

УДК 551.464(262.5)

ИЗМЕНЧИВОСТЬ СОДЕРЖАНИЯ ВЗВЕШЕННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ФОСФОРА В ВЕРХНЕМ СЛОЕ ГЛУБОКОВОДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

© 2015 г. А. С. Кукушкин¹, А. В. Пархоменко²¹Морской гидрофизический институт НАН Украины, Севастополь²Институт биологии южных морей НАН Украины, Севастополь

e-mail: kukushkinas@mail.ru, parkhomenko.al@yandex.ua

Поступила в редакцию 26.02.2014 г.

По данным многолетних (1985–1994 гг.) наблюдений рассмотрены особенности сезонной изменчивости пространственного и вертикального распределений концентрации взвешенного органического фосфора ($P_{\text{ВОВ}}$) в верхнем слое глубоководной части Черного моря. Получены статистические оценки сезонных изменений содержания $P_{\text{ВОВ}}$ и отношений концентраций компонентов взвешенного органического вещества (углерод, азот, фосфор) и хлорофилла “а” в поверхностном слое и зоне фотосинтеза. По регрессионным уравнениям и данным по содержанию хлорофилла “а”, рассчитанного на основе экспериментальных и спутниковых наблюдений в периоды 1979–1986 и 1998–2010 гг., получены оценки многолетней изменчивости содержания $P_{\text{ВОВ}}$ в этих слоях моря. Показано, что внутригодовая и межгодовая изменчивость концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ в открытой части Черного моря тесно связана с изменениями биомассы фитопланктона и определяется, с одной стороны, долговременной цикличностью климатических условий и связанных с ними изменениями гидрологического режима, а с другой, перестройкой планктонного сообщества в аэробной зоне Черного моря.

DOI: 10.7868/S0030157415020094

ВВЕДЕНИЕ

Для понимания процессов, формирующих и поддерживающих устойчивое функционирование морских экосистем, необходимы исследования количественного и качественного состава взвешенного органического вещества (ВОВ) и отдельных его компонентов во времени и пространстве. Количественные оценки концентрации взвешенного органического углерода ($C_{\text{ВОВ}}$), азота ($N_{\text{ВОВ}}$) и фосфора ($P_{\text{ВОВ}}$) представляют несомненный интерес не только при исследовании трофики и гидрохимической структуры, но и биогеохимических циклов углерода, азота и фосфора в морских экосистемах [1]. Кроме этого, изучение механизма связей между изменениями климатических условий, ВОВ и его компонентами и другими структурно-функциональными показателями фитопланктона за длительные периоды времени необходимо для оценки и прогнозирования экологического состояния морских экосистем.

В последние два десятилетия в шельфовой и глубоководной частях Черного моря активно проводились исследования пространственно-временной изменчивости концентрации компонентов ВОВ ($C_{\text{ВОВ}}$ и $N_{\text{ВОВ}}$) [2, 3, 6–8, 10, 14]. Однако, из-за относительно небольшого количества экспериментальных данных по измерению концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ и неравномерного их распределения по годам и сезонам, сведения о простран-

ственно-временной изменчивости его концентрации в Черном море имеют эпизодический характер [2, 23, 24]. Очевидно, что крайне ограниченные возможности экспедиционных исследований, а также трудоемкость прямых определений концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ не позволяют в ближайшее время надеяться на пополнение экспериментальных данных. Компенсировать их отсутствие можно расчетным путем с использованием корреляционных связей между одновременно измеренными концентрациями $P_{\text{ВОВ}}$, $C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$ и хлорофилла “а”.

Цель настоящей работы – анализ и обобщение экспериментальных и расчетных данных, характеризующих пространственное и вертикальное распределение концентрации $P_{\text{ВОВ}}$, а также исследование внутригодовой и межгодовой ее изменчивости в поверхностном слое (0–5 м) и в слое фотосинтеза глубоководной области Черного моря.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использовали экспериментально измеренные концентрации $P_{\text{ВОВ}}$, $C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$ и хлорофилла “а” ($C_{\text{ХЛ}}$, хл “а”) из банка данных отдела экологической физиологии водорослей Института биологии южных морей и Морского гидрофизического института НАН Украины, полученные в открытой части Черного моря с 1978 г. по 1995 г. в 29 научных рейсах на 502 станциях. Из них, од-

Таблица 1. Параметры уравнений регрессии ($y = ax + b$), связывающие концентрацию взвешенного органического фосфора ($P_{\text{ВОВ}}$), с концентрацией хл “а” ($C_{\text{ХЛ}}$), взвешенного органического углерода ($C_{\text{ВОВ}}$) и азота ($N_{\text{ВОВ}}$) в поверхностном слое (ПС) и в слое фотосинтеза (ФС) глубоководной части Черного моря

Параметры уравнения			Зима		Весна		Лето		Осень	
y	x		ПС	ФС	ПС	ФС	ПС	ФС	ПС	ФС
$P_{\text{ВОВ}}$	$C_{\text{ХЛ}}$	a	0.024	0.02	0.082	0.069	0.11	0.08	0.043	0.081
		b	0.014	0.017	0.024	0.02	0.012	0.01	0.018	0.009
		r	0.76	0.74	0.7	0.61	0.96	0.86	0.73	0.8
		σ	0.018	0.018	0.029	0.026	0.013	0.025	0.004	0.015
		N	88	129	59	122	14	47	24	47
$P_{\text{ВОВ}}$	$C_{\text{ВОВ}}$	a	0.0041	0.0036	0.0071	0.005	0.0033	0.0028	0.0013	0.0013
		b	-0.053	0.001	-0.027	0.0012	-0.004	0.013	0.0181	0.001
		r	0.6	0.71	0.85	0.83	0.92	0.83	0.51	0.81
		σ	0.022	0.017	0.032	0.02	0.013	0.013	0.005	0.013
		N	91	181	67	242	24	91	25	115
$P_{\text{ВОВ}}$	$N_{\text{ВОВ}}$	a	0.033	0.03	0.042	0.032	0.018	0.016	0.017	0.016
		b	0.0003	0.003	-0.018	0.005	0.0094	0.018	0.01	0.016
		r	0.62	0.79	0.83	0.82	0.9	0.75	0.87	0.73
		σ	0.022	0.016	0.033	0.021	0.014	0.016	0.012	0.015
		N	91	181	67	228	24	100	43	126

Примечание. N – количество пар измеренных параметров.

современные измерения концентраций $P_{\text{ВОВ}}$, $C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$ и хл “а”, проведены в 10 рейсах на 51 станции с 1985 по 1994 гг. Также использовали среднегодовые значения по биомассе фитопланктона [11] и зимней температуре поверхностного слоя моря [30] и относительной прозрачности (глубины видимости белого диска) морской воды [9].

