УДК 551.465 (262.5) DOI: 10.33075/2220-5861-2020-3-39-48

АНАЛИЗ СЕЗОННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ГИДРОЛОГО-ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРНОСТНЫХ ВОД СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

А.А. Валле, Е.А. Гребнева, А.Б. Полонский

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

На основе архивного массива данных Института природно-технических систем с 1955 по 2015 гг. проанализирована внутригодовая изменчивость температуры, солености, растворенного кислорода и pH в поверхностном слое вод северо-западного шельфа Черного моря, включая приустьевую область Дуная. Подтверждено абсолютное преобладание годовой гармоники в сезонной изменчивости большинства анализируемых гидролого-гидрохимических характеристик на большей части рассмотренной акватории шельфа. Исключение составляет соленость в приустьевой области Дуная. Здесь полугодовая гармоника описывает более 60% общей дисперсии, обусловленной сезонной изменчивостью солености, что связано с особенностями ветрового режима в регионе.
Ключевые слова: температура, соленость, кислородный режим, pH, северо-западная часть Черного моря, приустьевой район Дуная.

Поступила в редакцию: 25.08.2020. После доработки: 17.09.2020.

Введение. Северо-западная часть Черного моря (СЗЧМ) – это мелководный шельфовый район, гидролого-гидрохимический режим которого в значительной степени определяется стоком рек. От речного стока зависит распределение гидролого-гидрохимических характеристик поверхностных вод, термохалинная стратификация и содержание биогенных веществ практически во всей СЗЧМ. В годы обильного стока речные воды покрывают около 70% всей акватории шельфа, а в маловодные от 20% до 40%. Вместе с тем в период половодья даже в маловодные годы трансформированные речные воды могут достигать центрального района СЗЧМ и занимать около 50% площади СЗЧМ [1, 2].

В СЗЧМ впадают такие крупные реки как Дунай (годовой сток которого в среднем за период 1960-2003 гг. составляет около 200 км^3), Днепр (~44 км^3), Днестр (~10 км^3) и Южный Буг (~3 км^3) [3]. Анализу изменчивости стока этих рек посвящено много работ [4, 5, 6, 7]. Дунай (в отличие от других крупных рек, указанных выше) не впадает в лиман, но образует обширную дельту, что существенно влияет на поступление биогенов в море. На колебание объёма стока Дуная в основном влияют изменяющиеся климатические условия над площадью его водосбора. В полноводные годы годовой сток достигает 313 км^3, а в засушливые может снижаться до 123 км^3 [8]. Это приводит к значительным межгодовым вариациям гидролого-гидрохимических и гидробиологических характеристик вод в приустьевой зоне и в СЗЧМ. В тоже время на эти характеристики (особенно за последние тридцать лет) принципиальное влияние оказывает хозяйственная деятельность в регионе. Это проявляется, в частности, в эвтрофикации вод СЗЧМ [8, 9] и приводит к существенным изменениям гидрохимических и гидробиологических характеристик. Например, с 60-х до середины 80-х гг. 20-го столетия на придунайском шельфе с глубинами менее 50 м концентрация нитратов и фосфатов в поверхностном слое увеличилась в 3–5 раз [10].

Район приустьевого взморья Дуная представляет собой зону постоянного взаимодействия речных и морских вод, в результате чего образуются трансформированные водные массы. Формирование гидрохимических условий взморья происходит под воздействием сложных гидрофизических, гидродинамических

процессов, характерных для этого района. Поэтому приустьевое взморье Дуная представляет собой один из самых сложных районов для исследования гидролого-гидрохимического режима.

Поступление с пресноводным стоком значительного количества биогенных элементов обеспечивает обильную кормовую базу для фитопланктона в течение всего года. В период максимального стока концентрация биогенных элементов возрастает в десятки раз. В результате, на приустьевом взморье регулярно отмечается неконтролируемые локальные повышения биопродуктивности, так называемое «цветение». Это приводит к гипоксии (то есть, к истощению растворенного кислорода), что сопровождается резким изменением величины pH (в диапазоне от 7,9 до более, чем 9,0). Такие колебания гидрохимических показателей морской воды могут оказывать неблагоприятное воздействие на жизнедеятельность гидробионтов, что приводит к снижению биоразнообразия и рыбных запасов [11–14].

Благодаря многолетним исследованиям СЗЧМ установлено, что гидрохимический режим за последние 50 лет претерпел значительные изменения [15–18]. Авторами публикации [17] было показано, что в 1950–1960 гг. содержание растворенного кислорода в СЗЧМ в среднем составляло 7,85–11,44 мг·дм$^{-3}$ (или примерно 350–510 μM). В работе [9] установлено, что в 1970–1980-х годах благодаря повышенному речному стоку и увеличению биогенных элементов в верхнем слое вод СЗЧМ резко возросло количество фитопланктона, который является основным продуцентом кислорода. Вместе с тем в придонном слое с конца 1970-х годов наблюдается снижение концентрации кислорода, что является прямым следствием обострения стратификации и повышения концентрации биоты в поверхностном слое [18, 19].

