). Number of cases 7

В теплый период года (с мая по август) ВАК ослабевает по сравнению с зимой. Неудивительно, что для теплого периода года выделить статистически значимый сигнал в разностном композите величины рН (ВАК+ минус ВАК-) не удалось.

Выводы. В результате выполненного анализа получено, что в зимний период Восточно-Атлантическое колебание оказывает значимое влияние на аномалии величины рН верхнего слоя вод Черного моря. С ноября по февраль, при отрицательной среднесезонной аномалии индекса ВАК (превышающей по абсолютной величине 0.5σ и составляющей в среднем по морю $-1,1$) получена положительная среднесезонная аномалия величины рН около $0,09$ ед. рН. При положительной фазе ВАК (когда аномалии индекса превышают 0.5σ) аномалия рН отрицательна и в среднем для всего моря превышает (по абсолютной величине)

$-0,08$ ед. рН. Разность между аномалиями величины рН на поверхности моря с ноября по февраль между положительной и отрицательной фазами ВАК составляет около $-0,17$ ед. рН. В поле пространственного композита практически по всей акватории моря эта разность тоже отрицательна. Это значит, что в зимний период года при положительной фазе ВАК+ происходит тенденция уменьшения величины рН. Значимые области отрицательных величин композита рН выделяются в восточной и западной частях моря, там, где выполнено достаточное количество измерений.

Полученные закономерности изменчивости величины рН обусловлены региональными аномалиями гидрометеорологических условий в Черноморском регионе в различные фазы ВАК и сопутствующими биогеохимическими факторами.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПТС по теме «Фундаментальные исследования процессов в климатической системе, определяющих пространственно-временную изменчивость природной среды глобального и регионального масштабов (№ госрегистрации 121122300074-7).

Выражаем благодарность анонимному рецензенту за конструктивную и доброжелательную критику первого варианта работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kozuchowski K.M.* Variations of hemispheric zonal index since 1899 and its relationships with air temperature // *International Journal Climatology*. 1993. Vol. 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. Vol. 7. P. 1635–1647.
3. *Полонский А.Б.* Роль океана в изменениях климата. К.: Наукова думка. 2008. 184 с.
4. *Пальмен Э., Ньютон Ч.* Циркуляционные системы атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 465 с.
5. *Walker G.T., Bliss E.W.* World weather V // *Roy Meteorol. Soc.* 1932. Vol. 36. P. 53–84.
6. *Barnston A.G., Livezey R.E.* Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns // *Mon. Wea. Rev.* 1987. Vol. 115. No. 6. P. 1083–1126.
7. *Hurrell J.W.* Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation: Regional Temperatures and Precipitation // *Science*. 1995. No. 5224. P. 676–679.
8. *Полонский А.Б., Башарин Д.В., Воскресенская Е.Н., Ворли С.* Североатлантическое колебание: описание, механизмы и влияние на климат Евразии // *Морской гидрофизический журнал*. 2004. № 2. С. 42–57.
9. *Нестеров Е.С.* Особенности состояния океана и атмосферы в разных фазах североатлантического колебания // *Метеорология и гидрология*. 1998. № 8. С. 74–82.
10. *Thompson D.W., Wallace J.M.* The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields // *Geophys. Res. Lett.* 1998. Vol. 25. No. 9. P. 1297–1300.
11. *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.
12. *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.
13. *Евстигнеев В.П., Наумова В.А., Воскресенская Е.Н., Евстигнеев М.П., Любарев Е.П.* Ветроволновые условия прибрежной зоны Азово-Черноморского региона. С.: ИПТС, 2017. 320 с.
14. *Lionello P., Bhend 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. Vol. 14. P. 325–372.
15. *Вязилова Н.А.* Циклоническая активность и колебания циркуляции в Северной Атлантике // *Метеорология и гидрология*. 2012. № 7. С. 5–14.
16. *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. Vol. 32. No. 19. P. 6285–6298. DOI: 10.1175/JCLI-D-19-0135.1.
17. *Moore G.W.K., Renfrew I.* Cold European winters: Interplay between the NAO and the East Atlantic mode // *Atmos. Sci. Lett.* 2012. Vol. 13. No. 1. P. 1–8. DOI: 10.1002/asl.356.
18. *Woollings T., Blackburn M.* The North Atlantic jet stream under climate change, and its relation to the NAO and EA

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

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

20. 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).