Методика отбора проб и определения в них содержания компонентов ВОВ подробно описана в работах [2, 3, 7]. Концентрация $P_{\text{ВОВ}}$ определялась сжиганием взвеси на стекловолокнистых фильтрах GF/F в плаве кислых солей [13]. Концентрация хл “а” определялась флюориметрическим методом. Кроме этого были использованы рассчитанные концентрации хл “а”, полученные на основе спутниковых наблюдений (радиометр CZCS за 1979–1986 гг. и SeaWiFS за 1998–2010 гг. [27]). Сравнение одновременно измеренных среднемесячных концентраций хл “а”, полученных по судовым и спутниковым наблюдениям в одних и тех же районах моря, показало их удовлетворительное сходство (различие составило 10–30%).

Экспериментально измеренные концентрации $P_{\text{ВОВ}}$, имеющиеся в базе данных, в основном были получены в западной и центральной частях Черного моря, что не позволяет получить статистически достоверные оценки пространственно-временной ее изменчивости в поверхностном слое и слое фотосинтеза по всей глубоководной области моря. Компенсировать их отсутствие можно используя расчетный метод, основанный на корреляционных связях между одновременно измеренными концентрациями $P_{\text{ВОВ}}$, $C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$ и хл “а” [8]. Уравнения регрессий рассчитывали по экспериментальным данным перечисленных выше параметров в те годы, когда отсутствовали

аномальные изменения их концентраций. Степень связи между переменными в линейных уравнениях регрессии вида $y = ax + b$, где y – $P_{\text{ВОВ}}$, x – $C_{\text{ХЛ}}$, $C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$ оценивали по коэффициенту корреляции (r), его достоверности (p) и стандартной ошибке регрессии (σ) [19] (табл. 1). Значения коэффициентов корреляции r (0.64–0.7) для приведенных зависимостей оказались достоверными при высоком уровне значимости ($p < 0.001$).

В качестве индикатора трансформации ВОВ использовали атомарные отношения концентраций $C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$ и $P_{\text{ВОВ}}$ [18]. Средние значения этих отношений в фитопланктоне в присутствии необходимого для его роста количества биогенных элементов в поверхностных морских водах приближаются к оптимальным соотношениям, соответствующих редфилдовскому 106 : 16 : 1 [18, 25]. Соотношение детритной и фитопланктонной фракций в ВОВ оценивали по отношению концентраций $C_{\text{ВОВ}}$ и хл “а” (далее $C/\text{хл}“а”$) [26].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сезонная изменчивость пространственного и вертикального распределения концентрации $P_{\text{ВОВ}}$. Зимой (в первой половине марта 1988 г.) в западной и центральной глубоководных областях моря (рис. 1а) во время массового развития фитопланктона в поверхностном слое наблюдались повышенные значения концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ (0.05–0.11 мкМ), полученные южнее Крыма в районе стационарного циклонического круговорота. В то же время, пространственное распределение рассчитанных концентраций $P_{\text{ВОВ}}$, по измеренной в 1988–1992 гг. концентрации хл “а” в поверхностном слое, охватывающее всю глубоководную

Таблица 2. Сезонные изменения одновременно измеренных концентраций компонентов ВОВ в поверхностном слое (ПС) и в слое фотосинтеза (ФС) в глубоководной части Черного моря

Сезон	Слой	N/n	$C_{\text{ВОВ}}, \text{мкМ}$	$N_{\text{ВОВ}}, \text{мкМ}$	$P_{\text{ВОВ}} \times 10^{-2}, \text{мкМ}$	$C_{\text{ХЛ}}, \text{мг/м}^3$	$C : N : P$	$C/\text{хл} "а"$
Зима	ПС	2/80	14.8 ± 4.0	1.66 ± 0.52	5.6 ± 3.5	1.64 ± 0.87	106 : 11.9 : 0.4	125 ± 81
	ФС	2/31	12.3 ± 3.6	1.44 ± 0.55	4.4 ± 2.3	1.55 ± 0.88	106 : 12.4 : 0.38	121 ± 51
Весна	ПС	4/30	13.9 ± 6.8	2.03 ± 1.34	7.5 ± 6.7	0.61 ± 0.42	106 : 15.5 : 0.57	392 ± 288
	ФС	4/29	9.9 ± 2.8	1.5 ± 0.58	5.0 ± 2.1	0.43 ± 0.17	106 : 16 : 0.54	244 ± 80
Лето	ПС	4/11	13.3 ± 5.1	2.1 ± 1.39	3.9 ± 1.7	0.18 ± 0.06	106 : 16.7 : 0.31	732 ± 215
	ФС	3/10	9.6 ± 2.0	1.35 ± 0.26	4.1 ± 2.0	0.46 ± 0.17	106 : 14.9 : 0.45	257 ± 62
Осень	ПС	2/3	9.4 ± 2.3	1.19 ± 0.43	3.7 ± 0.6	0.32 ± 0.08	106 : 13.4 : 0.42	383 ± 187
	ФС	1/1	6.8	1.25	2.3	0.2	106 : 19.5 : 0.36	384

Примечание. N – количество экспедиционных рейсов, n – количество станций.

часть моря, было более однородным (область повышенной концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ в этом распределении отсутствовала) (рис. 16). В слое фотосинтеза распределение измеренных и рассчитанных значений концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ хорошо совпадало с их распределениями в поверхностном слое, а небольшое различие наблюдалось в их абсолютных значениях (табл. 2). Отмечается также хорошее совпадение характера пространственного распределения концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ и одновременно с ней измеренных концентраций $C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$ и хл "а" [8].

Из анализа величин атомарного отношения между концентрациями основных компонентов ВОВ следует, что средние величины отношений C/P (265–279) и N/P (35–38) в поверхностном слое и в слое фотосинтеза глубоководной области моря были значительно выше их оптимального соотношения 106 : 16 : 1. Относительно низкая средняя величина отношения $C/\text{хл} "а"$, равная 125, и повышенные величины отношения C/N в поверхностном слое (8.9), и в слое фотосинтеза (8.5) свидетельствуют о преобладании фитопланктона в составе ВОВ. Это подтверждается и средними значениями биомассы фитопланктона, рассчитанными по концентрации хл "а" на сухую массу ($C_{\text{ХЛ}} \times 50$ [3]) 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. Высокие значения отношений C/P и N/P , можно, объяснить быстрым выведением фосфора из детрита [25].