Подробные исследования гидрохимии вод приустьевого взморья Дуная за последние годы были выполнены сотрудниками Морского гидрофизического института НАН Украины, которые в 1997–2010 годах провели 7 экспедиций в этом районе [7]. Было показано, что поверхностные воды с соленостью менее 16,5‰ более насыщены кислородом, чем воды с более высокой соленостью. Области пониженного содержания кислорода в придонных слоях возникают в устойчиво стратифицированных водах, когда одновременно присутствуют и термоклин, и галоклин. Высокие значения pH в поверхностном слое (до 9,3 при средней величине pH = 8,69) и в придонном слое (8,86 при средней величине pH = 8,28) указывают на тот факт, что на взморье протекают активные фотосинтетические процессы. При этом в период развития гипоксии величина pH в придонном слое падала до 7,39 ед. pH [11]. Такие резкие изменения ключевых показателей гидролого-гидрохимического режима вод и сопутствующие гидробиологические процессы исключительно важны не только с точки зрения изучения фундаментальных проблем функционирования региональных экосистем, но и для решения многочисленных прикладных задач. Именно по этой причине значительное внимание исследователей биогеохимического режима Черного моря было сосредоточено на акватории приустьевых областей СЗЧМ [20–22].

Накопленные к настоящему времени обширные архивные данные позволяют провести ретроспективный анализ гидролого-гидрохимического режима вод СЗЧМ и оценить изменчивость сопутствующих гидробиологических процессов в регионе, начиная с середины 20 века. Ниже приводятся результаты анализа сезонной изменчивости температуры и солености, содержания растворенного кислорода и pH в верхнем слое вод СЗЧМ, включая район приустьевого взморья р. Дунай, по экспериментальным данным, полученным в период с 1955 по 2015 гг.

Данные наблюдений. В работе анализируется сезонная изменчивость температуры, солености, растворенного кислорода и pH в поверхностном слое СЗЧМ и в приустьевой зоне Дуная с использованием базы данных Института природно-технических систем (ИПТС) [23]. Проанализированы данные по этим характеристикам за период с 1955 по

2015 гг. Количество станций, выполненных за весь период, представлено в табл. 1.

В качестве границы СЗЧМ выбраны береговая черта от м. Калиакра до м. Сарыч (Ш=43º23'с.ш., Д=34º в.д.) и изобата 100м. В качестве геохимической границы речного экотона при типичных величинах стока р. Дунай обычно принимается изогалина 6‰ [24]. Поэтому, для приустьевой акватории Дуная определены границы с координатами: 44º9'–45º8'с.ш., 29º7'–30º8' в.д.

Регулярные гидрохимические наблюдения в СЗЧМ начались с 1950-х годов. Наибольшее количество измерений было выполнено в 1980-х годах. С начала 1990-х годов количество экспедиций резко сократилось. Пространственное распределение данных также крайне неравномерно. На рис. 1 представлено расположение выполненных станций по температуре (рис.1а) и pH (рис.1б). Эти параметры выбраны в качестве примера, поскольку температура наиболее полно обеспечена данными измерений, а массив исторических данных pH –наименее представителен по сравнению с другими анализируемыми параметрами (табл. 1). Наиболее полно охвачен измерениями теплый период года (июль, август и сентябрь) [25, 26]. По величине pH относительно неплохо обеспечена измерениями прибрежная акватория, включая мелководные районы, прилегающие к устьевым областям рек: Днепр, Днестр, Южный Буг и Дунай. Общее количество станции в более глубоководной части СЗЧМ значительно выше, чем в приустьевых областях крупных рек. При этом они более равномерно распределены по акватории. Необходимо отметить, что величина pH в Черном море до второй половины 1970-х гг. в основном определялась колориметрическим методом, точность которого ограничена десятыми долями ед. pH [27]. Более точным методом определения pH является потенциометрический метод, основанный на измерении зависимости потенциала электрода от активности ионов водорода в исследуемом растворе, который начал широко использоваться только со второй половины 1970-х гг. Точность измерений современных стандартных pH-метров возросла на порядок, ошибка измерения не превышает 0,02 [28].

Подробное описание процедуры контроля качества по кислороду и метод обработки данных представлены в статье [29]. Аналогичная процедура была применена к гидрологическим данным по температуре и солености. Поскольку количество измерений для большинства месяцев ограничено, особенно в зимний период, а станции распределены по пространству неравномерно, проводилось восстановление значений в узлах регулярной сетки для каждого месяца посредством метода оптимальной интерполяции [30]. Сезонный ход рассчитан по осредненным данным из среднемесячных полей. Для определения преобладающего вклада в дисперсию временного ряда различных частотных компонент использовался метод гармонического анализа.

