

УДК 574.5:551.464 (262.5)

А.В. Пархоменко¹, А.С. Кукушкин²

СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

По данным многолетних наблюдений изучены (1970–2009) особенности пространственного распределения сезонных концентраций основных биогенных элементов (фосфаты, нитраты, аммонийный азот, кремнекислота) и получены оценки изменчивости их содержания в поверхностном слое северо-западной части Черного моря (СЗЧМ). Получены оценки сезонного содержания биогенных элементов в северном, западном, юго-западном и центральном районах, различающихся по степени влияния трансформированных речных вод. Показано, что сезонная изменчивость содержания биогенных элементов в указанных районах северо-западной части Черного моря определяется изменчивостью объема речного стока и масштабов распространения трансформированных речных вод по шельфу, региональными гидрометеорологическими условиями и интенсивностью биотического цикла азота, фосфора, кремния. Для весеннего и летнего периодов, наиболее обеспеченных данными на вдольбереговом и широтном (по 45° с. ш.) разрезах западного района, были проведены детальные исследования сезонной изменчивости концентрации фосфатов, нитратов, хлорофилла «а» и солености воды. Получены оценки связи между сезонными величинами объема стока Дуная, солености воды, концентрации хлорофилла «а», биомассы фитопланктона и сезонными концентрациями биогенных элементов для западного района СЗЧМ. Рассчитанные множественные коэффициенты корреляции и детерминации показали, что в весенний и летний периоды поступление с трансформированными речными водами фосфатов, нитратов и кремнекислоты обеспечивало примерно 20%, 36–50% и около 36% от общей их дисперсии, соответственно. В процессе усвоения этих биогенных элементов фитопланктоном на долю фосфатов приходилось 10–23%, нитратов – 23–52% и кремнекислоты – 17–52% от общей их дисперсии, соответственно. Полученные результаты указывают на связь поступления биогенных элементов с трансформированными речными водами и их расхода, связанного с усвоением биогенных элементов микропланктоном (фитопланктон и бактерии). Очевидно, что эти потоки можно отнести к основным составляющим, обеспечивающим годовой баланс биогенных элементов в СЗЧМ.

Ключевые слова: Черное море, фосфаты, нитраты, кремнекислота, аммонийный азот, соленость, хлорофилл «а»

Введение. Исследование экологического состояния шельфовых вод Черного моря представляет большой теоретический и практический интерес в связи с влиянием биогенных веществ (минеральные соединения азота, фосфора и кремния) антропогенного происхождения на прибрежные воды. С одной стороны, эти вещества служат материальной основой биопродуктивности, а с другой – являются важнейшими показателями процессов эвтрофикации этих вод, возникновения дефицита кислорода и гипоксических зон в придонном слое.

В северо-западную часть Черного моря (СЗЧМ) биогенные вещества поступают с речными, терригенными и промышленно-бытовыми стоками и атмосферными осадками. Для оценки экологического состояния шельфовых вод в СЗЧМ в течение длительного периода (1950–2009) было проведено большое количество комплексных гидрофизических, гидрохимических, биологических и климатических исследований, обобщенных в работах [Большаков, 1970; Северо-западная часть..., 2006; Sociasu et al.,

1996; Friedel et al., 1998; Kukushkin, 2018; Кондратьев, 2019; Пархоменко, Кукушкин, 2020]. В отдельных районах СЗЧМ и в разные временные периоды были определены пределы изменчивости концентрации основных биогенных элементов, измеренных в течение 1977–1993 гг., и установлено уменьшение их среднегодовых значений в 1987–1993 гг. по сравнению с предыдущими годами [Гаркавая, Богатова, 2006]. По пространственным распределениям среднегодовых концентраций биогенных элементов в слое 0–30 м, измеренных в 1980–2002 гг., были выделены районы северо-западного шельфа, различающиеся по степени влияния речного стока и вод открытого моря [Геворгиз и др., 2005]. По данным исследований в 2004–2010 гг. [Berlinsky et al., 2006; Bogatova, 2013] были рассмотрены особенности гидрохимического режима украинского участка взморья Дуная на расстоянии до 8 км от его дельты с соленостью воды 2–8 PSU. В этой работе подтверждается роль взморья как «маргинального фильтра», который за счет физико-химических процессов,

¹ Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН», г. Севастополь, отдел экологической физиологии водорослей, ст. науч. с., канд. биол. н.; e-mail: parkhomenko.al@yandex.ua

² Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН», г. Севастополь, отдел взаимодействия атмосферы и океана, ст. науч. с., канд. физ.-мат. н.; e-mail: kukushkinas@mail.ru

биоассимиляции, биоаккумуляции и биофилтрации многократно снижает уровень растворенных минеральных соединений азота и фосфора по сравнению с его дельтой. Однако имеющиеся до настоящего времени данные по пространственной изменчивости сезонного содержания биогенных элементов в поверхностном слое СЗЧМ и их связь с сезонными величинами объема речного стока, солёности воды и структурно-функциональными характеристиками фитопланктона носят бессистемный характер. В связи с этим была предпринята попытка провести обобщение пространственной изменчивости сезонного содержания биогенных элементов в поверхностном слое СЗЧМ по многолетним данным за период с 1970 по 2009 гг.

Цель настоящей работы состояла в исследовании многолетней (1970–2009) пространственной изменчивости сезонного содержания биогенных элементов (азота, фосфора и кремния) в поверхностном слое СЗЧМ и оценка их связи с сезонными значениями объема стока Дуная, солёности воды, концентрации хлорофилла «а» и биомассы фитопланктона.

Материалы и методы исследований. В работе использовались данные наблюдений из банка данных биогенных элементов Морского гидрофизического института РАН, в состав которых входили: фосфаты – PO_4^{3-} (6077 станций), кремниевая кислота – SiO_3^{2-} (4020 станций), нитраты – NO_3^- (2523 станции), аммонийный азот – NH_4^+ (1759 станций) и солёность – S (более 50 000 станций), полученные в поверхностном слое (0–5 м) в течение 1950–2009 гг. Предварительный анализ данных, характеризующих содержание биогенных элементов в 1950–1960 гг., показал завышенные их значения, что, по нашему мнению, связано с использованием менее совершенных методов их определения, чем в более поздний период. Поэтому в работе использовались резуль-

таты измерений биогенных веществ, полученные с использованием стандартных методов в 1970–2009 гг. [Методы гидрохимических..., 1978].

Кроме того, в работе использовались сезонные спутниковые значения концентрации хлорофилла «а», полученные с помощью радиометра CZCS за 1978–1986 гг. (данные были любезно переданы авторам В.В. Суслиным), а также данные судовых наблюдений за 1978–1995 гг. Сравнение среднемесячных концентраций хлорофилла «а», полученных по спутниковым и судовым наблюдениям в одних и тех же районах СЗЧМ, показало, что их различие составляло 10–30% [Kukushkin, 2018]. Также использовались полученные в СЗЧМ многолетние данные (1970–2000) по биомассе фитопланктона [Black Sea Data..., 2003] и многолетние данные (1950–2010) по объёму стока Дуная в СЗЧМ [Kukushkin, 2018].