Анализ вертикальных профилей среднемесячных значений концентраций $P_{\text{ВОВ}}$, $C_{\text{ВОВ}}$ и хл "а", полученных по результатам их одновременных измерений показал, что в зимний период (начало марта 1988 г.) при отсутствии сезонного термоклина и усилении вертикального обмена в надпикноклинном слое отмечались повышенные концентрации $P_{\text{ВОВ}}$, $C_{\text{ВОВ}}$ и хл "а" и их равномерное вертикальное распределение (рис. 2а). Высокие концентрации хл "а" (2.0–2.3 мг/м³) и низкие величины отношения $C/\text{хл} "а"$ (~90) указывают на значительный вклад фитопланктона в составе

ВОВ. В слое оксиклина с увеличением глубины концентрация $P_{\text{ВОВ}}$ и $C_{\text{ВОВ}}$ равномерно снижалась и на глубине 100 м достигала минимальных значений. Величины отношений $C/\text{хл} "а"$ и C/P в этом слое соответственно возрастали до 300 и 350, что, вероятнее всего, связано с увеличением доли детрита и снижением концентрации фосфора в составе ВОВ, обусловленное процессом его выведения и минерализации. Следует отметить, что характер вертикального распределения концентраций компонентов ВОВ и их соотношений в слое 0–100 м в первой половине января [3] и в начале марта 1988 г. в целом были близки. В то же время, абсолютные значения концентраций компонентов ВОВ, полученные в первой половине января, были ниже, а величины их отношений – выше по сравнению со значениями этих показателей, полученными в начале марта.

В весенний период пространственные распределения измеренных (рис. 1в) и рассчитанных (рис. 1г) концентраций $P_{\text{ВОВ}}$ в целом хорошо согласуются. Повышенная его концентрация, а также концентрации $C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$ и хл "а" [8], отмечались в северной части моря. В среднем измеренная и рассчитанная концентрация $P_{\text{ВОВ}}$ в поверхностном слое глубоководной области моря по сравнению с зимним периодом была в 1.3 раза выше (табл. 2). Распределение концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ в слое фотосинтеза совпадало с распределением этого показателя в поверхностном слое, а средневзвешенная его концентрация в этом слое была в 1.3–1.5 раза меньше, чем в поверхностном слое. Величины отношений C/P и N/P были заметно ниже. Это, а также близкие к оптимальному атомарному соотношению (106 : 16) средние значения отношения C/N , равные 6.6–6.8, свидетельствует о низкой степени биохимической трансформации детрита. Биомасса фитопланктона по сравнению с зимним периодом снизилась и в среднем изменялась в интервале от 17 до 25 мгС/м³, а содержание фитопланктона в $C_{\text{ВОВ}}$ составляло 12–18%. На относительно низкую долю живого вещества в ВОВ указывали и высокие средние значения отношения $C/\text{хл} "а"$ (244–392).

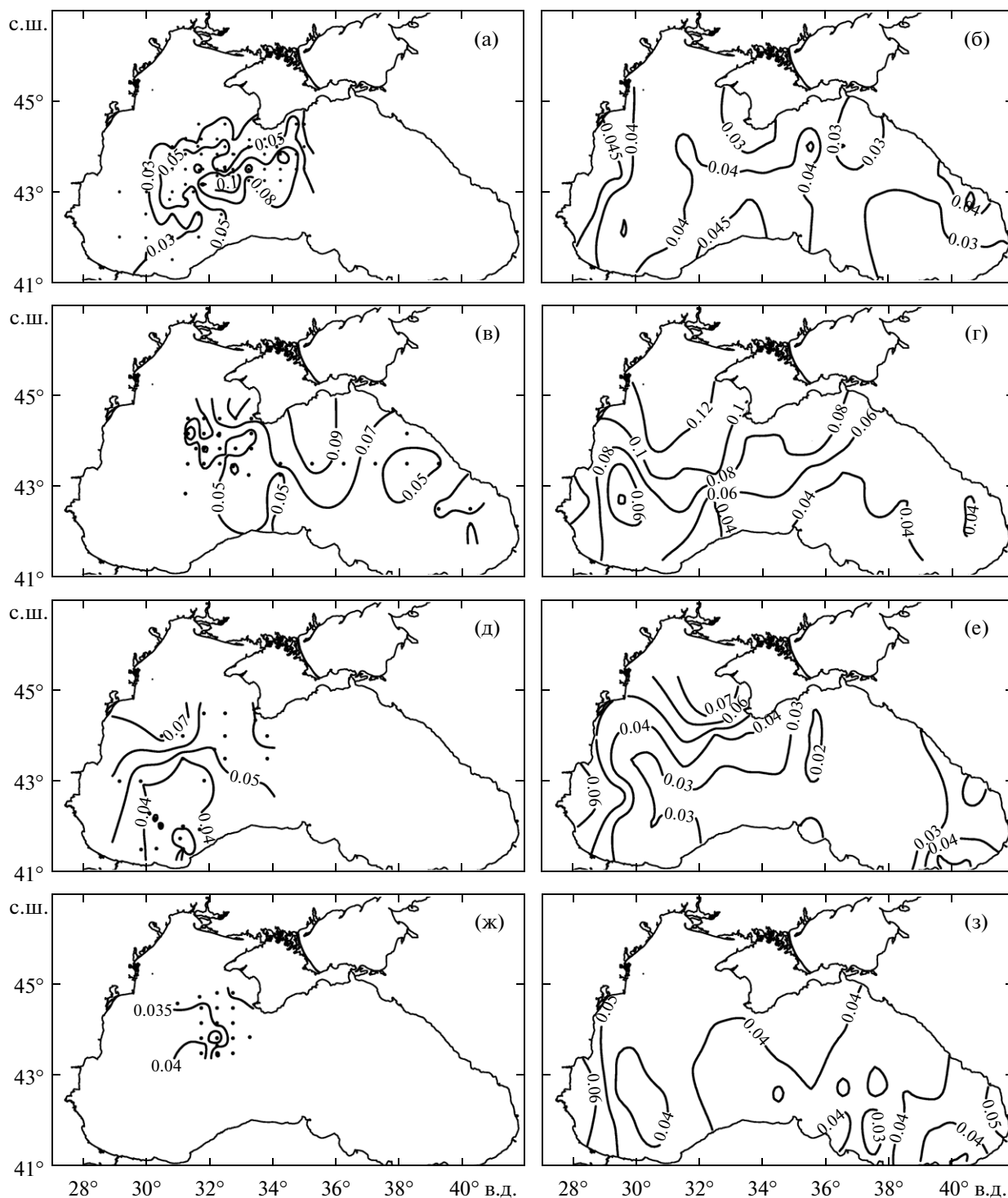


Рис. 1. Распределение измеренных (а, в, д, ж) и рассчитанных (б, г, е, з) концентраций $P_{ВОВ}$, мкМ в поверхностном слое моря в зимний – (а, б), весенний – (в, г), летний – (д, е) и осенний – (ж, з) периоды. Точки – станции.