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

22. *Кибальчич И.А.* Особенности общей циркуляции атмосферы и их влияние на формирование температурных аномалий в Украине: Дисс. ... канд. геогр. наук. Одесса: 2015. 181 с.

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

24. *Lauvset S.K., Gruber N.* Long-term trends in surface ocean pH in the North Atlantic // *Marine Chemistry*. 2014. Vol. 162. P. 71–76.

25. *Leseurre C., Monaco Cl.Lo., Reverdin G., Metzl N., Fin J., Olafsdottir S., Racapé V.* Ocean carbonate system variability in the North Atlantic Subpolar surface water (1993–2017) // *Biogeosciences*. 2020. Vol. 17. P. 2553–2577.

26. *Полонский А.Б., Гребнева Е.А.* Пространственно-временная изменчивость водородного показателя вод Черного моря // *Доклады Академии наук*. 2019. Т. 486. № 4. С. 494–499.

27. *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. DOI: 10.33075/2220-5861-2022-2-12-21.

28. NOAA/National Weather Service, Center for Weather and Climate Prediction.

<https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/ea.shtml> (дата обращения 20.01.2022).

29. *Мельников В.В., Полонский А.Б., Котолупова А.А. и др.* GIS Института природно-технических систем // *Системы контроля окружающей среды*. 2016. № 4 (24). С. 49–55.

30. *Новикова А.М., Каширина Е.С., Новиков А.А., Полонский А.Б., Панкеева Т.В.* ГИС в морских исследованиях: мировой опыт и возможности его применения на примере Черноморского региона // *Труды Карадагской научной станции им. Т.И. Вяземского – природного заповедника РАН*. 2017. № 1 (3). С. 54–66.

31. *Кремер Н.Ш., Путко Б.А.* Эконометрика: учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ЮНИТИ-ДАНА. 2010. 328 с.

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

33. *Gattuso J.-P., Hansson L.* Ocean acidification: background and history // *Ocean Acidification*. Oxford University Press, Oxford. 2011. P. 1–20.

34. *Zeebe R.E., Wolf-Gladrow D.* CO₂ in seawater: equilibrium, kinetics, isotopes. Elsevier Oceanogr. 2001. 346 p.

35. *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.

36. *Грезе В.Н.* (ред). Основы биологической продуктивности Черного моря. К.: Наукова думка, 1979. 392 с.

37. *Маштакова Г.П.* Сезонная динамика фитопланктона восточной части Черного моря. М.: Институт рыбного хозяйства и океанографии. 1968. Вып. 27. С. 60–72.

38. *Добржанская М.А.* Основные черты гидрохимического режима Черного моря // *Труды СБС ЛИ СССР*. 1960. Т. 13. С. 325–378.

**IMPACT OF THE EAST ATLANTIC OSCILLATION ON pH ANOMALIES
IN THE UPPER LAYER OF THE OPEN PART OF THE BLACK SEA**

A.B. Polonsky, E.A. Grebneva

Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28

The impact of the East Atlantic oscillation (EAO) on the pH anomalies in the surface waters of the open Black Sea is analyzed. Using the technique of difference composites, it is shown that in the winter period the EAO significant influence on the pH anomalies of the upper layer of the Black Sea is observed. From November to February, at the negative phase EAO (EAO⁻), a positive average seasonal anomaly of the pH value is obtained (about 0.09 pH units), while at the positive phase (EAO⁺), the pH anomaly is negative and exceeds (in absolute value) -0.08 pH units. So, the typical difference between the pH values in the Black Sea upper layers in the opposite EAO phases is about -0.17 pH units. The likely reasons of the found pH variability in the upper layer Black Sea waters are analyzed.