Связь концентрации биогенных элементов с объёмом стока Дуная, солёностью воды, содержанием хлорофилла «а» и биомассой фитопланктона оценивались по коэффициентам корреляции (r) между их сезонными значениями. Данные для расчетов (r) по возможности выбирались по близким датам наблюдений этих показателей (концентрации биогенных элементов и солёность воды измерялись одновременно). Также рассчитывались множественные коэффициенты корреляции, учитывающие совместное влияние на изменчивость биогенных элементов таких сочетаний показателей, как значения объёма стока Дуная, солёности воды, концентрация хлорофилла «а» и биомасса фитопланктона. Формула для вычисления множественного коэффициента корреляции (R) имела вид [Эренберг, 1981]:

$$R_{1-23} = \sqrt{\frac{r_{12}^2 + r_{13}^2 - 2r_{12}r_{13}r_{23}}{1 - r_{23}^2}}, \dots,$$

где r – коэффициент парной корреляции между двумя показателями.

Для определения процента от общей дисперсии концентрации биогенных элементов в зависимости от изменчивости соответствующих показателей использовался множественный коэффициент детерминации, равный квадрату множественного коэффициента корреляции [Эренберг, 1981]. Статистическую значимость коэффициентов корреляции определяли по стандартному алгоритму с использованием t -критерия Стьюдента.

Сезонная изменчивость концентраций биогенных элементов оценивалась по средним многолетним их концентрациям в поверхностном слое западного, юго-западного, северного и центрального районов СЗЧМ (рис. 1).

Результаты и обсуждение исследований. *Сезонная изменчивость пространственного распределения биогенных элементов в различных районах СЗЧМ.* Пространственное распределение биогенных элементов в СЗЧМ в годовом цикле представлено на рис. 2 и 3. Районы с повышенными концентрациями исследуемых биогенных элементов в СЗЧМ выделены утолщенными изолиниями. Как

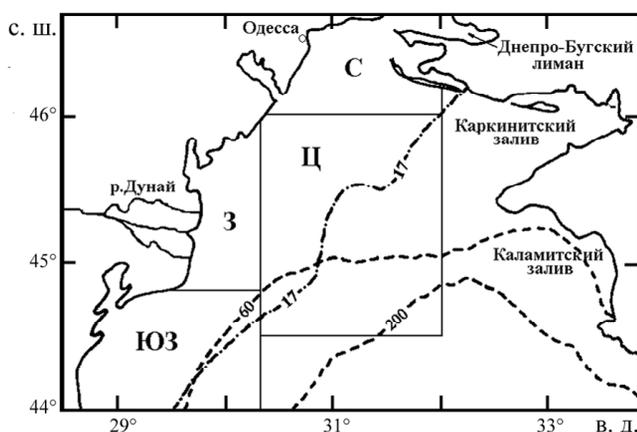


Рис. 1. Районы северо-западной части Черного моря: юго-западный (ЮЗ), западный (З), северный (С) и центральный (Ц). Штрихпунктирной линией обозначена солёность 17 PSU, штриховой линией – изобаты 60 и 200 м

Fig. 1. Regions of the northwestern Black Sea: southwestern (ЮЗ), western (З), northern (С) and central (Ц). The dash-dotted line indicates the 17 PSU salinity, the dashed line is for the 60 and 200 m isobaths

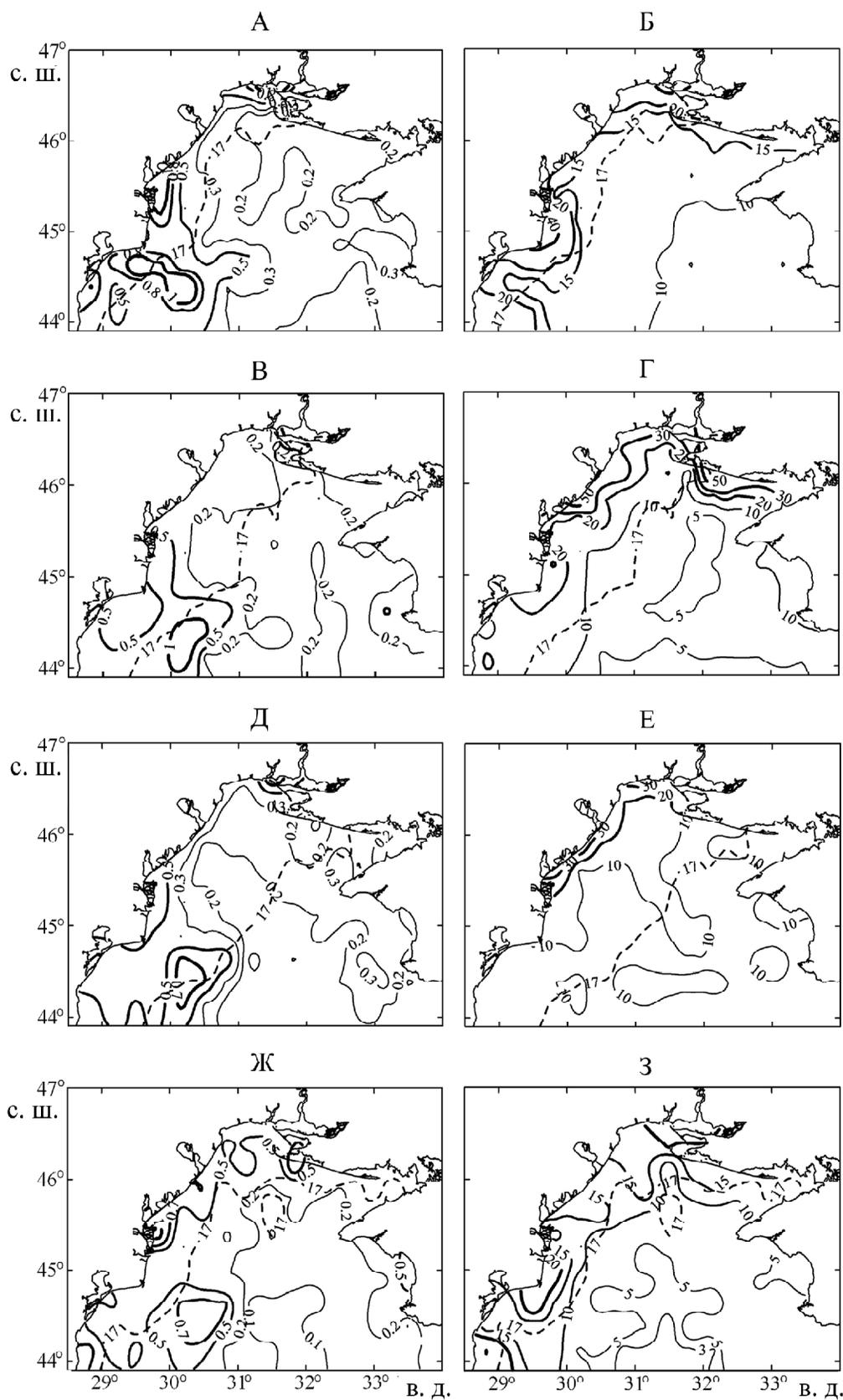


Рис. 2. Распределение фосфатов (А, В, Д, Ж) и кремнекислоты (Б, Г, Е, З) в поверхностном слое зимой (А, Б), весной (В, Г), летом (Д, Е) и осенью (Ж, З). Штриховая линия – изогалина 17 PSU