В весеннее время, когда отмечается ослабление конвективного и ветрового перемешивания вод и формирование сезонного термоклина, в вертикальном распределении среднемесячных концентраций $P_{ВОВ}$ и $C_{ВОВ}$ в зоне фотосинтеза наблюдался переход от равномерного зимнего рас-

пределения к одномодальному (рис. 2б). С увеличением глубины до нижней границы зоны фотосинтеза в распределении концентрации $P_{ВОВ}$ и $C_{ВОВ}$ отмечалась одинаковая тенденция их снижения. В слое 50–100 м, начиная с глубины 80 м, отмечалось незначительное увеличение концен-

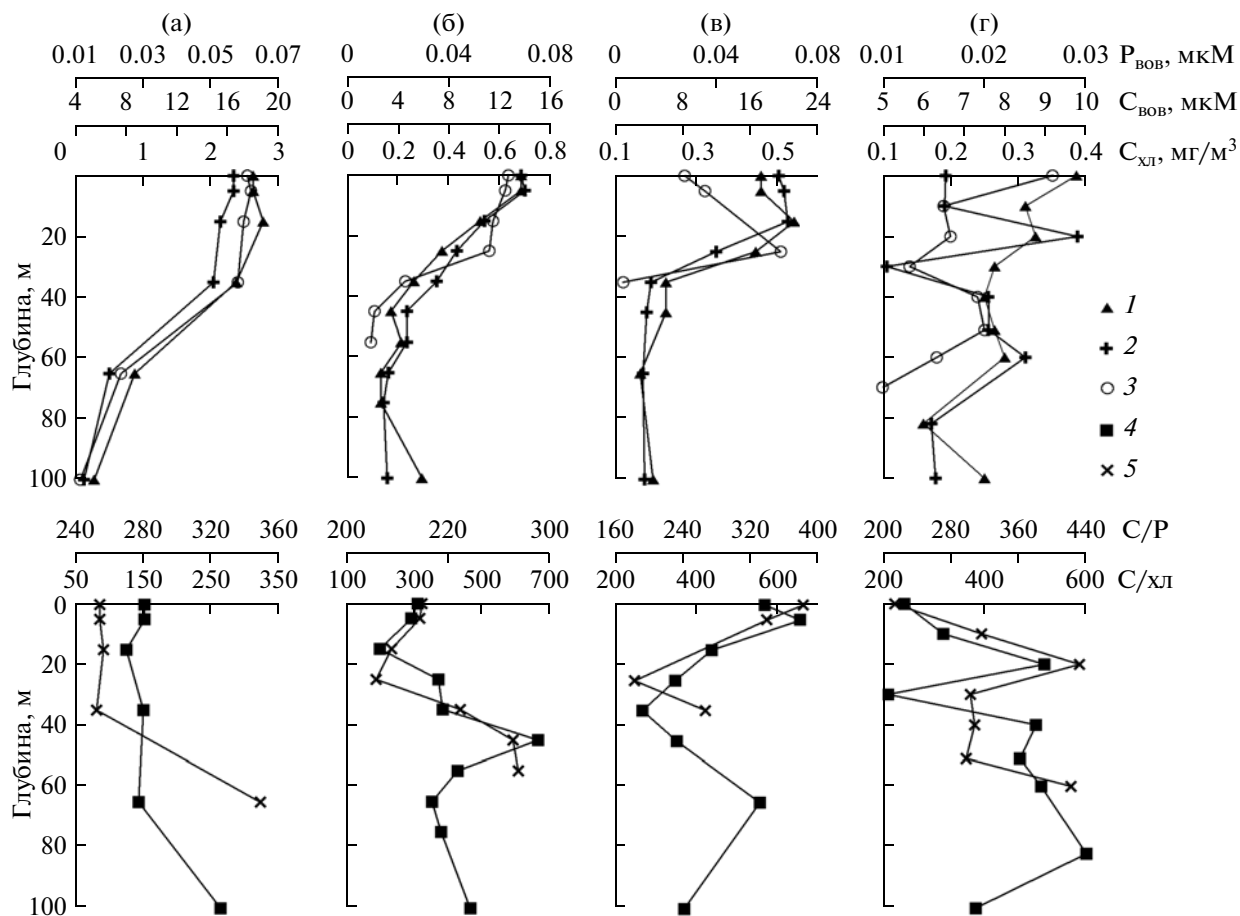


Рис. 2. Вертикальные распределения концентраций $P_{\text{ВОВ}}$ (1), $C_{\text{ВОВ}}$ (2), хл "а" (3) и их отношений C/P (4), $C/\text{хл}$ (5) в марте (а), апреле (б), сентябре (в) и ноябре (г).

трации $P_{\text{ВОВ}}$. Средние значения концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ в зоне фотосинтеза были в 2 раза выше, чем в слое оксиклина.

По сравнению с зимним периодом величины отношений C/P и $C/\text{хл}$ "а" в зоне фотосинтеза возрастали до 300 и 350, а в слое оксиклина — до 500 и 650 (рис. 2б). По-видимому, наблюдаемое в весенний период увеличение величин отношений C/P и $C/\text{хл}$ "а" в зоне фотосинтеза обусловлено, с одной стороны, повышением температуры в верхнем слое моря, с другой, — активизацией регенерационной деятельности зоопланктонного сообщества [16], а в слое оксиклина — деградацией диатомовых водорослей после завершающей стадии позднелетнего их "цветения".

В летний период в поверхностном слое глубоководной области моря в целом отмечался однородный характер пространственного распределения рассчитанных (рис. 1е) и измеренных (рис. 1д) концентраций $P_{\text{ВОВ}}$ за исключением незначительного повышения величин этого показателя в северной части моря. Средняя концентрация $P_{\text{ВОВ}}$ в поверхностном слое и зоне фотосинтеза глубоководной области моря по сравнению с весенним пе-

риодом снижалась соответственно в 1.8 и 1.2 раза (табл. 2).

Летом, в период четко выраженной температурной стратификации вод и наибольшей устойчивости верхнего деятельного слоя, вертикальные профили концентраций $P_{\text{ВОВ}}$, $C_{\text{ВОВ}}$ и хл "а", как правило, соответствуют одномодальному типу [3, 21, 24]. Согласно представленным на (рис. 2в) данным (начало сентября 1993 г.) максимумы концентраций $C_{\text{ВОВ}}$ и $P_{\text{ВОВ}}$ не совпадали, а величина отношения $C/\text{хл}$ "а" с глубиной уменьшалась до нижней границы фотосинтеза, что обусловлено снижением фотосинтетической активности фитопланктона на этих глубинах. Максимум концентраций $P_{\text{ВОВ}}$, $C_{\text{ВОВ}}$ и хл "а" наблюдался в слое термоклина (15–25 м), а по мере увеличения глубины их концентрации снижались до нижней границы зоны фотосинтеза. Для верхнего перемешанного слоя (ВПС) отмечались относительно высокие величины отношения C/P (400) и $C/\text{хл}$ "а" (670), что указывает на значительное снижение доли фитопланктона и концентрации фосфора в составе ВОВ, обусловленное регенерационной активностью зоопланктона [16]. В слое

50–100 м концентрация $P_{\text{ВОВ}}$ практически не изменялась и была минимальной. Близкие к описанным вертикальным профилям концентрации $P_{\text{ВОВ}}$, $C_{\text{ВОВ}}$ и их абсолютным значениям получены и в более поздних исследованиях для летнего периода (1990–1998 гг.) в западной глубоководной области Черного моря [24].