Таблица 1. Обеспеченность станциями в северо-западной части Черного моря и приустьевой акватории р. Дунай с 1955 по 2015 гг. Приведено количество наблюдений в поверхностном слое из базы данных ИПТС

Океанографическая характеристика	Количество станций в акваториях исследования	
	Северо-западный шельф	Приустьевое взморье р. Дунай
Кислород	17013	5303
Величина pH	11615	4743
Температура	42695	9362
Соленость	40519	6112

При усреднении учитывался следующий хорошо известный факт. Данные измерений величины pH не подчиняются нормальному закону распределения, что вполне естественно, учитывая логарифмический характер самой величины pH.

Выборочная гистограмма поэтому характеризуется явно выраженной асимметрией (см. [26]). В таком случае в качестве климатической характеристики величины pH могут использоваться её медианные значения. Медиана соответствует квантилю распределения $\tau = 0{,}5$.

Усредненная карта распределения хлорофилла-а в мае за период с 1997 по 2018 гг. получена с сайта CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service). Разрешение 1 км × 1 км [31]. Данные по ветру взяты из работы [32].

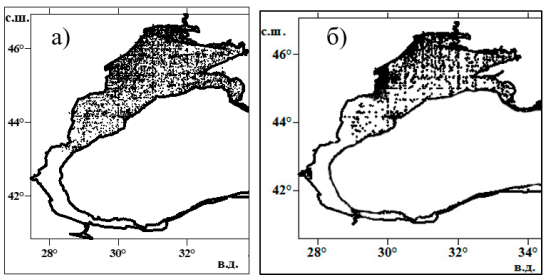

Рис. 1. Пространственное распределение станций, выполненных в северо-западной части Черного моря за период 1955–2015 гг. с фиксацией температуры (а) и величины pH (б) в поверхностном слое

Fig. 1. Spatial distribution of stations performed in the northwestern part of the Black Sea for the period 1955–2015 with temperature fixation (a) and pH (b) in the surface layer

Результаты и их обсуждение. Внутригодовые изменения гидролого-гидрохимических характеристик поверхностного слоя вод СЗЧМ имеют хорошо выраженный сезонный характер (рис. 2–4). Сезонный ход кислорода и температуры в СЗЧМ характеризуется теми же закономерностями что и в глубоководной части моря (см. [29]), но большими амплитудами. В зимний период температура поступающих в СЗЧМ речных вод значительно ниже, турбулентное перемешивание верхнего слоя вод в СЗЧМ более интенсивное, чем в открытой части моря. Это приводит к насыщению этих вод кислородом из атмосферы. Среднее значение кислорода в СЗЧМ в январе достигает 365 μM, а в районе устья Дуная – 357 μM. В осенний период в пространственном распределении наблюдается повышенное содержание кислорода у берегов Румынии (рис. 4а), что связано с преобладающим в этом районе северо-западным ветром [32], который приводит к дрейфу трансформированных вод Дуная вдоль западного берега (рис. 4д). Среднее значение кислорода в СЗЧМ в осенний период составляет 302 μM, а в приустьевом районе Дуная – 303 μM.

Весной речной сток достигает максимума. Речные воды характеризуются повышенным содержанием кислорода. Но, благодаря преобладанию у румынского побережья юго-восточных ветров [32] воды Дуная блокируются в прибрежном районе, что хорошо видно по пространственному распределению кислорода (рис. 3а).

Жизнедеятельность фитопланктона и зоопланктона существенно влияет на содержание в воде кислорода и pH. В весенне-осенний период в поверхностном слое идет активное потребление фитопланктоном азота, кремния, фосфора и др. веществ. Одновременно происходит дополнительное образование кислорода в процессе фотосинтеза. А вот в летний период цветение фитопланктона приводит к понижению содержания кислорода в связи с расходованием кислорода на окисление органического вещества. Также в этот период наблюдается ослабление продукции турбулентной энергии в верхнем слое моря, что препятствует поступлению кислорода из атмосферы.

