



УДК 551.464(262.5)

А. С. Кукушкин, канд. физ.-мат. наук, ст. н. с.

Морской гидрофизический институт Национальной академии наук Украины, Севастополь, Украина

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СОДЕРЖАНИЯ ВЗВЕШЕННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ФОСФОРА В ВЕРХНЕМ СЛОЕ ЗАПАДНОЙ ГЛУБОКОВОДНОЙ И СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ШЕЛЬФОВОЙ ЧАСТЯХ ЧЁРНОГО МОРЯ

По данным многолетних (1985 – 1994 гг.) наблюдений содержания взвешенного органического вещества рассмотрена сезонная изменчивость пространственного распределения концентрации взвешенного органического фосфора (P_{BOB}) и отношений концентраций компонентов этого вещества (углерод, азот, фосфор) и хлорофилла «а» в поверхностном слое и слое фотосинтеза в западном глубоководном и северо-западном шельфовом районах Чёрного моря. По регрессионным уравнениям рассчитаны оценки сезонного содержания P_{BOB} в поверхностном слое моря и с их учётом проанализированы внутригодовые и межгодовые его изменения в период 1979 – 1995 гг. Показано, что сезонные межгодовые изменения концентрации P_{BOB} в этих районах моря в основном определяются климатическими условиями, а в северо-западном шельфовом районе они также зависят от изменения объёмов речных стоков и масштабов их распространения на шельфе.

Ключевые слова: Чёрное море, взвешенный органический фосфор, хлорофилл «а», пространственное распределение, изменчивость.

Известно, что продуктивность морской экосистемы, интенсивность протекания в ней биохимических процессов и её устойчивость к различного рода воздействиям в значительной степени определяются изменчивостью состава и содержания взвешенного органического вещества (BOB). Внимание к исследованию биогеохимических процессов, влияющих на эволюцию экосистемы Чёрного моря, способствовало достаточно активному изучению пространственно-временной изменчивости компонентов BOB (взвешенного органического углерода – C_{BOB} и азота N_{BOB}) в шельфовой и глубоководной частях моря в последние 20 – 25 лет [1, 2, 4, 7 – 10]. Однако, из-за относительно небольшого количества экспериментальных данных по измерению концентрации взвешенного органического фосфора (P_{BOB}), включающего фосфорсодержащие вещества живых организмов (фито-, микрозоо- и бактериопланктон и продукты их разложения) [13], и неравномерного их распределения по годам и сезонам, сведения о пространственно-временной изменчивости его концентрации в Чёрном море имеют эпизодический характер [2, 16, 17]. Крайне ограниченные возможности экспедиционных исследований, а также трудоёмкость прямых определений концентрации P_{BOB} не

позволяют в ближайшее время надеяться на пополнение экспериментальных данных. Компенсировать их отсутствие возможно расчётным путём с использованием корреляционных связей между одновременно измеренными концентрациями P_{BOB} , C_{BOB} , N_{BOB} и хл «а» [7].

Целью настоящей работы является анализ и обобщение экспериментальных и расчётных данных по пространственному распределению концентрации P_{BOB} и его внутригодовой и межгодовой изменчивости в поверхностном слое (0 – 5 м) и в слое фотосинтеза в западной глубоководной и шельфовой северо-западной (СЗЧМ) частях Чёрного моря.

Материал и методы. В работе использовали данные натурных измерений концентраций P_{BOB} , C_{BOB} , N_{BOB} и хлорофилла «а» ($C_{\text{ХЛ}}$, хл «а») из банка данных Института биологии южных морей и Морского гидрофизического института НАН Украины, полученные в 12 экспедиционных рейсах на 228 станциях и 922 горизонтах в период 1978 – 1995 гг. Кроме этого использованы данные спутниковых (радиометр CZCS, 1979 – 1986 гг.) наблюдений концентрации хл «а».

Сравнение среднемесячных концентраций хл «а», полученных по судовым и спутниковым

наблюдениям одновременно в одних и тех же районах моря, показало их удовлетворительное сходство (различие составило 10 – 30%). Методика отбора проб и определения в них содержания компонентов ВОВ подробно описана в [1, 2, 11]. Концентрация $P_{\text{ВОВ}}$ определялась сжиганием стекловолнистых фильтров GF/F в плаве кислых солей [11].

В качестве индикатора трансформации ВОВ использовались атомарные отношения концентраций $C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$ и $P_{\text{ВОВ}}$ [13]. Средние значения этих отношений в фитопланктоне в присутствии необходимого для его роста количества биогенных элементов в поверхностных морских водах приближаются к оптимальным отношениям, соответствующим редфилдовскому соотношению – 106:16:1 [13, 18]. В зависимости от степени биохимической трансформации ВОВ отношения отдельных его компонентов могут значительно изменяться. Поэтому для оценки соотношения детритной и фитопланктонной фракций в ВОВ использовалась величина отношения концентраций $C_{\text{ВОВ}}$ и хл «а» (далее $C/\text{хл}«а»$) [19].

Линейные уравнения регрессии вида $y = ax + b$ [14], характеризующие связь между одновременно измеренными концентрациями $P_{\text{ВОВ}}$, компонентами ВОВ и хл «а» для разных сезонов в глубоководном районе моря и СЗЧМ, позволили рассчитать недостающие данные о концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ для того или иного месяца или года. Значения коэффициента корреляции (0.51 – 0.96) были достоверны при высоких уровнях значимости (< 0.001).

Результаты и обсуждение. Сезонная изменчивость пространственного распределения $P_{\text{ВОВ}}$. З и м н и й п е р и о д. Анализ полученных данных о пространственном распределении концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ в западной и центральной глубоководных частях моря (рис 1 а, табл. 1) показал, что в поверхностном слое в районе 43° – 43° 30' с.ш., 30° 30' – 33° 30' в.д., где зимой обычно расположен стационарный циклонический круговорот, а также в районе западного побережья моря наблюдались повышенные значения его концентрации (0.05 – 0.11 мкМ). Для них характерны большие величины коэффициента вариации (62 – 80%), свидетельствующие о высокой межгодовой изменчивости. Максимальные значения концентрации (в том числе и в слое фотосинтеза) отмечены в районе 33° в.д., в центре циклонического кру-

говорота. Сравнительный анализ величин атомарного соотношения между концентрациями основных компонентов ВОВ показал, что средние величины отношений C/P (313 – 332) и N/P (36) в поверхностном слое и в слое фотосинтеза глубоководной области моря были значительно выше их оптимального соотношения 106:16:1.

Содержание фитопланктона в ВОВ, равное 0.8% (среднее значение $C/\text{хл}«а»$ равно 125), и относительно высокие значения отношения C/N (9.2 – в поверхностном слое и 8 – в слое фотосинтеза) свидетельствуют о том, что ВОВ состояло из фитопланктона и детрита, находящегося на различных стадиях биохимической трансформации. Это также подтверждается средними значениями биомассы фитопланктона, рассчитанными по концентрации хлорофилла «а» на сухую массу ($C_{\text{хл}} \times 50$ [1]) и равными 82 и 78 мгС/м³, и их доли от концентрации $C_{\text{ВОВ}}$ – 46 и 52 % в поверхностном слое и в слое фотосинтеза соответственно.