Относительно низкие концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ (0.03–0.06 мкМ), биомассы фитопланктона (9 мгС/м³ в поверхностном слое и 16–24 мгС/м³ в слое фотосинтеза) и малая его доля в $C_{\text{ВОВ}}$ (~6% в поверхностном слое и 20.8–23.7% в слое фотосинтеза), а также высокие значения отношения С/хл“а” (257–732) в совокупности показывают на снижение доли фитопланктона и преобладание детрита в ВОВ.

В осенний период измеренные и рассчитанные концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ в поверхностном слое (рис. 1ж) и в слое фотосинтеза на северном участке глубоководной части моря по сравнению с летним периодом соответственно снижались в 1.1 и 1.5 раза (табл. 2). Пространственное распределение концентраций $P_{\text{ВОВ}}$ по всей глубоководной части моря было относительно однородным (рис. 1з).

Рассчитанные средние значения биомассы фитопланктона в поверхностном слое (16 мгС/м³) и в слое фотосинтеза (10 мгС/м³), их доля от содержания $C_{\text{ВОВ}}$, равная 12–14%, и высокие средние величины отношений С/хл“а” (384) и С/Н (7.9), показывают на то, что в составе ВОВ в осенний период этом районе преобладал трансформированный детрит.

Необходимо отметить, что в осенний период вертикальные профили концентраций $P_{\text{ВОВ}}$, $C_{\text{ВОВ}}$ и хл “а” были получены на одной станции в ноябре 1993 г. (рис. 2г) и не могут отражать их типичный характер в этот период. Поэтому для общей характеристики изменения концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ с глубиной использовали имеющиеся в литературе сведения о сезонном изменении вертикальных профилей концентраций хл “а” и $C_{\text{ВОВ}}$. На основе анализа многолетних данных по содержанию хл “а”, полученных в глубоководной области Чёрного моря [21], показано, что в осенний период характер вертикального профиля его концентрации в зоне фотосинтеза постепенно переходит от одномодального распределения к равномерному (зимнему). При этом его концентрация в ВПС возрастает. Такие же изменения отмечались и в вертикальном профиле концентрации $C_{\text{ВОВ}}$, когда постепенно исчезает пик в термоклине, а его концентрация в ВПС повышается [3]. Аналогичная тенденция наблюдалась и в изменении концентраций $P_{\text{ВОВ}}$ и хл “а” в зоне фотосинтеза (рис. 2г). В слое 40–100 м, как и в предыдущие сезоны, с увеличением глубины концентрация $P_{\text{ВОВ}}$ снижалась.

Таким образом, анализ сезонной изменчивости пространственного распределения измерен-

ных и рассчитанных концентраций $P_{\text{ВОВ}}$ в поверхностном слое и в зоне фотосинтеза глубоководной области моря показал, что в целом ее распределение имеет однородный характер. Отличие наблюдалось в зимний и весенний сезоны, когда в центральной и северной областях западного циклонического круговорота были отмечены повышенные его концентрации. Сезонный характер пространственного распределения измеренных и рассчитанных концентраций $P_{\text{ВОВ}}$ в целом совпадал с распределением измеренных концентраций $C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$ и хл “а” [8].

Из анализа сезонной изменчивости вертикальных профилей концентрации $P_{\text{ВОВ}}$, $C_{\text{ВОВ}}$ и хл “а” следует, что тенденция их изменения в слое 0–100 м в разные сезоны года имеет общий характер, что указывает на связь сезонной изменчивости концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ с изменчивостью концентрации хл “а” и параметрами гидрологической структуры вод надпикноклинового слоя.

В зимне-весенний период содержание $P_{\text{ВОВ}}$ в поверхностном слое и зоне фотосинтеза было значительно выше по сравнению с другими сезонами. ВОВ в основном состояло из фитопланктона и детрита. Доля детрита в ВОВ весной была выше. В летне-осенний период в поверхностном слое и зоне фотосинтеза содержание $P_{\text{ВОВ}}$ снижалось, а в ВОВ преобладал детрит, находящийся на различных стадиях биохимической трансформации.

Внутригодовая изменчивость концентрации $P_{\text{ВОВ}}$. Измеренные в течение года среднемесячные концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ в глубоководной области моря были неравномерно распределены по сравнению с распределениями концентраций $C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$ и хл “а”, что не позволяло статистически достоверно получить оценки внутригодовой и межгодовой изменчивости его концентрации. Поэтому для решения этой задачи было проведено объединение измеренных и рассчитанных (по экспериментальным данным концентраций $C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$ и хл “а”) значений концентрации $P_{\text{ВОВ}}$, основанное на удовлетворительном их совпадении во все сезоны. В поверхностном слое и в слое фотосинтеза в зимне-весенний период различие этих значений в среднем не превышало 10%, а в летне-осенний 15–25%.

Согласно полученным данным, для внутригодовой изменчивости концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ была характерна двухвершинная кривая, на которой выделяются два максимума (рис. 3а). Первый – в холодный период года (февраль–апрель), второй – в осенний период (сентябрь, октябрь). Первый максимум, как правило, более выражен по сравнению со вторым. В летнее время отмечался продолжительный минимум со слабо выраженным пиком $P_{\text{ВОВ}}$ (июнь). Сезонный ход концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ в целом соответствовал внутригодовой изменчивости показателей фитопланктона (его

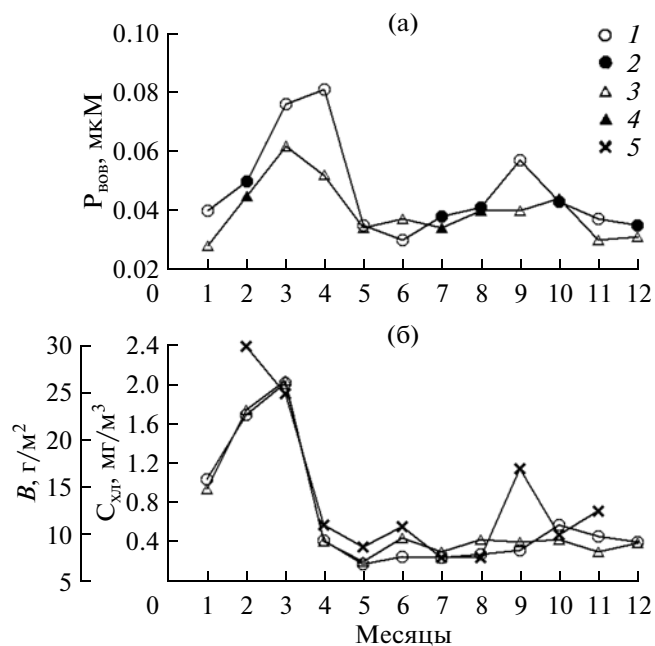


Рис. 3. Годовой ход измеренных (1, 3, 5) и рассчитанных (2, 4) концентраций P_{VOV} (а), хл “а” (1, 3) и биомассы фитопланктона (5) (б) в поверхностном слое (1, 2) и в слое фотосинтеза (3, 4, 5).