Сезонная динамика величины pH соответствует развитию продукционных процессов. От зимы к лету на обеих акваториях отмечается увеличение величины pH, а затем ее уменьшение к осени

(рис. 2в). В весенние месяцы происходит быстрый прогрев поверхностных вод, а также поступление большого количества биогенных элементов с речным стоком в период весеннего половодья. Эти процессы стимулируют развитие мелкоклеточных организмов, что подтверждается максимумом содержания пигмента хлорофилла-а (первичный фотосинтезирующий пигмент фитопланктона) в летний период. Средние значения pH весной в районе взморья Дуная достигают 8,50–8,52, летом – 8,58 ед. pH, а на шельфе весной 8,40–8,46, летом – 8,50 ед. pH, что являются следствием «цветения» [33]. Развитие активных продукционных процессов на взморье Дуная в летние месяцы вызвано резкой термохалинной стратификацией препятствующей вертикальному перемешиванию. В эти месяцы начинается резкое ухудшение кислородных условий, которое, как правило, сопровождается обильным «цветением» воды и приводит к росту в поверхностном слое моря (от 0 до 5 м) величины pH [34]. В мае (рис. 2в и 3б) отмечается небольшое понижение pH (8,48 ед. pH) относительно соседних месяцев. Это вызвано снижением прозрачности воды и ухудшением условий для развития водорослей в период весеннего половодья. В мае (рис. 3б), область пониженных значений pH (8,37 ед. pH) в районе приустьевого взморья располагается лишь вблизи устья реки. Эта акватория характеризуется небольшими величинами биомассы фитопланктона. Однако в сезонном ходе концентрации хлорофилла-а такое понижение отсутствует. На карте распределения хлорофилла-а в мае отмечаются максимальные значения (<5 мг/м^3) вблизи устья Дуная (рис 3е). Вероятно, это несоответствие вызвано адаптационным увеличением внутриклеточного содержания хлорофилла-а в водорослях в связи с ухудшением световых условий [35, 36]. Вблизи устья в зоне трансформированных речных вод величина pH составляет 8,41–8,50 ед. pH. Для этих вод характерно активное развитие биопродукционных процессов в этот период года. Область повышенных pH распространяется по всей центральной части шельфа.

В динамике сезонного хода pH приустьевого взморья, в отличии от всей СЗЧМ, наблюдается резкое падение pH от лета к осени. Величина pH достигает своего локального минимума (8,35 ед. pH) в октябре, что обусловлено несколькими причинами. Во-первых, это связано с ослаблением в осенний период температурной стратификации из-за усиления ветро-волнового и конвективного перемешивания. Во-вторых, в осенний период происходит снижение притока солнечной радиации, что способствует уменьшению численности фитопланктона и сокращению его видового богатства. В период гидрологической осени диапазон значений pH колеблется в приустьевой зоне в пределах 8,35–8,40 ед. pH, а в СЗЧМ – от 8,39 до 8,40 ед. pH. В ноябре в придельтовом участке Дуная pH составляет 8,42–8,46 ед. pH. Область пониженных значений pH формируется за счет вертикального перемешивания поверхностных вод с водами придонных горизонтов, pH которых падает до 7,39 ед. на взморье Дуная (рис.4б, [11]). В связи с этим минимальные величины pH отмечаются в январе, когда конвективное перемешивание достигает придонных горизонтов (рис. 2в).

По среднемесячным данным хорошо видно, что поверхностные воды в приустьевом районе Дуная сильно распреснены (рис. 2ж, 3г и 4г). Сезонное изменение солености связано не только с большими сезонными колебаниями речного стока, осадков и испарения, но и с сезонной изменчивостью поля ветра (рис. 3д и 4д). В целом соленость поверхностного слоя в приустьевом районе в течение года изменяется от 12,5‰ до 17,5‰. В СЗЧМ воды не так сильно распреснены (среднемесячные величины солености, как правило, превышают 16‰). Осенний период характеризуется более обильными осадками, что приводит к дополнительному распреснению поверхностного слоя вод в приустьевой зоне Дуная (рис. 4г). Для летнего периода характерно превышения испарения над осадками, что приводит к повышен-

ному содержанию солей в поверхностных водах. Временной ход солености в весенний период в устье Дуная (рис. 2ж) можно объяснить специфическим сезонным ходом компонент ветра над морем, который представлен в работе [35]. Как показано автором этой работы (см. также [32]), на динамику и термохалинную структуру вод оказывают сильное влияние ветровой режим, характеризующийся изменчивостью с полугодовой периодичностью. Именно сгонно-нагонные явления такой периодичности служат основной причиной формирования полугодовой изменчивости солености в приустьевом районе Дуная. Температура поверхностных вод в СЗЧМ и Дунайских вод (рис. 2д) тоже значительно отличаются между собой на сезонном масштабе. Можно отметить, что Дунайские во-

