

УДК 551.464 (262.5)

ВАРИАБЕЛЬНОСТЬ ВЗВЕШЕННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ФОСФОРА В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

© 2018 г. А. С. Кукушкин¹, А. В. Пархоменко²¹Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия²Институт морских биологических исследований им. А.О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия
e-mail: kukushkinas@mail.ru, parkhomenko.al@yandex.ua

Поступила в редакцию 08.11.2015 г.

По данным многолетних (1985–1995 гг.) наблюдений рассмотрены особенности сезонной изменчивости пространственного и вертикального распределения взвешенного органического фосфора ($P_{\text{ВОВ}}$) в поверхностном слое и в зоне фотосинтеза северо-западной части Черного моря. Использование регрессионных уравнений и данных экспериментальных и спутниковых наблюдений по содержанию хлорофилла “а” позволило получить оценки сезонной многолетней (1979–1995 гг.) изменчивости $P_{\text{ВОВ}}$ в поверхностном слое и в зоне фотосинтеза. Рассчитаны отношения концентраций взвешенного органического углерода, азота, фосфора и хлорофилла “а” и получены статистические оценки сезонных изменений $P_{\text{ВОВ}}$ в районах, различающихся по степени влияния речного стока и вод открытого моря. Показана согласованность внутригодовых изменений содержания $P_{\text{ВОВ}}$, хлорофилла “а” и биомассы фитопланктона, что указывает на роль фитопланктона в образовании $P_{\text{ВОВ}}$ и внутригодовой и межгодовой его изменчивости в северо-западной части моря. Установлено, что многолетние сезонные изменения $P_{\text{ВОВ}}$ и связанные с ними изменения концентрации хлорофилла “а” зависят от изменчивости объема речного стока, масштабов его распространения на северо-западном шельфе и региональных гидрометеорологических условий.

DOI: 10.7868/S0030157418030048

ВВЕДЕНИЕ

Исследования пространственно-временной изменчивости содержания взвешенного органического вещества (ВОВ) и отдельных его компонентов (взвешенного органического углерода, азота и фосфора) с последующей оценкой их седиментационных потоков необходимы для понимания процессов, формирующих и поддерживающих устойчивое функционирование морских экосистем [6, 26].

В этом контексте исследования пространственно-временной изменчивости содержания отдельных компонентов ВОВ в северо-западной части Черного моря (СЗЧМ) приобретают особый интерес, поскольку эта часть моря в наибольшей степени (по сравнению с другими районами моря) подвержена антропогенному влиянию. В то же время в разных ее районах это влияние не одинаково. В наибольшей степени постоянно антропогенному прессу подвержены участки вдоль западного побережья, где переносятся трансформированные речные воды Днепра, Южного Буга, Днестра, Дуная и промышленно-бытовые стоки из расположенных на этом побережье многочисленных населенных пунктов. В результате смешивания речных и промышленно-бытовых стоков с морской водой в прибрежных водах увеличивается содержание

биогенных элементов (азота и фосфора), азот и фосфорсодержащих органических соединений и взвешенного вещества аллохтонного происхождения [13, 15], что активизирует развитие фитопланктона и, как следствие, способствует увеличению содержания отдельных компонентов ВОВ в этом районе. Гидрохимические условия в водах центрального района, в основном определяемые водообменом с открытой частью моря, в меньшей степени подвержены антропогенному влиянию, имеющему сезонный характер. Так, в период половодья (май–август) и при благоприятной ветровой ситуации (юго-западный и западный ветер) в этот район поступают трансформированные речные воды [5], что приводит к увеличению концентрации биоогенных элементов, азот- и фосфорсодержащих органических и взвеси в верхнем перемешанном слое. Как следствие, в этом слое активизируется фотосинтез планктонных водорослей, повышается содержание кислорода в среде и снижается прозрачность воды с последующим возникновением зон с дефицитом кислорода в придонном слое [2, 3, 25].