Fig. 2. Distribution of phosphates (A, B, D, Z) and silicic acid (B, G, E, 3) in the surface layer in winter (A, B), spring (B, G), summer (D, E) and autumn (Z, 3). The dashed line is for 17 PSU isohaline

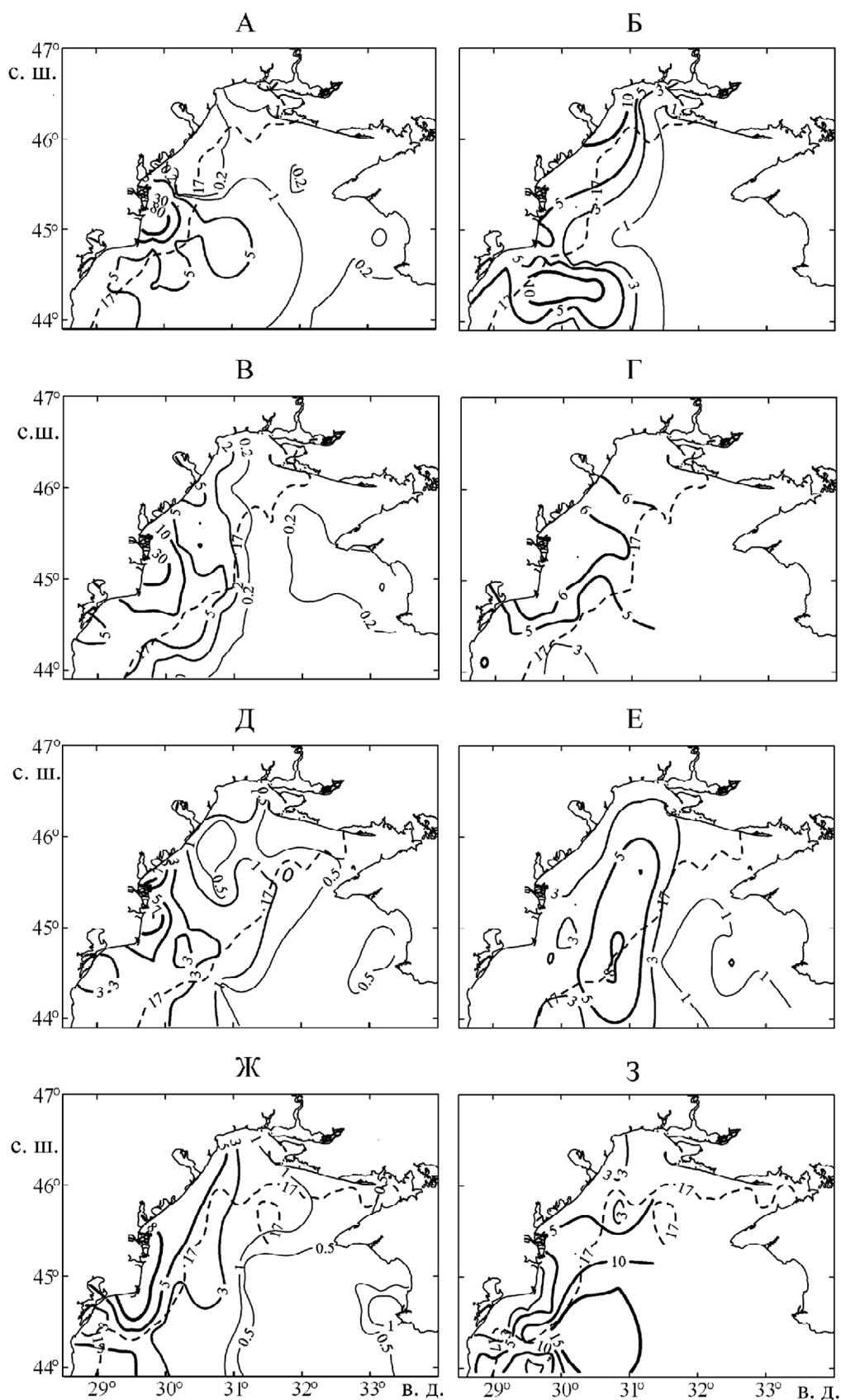


Рис. 3. Распределение нитратов (А, В, Д, Ж) и аммония (Б, Г, Е, З) в поверхностном слое зимой (А, Б), весной (В, Г), летом (Д, Е) и осенью (Ж, З). Штриховая линия – изогалина 17 PSU

Fig. 3. Distribution of nitrates (A, B, D, Zh) and ammonium (B, G, E, Z) in the surface layer in winter (A, B), spring (B, G), summer (D, E) and autumn (Zh, Z). The dashed line is for 17 PSU isohaline

видно из этих рисунков, в зимний период повышенные концентрации всех основных биогенных элементов были зарегистрированы в прибрежных водах вдоль западного берега СЗЧМ (см. рис. 2А, Б и рис. 3А, Б). В западном, северном и частично юго-западном районах это трансформированные речные воды (ТРВ) с соленостью менее 17 PSU [Большаков, 1970], в которых были отмечены повышенные концентрации хлорофилла «а» и пониженная прозрачность. Максимальные средние концентрации PO_4^{3-} (0,7 мкМ), NO_3^- (6–7 мкМ), (3,8–4,9 мкМ) и (23,9 мкМ) были получены в западном и юго-западном районах (табл. 1). Примерно одинаковое пониженное содержание биогенных элементов по сравнению с этими районами было зафиксировано в северном и центральном районах. В центральный район ТРВ зимой не попадают, а в северный район речной сток из Днепро-Бугского лимана ограничен.

Детальная структура пространственного распределения содержания PO_4^{3-} и NO_3^- хорошо видна на вдольбереговом разрезе (рис. 4), расположенном на расстоянии 7–15 км от берега, и на широтном разрезе по 45° с. ш. (рис. 5). Распределение солености, измеренной одновременно с PO_4^{3-} , и концентрации $C_{хл}$ по данным радиометра CZCS за 1978–1986 гг. на этих разрезах позволяют проследить масштабы распространения ТРВ и степень развития фитопланктона, а также оценить их сезонную изменчивость. В зимний период повышенное содержание фосфатов и нитратов наблюдалось в приустьевом районе Дуная, где в ТРВ были отмечены относительно высокие концентрации хлорофилла «а» по сравнению с другими участками вдольберегового разреза. В то же время на северном участке, вблизи от входа в Днепро-Бугский лиман, концентрации PO_4^{3-} и NO_3^- и значительно снижались, что было связано с

Таблица 1

Сезонные концентрации биогенных элементов, хлорофилла «а» ($C_{хл}$) и солености (S) в поверхностном слое западного, юго-западного, северного и центрального районов СЗЧМ в 1970–2009 гг.