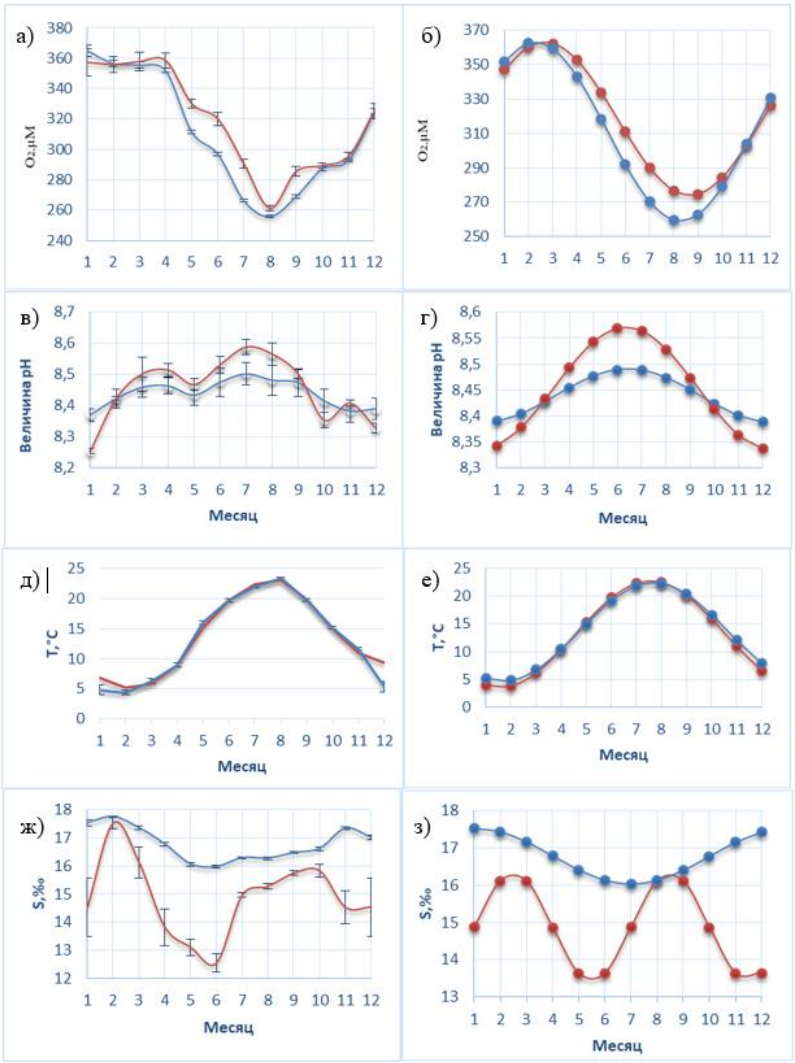

Рис. 2. Сезонный ход кислорода (а), величины pH (в), температуры (д) и солености (ж) в северо–западной части Черного моря (синим цветом) и в устье Дуная (красным цветом) в поверхностном слое моря (вертикальные отрезки – доверительный интервал с вероятностью 99%, на графике pH – ежемесячные величины стандартного отклонения). Осредненный сезонный ход кислорода (б), pH (г), температуры (е) и солености (з), аппроксимированный гармоникой с периодом 12 месяцев для кислорода, pH и температуры, и с периодом 6 месяцев для солености

Fig. 2. Seasonal variation of oxygen (a), pH (c), temperature (e) and salinity (g) in the N - W part of the Black Sea (in blue) and at the mouth of the Danube (in red) in the surface layer of the sea (vertical segments - confidence interval with a probability of 99%, on the pH graph - monthly values of the standard deviation). Averaged seasonal variations of oxygen (b), pH (d), temperature (f) and salinity (h), approximated by a harmonic with a period of 12 months for oxygen, pH, temperature and with a period of 6 months for salinity

ды, которые берут свое начало на восточных склонах Шварцвальда, существенно охлаждают поверхностный слой приустьевой зоны в зимние месяцы. Эта тенденция хорошо видна на рис. 3в.