В то же время на большей части СЗЧМ и в простирающемся в южном направлении участке моря между 29 и 30° в.д. зарегистрированы пониженные концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ (0.02 – 0.03 мкМ), изменчивость которых была низкой (v менее 20%). Распределение концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ в слое фотосинтеза хорошо совпадало с её распределением в поверхностном слое и отличалось несколько меньшими абсолютными значениями и более низкой изменчивостью (табл. 1).

Отмечается также хорошее совпадение распределений концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ и одновременно с ней измеренных концентраций $C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$ и хл «а» [7, 8]. Средние величины отношений C/P и N/P в СЗЧМ достаточно высокие (табл. 1).

В районе постоянного влияния рек (северный и западный районы СЗЧМ) величины отношения C/N , равные 6.8 – 7.1, и $C/\text{хл}«а»$ – 123 – 127 свидетельствуют о том, что ВОВ состояло из фитопланктона и свежего детрита.

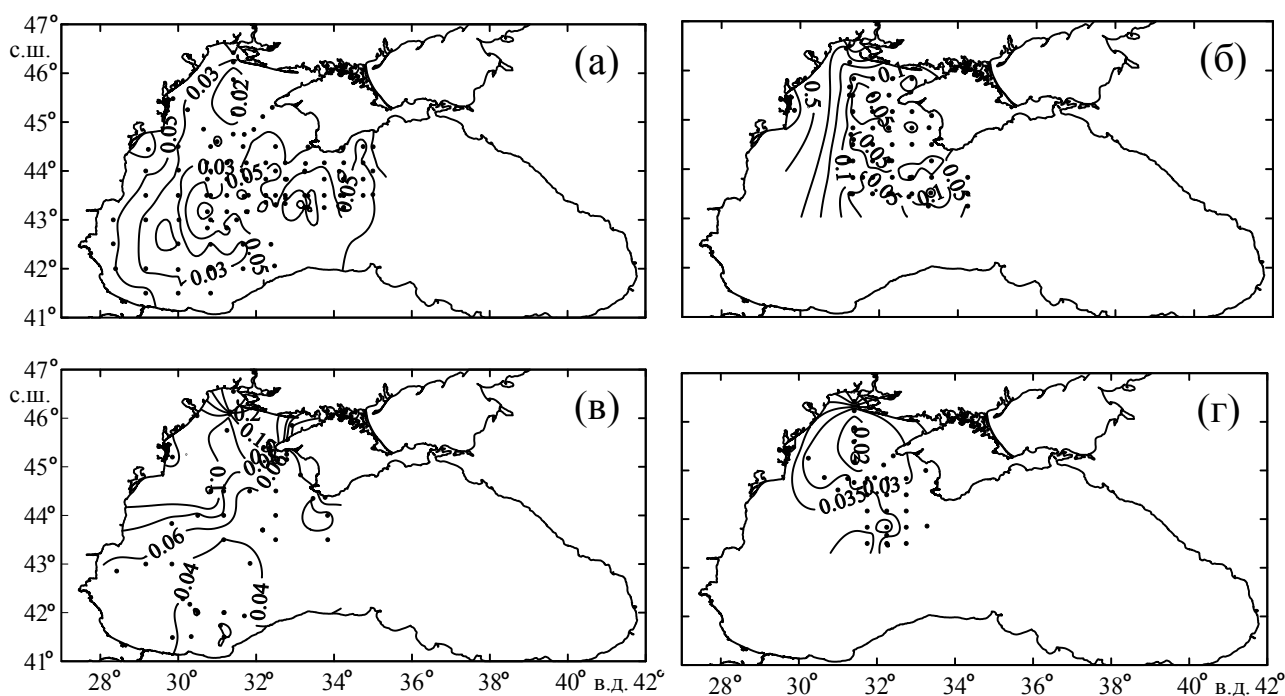


Рис. 1 Распределение концентраций P_{BOB} , μM в поверхностном слое в зимний (а), весенний (б), летний (в) и осенний (г) периоды. Точки – станции.

Fig. 1 P_{som} concentrations' distribution, μM in the surface layer in winter (a), spring (b), summer (c), and autumn (d). The points are the stations.

Определённая расчётным путем биомасса фитопланктона в сухом виде в поверхностном слое была равна 109.5 мгC/м^3 , а в слое фотосинтеза – 63.5 мгC/м^3 , что составляло соответственно 61 и 50 % от содержания C_{BOB} .

В центральном районе СЗЧМ, не подверженном в зимний период влиянию речного стока, наблюдались более высокие значения отношения N/P и несколько меньшие значения отношения C/N по сравнению с районом влияния рек, что, видимо, связано с более высоким содержанием N_{BOB} в BOB. Рассчитанное значение биомассы фитопланктона в этом районе в поверхностном слое ниже в 3 раза, а в слое фотосинтеза – в 2. Доля фитопланктона в C_{BOB} изменялась в интервале 33 – 36 %, что указывало на более высокое по сравнению с районом влияния рек содержание детритной фракции в BOB.

Высокие значения отношений C/P и N/P в районах исследований, видимо, объясняются более быстрым выведением фосфора из детрита [18], а также недостаточной обеспеченно-

стью фитопланктонного сообщества минеральным фосфором [12].

В весенний период, как и в зимний, повышенная концентрация P_{BOB} и её высокая изменчивость (86 – 89 %) наблюдались в поверхностном слое глубоководной части моря в районе $43^\circ - 43^\circ 30' \text{ с.ш.}$, $33 - 34^\circ \text{ в.д.}$ и вдоль северного и западного берегов в СЗЧМ (рис. 1 б). В глубоководной части моря она увеличилась по сравнению с зимним периодом примерно в 1.3 раза, а в СЗЧМ – более чем в 10 раз (табл. 1).

В этих районах также отмечены повышенные концентрации C_{BOB} , N_{BOB} и хл «а» [7, 8]. Область пониженных значений концентрации P_{BOB} , зарегистрированная в центральном районе СЗЧМ и несколько южнее его (на участке между $30^\circ 30' - 32^\circ 30' \text{ в.д.}$), заметно уменьшилась в размерах по сравнению с зимним периодом.

Значение концентрации P_{BOB} и её изменчивость увеличились примерно в 2 раза.