В 80-е – 90-е годы XX столетия в СЗЧМ достаточно активно проводились исследования по содержанию взвешенного органического углерода ($C_{\text{ВОВ}}$) и азота ($N_{\text{ВОВ}}$) [7–10, 17–20]. В то же время

измерения содержания взвешенного органического фосфора ($P_{\text{ВОВ}}$) носили эпизодический характер, что не позволяло получить представление об его пространственно-временной изменчивости в этой части моря [7]. Для пополнения массива данных по содержанию $P_{\text{ВОВ}}$ (в годы их отсутствия) нами ранее был предложен и опробован метод его расчета, основанный на использовании корреляционной связи между одновременно измеренными концентрациями $P_{\text{ВОВ}}$, $C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$ и хлорофилла "а" (хл "а") [21, 22]. Это позволило оценить особенности пространственного распределения $P_{\text{ВОВ}}$ по сезонам и проанализировать внутригодовую и сезонную межгодовую его изменчивость в поверхностном слое западного и центрального районов СЗЧМ. Также было оценено влияние региональных гидрометеорологических условий и объемов речного стока на межгодовые изменения концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ в поверхностном слое западного района в зимне-весенний период [21]. Однако в этих исследованиях не рассматривались вопросы, связанные с особенностями вертикального распределения $P_{\text{ВОВ}}$, а также с оценкой связи внутригодовой и межгодовой изменчивости содержаний $P_{\text{ВОВ}}$ и $C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$, хл "а" и биомассы фитопланктона в поверхностном слое и зоне фотосинтеза в различных районах СЗЧМ.

Цель настоящей работы состояла в исследовании пространственного и вертикального распределения содержания $P_{\text{ВОВ}}$ в различные сезоны, внутригодовой и сезонной межгодовой его вариабельности в поверхностном слое и зоне фотосинтеза в различных районах СЗЧМ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использовали экспериментальные данные по содержанию $P_{\text{ВОВ}}$, $C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$ и хл "а" из банка данных отдела экологической физиологии водорослей Института морских биологических исследований им А. В. Ковалевского РАН и Морского гидрофизического института РАН, полученные в СЗЧМ с 1979 по 1995 г. в 33-х научных рейсах на 266 станциях и 931 горизонте. Из них одновременные измерения $P_{\text{ВОВ}}$, $C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$ и хл "а" были проведены в период с 1985 по 1994 г. в 8 рейсах на 65 станциях и 252 горизонтах. Кроме того, была использована дополнительная информация по содержанию хл "а" в поверхностном слое моря, полученная по результатам наблюдений радиометра CZCS в период 1978–1986 гг. (данные любезно предоставлены Суслиным В.В.), а также многолетние данные по биомассе фитопланктона за период 1948–2001 гг. [16, 30] и архивные данные по температуре и солености морской воды, температуре воздуха [14] и объему стока Дуная [11, 12].

Методика отбора проб и определения в них содержания компонентов ВОВ подробно описана в работах [7, 8, 17]. Содержание $P_{\text{ВОВ}}$ определялось сжиганием взвеси на стекловолоконных фильтрах GF/F в плаве кислых солей [23], концентрация хл "а" – флуориметрическим методом. Сравнение одновременно измеренных среднемесячных величин концентрации хл "а", полученных по судовым и спутниковым (радиометр CZCS за 1979–1986 гг.) наблюдениям в одних и тех же районах моря, показало их удовлетворительное сходство (различие составило 10–25%).

Немногочисленные экспериментальные данные по содержанию $P_{\text{ВОВ}}$, имеющиеся в базе данных, не позволяют получить статистически достоверные оценки временной его изменчивости в поверхностном слое и зоне фотосинтеза СЗЧМ. Компенсировать их отсутствие можно используя расчетный метод, основанный на использовании корреляционных связей между одновременно измеренными концентрациями $P_{\text{ВОВ}}$, $C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$ и хл "а" [21, 22]. Уравнения регрессии рассчитывали по экспериментальным данным этих параметров в годы и сезоны, 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) [27] (табл. 1). Значения коэффициентов корреляции r (0.61–0.96) для приведенных зависимостей оказались достоверными при высоком уровне значимости ($p < 0.001$).