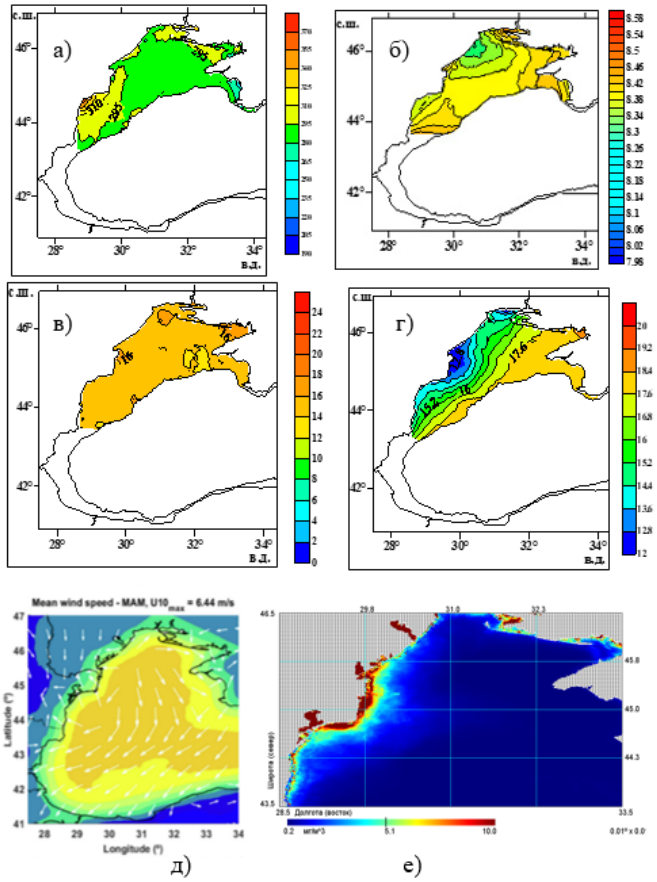

Рис. 3. Пространственное распределение растворенного кислорода (а), pH (б), температуры (в), солености (г), скорости ветра (д – взято из работы [32]) и хлорофилла-а (е) с 1955 по 2015 гг. на поверхности в мае

Fig. 3. Spatial distribution of dissolved oxygen (a), pH (b), temperature (c), salinity (d), wind speed (e - taken from [32]) and chlorophyll-a (f) from 1955 to 2015 on the surface in May

Гармонический анализ сезонного хода температуры, солености, кислорода и величины pH в приустьевом районе Дуная и СЗЧМ показал следующие результаты (рис. 2). Годовая гармоника описывает 98,7% общей дисперсии сезонной изменчивости температуры в приустьевом районе Дуная. Для кислорода эта доля составляет 92,5%. При этом полугодовая гармоника солености описывает 60,5% общей дисперсии, что обусловлено особенностями ветрового режима (см. выше). В шельфовой зоне годовая гармоника описывает 97,2% общей дисперсии, обусловленной сезонной изменчивостью температуры. Для кислорода эта доля составляет 96%, а для солености – 84,8%. Сезонный ход величины pH показал, что внутригодовая динамика на взморье р. Дунай также хорошо описывается годовой гармоникой (рис. 2г). Ее вклад в суммарную дисперсию среднемесячных величин pH составляет более 83%. Размах осредненной сезонной изменчивости pH в поверхностном слое достигает 0,22 ед. На акватории СЗЧМ преобладающий вклад в дисперсию величины pH также вносит годовая гармоника (75,25%) при диапазоне сезонных изменений 0,1 ед. pH.

Выводы. Уточнены количественные характеристики сезонной изменчивости растворенного кислорода, температуры, солености и pH вод СЗЧМ и приустьевой

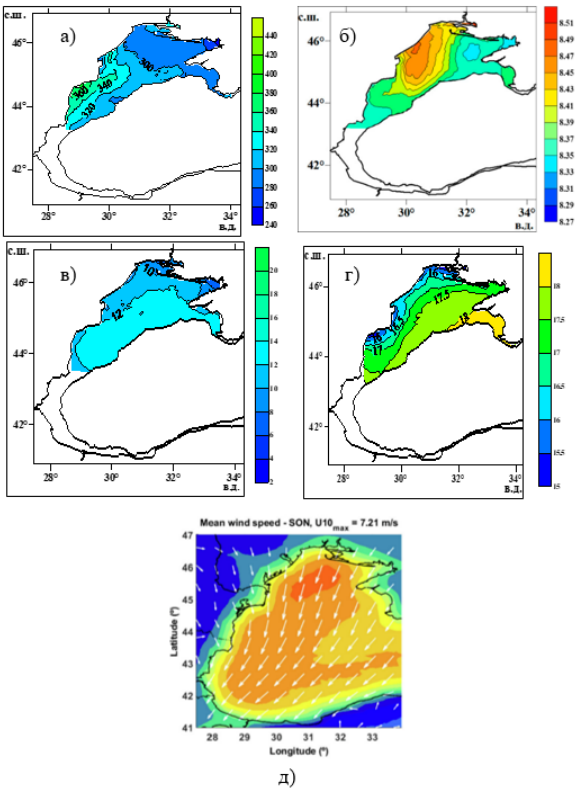

Рис. 4. Пространственное распределение растворенного кислорода (а), pH (б), температуры (в), солености (г), с 1955 по 2015 гг., скорости ветра (д – взято из работы [32]) на поверхности в ноябре

Fig. 4. Spatial distribution of dissolved oxygen (a), pH (b), temperature (c), salinity (d), from 1955 to 2015, wind speed (e - taken from [32]) on the surface in November

зоны Дуная по данным наблюдений с 1955 по 2015 гг. Подтверждено, что амплитуды внутригодовых колебаний температуры, солености, растворенного кислорода и pH поверхностного слоя вод в СЗЧМ значимо превышают соответствующие амплитуды в глубоководной части Черного моря. При этом сезонная изменчивость величины pH и солености на участке акватории прилегающей к устью Дуная более чем в 2 раза превышает по амплитуде соответствующую сезонную изменчивость в СЗЧМ. Сезонная изменчивость описанных характеристик формируется под действием комплекса факторов. В частности, значительное влияние на распределение солености и растворенного кислорода в приустьевой части Дуная оказывает ветровой режим, который характеризуется полугодовой периодичностью.