Табл. 1 Сезонные изменения концентрации взвешенного органического фосфора ($P_{\text{ВОВ}}$, мкМ) и отношений одновременно измеренных концентраций компонентов ВОВ в поверхностном слое (ПС) и в слое фотосинтеза (ФС) в глубоководной и северо-западной (шельфовой) частях Черного моря

Table 1 Seasonal variations of suspended organic phosphorus (P_{som} , μM) and relations of simultaneously measured concentrations of SOM components in the surface layer (SL) and in the photosynthesis layer (PL) in the deep-sea and north-western (shelf) parts of the Black Sea

Сезон	Слой	N/n	$P_{\text{ВОВ}} \cdot 10^{-2}$	$v, \%$	C/P	N/P	C/N	C/хл«а»
Глубоководная часть								
Зима	ПС	80	5.6 ± 3.5	62	322 ± 182	36 ± 17	9.2 ± 2.3	129 ± 81
	ФС	31/166	4.4 ± 2.3	52	313 ± 79	36 ± 9	8.0 ± 1.9	121 ± 53
Весна	ПС	30	7.5 ± 6.7	89	260 ± 119	33 ± 15	7.8 ± 2.2	392 ± 288
	ФС	29/215	5.0 ± 2.1	42	210 ± 41	31 ± 9	7.2 ± 2.0	244 ± 80
Лето	ПС	20	3.9 ± 1.7	43	350 ± 219	55 ± 23	7.4 ± 2.5	732 ± 215
	ФС	16/140	4.1 ± 2.0	49	277 ± 104	37 ± 7	7.4 ± 2.1	257 ± 62
Осень	ПС	15	3.7 ± 0.6	16	269 ± 70	33 ± 12	9.2 ± 4.5	383 ± 187
	ФС	1/1	2.3	–	295	54	5.4	384
СЗЧМ, район постоянного влияния речного стока								
Зима	ПС	4	5.9 ± 4.7	80	266 ± 60	39 ± 11	7.1 ± 3.1	127 ± 96
	ФС	4/12	3.3 ± 0.9	27	307 ± 54	45 ± 9	6.8 ± 1.8	123 ± 37
Весна	ПС	4	76.7 ± 65.8	86	185 ± 20	30 ± 10	6.6 ± 1.6	260 ± 125
	ФС	3/10	56.5 ± 37.3	66	187 ± 22	30 ± 6	6.4 ± 1.0	361 ± 209
Лето	ПС	5	15.8 ± 10.7	68	220 ± 143	51 ± 22	5.3 ± 0.8	600 ± 400
	ФС	5/16	15.3 ± 8.3	54	275 ± 45	45 ± 11	6.2 ± 1.2	384 ± 222
Осень	ПС	5	3.4 ± 1.2	35	312 ± 72	44 ± 35	9.1 ± 3.4	134 ± 67
	ФС	5/13	3.4 ± 1.1	32	292 ± 48	38 ± 16	8.6 ± 2.5	124 ± 48
СЗЧМ, район эпизодического влияния речного стока								
Зима	ПС	4	2.8 ± 0.4	14	302 ± 88	52 ± 14	5.7 ± 0.4	173 ± 100
	ФС	4/12	2.5	–	310 ± 10	54 ± 1	5.7 ± 1.0	136 ± 38
Весна	ПС	22	6.5 ± 3.6	55	242 ± 51	37 ± 9	6.7 ± 1.5	500 ± 425
	ФС	21/114	5.0 ± 2.6	52	225 ± 60	36 ± 10	6.4 ± 1.1	271 ± 143
Лето	ПС	8	9.5 ± 6.7	70	319 ± 105	32 ± 17	9.1 ± 2.3	1064 ± 560
	ФС	2/12	5.5 ± 2.5	45	363 ± 90	39 ± 6	7.7 ± 0.4	472 ± 53
Осень	ПС	14	2.7 ± 0.7	26	339 ± 102	40 ± 16	9.2 ± 3.4	290 ± 257
	ФС	8/32	2.5 ± 0.6	24	314 ± 14	33 ± 4	9.5 ± 1.2	149 ± 47

Примечание: N – количество станций, n – количество проб (горизонтов измерений), v – коэффициент вариации

Распределение его концентрации в слое фотосинтеза хорошо совпадало с распределением в поверхностном слое, а средневзвешенная концентрации в этом слое была в 1.3 – 1.5 раза ниже. Величины отношений C/P и N/P во всех районах и особенно в районе постоянного влияния рек заметно снизились. Это, а также близкие к оптимальному атомарному соотношению (106:16) средние значений C/N, равные в глубоководной части моря 7.2 – 7.8, а в СЗЧМ – 6.4 – 6.7, свидетельствуют о низкой степени биохимической трансформации детрита.

По сравнению с зимним периодом значительное увеличение биомассы фитопланктона отмечалось только в районе влияния рек

(392 мгС/м³ в поверхностном слое и 269 мгС/м³ в слое фотосинтеза). В других районах моря она на порядок меньше и в среднем изменялась от 17 до 25 мгС/м³. В то же время содержание фитопланктона в $S_{\text{ВОВ}}$ во всех исследуемых районах было примерно одинаковым и составляло 12 – 18%. На относительно низкую долю живого вещества в ВОВ указывали и высокие значения отношения C/хл«а» (244 – 500).

Полученные результаты позволяют считать, что во взвешенном веществе преобладала детритная фракция с низким уровнем биохимической трансформации.

В летний период немногочисленные данные измерений P_{BOB} не позволяют достаточно подробно описать распределение его концентраций в районе исследований (рис 1 в). В глубоководной части моря наблюдались пониженные концентрации P_{BOB} (0.03 – 0.06 мкМ) и высокие значения отношения $C/\text{хл}«а»$ (257 – 732), низкая величина биомассы фитопланктона (9 мгС/м³ в поверхностном слое и 16 – 24 мгС/м³ в слое фотосинтеза) и невысокая его доля в S_{BOB} (~ 6% в поверхностном слое и 20.8 – 23.7% в слое фотосинтеза), что указывало на преобладание детрита в BOB.

В северном районе СЗЧМ и в предустьевой зоне Дуная отмечены повышенные концентрации P_{BOB} (0.15 – 0.3 мкМ). По сравнению с весенним периодом его содержание в районе влияния рек уменьшилось в 4 – 5 раз, а изменчивость снизилась до 54 – 68 %. В центральном районе СЗЧМ содержание P_{BOB} в поверхностном слое увеличилось ~ в 1.5 раза, а его изменчивость возросла до 70%. В слое фотосинтеза эти показатели не изменились. Необходимо отметить, что приведённые данные в основном получены в августе 1990 г., когда в связи с наблюдаемой в СЗЧМ антициклонической циркуляцией трансформированные речные воды, обогащённые биогенными элементами, распространились на весь центральный район [9]. Для районов СЗЧМ характерны высокие средние значения отношений C/P (220 – 363) и N/P (32 – 51). Величины биомассы фитопланктона в СЗЧМ были выше, чем в глубоководной части моря. В районе влияния рек в поверхностном слое она составляла 66.5 и 102.5 мгС/м³ в слое фотосинтеза, а в центральном районе – 38.0 и 33.5 мгС/м³ соответственно. Относительно S_{BOB} эти значения биомассы фитопланктона в обоих районах СЗЧМ составляли 12 – 14 % в поверхностном слое и 16.1 – 20.8 % в слое фотосинтеза, что указывало на преобладание детритной составляющей BOB в летний период. При этом наибольшей трансформации детрит был подвержен в центральном районе СЗЧМ, где средние величины отношений C/P (319 – 363) и C/N (7.7 – 9.1) были выше по сравнению с Морський екологічний журнал, № 4, Т. XII. 2013

с районом влияния рек (табл. 1).