Параметр	Сезон	Западный	Юго-западный	Северный	Центральный
PO_4^{3-} , мкМ	Зима	0,7±0,4	0,4±0,21	0,33±0,15	0,24±0,1
	Весна	0,52±0,4	0,36±0,23	0,22±0,03	0,13±0,05
	Лето	0,44±0,17	0,35±0,24	0,33±0,15	0,17±0,06
	Осень	0,6±0,35	0,36±0,19	0,54±0,2	0,21±0,15
NO_3^- , мкМ	Зима	7,0±0,33	6,0±2,5	0,47±0,2	0,82±0,7
	Весна	7,2±2,2	6,0±2,4	0,52±0,4	0,7±0,47
	Лето	3,8±1,1	3,4±1,8	0,83±0,7	0,5±0,29
	Осень	6,1±1,4	5,3±2,1	1,6±1,2	0,37±0,2
NH_4^+ , мкМ	Зима	3,8±2,3	4,9±2,6	–	1,8±0,8
	Весна	4,8±2,4	4,2±1,6	–	1,3±0,6
	Лето	2,6±0,8	2,9±1,1	–	0,98±0,3
	Осень	3,0±1,6	3,5±0,8	–	0,94±0,5
SiO_3^{2-} , мкМ	Зима	13,1±8,6	23,9±20,1	14,7±4,1	10,9±4,8
	Весна	20,3±10,1	17,4±7,5	15,1±12,4	6,3±2,7
	Лето	16,9±12,6	10,9±8,1	22,5±15,4	11,6±8,8
	Осень	14,5±11,6	14,0±8,6	17,7±1,1	5,8±2,9
$C_{хл}$, мг/м ³	Зима	1,4±1	1,2±0,8	1,48±0,6	0,76±0,4
	Весна	2,2±1,5	1,4±0,7	1,7±0,75	0,8±0,3
	Лето	2,1±1,4	1±0,8	2,2±1	1±0,5
	Осень	1,9±1,2	1,3±0,6	2±0,7	0,8±0,4
S, PSU	Зима	15,62±2,1	16,23±0,75	15,5±0,9	17,9±0,25
	Весна	11,9±1,2	15,42±0,56	13,8±0,2	17,75±0,5
	Лето	13,5±1,1	15,9±0,75	14,8±0,6	16,45±0,5

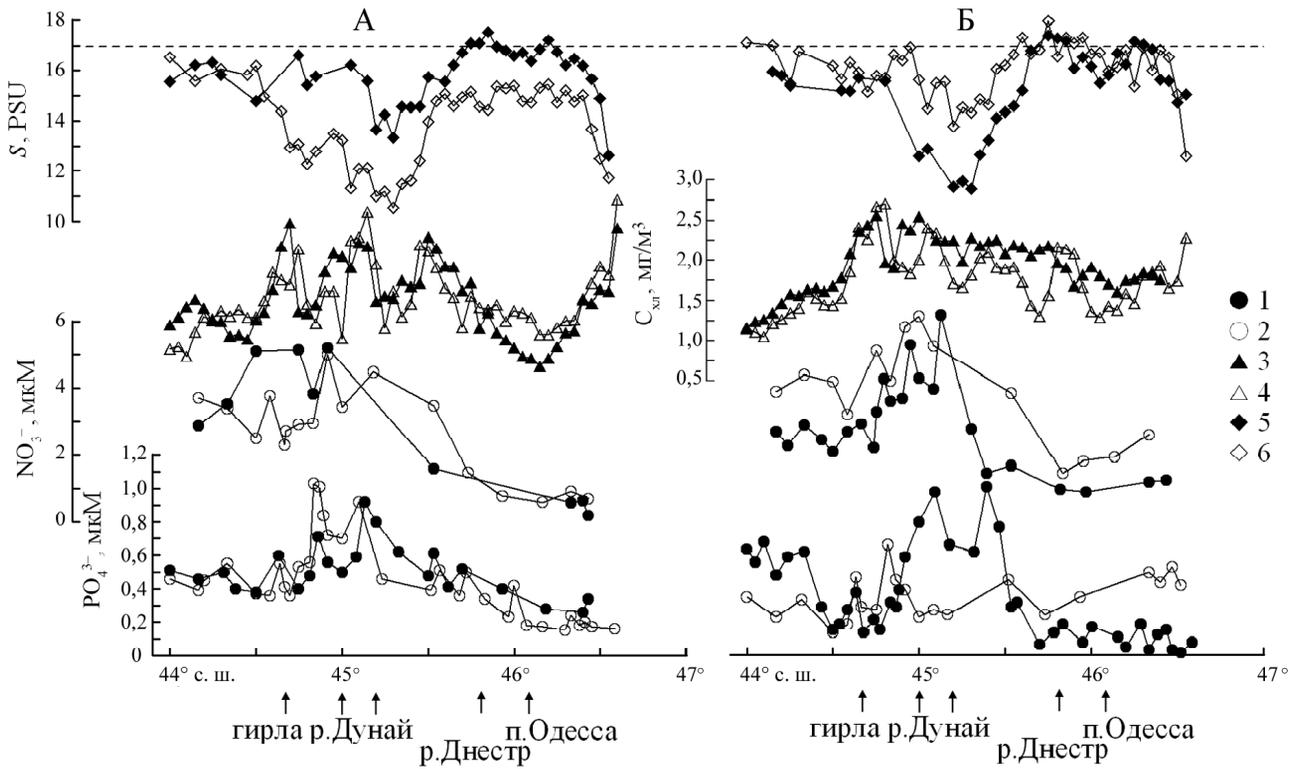


Рис. 4. Распределение концентраций PO_4^{3-} , NO_3^- (1, 2), концентрации хлорофилла «а» (3, 4) и солёности воды (5, 6) на вдольбереговом разрезе в поверхностном слое зимой (1, 3, 5), весной (2, 4, 6) (А), летом (1, 3, 5) и осенью (2, 4, 6) (Б)

Fig. 4. Distribution of concentrations PO_4^{3-} , NO_3^- (1, 2), concentration of chlorophyll "a" (3, 4) and salinity (5, 6) on the alongshore sections in the surface layer in winter (1, 3, 5) and spring (2, 4, 6) (A), summer (1, 3, 5) and autumn (2, 4, 6) (B)