В качестве индикатора трансформации ВОВ использовали атомарные отношения $C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$ и $P_{\text{ВОВ}}$ [26, 31, 32]. Соотношение детритной и фитопланктонной фракций в ВОВ оценивали по отношению концентраций $C_{\text{ВОВ}}$ и хл "а" (далее $C/\text{хл "а"}$) [32].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования пространственного и вертикального распределения $P_{\text{ВОВ}}$, внутригодовой и сезонной межгодовой его изменчивости проводили в западном и центральном районах СЗЧМ, которые в разной степени подвержены влиянию стока рек и вод открытого моря (рис. 1).

Сезонная изменчивость пространственного и вертикального распределения содержания $P_{\text{ВОВ}}$. В зимний период, когда объем речного стока по сравнению с весенне-летним периодом резко снижался, в береговой зоне выделялась сравнительно узкая по ширине (15–20 миль) зона трансформации речных вод [5, 17]. Немногочисленные измерения $P_{\text{ВОВ}}$ в декабре 1987 г. – январе 1988 г. показали, что

Таблица 1. Параметры уравнений регрессии ($y = ax + b$), связывающие содержание ($P_{\text{ВОВ}}$) с содержанием хл “а”, $C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$ в поверхностном слое (ПС) и в зоне фотосинтеза (ФС) северо-западной части Черного моря

Параметры уравнения			Зима		Весна		Лето		Осень	
у	х		ПС	ФС	ПС	ФС	ПС	ФС	ПС	ФС
$P_{\text{ВОВ}}$	хл “а”	a	0.023	0.02	0.079	0.069	0.086	0.08	0.096	0.08
		b	0.01	0.0165	0.016	0.02	0.049	0.01	0.023	0.009
		r	0.96	0.74	0.8	0.61	0.91	0.86	0.92	0.8
		σ	0.009	0.018	0.035	0.026	0.045	0.025	0.04	0.015
		N	12	129	76	122	28	47	47	47
$P_{\text{ВОВ}}$	$C_{\text{ВОВ}}$	a	0.0044	0.00362	0.0054	0.00495	0.0045	0.0028	0.023	0.003
		b	-0.0087	0.007	-0.0097	0.0012	-0.014	0.013	0.0084	0.012
		r	0.93	0.77	0.94	0.83	0.92	0.83	0.63	0.81
		σ	0.012	0.017	0.02	0.02	0.039	0.013	0.007	0.013
		N	11	181	76	242	28	91	33	115
$P_{\text{ВОВ}}$	$N_{\text{ВОВ}}$	a	0.033	0.03	0.031	0.032	0.022	0.0162	0.01	0.0158
		b	-0.015	0.003	-0.002	0.005	0.022	0.018	0.018	0.0163
		r	0.92	0.79	0.88	0.82	0.83	0.75	0.57	0.73
		σ	0.013	0.016	0.029	0.021	0.059	0.016	0.074	0.015
		N	11	181	76	228	29	100	40	126

Примечание. N – количество пар измеренных параметров.

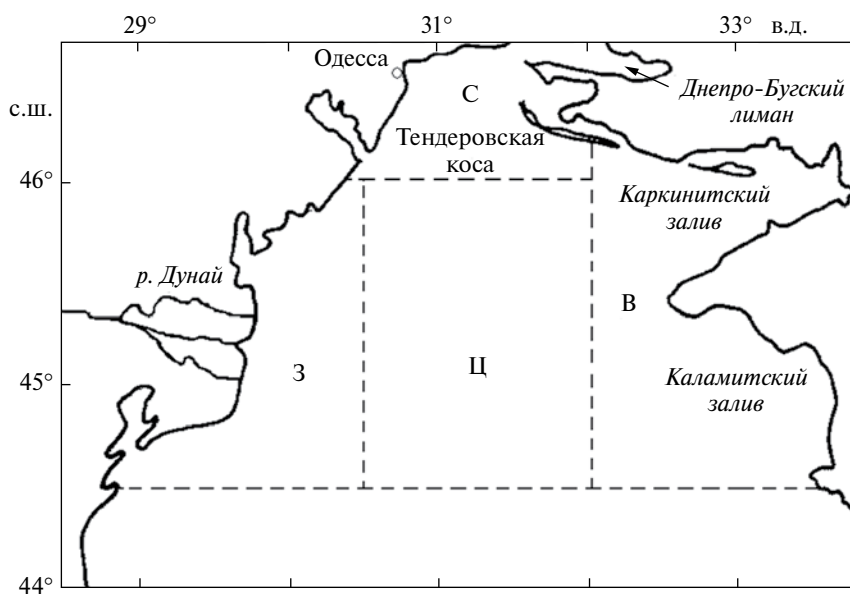


Рис. 1. Районы северо-западной части Черного моря: западный (З), северный (С), центральный (Ц), восточный (В).