биомассы и концентрации хл “а”) (рис. 3б), что указывает на его ключевую роль в образовании P_{VOV} в глубоководной области моря. Следует также отметить, что сезонный ход структурных показателей фитопланктона от года к году может существенно изменяться. Это связано, прежде всего, с изменчивостью метеорологических условий, оказывающих влияние на сроки сезонной смены видового состава фитопланктона, на абсолютные значения его биомассы, количество и продолжительность ее сезонных максимумов [4, 8, 11, 15].

Межгодовая изменчивость содержания P_{VOV} . Многолетний ряд данных, характеризующих внутригодовую изменчивость содержания P_{VOV} , был дополнен его значениями, рассчитанными по полученной на основе спутниковой информации о концентрации хл “а” (радиометр CZCS, 1979–1986 гг. и SeaWiFS, 1998–2010 гг.) в поверхностном слое моря. Объединение измеренных и рассчитанных концентраций P_{VOV} за период 1978–2010 гг. позволило получить наиболее полную картину ее многолетней изменчивости. Очевидно, что неоднородность распределения и естественная вариабельность этих данных в пространстве и во времени может сказываться на результатах осреднения. Поэтому для оценки межгодовой изменчивости концентрации P_{VOV} в поверхностном слое использовали ее аномалии (отклонения от средних значений нормированные на средние квадратичные отклонения), а также аномалии биомассы фитопланктона в зоне фотосинтеза, значений средней зимней температуры

поверхностного слоя моря и относительной прозрачности (глубины видимости белого диска) морской воды.

Сравнение межгодовой динамики аномалий концентрации P_{VOV} с многолетними изменениями аномалий биомассы фитопланктона в период 1978–2001 гг. в целом указывает на сходный характер колебаний их многолетнего хода (рис. 4а, 4б). Межгодовая изменчивость аномалий относительной прозрачности (рис. 4в) до 1984 г. практически соответствовала многолетнему ходу аномалий концентрации P_{VOV} и биомассы фитопланктона. В период с 1985 по 1993 гг., когда их средние значения резко повышались (аномалии положительны), среднегодовые значения относительной прозрачности понижались (аномалия отрицательная) и были в противофазе с колебаниями концентрации P_{VOV} и биомассы фитопланктона. Средняя зимняя температура воды до 1982 г. была несколько выше среднегодовой (аномалия положительная), а с 1982 г. ее величина понижалась (аномалия отрицательная) и была в противофазе многолетнему ходу среднегодовых величин концентрации P_{VOV} и биомассы фитопланктона. Согласно полученным данным, в межгодовой изменчивости концентрации P_{VOV} и других показателей можно выделить три основных периода: первый период – 1978–1985 гг., второй – 1985–1993 гг. и третий – 1994–2010 гг. (рис. 4). В первый период среднегодовые величины концентрации P_{VOV} , биомассы фитопланктона и относительной прозрачности были ниже средних значений (отрицательные аномалии). В то время как среднегодовые значения зимней температуры были выше средних значений (положительные аномалии) (рис. 4в). Анализ межгодовой изменчивости концентрации P_{VOV} и биомассы фитопланктона, значений относительной прозрачности и средней зимней температуры в поверхностном слое моря (рис. 4) показал, что для этого периода были характерны незначительные колебания их среднегодовых значений. Это в целом согласуется с результатами исследований, в которых показано, что уровень концентрации хл “а” и первичной продукции в период с 70-х до начала 80-х годов существенно не изменялся и практически остался на прежнем уровне [5].

Во втором периоде с 1985 по 1993 гг. отмечалось резкое изменение не только средних значений аномалий концентрации P_{VOV} , биомассы фитопланктона, средней зимней температуры воды и относительной ее прозрачности, но и степень их межгодовой вариабельности. Для этого периода наблюдений характерны высокие абсолютные значения среднегодовых значений концентрации P_{VOV} и биомассы фитопланктона, превышающие средние величины этих показателей в 2–3 раза по сравнению с предыдущим периодом. В то же время, средние значения относительной прозрачности и зимней температуры были значительно ни-