В осенний период содержание P_{BOB} на северном участке глубоководной части моря по сравнению с летним периодом уменьшилось в 1.1 и 1.5 раза в поверхностном слое и в слое фотосинтеза соответственно. Рассчитанные средние значения биомассы фитопланктона в поверхностном слое (16 мгС/м³) и в слое фотосинтеза (10 мгС/м³), их доля от содержания S_{BOB} , равная 12 – 14%, и высокие средние величины отношений $C/\text{хл}«а»$ (384) и C/N (9.2), видимо, означали, что в BOB в этом районе преобладал трансформированный детрит.

Наибольшие изменения в распределении концентрации P_{BOB} в осенний период наблюдались в СЗЧМ. По сравнению с летним периодом в районе влияния рек она снизилась в 4.5 раза, а в центральном районе – в 3.5 и 2 раза в поверхностном слое и в слое фотосинтеза соответственно (рис. 1 г, табл. 1). Также уменьшилась изменчивость его концентрации ($v = 16 – 35 \%$), но средние величины отношений C/P и N/P оставались высокими, а отношения C/N увеличилось до 8.6 – 9.5. Величина биомассы фитопланктона в районе влияния рек в поверхностном слое и в слое фотосинтеза была равна 50 мгС/м³ и ее вклад в BOB равнялся ~ 50%. В центральном районе в исследуемых слоях значение биомассы было ниже (26.6 и 33.5 мгС/м³ соответственно), что составляло 25 и 34 % от содержания S_{BOB} . Учитывая высокие средние значения отношений C/P (292 – 339), N/P (33 – 44) и C/N (8.6 – 9.5) можно предположить, что детрит в СЗЧМ в обоих слоях был в значительной степени трансформированным.

Сравнительный анализ пространственного распределения содержания P_{BOB} в глубоководной области моря в различные сезоны года показал, что его повышенное содержание и высокая изменчивость наблюдались в зимне-весенний период в поверхностном слое и в слое фотосинтеза в центральной области западного циклонического круговорота. BOB состояло из фитопланктона и детрита, доля которого в BOB весной была выше. В летне-осенний период содержание P_{BOB} и его изменчивость уменьши-

лись, а в ВОВ преобладал детрит, находящийся на различных стадиях биохимической трансформации.

Пространственное распределение концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ в СЗЧМ в отличие от глубоководной области моря изменялось в течение года в меньшей степени. Его повышенные концентрации и изменчивость в годовом цикле наблюдались в районе постоянного влияния рек, где в весенний период они были максимальными. Пониженные концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ в СЗЧМ зарегистрированы в центральном районе. В то же время в летний период, когда в связи с наблюдаемой в СЗЧМ антициклонической циркуляцией трансформированные речные воды, обогащённые биогенными элементами, распространились на весь центральный район, получены более высокие концентрации, чем в районе влияния рек в осенне-зимний период, сравнимые с концентрацией $P_{\text{ВОВ}}$ в глубоководной части моря в зимне-весенний период.

Пространственное распределение концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ совпадало с распределениями концентраций $C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$ и хл «а» во всех районах моря.

Внутригодовое распределение концентрации $P_{\text{ВОВ}}$. Внутригодовое распределение измеренных среднемесячных концентраций $P_{\text{ВОВ}}$ очень неравномерно по сравнению с аналогичными распределениями концентраций $C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$ и хл «а». Наиболее обеспечены наблюдениями зимне-весенние месяцы. Объединение измеренных и рассчитанных (для месяцев, в которых отсутствовали такие измерения) значений концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ было основано на их удовлетворительном совпадении во все сезоны. В глубоководной части моря в поверхностном слое и слое фотосинтеза в зимне-весенний период их различие в среднем не превышало 10 %, а в летне-осенний находилось в пределах 15 – 25 %. В СЗЧМ это различие в поверхностном слое во все сезоны не превышало 20 %, а в слое фотосинтеза находилось в пределах 4 – 30 %.

Результаты измерений и расчётов среднемесячных значений концентраций $P_{\text{ВОВ}}$, ха-

рактеризующие внутригодовые его изменения, в западном циклоническом (ЗЦК) и антициклоническом «севастопольском» (АЦК) круговоротах и в СЗЧМ показаны на рис. 2. В глубоководной части моря характер изменений концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ в ЗЦК и АЦК близок, а абсолютные их значения несколько различаются (более высокие концентрации отмечены в ЗЦК). Для обоих динамических образований была характерна двухвершинная кривая изменения содержания $P_{\text{ВОВ}}$, на которой выделялись два максимума – в холодный период года (март, апрель) и тёплый (июль – сентябрь).

При этом его максимальное содержание в июле и августе зарегистрировано в аномальном 1992 г. [21] и не является типичным. Поэтому первый максимум, как правило, более выражен по сравнению со вторым. Для районов СЗЧМ также характерны два максимума во внутригодовом распределении концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ – весенний (апрель, май) и летний (август, сентябрь). Весной эти максимумы наиболее выражены в районе влияния рек.

Для исследуемых районов наблюдалось хорошее соответствие в характере внутригодовых изменений концентраций $P_{\text{ВОВ}}$ (рис. 2), $C_{\text{ВОВ}}$ и хл «а» [3, 7, 8] Это позволяет считать, что сезонная изменчивость в развитии фитопланктона оказывает существенное влияние на внутригодовое изменение концентрации $P_{\text{ВОВ}}$.

Межгодовая изменчивость содержания $P_{\text{ВОВ}}$. Исползованные для анализа внутригодовых изменений величины содержания $P_{\text{ВОВ}}$ дополнены значениями, рассчитанными по данным спутниковых (радиометр CZCS, 1979 – 1986 гг.) наблюдений концентрации хл «а». Обобщение измеренных и рассчитанных значений сезонных концентраций $P_{\text{ВОВ}}$ позволило получить их достаточно представительное межгодовое распределение в поверхностном слое в различных районах моря.

В глубоководной части моря (ЗЦК) в зимне-весенний период в течение 1979 – 1986 гг. выявлено увеличение концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ (рис. 3 а).