в поверхностном слое его содержание на большей части СЗЧМ было пониженным (0.02–0.03 мкМ). В предустьевых районах Дуная и Днепро-Бугского лимана (западный и северный районы СЗЧМ) оно было примерно одинаковым и относительно небольшим (0.03–0.05 мкМ) (рис. 2а, табл. 2) даже по сравнению с его содержанием (0.05–0.11 мкМ), полученным зимой в центральной части западной глубоководной области моря [22]. Следует также отметить хорошее совпадение распределений измеренных и рассчитанных (по данным спутниковых наблюдений концентрации хл “а” с помощью радиометра CZCS за 1978–1986 гг.) концентраций $P_{\text{ВОВ}}$ (рис. 2а, 2б), что подтверждает возможность совместного их использования. Пространственное распределение $P_{\text{ВОВ}}$ в зоне фотосинтеза хорошо совпадало с его распределением в поверхностном слое. В то же время средневзвешенные концентрации в зоне фотосинтеза были примерно на 20% ниже (табл. 2). Отмечается совпадение пространственного распределения $P_{\text{ВОВ}}$ и одновременно измеренных с ним $C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$ и хл “а” [17, 20].

Анализ величин атомарных отношений C/N и C/P показал, что в районе постоянного влияния речного стока (северный и западный районы СЗЧМ) в поверхностном слое и в зоне фотосинтеза они были примерно одинаковы (106:14:0.38) (табл. 2), но заметно выше их оптимального соотношения (106:16:1). Полученные в этих слоях величины отношений $C/\text{хл“а”}$, равные 118–123, и C/N (7.6), а также средние значения биомассы фитопланктона, рассчитанные по концентрации хл “а” на сухую массу ($C_{\text{хл}} \times 50$ [8]), которые в поверхностном слое и в зоне фотосинтеза составляли 76.5 и 67.5 мгС/м³, а их доли от содержания $C_{\text{ВОВ}}$ – 52 и 57% соответственно, указывают на то, что вклад фитопланктона и детрита в ВОВ был примерно одинаков.

В центральном районе СЗЧМ, где в зимний период влияние речного стока на воды этого района практически не сказывается [5], средние величины атомарных отношений C/N и C/P в поверхностном слое и в зоне фотосинтеза составляли 106:13.6:0.34 и 106:12.4:0.32 соответственно, а отношения $C/\text{хл“а”}$ (140–147) в этих слоях были выше по сравнению с западным и северным районом (рис. 2, табл. 2). Кроме того, более чем в 2 раза было ниже и рассчитанное для обоих слоев значение биомассы фитопланктона, равное 33.5 мгС/м³. Доля фитопланктона в $C_{\text{ВОВ}}$ изменялась в интервале 34–36%, что указывало на более высокое содержание детритной фракции в ВОВ по сравнению с западным районом. Относительно высокие значения отношений C/P и N/P в районах исследований, видимо, объясняются более быстрым выведением фосфора из детрита [28].