Работа выполнена в рамках госзадания (тема № 0012–2019–0002: Фундаментальные исследования процессов в климатической системе, определяющих пространственно-временную изменчивость природной среды глобального и регионального масштабов) при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-45-920014).

Авторы выражают глубокую благодарность рецензенту за доброжелательную критику рукописи и ценные рекомендации, учет которых позволил улучшить качество рукописи.

СПИСОК ЛИТЕРТУРЫ

1. *Зайцев Ю. П.* Введение в экологию Черного моря / Одесса: «Эвен». 2006. 224 с.

2. *Северо-западная* часть Черного моря: биология и экология / под ред. Ю.П. Зайцева, Б.Г. Александрова, Г.Г. Миничевой. Киев: Наук. думка. 2006. 701 с.

3. *Джаошвили Ш. В.* Реки Черного моря // Европейское агентство по охране окружающей среды. Технический отчет. 2003. № 71. С. 185.

4. *Михайлов В. Н.* Устья рек России и сопредельных стран: Прошлое, настоящее и будущее. Москва: ГЕОС. 1997. 413 с.

5. *Михайлова М. В.* Формирование дельты выдвижения Килийского рукава и баланс наносов в устье Дуная // Водные Ресурс. 1995. Т. 22. № 4. С. 489–495.

6. *Гордеев В. В.* Особенности геохимии речного стока в Черное море // Система Черного моря. 2018. С. 247–286.

7. *Кондратьев С.И.* Особенности пространственного распределения кислорода в водах приустьевого взморья Дуная в 1997–2010 годах // Морской гидрофизический журнал. 2014. № 3. С. 60–76.

8. *Зайцев Ю.П.* Дунай – основной источник эвтрофирования Черного моря / Ю.П. Зайцев, Г.П. Гаркавая, Д.А. Нестерова [и др.] // Гидробиол. журн. 1989. Т. 25. Вып. 4. С. 21–23.

9. *Зайцев Ю.П.* Современное состояние экосистемы Черного моря / Ю.П. Зайцев, Г.П. Гаркавая, Д.А. Нестерова [и др.] // Современное состояние Черного моря. М.: Наука. 1987. С. 216–230.

10. *Yunev O.A.* Nutrient and phytoplankton trends on the western Black Sea shelf in response to cultural eutrophication and climate changes / O.A. Yunev, J. Carstensen, S. Moncheva [et al.] // Estuar. Coas. Shelf Sci. 2007. V. 74. P. 63–76.

11. *Екосистема* узмор'я Української дельти Дунаю / Відп. ред. Л. В. Воробйова. Одеса: Астропринт. 1998. 332 с.

12. *Осадчая Н.Н., Клебанов Д.А.* Оценка выноса биогенных элементов с водосборной площади Дуная в современный период (1989–2012 гг.) основные факторы его формирования и пути регулирования // Наукові праці УкрДГНМІ. 2016. № 268. С. 58–66.

13. *Diaz R.J., Rosenberg R, Robert J.* Marine benthic hypoxia: a review of its ecological effects and the behavioural responses of benthic macrofauna // Oceanography and marine biology. An annual review. 1995. Vol. 33. P. 245–303.

14. *Kroeker K.J.* Meta-analysis reveals negative yet variable effects of ocean acidification on marine organisms / K.J. Kroeker, R.L. Kordas, R.N. Crim [et al.] // Ecology letters. 2010. Vol. 13. № 11. P. 1419–1434.

15. *Максимова М.П.* Воздействие техногенного геохимического давления на внутриматериковые моря // Водн. ресурсы. 1986. № 5. С. 159–164.

16. *Орлова И.Г.* Состояние эвтрофированности вод северо-западной части Черного моря по результатам многолетнего комплексного мониторинга / И.Г. Орлова, Н.Е. Павленко, В.В. Украинский [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон. 2007. Т. 15. С. 32.

17. *Биология* северо-западной части Черного моря / Под ред. К.А. Виноградова. Киев: Наук. думка. 1967. 268 с.

18. *Толмазин Д.М.* Гидрологогидрохимическая структура вод в районах гипоксии и заморов в северозападной части Черного моря // Биология моря. 1977. Вып. 43. С. 12–17.

19. *Гаркавая Г.П., Богатова Ю.И., Буланая З.Т.* Современные тенденции изменения гидрохимических условий северо-западной части Черного моря // Изменчивость экосистемы Черного моря: Естественные и антропогенные факторы. М.: Наука. 1991. С. 299–306.