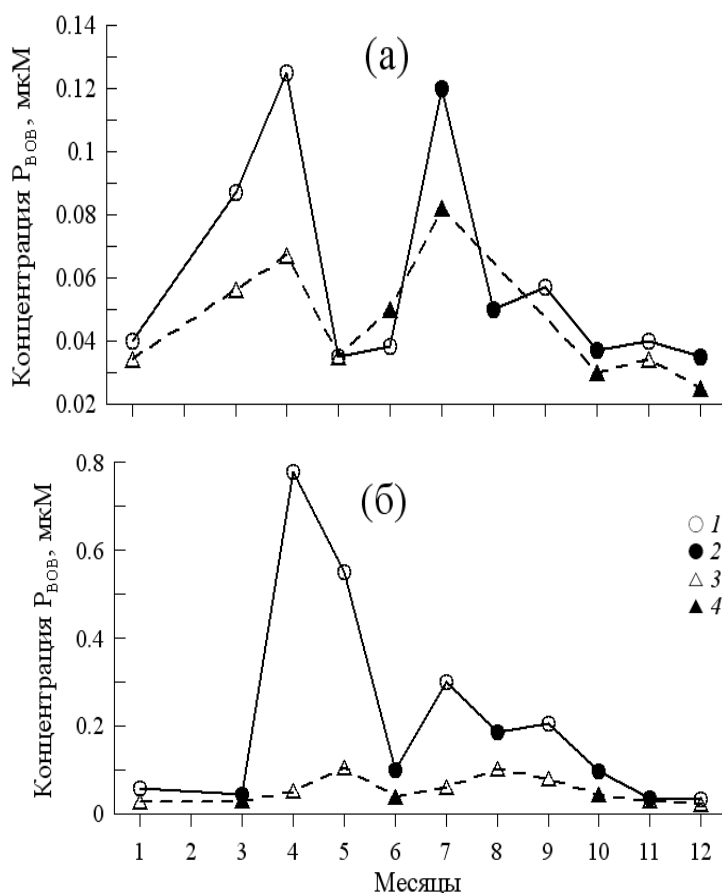


Рис. 2 Изменения среднемесячных измеренных (1, 3) и рассчитанных (2, 4) значений концентраций $P_{\text{сom}}$ в поверхностном слое западного циклонического (1, 2) и «севастопольского» антициклонического (3, 4) круговоротов – (а), в западном (1, 2) и центральном (3, 4) районах СЗЧМ – (б) с января по декабрь.

Fig. 2 Variations of monthly average measured (1, 3) and calculated (2, 4) values of P_{som} concentrations in the surface layer of the western cyclonic (1, 2) and «Sevastopol» anticyclonic (3, 4) circulations – (a), in the western and northern (1, 2) and central (3, 4) areas of the north-western part of the Black Sea – (b) from January to December

Зимние температуры воздуха в эти годы также повышались [15]. Кроме того, с конца 1970-х до середины 1980-х годов в глубоководной части моря отмечено значительное увеличение нитратов в их глубинном максимуме, который в начале 1980-х годов поднялся до глубин, совпадающих с изотермическим слоем [20].

Такие изменения способствовали более интенсивному и продолжительному зимне-весеннему развитию фитопланктона. Характер изменений

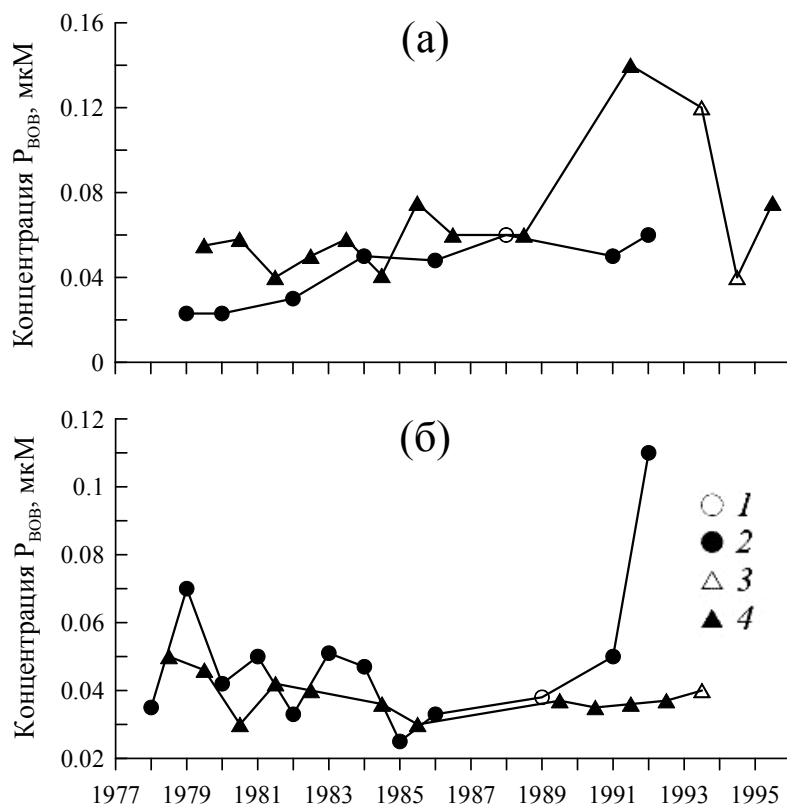


Рис. 3 Межгодовые изменения измеренных (1, 3) и рассчитанных (2, 4) значений концентраций $P_{\text{сom}}$ в западном циклоническом круговороте в зимний (1, 2) и весенний (3, 4) – (а), в летний (1, 2) и осенний (3, 4) – (б) периоды

Fig. 3 Intra-annual variations of measured (1, 3) and calculated (2, 4) values of P_{som} concentrations in the western cyclonic circulation in winter (1, 2) and spring (3, 4) – (a), in summer (1, 2) and autumn (3, 4) – (b)

концентрации P_{BOB} в летне-осенний сезон в течение 1979 – 1986 гг. был примерно одинаков (рис. 3 б). Его концентрации в этом временном интервале в среднем понижались. Их межгодовой разброс объясняется нерегулярностью полученных данных спутниковых наблюдений концентрации хл «а» в отдельные месяцы и сезоны, используемых для расчётов концентрации P_{BOB} .

Во второй половине 80-х – начале 90-х гг. содержание P_{BOB} в зимний сезон изменялось незначительно, а в весенне-летний оно увеличивалось, достигнув максимума в 1991 – 1993 гг. Аналогичный характер межгодовой изменчивости летних значений концентрации хл «а» в глубоководной части моря отмечался и в [3], а изменчивости концентраций C_{BOB} и N_{BOB} в весенне-летне-осенний периоды – в [7]. Увеличение концентраций этих компонентов BOB в начале 90-х гг. в весенне-летний период совпало с событием Эль-Ниньо, для которого в 1992 и 1993 гг. были характерны холодные зимы [5, 6], способствующие интенсификации вертикальных потоков водных масс и увеличению поступления нитратов из глубинных слоёв в слой фотосинтеза. В эти годы в море отмечено интенсивное распространение гребневика *Mnemiopsis leidyi* и связанное с этим интенсивное развитие фитопланктона [21]. Осенью концентрации компонентов BOB (в том числе P_{BOB}) изменялись незначительно [7].