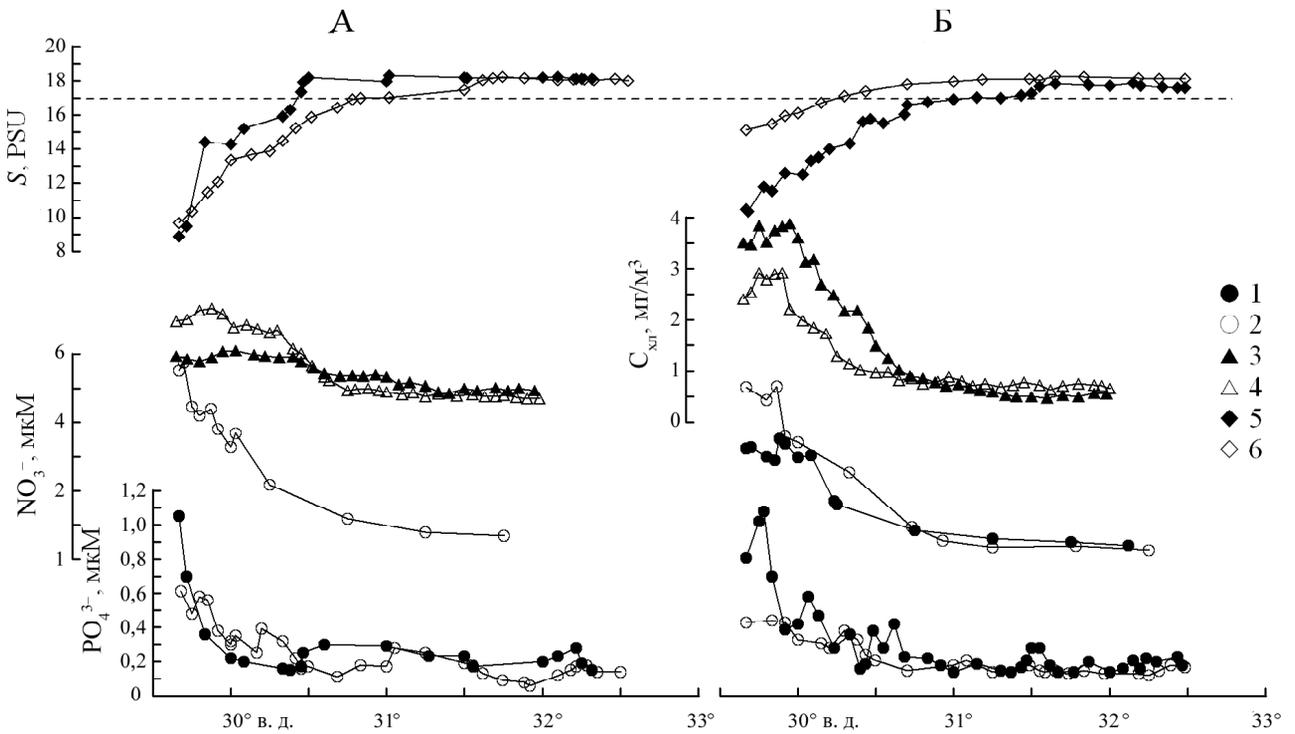


Рис. 5. Распределение концентраций PO_4^{3-} , NO_3^- (1, 2), концентрации хлорофилла «а» (3, 4) и солёности воды (5, 6) на широтном разрезе по 45° с. ш. в поверхностном слое зимой (1, 3, 5) и весной (2, 4, 6) (А), летом (1, 3, 5) и осенью (2, 4, 6) (Б)

Fig. 5. Distribution of concentrations PO_4^{3-} , NO_3^- (1, 2), concentration of chlorophyll "a" (3, 4) and salinity (5, 6) on a latitudinal section along 45° N in the surface layer in winter (1, 3, 5) and spring (2, 4, 6) (A), summer (1, 3, 5) and autumn (2, 4, 6) (B)

уменьшением зимой речного стока и, как следствие, малым их поступлением на шельф.

В весенний период площадь влияния речного стока увеличилась, и ТРВ, обогащенные биогенными элементами, распространились в центральном районе. Граница ТРВ находилась от берега на расстоянии 80–90 км. Содержание PO_4^{3-} во всех районах СЗЧМ несколько понизилось (см. рис. 2В; табл. 1), что, вероятно всего, связано с активным усвоением фосфатов фитопланктоном в процессе фотосинтеза. На интенсивное развитие фитопланктона в весеннее время указывало и значительное увеличение концентрации хлорофилла «а» и компонентов взвешенного органического вещества (взвешенные органический углерод, азот и фосфор) [Kukushkin, 2018] по сравнению с зимним периодом. Отмечалось также понижение прозрачности в северном и центральном районах. Среднее содержание NO_3^- , NH_4^+ и SiO_3^{2-} , по сравнению с зимним периодом, изменилось незначительно (см. рис. 2В, Г; 3В, Г; табл. 1). По-видимому, это можно объяснить тем, что поступление биогенных веществ с речными водами и их усвоение фитопланктоном в процессе фотосинтеза примерно одинаковы. Характер изменчивости анализируемых показателей в весенний период на разрезах (см. рис. 4А; 5А) практически не изменился по сравнению с зимним периодом. Некоторые различия были связаны с их абсолютными величинами. В предустьевом районе Дуная отмечалось повышение (~ на 20–30%) концентрации фосфатов и хлорофилла «а», а в центральном районе наблюдалось примерно такое же их понижение.

В летний период ТРВ растекались от приустьевой зоны Дуная в восточном направлении на расстояние более 100 км. Из северного района они распространялись в южном и юго-восточном направлениях. По сравнению с весенним периодом были отмечены значительные изменения в содержании биогенных веществ в районах СЗЧМ. В западном районе концентрации PO_4^{3-} , SiO_3^{2-} уменьшались на 20%, NO_3^- и NH_4^+ на 85% (см. рис. 2Д, Е; 3Д, Е; табл. 1). При этом биомасса фитопланктона значительно повышалась [Black Sea Data..., 2003]. В северном районе в ТРВ из Днепро-Бугского лимана содержание PO_4^{3-} , SiO_3^{2-} и NO_3^- увеличилось на 50–60%, что способствовало активному развитию фитопланктона (его биомасса увеличилась на 70%). Поступление ТРВ в значительную часть центрального района летом привело к увеличению концентраций PO_4^{3-} , NO_3^- и NH_4^+ в поверхностном слое примерно на 30–40%, а SiO_3^{2-} более 80%, что, как следствие, способствовало увеличению биомассы фитопланктона примерно на 60% по сравнению с весной. Вероятнее всего, увеличение концентрации биогенных элементов, в том числе кремниевой кислоты в поверхностном слое центрального района, способствовало развитию диатомовых водорослей, что, как следствие, могло привести к росту биомассы фитопланктона в целом.

Распределение фосфатов и нитратов на вдольбереговом разрезе (см. рис. 4Б) по сравнению с весенним периодом изменилось незначительно (их

содержание повысилось только на южном участке разреза). Распределения солёности и концентрации хлорофилла «а» практически не изменились. На западном участке разреза по 45° с. ш. в предустьевом районе Дуная отмечалось увеличение концентрации и хлорофилла «а» (см. рис. 5Б). Однако характер распределения анализируемых показателей по сравнению с весенним периодом сохранился.