Анализ вертикальной структуры распределений $P_{\text{ВОВ}}$, $C_{\text{ВОВ}}$, $C_{\text{хл}}$ (рис. 3а, 3в, 3д) и величин их отношений C/P , C/N и $C/\text{хл“а”}$ (рис. 3б, 3г, 3е) на разрезе в юго-восточном направлении от предустьевого участка Дуная (ст. 3530) до свала глубин (ст. 3534) показал, что повышенные концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ (0.04–0.055 мкМ), $C_{\text{ВОВ}}$ (10 мкМ) и хл “а” (0.9–1.0 мг/м³) были получены в предустьевом участке Дуная, где соленость в трансформированной речной воде составляла 15.8‰. На шельфовом участке в направлении свала глубин разрез (станции 3530–3533) концентрации этих показателей в поверхностном слое и в зоне фотосинтеза понижались. На глубоководной станции (ст. 3534) концентрации $P_{\text{ВОВ}}$, $C_{\text{ВОВ}}$ и хл “а” возросли и были сопоставимы с их концентрациями на станции 3530. На мелководных станциях вертикальное распределение $P_{\text{ВОВ}}$, $C_{\text{ВОВ}}$ и хл “а” по всей их толще было однородным. При приближении к глубоководной части разреза (станции 3533, 3534), где по гидрологическим характеристикам наблюдалась вертикальная стратификация вод, концентрации этих показателей с увеличением глубины понижались в 2–3 раза. Величина отношения $C/\text{хл“а”}$ (80–145), ее распределение в этой части разреза в слое 0–20 м (рис. 3д) и относительно высокая концентрация хл “а” (0.86–1.38 мг/м³) указывают на значительное увеличение доли фитопланктона в составе ВОВ. Однако с глубиной доля фитопланктона снижалась, а доля детрита в ВОВ возрастала с последующим увеличением величин отношения C/P до 260–300 (рис. 3б).

В весенний период повышенное содержание $P_{\text{ВОВ}}$, как и в зимний период, наблюдалось в трансформированных речных водах, распространяющихся вдоль северного и западного берегов (рис. 2в, 2г). Их прозрачность была равна 3–6 м, а соленость находилась в пределах 8.5–16.5‰ [17, 20]. В связи с половодьем площадь зоны смешивания речных и морских вод возрастала, а ее граница перемещалась в центральный район. По сравнению с зимним периодом содержание $P_{\text{ВОВ}}$ в поверхностном слое и в зоне фотосинтеза увеличилось в 8–10 раз (табл. 2), а $C_{\text{ВОВ}}$ и $N_{\text{ВОВ}}$ – в 6–8 раз [17, 20]. Область с пониженными концентрациями $P_{\text{ВОВ}}$ в центральном и восточном районе по сравнению с зимним периодом заметно уменьшилась по площади, а абсолютная величина его концентрации в среднем увеличилась примерно в 2 раза. Как и в зимний период, распределение $P_{\text{ВОВ}}$ в зоне фотосинтеза хорошо совпадало с его распределением в поверхностном слое, а средневзвешенная его концентрация в этом слое была в 1.3–1.5 раза ниже (табл. 2).

Величины атомарных отношений C/P и C/N в исследуемых слоях в западном районе снижались по сравнению с зимним периодом (табл. 2)