Keywords: deep-water part of the Black Sea, surface layer, composite analysis, pH value, East Atlantic Oscillation.

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. Polonsky A.B. Rol' okeana v izmenenii klimata (The role of the ocean in climate change), Kyiv: Naukova dumka, 2008, 184 p.
4. Pal'men E. and N'yuton CH. Tsirkulyatsionnyye sistemy atmosfery (Atmospheric circulation systems), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1973, 465 p.
5. Walker G.T. and Bliss E.W. World weather V. *Roy Meteorol. Soc.*, 1932, Vol. 36, pp. 53–84.
6. Barnston A.G. and Livezey R.E. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Mon. Wea. Rev.*, 1987, Vol. 115, No. 6, pp. 1083–1126.
7. Hurrell J.W. Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation: Regional Temperatures and Precipitation. *Science*, 1995, No. 5224, pp. 676–679.
8. Polonsky A.B., Basharin D.V., Voskresenskaya E.N., and Vorli S. Severoatlanticheskoye kolebaniye: opisaniye, mekhanizmy i vliyaniye na klimat Yevrazii (North Atlantic Oscillation: Description, Mechanisms and Impact on the Climate of Eurasia). *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal*, 2004, No. 2, pp. 42–57.
9. Nesterov E.S. Osobennosti sostoyaniya okeana i atmosfery v raznykh fazakh severoatlanticheskogo kolebaniya (Peculiarities of the State of the Ocean and the Atmosphere in Different Phases of the North Atlantic Oscillation). *Meteorologiya i gidrologiya*, 1998, No. 8, pp. 74–82.
10. Thompson D.W. and Wallace J.M. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, Vol. 25, No. 9, pp. 1297–1300.
11. Belokopytov V.N. Klimaticheskiye izmeneniya gidrologicheskogo rezhima Chernogo morya: Dis. dr. geogr. nauk (Climatic changes in the hydrological regime of the Black Sea. Dr. geogr. sci. thesis), Sevastopol: FGBUN “Morskoy gidrofizicheskiy institut RAN”, 2007, 377 p.
12. Averyanova E.A., Gubarev A.V., and Polonsky A.B. Vliyaniye severoatlanticheskogo i vostochno-atlanticheskogo kolebaniy na zavikhrennost' kasatel'nogo napryazheniya treniya vetra nad Chernym morem (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.
13. Evstigneev V.P., Naumova V.A., Voskresenskaya E.N., Evstigneev M.P., and Lyubarets E.P. Vetrovolnovyye usloviya pribrezhnoy zony Azovo-Chernomorskogo regiona (Wind wave conditions of the coastal zone of the Azov-Black Sea region). Sevastopol: IPTS, 2017, 320 p.
14. Lionello P., Buzzi 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.
15. Vyazilova N.A. Tsiklonicheskaya aktivnost' i kolebaniya tsirkulyatsii v Severnoy Atlantiki (Cyclonic Activity and Circulation Fluctuations in the North Atlantic). *Meteorologiya i gidrologiya*, 2012, No. 7, pp. 5–14.