Осенью площадь распространения ТРВ уменьшилась как в центральном районе, так и вдоль западного побережья. По сравнению с летом концентрации биогенных элементов (кроме кремниевой кислоты) увеличились на 20–60% во всех районах шельфа (см. рис. 2Ж, 3; 3Ж, 3; табл. 1). Содержание SiO_3^{2-} увеличилось примерно на 25% только в юго-западном районе, а в других районах оно уменьшилось в 1,2–2 раза. Распределения всех показателей на вдольбереговом разрезе изменились по сравнению с летом и приблизились к их зимнему состоянию. Содержание PO_4^{3-} и хлорофилла «а» в пределах юго-западного и западного районов уменьшилось примерно на 40 и 10%, соответственно, по сравнению с летним периодом. На северном участке разреза, наоборот, концентрация PO_4^{3-} осенью увеличилась на 70%. По сравнению с летним периодом, на широтном разрезе распределение анализируемых показателей практически не изменилось. На западном участке разреза было отмечено уменьшение концентрации PO_4^{3-} и хлорофилла «а» и увеличение концентрации и солёности.

Оценка влияния природных факторов на изменчивость содержания биогенных элементов в СЗЧМ. Влияние природных факторов на изменчивость содержания биогенных элементов PO_4^{3-} , NO_3^- , SiO_3^{2-} можно оценить по парным (r) и множественным (R) коэффициентам корреляции и детерминации (R^2) [Эренберг, 1981] между сезонными значениями концентраций биогенных элементов и сочетаниями значений объема стока Дуная (V), солёности воды (S), концентрации хлорофилла «а» ($C_{\text{хл}}$) и биомассы фитопланктона (B) (табл. 2, 3). В осенний период в связи с ограниченным количеством данных расчеты коэффициентов корреляции не проводились. Сочетание V и S может быть связано с поступлением биогенных элементов с речными водами в СЗЧМ, а сочетание $C_{\text{хл}}$ и B – расходом на усвоение фитопланктоном.

Согласно данным, множественный коэффициент корреляции между PO_4^{3-} , NO_3^- и сочетанием S , V в зимний период для западного района был равен 0,72 (на уровне значимости более 98% доверительного интервала). Относительно высокая степень связи между этими показателями обеспечивалась за счет влияния солёности воды (коэффициент корреляции между PO_4^{3-} , NO_3^- и S , который изменялся в пределах $r_{12} = -(0,37-0,62)$) и объема стока Дуная ($r_{13} = -0,5$ для PO_4^{3-} и V), которые указывают на степень смешения речных и морских вод в СЗЧМ и позволяют косвенно оценивать изменение содержания биогенных элементов в трансформированной реч-

Таблица 2

Парные (r) и множественные (R) коэффициенты корреляции и детерминации (R^2) между сезонными значениями концентраций биогенных элементов и солености воды (S), объема стока Дуная (V), концентрации хлорофилла «а» ($C_{хл}$) и биомассы фитопланктона (B) в западном районе СЗЧМ

Сезон	r, R	Показатели					
		$PO_4^{3-} - S, V$	$NO_3^- - S, V$	$SiO_3^{2-} - S, V$	$PO_4^{3-} - C_{хл}, B$	$NO_3^- - C_{хл}, B$	$SiO_3^{2-} - C_{хл}, B$
Весна	r_{12}	0,36	-0,42	-0,22	-0,26	0,56	0,19
	r_{13}	0,07	0,56	0,28	-0,24	-0,24	-0,33
	r_{23}	-0,44	-0,44	-0,44	0,17	0,34	0,17
	R/R^2	0,44/0,2	0,6/0,36	0,14/0,09	0,33/0,1	0,72/0,52	0,41/0,17
Лето	r_{12}	-0,44	-0,7	-0,76	-0,37	0,44	0,53
	r_{13}	0,33	0,44	0,5	-0,25	0,35	0,33
	r_{23}	-0,47	-0,47	-0,47	-0,05	0,42	-0,05
	R/R^2	0,46/0,21	0,71/0,5	0,6/0,36	0,46/0,21	0,48/0,23	0,64/0,41

Примечание: r_1 относится к PO_4^{3-} , NO_3^- и SiO_3^{2-} ; r_2 – к S и $C_{хл}$; r_3 – к V и B .

Таблица 3

Множественные коэффициенты корреляции (R) и детерминации (R^2) между сезонными значениями концентраций биогенных элементов и солености воды (S) и концентрации хлорофилла «а» ($C_{хл}$), полученные на вдольбереговом разрезе

Показатели	Зима		Весна		Лето		Осень	
	R	R^2	R	R^2	R	R^2	R	R^2
$PO_4^{3-} - C_{хл}, S$	0,55	0,3	0,67	0,45	0,71	0,5	0,17	0,03
$NO_3^- - C_{хл}, S$	0,62	0,38	0,52	0,27	0,73	0,53	0,1	0,01
$SiO_3^{2-} - C_{хл}, S$	0,73	0,53	0,7	0,49	0,77	0,59	0,56	0,32

ной воде. Согласно коэффициенту детерминации, равному 0,52, поступление фосфатов и нитратов в западный район зимой с ТРВ обеспечивает более 50% общей их дисперсии. В весенний период увеличение объема стока Дуная и снижение солености ТРВ указывает на дополнительное поступление биогенных веществ в западный район. Коэффициент корреляции между значениями S, V был относительно высоким ($R = 0,6$) (см. табл. 2). В то же время расход NO_3^- на усвоение фитопланктоном также должен был увеличиваться. Косвенно это подтверждается высоким коэффициентом корреляции между величиной NO_3^- и сочетанием значений $C_{хл}$ и B (см. табл. 2). Согласно данным табл. 1, содержание различных форм азота в западном районе весной повысилось по сравнению с зимой. Связь между значениями S и V была менее тесной ($R = 0,44$), а между отдельными их значениями – также прямо пропорциональной. В весенний период при увеличении объема стока и снижения солености ТРВ это должно было способствовать снижению

содержания PO_4^{3-} , что подтверждается данными в табл. 1. На снижение концентрации PO_4^{3-} указывают и наиболее высокое содержание хлорофилла «а» и величины биомассы фитопланктона [Black Sea Data..., 2003] по сравнению с зимним периодом. Отрицательные коэффициенты корреляции между концентрацией хлорофилла «а», величиной биомассы фитопланктона и содержанием PO_4^{3-} означают, что при увеличении концентрации хлорофилла «а» и биомассы фитопланктона концентрация PO_4^{3-} понижается. Коэффициенты детерминации (см. табл. 2) указывают на то, что поступление биогенных элементов с ТРВ весной обеспечивало примерно 20% общей дисперсии фосфатов, 36% общей дисперсии нитратов и 9% общей дисперсии кремнекислоты. Их расход на усвоение фитопланктоном составлял 10, 52 и 17% общей дисперсии для этих элементов, соответственно (см. табл. 2).