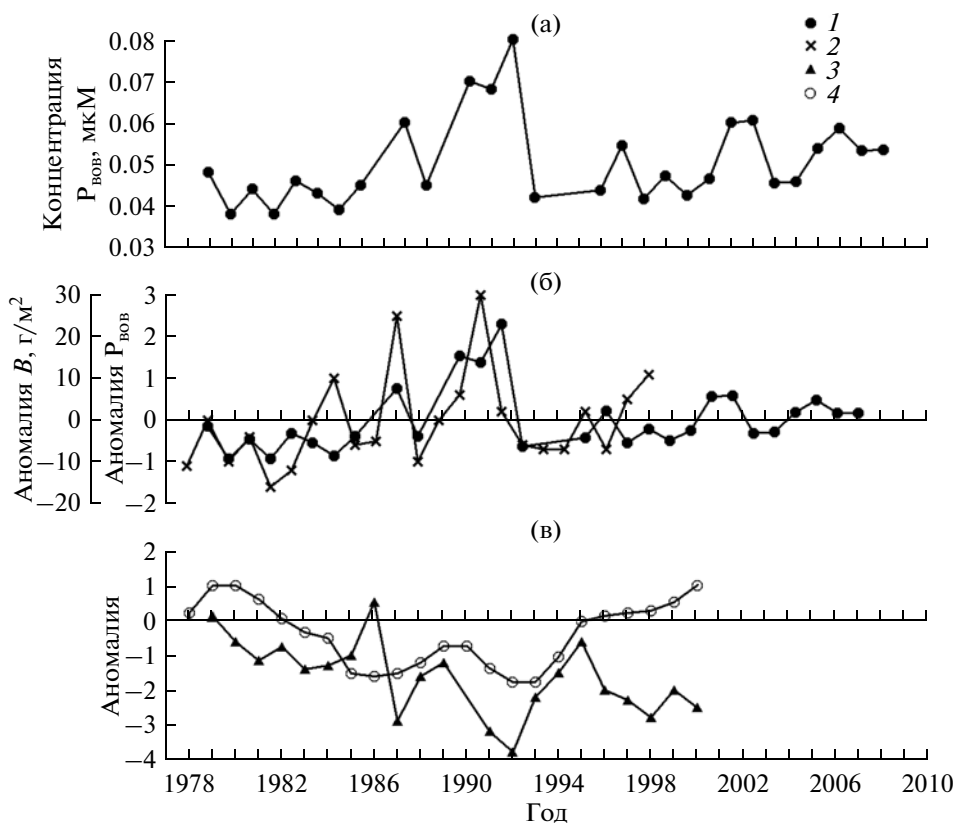


Рис. 4. Межгодовые изменения среднегодовой концентрации $P_{ВОВ}$ (1) (а) и ее аномалии (б) в поверхностном слое моря, среднегодовых значений аномалии биомассы фитопланктона (2) в слое фотосинтеза (б), глубины видимости белого диска (3) и средней зимней температуры поверхностного слоя моря (4) (в).

же величин этих показателей, наблюдаемых в предыдущем периоде. Как показано в ряде работ, значительные изменения структурно-функциональных характеристик фитопланктона в этот период времени были связаны, с одной стороны, с изменением климатических условий [29], с другой, с изменением структуры планктонного сообщества [5, 11, 12]. Совпадение значительных изменений климатических условий и структуры планктонного сообщества привело к дополнительному приросту биомассы фитопланктона на протяжении года, что способствовало резкому повышению среднегодовых значений его биомассы и, как следствие, концентрации $P_{ВОВ}$ в глубоководной области моря в 1988–1994 гг. по сравнению с другими периодами. Следует отметить, что для этого периода времени в глубоководной области моря были отмечены высокие средние летние величины первичной продукции ($350\text{--}670 \text{ мгС/м}^2 \text{ день}$) и хл “а” ($0.4\text{--}1.5 \text{ мг/м}^3$), что объясняется снижением пресса фитофагов на фитопланктон [5]. Кроме этого, в этот период времени скорость экскреции неорганических соединений азота и фосфора зоопланктоном, обеспечивающая регенерационную первичную продукцию в летне-осенний период, практически не изменялась [16, 17], что в комплексе и способствовало дополнительному

приросту биомассы фитопланктона в летне-осенний период [12].

В последующий период, начиная с 1994 г., аномалии концентрации $P_{ВОВ}$ и биомассы фитопланктона резко снижались, а значения относительной прозрачности и средней зимней температуры воды повышались и соответствовали величинам, отмеченным в период с 1978 по 1985 гг. В целом в эти периоды характер их межгодовых изменений хорошо согласуется между собой. Незначительные их различия (например, в 1983–1986 гг.), вероятнее всего, связаны с тем, что величины этих показателей были получены в разных районах моря и не были синхронизованы во времени и пространстве их проведения. Начиная с 1994 г. повышение средней зимней температуры в поверхностном слое моря способствовало ослаблению интенсивности конвективного перемешивания в его верхнем слое, что и привело к снижению уровня в обеспеченности биогенными элементами фитопланктона в зимне-весенний период и, как следствие, способствовало снижению его структурно-функциональных характеристик.

Снижение биомассы гребневика после 1992 г. и увеличение количества кормового зоопланктона фактически положило начало восстановлению экосистемы глубоководной области моря [5, 28].

Как следствие, уровень выедания фитопланктона мезозoopланктоном снижался, а биомасса мезозoopланктона повышалась [22], что способствовало уменьшению структурно-функциональных характеристик фитопланктона [20]. Это, в свою очередь, повлекло за собой снижение концентраций $S_{\text{ВОВ}}$ и хл “а” [8], а, следовательно, концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ и повышение прозрачности воды (рис. 4), значения которых по нашим данным приблизились к уровню первой половины 80-х годов.

Сравнение межгодовой изменчивости концентрации $P_{\text{ВОВ}}$, полученной в период 1978–1995 гг., с многолетним ходом биомассы фитопланктона в зоне фотосинтеза в период 1948–2001 гг. [11] и 1948–2010 гг. [12] показало хорошее их соответствие, что указывает на ключевую роль фитопланктона в образовании ВОВ и, в частности, $P_{\text{ВОВ}}$. Как показано в этих работах межгодовая изменчивость биомассы фитопланктона в зоне фотосинтеза глубоководной области моря имеет примерно 10-летние циклические колебания, связанные с изменением средней зимней температуры в поверхностном слое моря, а устойчивые однонаправленные тренды за весь период исследований отсутствуют. Следует также отметить, что межгодовая вариабельность концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ в глубоководной области Черного моря тесно связана с изменениями биомассы фитопланктона и определяется, с одной стороны, долговременной циклическостью климатических условий и связанных с ними изменениями гидрологического режима, а с другой, перестройкой планктонного сообщества в аэробной зоне Черного моря.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ многолетних данных за период 1978–2010 гг. позволил выявить основные особенности пространственного и вертикального распределения концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ и получить статистические оценки внутригодовой и межгодовой ее изменчивости в глубоководной части Черного моря. Используемые регрессионные уравнения для расчета $P_{\text{ВОВ}}$ по концентрациям хл “а”, определенным на основе экспериментальных и спутниковых наблюдений, позволяют получить близкие оценки значений концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ в поверхностном слое моря, корректно отражающие характер ее сезонной, внутригодовой и межгодовой изменчивости. Внутригодовое изменение концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ в целом согласуется с изменчивостью структурных показателей фитопланктона (биомассы и концентрации хл “а”), что свидетельствует о его ключевой роли в образовании $P_{\text{ВОВ}}$. Межгодовая изменчивость концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ и биомассы фитопланктона связана с изменением климатических условий. Аномальные изменения структуры планктонного сообщества в конце 80-х — начале 90-х гг., совпавшие с климатиче-

ской циклическостью, способствовали высоким значениям биомассы фитопланктона и, как следствие, концентраций $P_{\text{ВОВ}}$. В период 1996–2010 гг. отмечается относительно стабильный уровень среднегодовых значений концентрации $P_{\text{ВОВ}}$, приближающийся к наблюдаемым ее значениям в период 1978–1986 гг., что указывает на отсутствие резких изменений характеристик планктонного сообщества, так и на незначительную изменчивость гидрологического режима в Черном море в этот период.