20. *Mikhailov V.N., Mikhailova M.V.* River Mouths // The Handbook of Environmenta Chemistry. Berlin Heidelberg. Springer-Verlag. 2008. V. 5. P. 91–133.

21. *Михайлов В.Н.* Гидрологические процессы в устьевой области Дуная и их возможные изменения / В.Н. Михайлов, В.Н. Морозов, М.В. Михайлова [и др.] // Водные ресурсы. 1988. № 1. С. 24–32.

22. *Чистяков А.А. Макарова Н.В., Макаров В.И.* Четвертичная геология. Учебник. М.: ГЕОС. 2000. 303 с.

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

24. *Берлинский Н.А.* К вопросу о трансграничном влиянии в устьевой области Дуная / Н.А. Берлинский, Ю.М.

Деньга, Ю.И. Попов [и др.] // Вестн. Одес. Ун-та. 2010. Т. 15. Вып. 10. С. 93–103.

25. *Polonsky A.B., Kotolupova A.A.* Long-term variability of the dissolved oxygen content and water temperatures in the upper layer of the Black sea // Oceanology. 2019. Vol. 59. No 1. P. 17–26. DOI: 10.1134/S000143701901017X

26. *Полонский А.Б., Гребнева Е.А.* Климатические характеристики водородного показателя вод приустьевой акватории у р. Дунай и его сезонная изменчивость // Система контроля окружающей среды. Севастополь: ИПТС. 2020. №. 1 (39). С. 109–116. DOI: 10.33075/2220-5861-2020-1-109-116

27. *Полонский А.Б.* Изменчивость pH в водах Черного моря в XX столетии: увеличивается ли кислотность морской воды? // Доклады НАН Украины. 2012. № 2. С. 146–149.

28. *Рябинин А.И., Шибаева С.А.* Инструментальные методы анализа в экологии: учебное пособие. Севастополь: СИЯЭиП. 2002. 168 с.

29. *Полонский А.Б., Валле А.А.* Определение сезонного хода и тенденции изменений концентрации растворенного кислорода и температуры в верхнем слое глубоководной части Черного моря по современным данным // Система контроля окружающей среды. Севастополь: ИПТС. 2020. № 2 (40). С. 134–143. DOI: 10.33075/2220-5861-2020-2-134-143

30. *Новикова А.М., Котолупова А.А.* Об опыте использования метода кригинга в программах Surfer и QGIS для морских климатических исследований // Системы контроля окружающей среды. Севастополь: ИПТС. 2016. № 6 (26). С. 59–67.

31. http://www.//marine.copernicus.eu (дата обращения: 20.06.2020)

32. *Rusu L.* The wave and wind power potential in the western Black Sea // Renewable Energy. 2019. V. 139. P. 1146–1158.

33. *Кириленко Н.Ф., Евстигнеев В.П.* Изменчивость содержания хлорофилла-а в северо-западной части Черного моря в современных климатических условиях // Системы контроля окружающей среды. Севастополь: ИПТС. 2017. № 10 (30). С. 80–87.

34. *Богатова Ю.И.* Гидрохимический режим украинского участка взморья Дуная // Водные ресурсы. 2013. Т. 40. № 3. С. 295–305.

35. *Берсенева Г.П.* Сезонная динамика концентрации хлорофилла «а». Планктон Черного моря. К.: Наук. думка. 1993. С. 92–102.

36. *Маштакова Г.П., Роухияйнен М.И.* Сезонная динамика фитопланктона. // Основы биологической продуктивности Черного моря. К.: Наук. думка. 1979. С. 85–88.

37. *Ильин Ю.П.* Гидрологический режим распространения речных вод в северо-западной части Черного моря // Научные труды УкрНИГМИ. 2006. № 255. С. 242–251.

ANALYSIS OF SEASONAL VARIABILITY OF HYDROLOGICAL AND HYDROCHEMICAL CHARACTERISTICS OF SURFACE WATERS OF THE NORTHWESTERN BLACK SEA

A.A. Valle, E.A. Grebneva, A.B. Polonsky

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

Based on the archived data set of the Institute of Natural and Technical Systems from 1955 to 2015 the intra-annual variability of temperature, salinity, dissolved oxygen and pH in the surface layer of the waters of the northwestern shelf of the Black Sea, including the Danube estuary area, are analyzed. The absolute predominance of the annual harmonic in the seasonal variability of most of the analyzed hydrological and hydrochemical characteristics in most of the considered shelf water area is confirmed. The exception is the salinity in the estuary area of the Danube. Here, the semiannual harmonic describes more than 60% of the total variability due to the seasonal variability of salinity, which is related to the peculiarities of the wind regime in the region.

Keywords: temperature, salinity, oxygen regime, pH, north-western part of the Black Sea, Danube estuary area.