В СЗЧМ в зимне-весенний период на распределение содержания компонентов BOB оказывают влияние региональные гидрометеорологические условия и объёмы стока рек, изменения которых, в свою очередь, обусловлены изменчивостью крупномасштабных процессов в системе океан – атмосфера [5, 6]. Механизм такого влияния заключается в том, что в годы Эль-Ниньо в зимний период ослабляется циклоническая активность над Центральной и Южной Европой. Устойчивая антициклональная погода, характеризующаяся пониженными осадками и температурой воздуха, приводит к снижению объёмов стоков рек и уменьшению площади зоны их влияния на водные массы в

СЗЧМ. Пониженная температура воды ухудшает условия развития фитопланктона. В период весеннего половодья влияние речного стока на СЗЧМ возрастает. При этом в зоне смешения речных и морских вод развивается фитопланктон, интенсивность продуцирования которого зависит от количества поступающих минеральных соединений азота и фосфора (определяемого, главным образом, объёмом речного стока), температуры воды и освещённости. В нормальные зимы (отсутствие Эль-Ниньо) усиливается циклоническая активность над площадями водосборов рек, наблюдается увеличение речных стоков и площади зоны их влияния на водные массы в СЗЧМ. В зоне трансформации речных вод происходит более интенсивное развитие фитопланктона, приводящее к повышению содержания BOB.

Поэтому для анализа межгодовых изменений содержания P_{BOB} в зимне-весенний период использованы значения аномалий объёмов стока Дуная и температуры воздуха [5, 6]. Умеренно тёплые зимы (кроме зимы 1980 г.) и положительные аномалии стока Дуная в 1979 – 1982 гг. способствовали интенсивному развитию фитопланктона в районе влияния рек в зимне-весенний период. Концентрация хл «а» в эти годы была выше средней [5, 6] и отмечалось увеличение концентрации P_{BOB} (рис. 4а, б).

В центральном районе СЗЧМ, который не был подвержен влиянию речного стока в этот период, также наблюдалось увеличение концентрации P_{BOB} и хл «а». После заметного уменьшения этих показателей в районе влияния рек в 1983 г. отмечалось их значительное увеличение в 1986 и 1988 гг. В центральном районе в зимний период концентрации P_{BOB} и хл «а» были выше средних концентраций только в 1986 г. Весной после 1983 г. концентрации этих показателей уменьшались, а минимальные значения отмечены в 1989 г., когда и сток Дуная был низким.

В районе влияния рек весной того года наблюдалась высокая пространственная изменчивость содержания P_{BOB} .

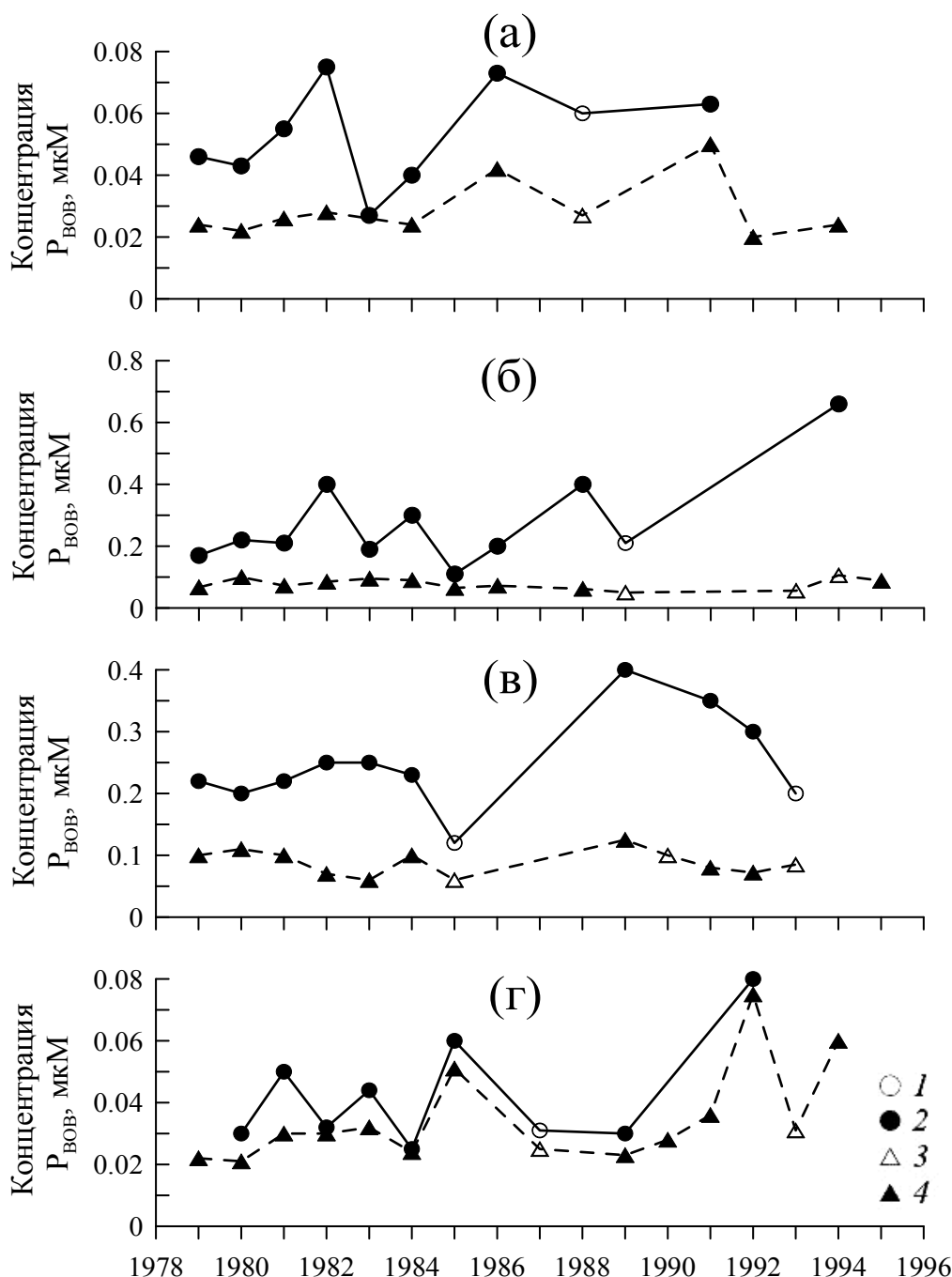


Рис. 4 Межгодовые изменения измеренных (1, 3) и рассчитанных (2, 4) значений концентраций P_{BOV} в северном и западном (1, 2) и центральном (3, 4) районах СЗЧМ в зимний (а), весенний (б), летний (в) и осенний (г) периоды

Fig. 4 Intra-annual variations of measured (1, 3) and calculated (2, 4) values of P_{som} concentrations in the northern and western (1, 2) and central (3, 4) areas of the north-western part of the Black Sea in winter (a), spring (b), summer (c), and autumn (d)

Вблизи устья Дуная (на расстоянии примерно 6 миль) его измеренная концентрация равнялась 1.54 μM , а на таком же расстоянии от входа в Днепро-Бугский лиман

0.21 μM .