Авторы благодарят З.П. Бурлакову и Л.В. Еремееву за полезные обсуждения полученных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бордовский О.К., Якушев Е.В.* Моделирование вертикального распределения взвешенных форм органического углерода, азота и фосфора в юго-западной части Тихого океана // *Океанология*. 1995. Т. 35. № 6. С. 890–894.
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 Черного моря // *Процессы формирования и внутригодовой изменчивости гидрофизических и гидрохимических полей Черного моря*. Севастополь: МГИАН УССР, 1988. С. 162–172.
3. *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.
4. *Ведерников В.И., Демидов А.Б.* Первичная продукция и хлорофилл в глубоководных районах Черного моря // *Океанология*. 1993. Т. 33. № 2. С. 229–235.
5. *Ведерников В.И., Демидов А.Б.* Долговременная и сезонная изменчивость хлорофилла и первичной продукции в восточных районах Черного моря // *Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря*. / Отв. ред. Зацепин А.Г., Флинт М.В. М.: Наука, 2002. С. 212–234.
6. *Востоков С.В.* Динамика взвешенного органического вещества в Черном море в период зимне-весеннего цветения вод фитопланктоном // *Изменчивость экосистемы Черного моря. Естественные и антропогенные факторы*. М.: Наука, 1991. С. 262–271.
7. *Кукушкин А.С.* Многолетняя изменчивость содержания взвешенного органического вещества в глубоководных районах Черного моря в летне-осенний период // *Морск. гидрофиз. журн.* 2012. № 1. С. 17–38.
8. *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: НПЦ “ЭКОСИ-Гидрофизика”, 2012. С. 143–159.
9. *Кукушкин А.С.* Многолетние сезонные изменения прозрачности поверхностных вод в Черном море

- за период 1923–2000 гг. // Физические проблемы экологии. М.: Макс Пресс, 2012. Т. 19. С. 219–231.
10. Кукушкин А.С. Изменчивость содержания взвешенного органического вещества в северо-западной части Черного моря // Океанология. 2013. Т. 53. № 5. С. 626–642.
 11. Кривенко О.В., Пархоменко А.В. Пространственная и временная изменчивость биомассы фитопланктона в Черном море за период 1948–2001 гг. // Морск. эколог. журн. 2010. Т. 9. № 4. С. 5–24.
 12. Кривенко О.В., Пархоменко А.В., Чурилова Т.Я. и др. Реанализ долговременных рядов изменения биомассы фитопланктона в открытой части Черного моря по результатам натурных и спутниковых наблюдений // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное исследование ресурсов шельфа. Севастополь: НПЦ “ЭКОСИ-Гидрофизика”, 2012. Т. 2. Вып. 26. С. 185–194.
 13. Люцарев С.В., Миркина С.Д. Определение общего фосфора во взвешенном веществе / Методы гидрохимических исследований океана. М.: Наука, 1978. С. 175–179.
 14. Люцарев С.В., Шанин С.С. Особенности распределения взвешенного органического углерода в толще вод Черного моря // Океанология. 1996. Т. 36. № 4. С. 538–542.
 15. Маштакова Г.П., Роухияйнен М.И. Сезонная динамика фитопланктона / Основы биологической продуктивности Чёрного моря. К.: Наукова думка, 1979. С. 85–88.
 16. Пархоменко А.В. Экскреция фосфора зоопланктоном в открытой части Черного моря // Морск. эколог. журн. 2005. Т. 4. № 4. С. 17–32.
 17. Пархоменко А.В., Пархоменко А.В. Численные оценки регенерационного потока азота в открытой части Черного моря // Морск. эколог. журн. 2007. Т. 6. № 2. С. 79–90.
 18. Романкевич Е.А. Геохимия органического вещества в океане. М.: Наука, 1977. 256 с.
 19. Румшинский Л.З. Элементы теории вероятности. М.: Наука, 1970. 256 с.
 20. Финенко З.З., Чурилова Т.Я., Сосик Х.М. Вертикальное распределение фотосинтетических характеристик в Черном море // Океанология. 2004. Т. 44. №2. С. 222–237.
 21. Финенко З.З., Чурилова Т.Я., Ли Р.И. Вертикальное распределение хлорофилла и флуоресценции в Черном море // Морск. эколог. журн. 2005. Т. 4. №1. С. 15–45.
 22. Шуганова Т.А., Мусаева Э.И., Булгакова Ю.В. и др. Гребневики вселенцы *Mnemiopsis leidyi* (A. Agassiz) и *Beroe ovata* (Mayer 1912) и их воздействие на пелагическую экосистему северо-восточной части Черного моря // Изв. РАН. Сер. биол. 2003. № 2. С. 225–235.
 23. 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.
 24. 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 // Mediterranean Marine Science. 2000. V. 1. № 1. P. 51–63.
 25. Copin-Montegut C., Copin-Montegut G. Stoichiometry of carbon, nitrogen and phosphorus in marine particulate matter // Deep-Sea Res. 1983. V. 30. № 1 A. P. 31–46.
 26. 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 // J. Mar. Biology. 1973. V. 19. № 4. P. 298–306.
 27. <http://Blackseacolor.com>.
 28. Kideys A.E., Gordina A.D., Niermann U. et al. Distribution of eggs and larvae of anchovy with respect to ambient conditions in southern Black Sea during 1993 and 1996 // Ecosystem modeling as a management tool for the Black Sea / Eds. Ivanov L.I., Oguz T. Dordrecht: Cluwer. 1998. V. 1. P. 189–198.
 29. Mikaelyan A.S. Longtime variability in phytoplankton communities in the open Black Sea in relation to environmental changes // Sensitivity to change: Black Sea, Baltic Sea and North Sea / Eds. Ozsoy E., Mikaelyan A. Dordrecht: Cluwer, 1997. P. 105–116.
 30. Oguz T., Gilbert D. Abrupt transitions of the top-down controlled Black Sea pelagic ecosystem during 1960–2000: Evidence for regime-shifts under strong fishery exploitation and nutrient enrichment modulated by climate-induced variations // Deep-Sea Res. 2007. V. 54. P. 220–242.

Variability of Suspended Organic Phosphorus in the Upper Layer of Deep Part of the Black Sea

A. S. Kukushkin, A. V. Parkhomenko

Based on the data of multi-year (1985–1994) observations the features of the seasonal variation of spatial and vertical distributions of the concentration of dissolved organic phosphorus (P_{SOM}) in the upper layer of the deep part of the Black Sea are considered. Statistical estimations of seasonal changes in the content of (P_{SOM}) and ratios of the concentrations of the components of particulate organic matter (carbon, nitrogen, phosphorus) and chlorophyll “a” in the surface layer and the euphotic zone are obtained. By regression equations and data of chlorophyll “a”, calculated on the basis of satellite observations during the 1979–1986 and 1998–2010 years estimations of content of (P_{SOM}) in this surface layer of the sea are received. It is shown that intra- and inter annual variability of concentrations of (P_{SOM}) in the open part of the Black Sea is closely linked with the changes biomass of phytoplankton and is determined on the one hand, by long-term cyclical climatic conditions and associated with them changes in hydrological regime, on the other hand, the restructuring of the plankton community in the aerobic zone of the Black Sea.