Летом связь между изменениями концентрации биогенных элементов и значениями S и V возросла ($r_{12} = -(0,44-0,76)$; $r_{13} = 0,33-0,5$; $R = 0,46-0,71$) по

сравнению с весной. Наиболее тесная связь отмечалась между биогенными элементами и значениями $C_{\text{хл}}$ и B (см. табл. 2). При этом заметно увеличилась биомасса фитопланктона [Black Sea Data..., 2003] что, по-видимому, связано с повышением количества биогенных элементов на их расход в процессе усвоения фитопланктоном. Действительно, в летнее время концентрация биогенных элементов в поверхностном слое западного района по сравнению с весенним периодом понижалась (см. табл. 1). Поступление фосфатов, нитратов и кремнекислоты с ТРВ обеспечивало примерно 21, 50 и 60% общей дисперсии, а их расход составлял 21, 23 и 41% общей дисперсии этих элементов, соответственно (см. табл. 2).

Влияние сезонных величин концентрации хлорофилла «а» и солености на изменчивость сезонных значений биогенных элементов также оценивали на вдольбереговом разрезе (см. табл. 3). Заметная связь между фосфатами и нитратами и сочетанием $C_{\text{хл}}$ и S получена во все сезоны ($R = 0,52-0,73$), кроме осени, когда связь между ними отсутствовала. При этом основное влияние на изменчивость их содержания оказывало колебание солености, что, иными словами, означало поступление этих элементов в прибрежные воды с ТРВ. И только весной изменчивость концентрации нитратов была связана с вариациями $C_{\text{хл}}$, т. е. с их расходом на усвоение фитопланктоном. Заметная связь между диоксидом кремнекислоты и сочетанием $C_{\text{хл}}$ и S ($R = 0,56-0,77$) в основном определялась концентрацией хлорофилла «а», и только осенью и зимой на ее изменчивость оказывала влияние соленость воды.

Выводы:

– зимой в условиях низкой температуры и освещенности скорость усвоения биогенных элементов микропланктоном уменьшается, что снижает их изъятие из водной среды. В то же время в результате зимней конвекции в зону фотосинтеза из донных отложений поступает дополнительное количество биогенных элементов, поддерживающее относительно высокое их содержание;

– весной биогенные элементы, поступающие с водами речного стока, в основном обеспечивали возросшую активность биопродукционных процес-

сов в исследуемых районах и частично компенсировали снижение потока биогенных веществ из донных осадков за счет формирования термоклина, что в целом способствовало уменьшению их концентрации в верхнем слое;

– летом концентрация биогенных веществ в верхнем слое исследуемых районов СЗЧМ понижалась относительно зимы и весны, что обусловлено наличием четко выраженного термоклина, ограничивающего их поступление из донных осадков в верхний слой и интенсивное усвоение фитопланктоном;

– осенью в связи со снижением интенсивности усвоения биогенных веществ фитопланктоном и повышением деструкционных процессов взвешенного органического вещества, а также с увеличением поступления биогенных веществ из донных осадков в верхний слой вследствие разрушения термоклина отмечалось повышение их концентраций в поверхностном слое исследуемых районов;

– для весны и лета, наиболее обеспеченных данными, получены количественные оценки связи между сезонными величинами объема стока Дуная, солености воды, концентрации хлорофилла «а», биомассы фитопланктона и сезонными концентрациями биогенных элементов для западного района СЗЧМ. Рассчитанные парные и множественные коэффициенты корреляции и детерминации показали, что в эти сезоны в западном районе поступление биогенных элементов с ТРВ обеспечивало примерно 20% общей дисперсии фосфатов, 36–50% общей дисперсии нитратов и около 36% общей дисперсии кремнекислоты, соответственно. На долю расхода биогенных элементов весной и летом в процессе усвоения фитопланктоном в поверхностном слое на фосфаты приходилось 10–23%, на нитраты – 52–23%, на кремнекислоту – 17–52% от общей их дисперсии соответственно. Результаты проведенных исследований указывают на связь поступления биогенных элементов с трансформированными речными водами и их расхода, связанного с усвоением фитопланктоном. Эти потоки можно отнести к основным составляющим баланса биогенных элементов в СЗЧМ.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания по темам: № 0828-2019-0003 (АААА-А18-118021490093-4) «Функциональные, метаболические и токсикологические аспекты существования гидробионтов и их популяций в биотопах с различным физико-химическим режимом»; № 0827-2019-0001 «Фундаментальные исследования процессов взаимодействия в системе «океан – атмосфера», определяющих региональную пространственно-временную изменчивость природной среды и климата». Авторы выражают благодарность студентке МГУ Федоровой А.А. за проведенные статистические расчеты, а также анонимным рецензентам за конструктивные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Большаков В.С. Трансформация речных вод в Черном море. Киев: Наукова думка, 1970. 328 с.

Гаркавая Г.П., Богатова Ю.И. Гидрохимические исследования // Северо-западная часть Черного моря: биология и экология. Киев: Наукова думка, 2006. С. 60–83.

Геворгиз Н.С., Кривенко О.В., Кондратьев С.И. Обобщение данных многолетних исследований содержания основных биогенных элементов в северо-западной части Черного моря за период 1980–2002 гг. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: МГИ НАНУ, 2005. Вып. 12. С. 177–187.

Кондратьев С.И. Три характерные гидролого-гидрохимические ситуации возле устья Дуная по данным экспедиционных исследований Морского гидрофизического института в 1997–2013 годах // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35. № 4. С. 367–383.

Методы гидрохимических исследований океана. М.: Наука, 1978. 261 с.

Пархоменко А.В., Кукушкин А.С. Оценка потоков минерального фосфора в эвтрофных водах северо-западной части Черного моря // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 1. С. 94–104.

Северо-западная часть Черного моря: биология и экология. Киев: Наукова думка, 2006. 701 с.

Эренберг А. Анализ и интерпретация статистических данных. М.: Финансы и статистика, 1981. 406 с.

Berlinsky N., Bogatova Yu., Garkavaya G. Estuary of the Danube, *The Handbook of Environmental Chemistry*, vol. 5, Water Pollution Part H, Estuaries, Berlin, Springer, 2006, p. 233–264.

Black Sea Database. Supplied with Ocean Base 3.07 DBMS. NATO SfP-971818 ODBMS Black Sea Project, 2003, CD-ROM.

Bogatova Yu.I. Hydrochemical regime of the Ukrainian nearshore area, *Water Resources*, 2013, vol. 40, no. 3, p. 305–314.

Cociasu A., Dorogan L., Humborg C., Popa L. Long-term ecological changes in Romanian coastal waters of the Black Sea, *Marine Pollution Bulletin*, 1996, vol. 32, p. 32–38.

Friedel G., Dunkel Ch., Wehrli B. Benthic fluxes of nutrients in the northwestern Black Sea, *Marine Chemistry*, 1998, vol. 62, p. 77–88.