В период 1991 – 1995 гг., характеризующийся долгоживущим событием Эль-Ниньо

– Южное колебание с несколькими фазами развития и затухания, выделялись холодные зимы 1992 и 1993 гг., когда сток Дуная был низким. Проведенные зимой 1992 г. только в центральном районе измерения выявили низкие концентрации хл «а» и P_{BOB} . Весной 1993 г. концентрации этих показателей повысились, но всё же оставались ниже средних значений. Умеренно тёплые зимы 1994 и 1995 гг. и близкие к средним значения объёма стока Дуная способствовали более интенсивному весеннему развитию фитопланктона и заметному повышению содержания P_{BOB} в СЗЧМ по сравнению с предшествующими годами [5, 6].

В летний период можно выделить два временных интервала – 1979 – 1985 и 1985 – 1992 гг., отличающихся различным содержанием и изменчивостью P_{BOB} (рис. 4 в) и хл «а» [9]. Для первого интервала характерно уменьшение их концентраций в обоих районах к 1985 г. При этом характер изменения концентраций P_{BOB} и хл «а» был похожим, хотя расчёты концентрации P_{BOB} проводились как по $C_{\text{ХЛ}}$, так и по C_{BOB} . Характер изменения концентрации хл «а» (особенно в центральном районе) хорошо соответствовал летнему температурному режиму [15]. В 1979 – 1981 гг. лето было умеренно тёплым, а концентрации P_{BOB} и хл «а» – повышенными по сравнению с последующими годами. В 1982 – 1984 гг. лето было умеренно холодным и отмечено понижение этих концентраций, а холодным летом 1985 г. они ещё более уменьшились.

Во втором временном интервале (1985 – 1992 гг.) повышенные значения концентраций P_{BOB} и хл «а» в обоих районах СЗЧМ отмечены в 1989 и 1990 гг., когда летние температуры воздуха были близки к климатическим. Возможной причиной таких высоких концентраций являлась наблюдаемая в эти годы летом антициклоническая циркуляция, выносящая обогащённые биогенными элементами и ВОВ трансформированные речные воды в центральный район шельфа [9]. Относительно высокие концентрации P_{BOB} и хл «а» наблюдались в районе влияния рек тёплым летом в аномаль-

ном 1992 г. после холодной зимы того года. В 1993 г. лето было умеренно холодным, и измеренные концентрации P_{BOB} и хл «а» в районе влияния рек уменьшились, в центральном районе несколько увеличились, а их значения оказались близкими к концентрациям в начальный период наблюдений (1979 – 1981 гг.).

В осенний период можно выделить два временных интервала (1979 – 1985, 1987 – 1992 гг.) с различным характером межгодовой изменчивости концентраций P_{BOB} (рис. 4 г) и хл «а» [9]. В течение 1979 – 1985 гг. в обоих районах было отмечено увеличение этих концентраций, достигшее максимальных значений в октябре 1985 г. Возможная причина таких высоких концентраций объяснялась интенсивным развитием фитопланктона в связи с поступлением в центральный район шельфа трансформированных речных вод [10]. Возможно также, что холодные зима и лето того года не способствовали активному развитию фитопланктона в эти сезоны и, следовательно, истощению запасов биогенных элементов. Пониженные значения концентраций P_{BOB} и хл «а» в начале декабря 1987 г. объяснялись низкой температурой воздуха и воды [1, 10], а в 1989 и 1993 гг. – расположением станций наблюдений на южном участке СЗЧМ, который находился под влиянием вод открытого моря. После 1989 г. в обоих районах наблюдался рост концентраций компонентов ВОВ (максимальные значения зарегистрированы в 1992 г.).

Заключение. 1. Для исследованных районов Чёрного моря выявлены основные особенности пространственного распределения содержания P_{BOB} и получены статистические оценки его сезонных изменений. По уравнениям регрессионной зависимости между одновременно измеренными концентрациями P_{BOB} , C_{BOB} , N_{BOB} и хл «а» рассчитаны оценки содержания P_{BOB} в периоды отсутствия наблюдений в течение 1979 – 1995 гг., что позволило получить представление о характере внутригодовой и межгодовой изменчивости его концентраций. **2.** Повышенные концентрации P_{BOB} (по результатам измерений) наблюдались во все сезоны в

районе влияния рек в СЗЧМ и в зимне-весенний период в центральной области стационарного западного циклонического круговорота, а наибольшие сезонные изменения концентрации $R_{\text{ВОВ}}$ выявлены в районе влияния рек, где в весенний период его содержание по сравнению с другими периодами было максимальным. Пониженные концентрации зарегистрированы в центральном районе СЗЧМ в зимний, весенний и осенний периоды, в глубоководной части моря – в летний и осенний. Пространственное распределение концентрации $R_{\text{ВОВ}}$ совпадало с распределениями концентраций $C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$ и хл «а». 3. Используемые для оценки биохимического состояния ВОВ средние величины отношений C/P и N/P во всех исследованных районах моря в годовом цикле оказались значительно выше стехиометрического соотношения 106:16:1 (по сравнению с величиной отношения C/N), что можно объяснить более быстрым выведением фосфора из детрита [18]. 4. Внутригодовое изменение концентраций $R_{\text{ВОВ}}$ в глубоководном и шельфовом (СЗЧМ) районах моря согласуется с изменчивостью концентраций $C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$ и хл «а» и связано с сезонными циклами развития фитопланктона. 5. В 1980-е гг. в глубоководной части моря в зимне-весенний период содержание $R_{\text{ВОВ}}$ увеличилось в 1.2 – 2 раза, что было обу-

словлено интенсивным и продолжительным цветением фитопланктона. В летне-осенний период уменьшение его концентрации (~ в 1.5 раза) отмечено в середине этого временного интервала (1985, 1986 гг.). В начале 90-х годов в весенне-летний период концентрация $R_{\text{ВОВ}}$ значительно увеличилась (в 3 раза) по сравнению с серединой 80-х годов. Возможной причиной такого увеличения могли быть холодные зимы 1992 и 1993 гг. во время активной фазы события Эль-Ниньо 1991 – 1995 гг., способствующие интенсификации вертикальных потоков водных масс и увеличению количества биогенных элементов в слое фотосинтеза. 6. В СЗЧМ на межгодовые изменения концентрации $R_{\text{ВОВ}}$ в зимне-весенний период заметное влияние оказывали региональные гидрометеорологические условия и объёмы стока рек. В летне-осенний период эти изменения в значительной степени зависели от температурного режима, а в центральном районе также и от поступления обогащённых биогенными элементами трансформированных речных вод.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность З. П. Бурлаковой и Л. В. Еремеевой за полезные обсуждения полученных результатов и В. В. Суслину за предоставленные данные спутниковых наблюдений концентрации хл «а».