16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/ea_map.shtml (September 06, 2022).
21. Nesterov E.S. O vostochno-atlanticheskom kolebanii tsirkulyatsii atmosfery (On the East Atlantic Oscillation of the Atmospheric Circulation). *Meteorologiya i gidrologiya*, 2009, No. 12, pp. 32–40.
22. Kibal'chich I.A. Osobennosti obshchey tsirkulyatsii atmosfery i ikh vliyaniye na formirovaniye temperaturnykh anomalii v Ukraine: dis. ... kand. geogr. nauk (Features of the General Atmospheric Circulation and Their Influence on the Formation of Temperature Anomalies in Ukraine. Cand. geogr. sci. thesis), Odessa, 2015, 181 p.
23. Oguz T. Black Sea Ecosystem Response to Climatic Teleconnections. *Oceanography*, 2005, Vol. 18, No. 2, pp. 122–133.
24. Lauvset S.K. and Gruber N. Long-term trends in surface ocean pH in the North Atlantic. *Marine Chemistry*, 2014, Vol. 162, pp. 71–76.
25. Leseurre C., Monaco Cl.Lo., Reverdin G., Metzl N., Fin J., Olafsdottir S., and Racapé V. Ocean carbonate system variability in the North Atlantic Subpolar surface water (1993–2017). *Biogeosciences*, 2020, Vol. 17, pp. 2553–2577.
26. Polonsky A.B. and Grebneva E.A. Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' vodorodnogo pokazatelya vod Chernogo morya (Spatial-temporal variability of the pH value of the Black Sea waters). *Doklady Akademii nauk*, 2019, Vol. 486, No. 4, pp. 494–499.
27. Polonsky A.B. and Grebneva E.A. O mezhgodovoy izmenchivosti velichiny rN v poverkhnostnom sloye glubokovodnoy chasti Chernogo morya (On the interannual variability of the pH value in the surface layer of the deep-water part of the Black Sea). *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy*, 2022, No. 2 (48), pp. 12–21. DOI: 10.33075/2220-5861-2022-2-12-21.
28. <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/ea.shtml> (January 20, 2022).
29. Mel'nikov V.V., Polonskiy A.B., Kotolupova A.A., Grebneva E.A., Mel'nik L.A., and Biryukova M.A. GIS Instituta prirodno-tekhnicheskikh system (GIS of the Institute of Natural and Technical Systems). *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy*, 2016, No. 4 (24), pp. 49–55.
30. Novikova A.M., Kashirina Ye.C., Novikov A.A., Polonskiy A.B., and Pankeyeva T.V. GIS v morskikh issledovaniyakh: mirovoy opyt i vozmozhnosti yego primeneniya na primere Chernomorskogo regiona (GIS in marine research: world experience and possibilities of its application on the example of the Black Sea region). *Trudy Karadag'skoy nauchnoy stantsii im. T.I. Vyazemskogo – prirodno zapovednika RAN*, 2017, No. 1 (3), pp. 54–66.
31. Kremer N.Sh., and Putko B.A. *Ekonometrika (Econometrics)*, Moscow: Unity-dana, 2010, 328 p.
32. Kharkova O.A., and Solovyov A.G. *Statisticheskiye metody i matematicheskoye modelirovaniye (Statistical Methods and Mathematical Modeling)*, Astrakhan: SGMU, 2017, 164 p.
33. Gattuso J.-P. and Hansson L. Ocean acidification: background and history. *Ocean Acidification*. Oxford University Press, Oxford., 2011, pp. 1–20.
34. Zeebe R.E. and Wolf-Gladrow D. CO₂ in seawater: equilibrium, kinetics, isotopes. *Elsevier Oceanogr.*, 2001, 346 p.
35. Bardin M.Yu., Platova T.V., and Samokhina O.F. Osobennosti izmenchivosti tsiklonicheskoy aktivnosti v umerennykh shirotakh Severnogo polushariya, svyazannyye s vedushchimi modami atmosfery tsirkulyatsii v Atlantiko-Yevropeyskom sektore (Peculiarities of cyclonic activity variability in the temperate latitudes of the Northern Hemisphere associated with the leading atmospheric circulation modes in the Atlantic-European sector). *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, 2015, Vol. 2, pp. 14–40.
36. Greze V.N. (editor). *Osnovy biologicheskoy produktivnosti Chernogo morya (Fundamentals of biological productivity of the Black Sea)*, Kyiv: Naukova dumka, 1979, 392 p.
37. Mashtakova G.P. Sezonnaya dinamika fitoplanktona vostochnoy chasti Chernogo moraya (Seasonal dynamics of phytoplankton in the eastern part of the Black Sea), M: Institute fisheries and oceanography, 1968, Vol. 27, pp. 60–72.
38. Dobzhanskaya M.A. Osnovnyye cherty gidrokhimicheskogo rezhima Chernogo morya (The main features of the hydrochemical regime of the Black Sea). *Trudy SBS LI SSSR*, 1960, Vol. 13, pp. 325–378.