Kukushkin A.S. Seasonal changes of hydrobiological and bio-optical parameters in the coastal areas of the western part of the Black Sea, *Diversity in Coastal Marine Sciences*, vol. 23, C.W. Finkl, C. Makowski (eds.). Springer, 2018, p. 153–180.

Поступила в редакцию 07.02.2020

После доработки 05.07.2020

Принята к публикации 06.11.2020

A.V. Parkhomenko¹, A.S. Kukushkin²

SEASONAL VARIABILITY OF THE SPATIAL DISTRIBUTION
OF BIOGENIC ELEMENTS IN THE SURFACE LAYER
OF THE NORTHWESTERN BLACK SEA

Based on the data of long-term (1970–2009) observations, the spatial distribution of seasonal concentrations of the main biogenic elements (phosphates, nitrates, ammonium nitrogen, silicic acid) were studied and the variability of their content in the surface layer of the northwestern part of the Black Sea (NWBS) was estimated. The seasonal concentrations of nutrients in the northern, western, southwestern and central regions, which differ in the degree of the influence of transformed river waters, were evaluated. It is shown that the seasonal variability of the content of nutrients in the indicated areas of the northwestern part of the Black Sea depends on the variability of the volume of river runoff and the spread of transformed river waters over the shelf, as well as on the regional hydrometeorological conditions and the intensity of the biotic cycle of nitrogen, phosphorus, and silicon. The detailed studies of the seasonal variability of the concentration of phosphates, nitrates and chlorophyll "a" and water salinity were carried out for the spring and summer seasons, which are the most provided with data on the alongshore and latitudinal (45°N) sections of the western region. The relationship between the seasonal values of the Danube runoff volume, water salinity, chlorophyll "a" concentration, phytoplankton biomass, and seasonal nutrient concentrations for the western region of the NWBS was assessed. The calculated multiple coefficients of correlation and determination showed that in the spring and summer periods the input of phosphates, nitrates and silicic acid with transformed river waters provided for about 20%, 36–50% and about 36% of their total dispersion, respectively. The assimilation of these biogenic elements by phytoplankton indicates that phosphates accounted for 10–23%, nitrates for 23–52% and silicic acid for 17–52% of their total dispersion, respectively. The obtained results indicate a relationship between the input of nutrients with transformed river waters and their output associated with the assimilation of nutrients by microplankton (phytoplankton and bacteria). Obviously, these fluxes could be regarded as the main components providing the annual balance of nutrients in the NWBS.

Key words: phosphates, nitrates, silicic acid, ammonium nitrogen, salinity, chlorophyll "a"

¹ A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Department of Ecological Physiology of Algae, Senior Scientific Researcher, PhD in Biology; e-mail: parkhomenko.al@yandex.ua

² Marine Hydrophysical Institute of RAS, Department of Atmosphere-Ocean Interaction, Senior Scientific Researcher, PhD in Physics and Mathematics; e-mail: kukushkinas@mail.ru

Acknowledgements. The study is carried out under the state task on themes no. 0828-2019-0003 (AAAA 18-118021490093-4) "Functional, metabolic and toxicological aspects of the existence of hydrobionts and their populations in biotopes with different physical and chemical regime" and no. 0827-2018-0001 "Fundamental investigation of interactions in the "ocean – atmosphere" system governing the regional spatial-temporal variability of the natural environment and the climate". The authors are grateful to A.A. Fedorova, student of the Moscow State University, for statistical calculations, and to anonymous reviewers for their constructive remarks.

REFERENCES

- Berlinsky N., Bogatova Yu., Garkavaya G. Estuary of the Danube, *The Handbook of Environmental Chemistry*, vol. 5, Water Pollution Part H. Estuaries, Berlin, Springer, 2006, p. 233–264.
- Black Sea Data base supplied with Ocean Base 3.07 DBMS. NATO SFP-971818 ODBMS Black Sea Project, 2003.
- Bogatova Yu.I. Hydrochemical regime of the Ukrainian nearshore area, *Water Resources*, 2013, vol. 40, no. 3, p. 305–314.
- Bol'shakov V.S. *Transformaciya rechnyh vod v Chernom more* [Transformation of river waters in the Black Sea], Kiev, Nauk. Dumka Publ., 1970, 328 p. (In Russian)
- Cociasu A., Dorogan L., Humborg C., Popa L. Long term ecological changes of Romanian coastal waters of the Black Sea, *Marine Pollution Bulletin*, 1996, vol. 32, p. 32–38.
- Erenberg A. *Analiz i interpretaciya statisticheskikh dannyh* [Analysis and interpretation of statistical data], Moscow, Finansy i Statistika Publ., 1981, 406 p. (In Russian)
- Friedel G., Dunkel Ch., Wehrli B. Benthic fluxes of nutrients in the northwestern Black Sea, *Marine Chemistry*, 1998, vol. 62, p. 77–88.
- Garkavaya G.P., Bogatova Yu.I. [Hydrochemical survey]. *Severo-zapadnaya chast' Chernogo morya: biologiya i ekologiya* [The northwestern Black Sea: biology and ecology], Kiev, Nauk. Dumka Publ., 2006, p. 60–83. (In Russian)
- Gevorgiz N.S., Krivenko O.V., Kondrat'ev S.I. Obobshchenie dannyh mnozhestva issledovaniy soderzhaniya osnovnykh biogennykh elementov v severo-zapadnoj chasti Chernogo morya za period 1980–2002 gg. [Generalization of data from the long-term studies of the concentrations of main biogenic elements in the northwestern Black Sea during 1980–2002], *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoj i shel'fovoj zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa*, 2005, no. 12, p. 177–187. (In Russian)
- Kondrat'ev S.I. Three typical hydrological-hydrochemical situations near the Danube River mouth based on the Marine Hydrophysical Institute research expeditions in 1997–2013, *Physical Oceanography*, 2019, vol. 26, no. 4, p. 326–340.
- Kukushkin A.S. Seasonal changes of hydrobiological and bio-optical parameters in the coastal areas of the western part of the Black Sea, *Diversity in Coastal Marine Sciences*, vol. 23, C.W. Finkl, C. Makowski (eds.). Springer, 2018, p. 153–180.
- Metody gidrochimicheskikh issledovaniy okeana* [Methods of hydrochemical ocean studies], Moscow, Nauka Publ., 1978, 272 p. (In Russian)
- Parkhomenko A.V., Kukushkin A.S. Evaluating mineral phosphorus fluxes in eutrophic waters of the northwestern Black Sea, *Water resources*, 2020, vol. 47, no. 1, p. 137–146.
- Severo-zapadnaya chast' Chernogo morya: biologiya i ekologiya* [The northwestern Black Sea: biology and ecology], Kiev, Nauk. Dumka Publ., 2006, 701 p. (In Russian)

Received 07.02.2020

Revised 05.07.2020

Accepted 06.11.2020