1. Бурлакова З. П., Еремеева Л. В., Коновалов С. К. Сезонная и пространственная изменчивость содержания взвешенного органического вещества в деятельном слое Черного моря // Морск. гидрофиз. журн. – 1998. – № 5. – С. 30 – 62.
2. Бурлакова З. П., Еремеева Л. В., Крупаткина Д. К., Чистенко В. М. Распределение и элементный состав взвешенного вещества в западной и северо-западной частях Чёрного моря // Процессы формирования и внутригодовой изменчивости гидрофизических и гидрохимических полей Чёрного моря. – Севастополь: МГИ АН УССР, 1988. – С. 162 – 172.
3. Ведерников В. И., Демидов А. Б. Первичная продукция и хлорофилл в глубоководных районах Черного моря // Океанология. – 1993. – 33, № 2. – С. 229 – 235.
4. Востоков С. В. Динамика взвешенного органического вещества в Черном море в период зим-

- не-весеннего цветения вод фитопланктоном // Изменчивость экосистемы Черного моря. Естественные и антропогенные факторы. – М.: Наука, 1991. – С. 262 – 271.
5. Воскресенская Е. Н., Кукушкин А. С., Бурлакова З. П., Еремеева Л. В. Влияние крупномасштабных атмосферных процессов на формирование гидрофизических и гидробиологических полей в северо-западной части Черного моря в зимний период // Морск. экол. журн. – 2004. – 3, № 3. – С. 29 – 36.
6. Воскресенская Е. Н., Кукушкин А. С., Михайлова Н. В. Особенности изменчивости распределений прозрачности и содержания взвешенного вещества в северо-западной части Черного моря в весенний период в связи с крупномасштабными процессами в системе океан – атмосфера // Метеорология и гидрология. – 2011. – № 1. – С. 64 – 77.

7. Кукушкин А. С. Многолетняя и сезонная изменчивость содержания взвешенного органического вещества в верхнем слое в глубоководных районах Черного моря / Устойчивость и эволюция океанологических характеристик экосистемы Черного моря. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. – С. 143–159.
8. Кукушкин А. С., Агафонов Е. А., Бурлакова З. П., Еремеева Л. В. Изменчивость прозрачности и содержания взвешенного вещества в поверхностном слое северо-западной части Черного моря // Океанология. – 2004. – **44**, № 6. – С. 870–881.
9. Кукушкин А. С., Бурлакова З. П., Еремеева Л. В. Изменчивость распределения прозрачности и содержания взвешенного вещества в поверхностном слое вод северо-западной части Черного моря в летний период // Океанология. – 2006. – **46**, № 6. – С. 834–845.
10. Кукушкин А. С., Бурлакова З. П., Еремеева Л. В. Особенности распределения прозрачности и содержания взвешенного вещества в поверхностном слое северо-западной части Черного моря в осенний период // Океанология. – 2008. – **48**, № 3. – С. 333–344.
11. Люцарев С. В., Миркина С. Д. Определение общего фосфора во взвешенном веществе / Методы гидрохимических исследований океана. М.: Наука, 1978. – С. 175–179.
12. Люцарев С. В., Шанин С. С. Особенности распределения взвешенного органического углерода в толще вод Черного моря // Океанология. – 1996. – **36**, № 4. – С. 538–542.
13. Романкевич Е. А. Геохимия органического вещества в океане. М.: Наука, 1977. – 256 с.
14. Румишинский Л. З. Элементы теории вероятности. М.: Наука, 1970. – 256 с.
15. Титов В. Б. О связи между сезонными атмосферными условиями и параметрами гидрологической структуры вод в северо-восточной части Черного моря // Океанология. – 2003. – **43**, № 3. – С. 347–355.
16. Якушев Е. В., Коржикова Л. И. Черты вертикального распределения взвешенного фосфора в Черном море // Современное состояние экосистем Черного моря. – М.: Наука, 1987. – С. 49–54.
17. Coban-Yildiz Y., Tugrul S., Edires D. et al. A comparative study on the abundance and elemental composition of POM in the three interconnected basins: the Black, the Marmara and Mediterranean Seas // Mediter. Mar. Sci. – 2000. – **1**, 1. – P. 51–63.
18. Copin-Montegut C., Copin-Montegut G. Stoichiometry of carbon, nitrogen and phosphorus in marine particulate matter // Deep-Sea Res. – 1983. – **30**, № 1 A. – P. 31–46.
19. Hobson Z. A., Menzel D. W., Barber R. T. Primary productivity and sizes of pools of organic carbon in the mixed layer of the ocean // Mar. Biol. – 1973. – **19**, № 4. – P. 298–306.
20. Konovalov S. K., Murray J. W. Variations in the chemistry of the Black Sea on a time scale of decades (1960–1995) // J. Mar. Syst. – 2001. – **31**. – P. 217–243.
21. Yilmaz A., Yunev O., Vedernikov V. et al. Unusual temporal variations in the spatial distribution of chlorophyll-a in the Black Sea during 1990–1996 // Ecosystem modeling as a management tool for the Black Sea. – Eds. Ivanov L. I. and Oguz. T. – Dordrecht: Kluwer, 1998. – **1**. – P. 105–120.

Поступила 09 ноября 2012 г.

После доработки 27 мая 2013 г.

В окончательном виде 09 сентября 2013 г.

Просторово-часова мінливість вмісту звязаного органічного фосфору у верхньому шарі західної глибоководної та північно-західної шельфової частинах Чорного моря. О. С. Кукушкин. За даними багаторічних (1985 – 1994 рр.) спостережень вмісту звязаної органічної речовини розглянута сезонна мінливість просторового розподілу концентрації звязаного органічного фосфору ($P_{\text{ЗОР}}$) і стосунків концентрацій компонентів цієї речовини (вуглець, азот, фосфор) і хлорофілу «а» в поверхневому шарі та шарі фотосинтезу в західному глибоководному та північно-західному шельфовому районах Чорного моря. По регресійних рівняннях розраховані оцінки сезонного змісту $P_{\text{ЗОР}}$ в поверхневому шарі моря і за їх обліком проаналізовані його внутрішньорічні і міжрічні зміни в період 1979 – 1995 рр. Показано, що сезонні міжрічні зміни концентрації $P_{\text{ЗОР}}$ в цих районах в основному визначаються кліматичними умовами, а в північно-західному шельфовому районі вони також залежать від зміни об'ємів річкових стоків і масштабів їх розповсюдження на шельфі.

Ключові слова: Чорне море, звязаний органічний фосфор, хлорофіл «а», просторовий розподіл, мінливість.

Spatial-temporal variability of suspended organic phosphorus content in the surface layer of the western deep-sea and north-western shelf zones of the Black Sea. A. S. Kukushkin. Based on the data of multi-year (1985 – 1994) observations of suspended organic matter considered is the seasonal variability of spatial distribution of suspended organic phosphorus (P_{som}) concentration and its concentrations' relations (carbon, nitrogen, phosphorus) and chlorophyll «a» in the surface layer and photosynthesis layer in the western deep-sea and north-western shelf zones of the Black Sea. According to regression equations calculated are the values of seasonal content of P_{som} in the surface layer of the sea and with their account its intra- and inter-annual variations in 1979 – 1995 are analyzed. It is shown that seasonal inter-annual variations of P_{som} concentration in these sea areas are generally determined with climate conditions and in the north-western shelf zone they also depend on variations of the river flow capacities and range of their distribution on the shelf.

Keywords: Black Sea, suspended organic phosphorus, chlorophyll «a», spatial distribution, variability.