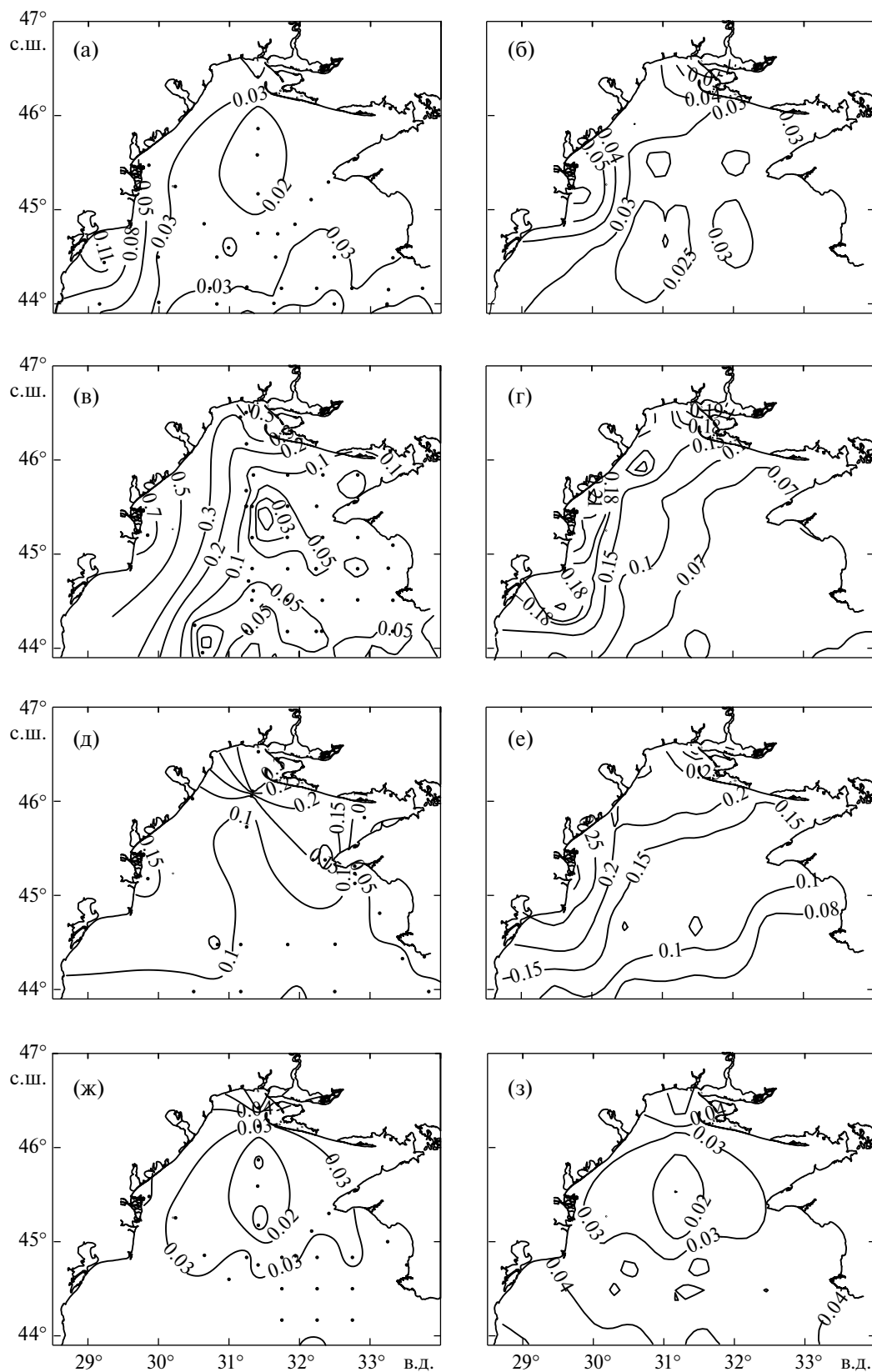


Рис. 2. Распределение измеренных (а, в, д, ж) и рассчитанных (б, г, е, з) концентраций $P_{\text{ВОВ}}$, мкМ в поверхностном слое моря в зимний – (а, б), весенний – (в, г), летний – (д, е) и осенний – (ж, з) периоды. Точки – станции.

Таблица 2. Сезонные изменения одновременно измеренных концентраций компонентов ВОВ в поверхностном слое (ПС) и в зоне фотосинтеза (ФС) в различных районах СЗЧМ

Сезон	Слой	N/p	$C_{\text{ВОВ}}, \text{мг-атС} \cdot \text{м}^{-3}$	$N_{\text{ВОВ}}, \text{мг-атN} \cdot \text{м}^{-3}$	$P_{\text{ВОВ}} 10^{-2}, \text{мг-атP} \cdot \text{м}^{-3}$	$C_{\text{ХЛ}}, \text{мг} \cdot \text{м}^{-3}$	C:N:P	C/хл "а"
Западный район								
Зима	ПС	9	12.4 ± 6.9	1.64 ± 1.05	4.5 ± 3.4	1.53 ± 0.62	106:14:0.38	118 ± 57
	ФС	8/28	9.8 ± 3.3	1.3 ± 0.49	3.4 ± 1.1	1.35 ± 0.92	106:14:0.37	123 ± 47
Весна	ПС	6	81.3 ± 116.9	13.74 ± 18.75	40.0 ± 56.0	0.87 ± 0.8	106:17.9:0.52	628 ± 426
	ФС	4/22	58.3 ± 73.6	10.0 ± 11.0	29.0 ± 33.0	0.7 ± 0.33	106:18.2:0.53	378 ± 208
Лето	ПС	4	64.0 ± 25.0	9.93 ± 2.58	24.0 ± 11.7	2.04 ± 1.28	106:16.4:0.4	375 ± 154
	ФС	4/13	55.5 ± 15.1	9.18 ± 4.03	22.6 ± 8.6	2.91 ± 1.36	106:17.5:0.43	229 ± 74
Осень	ПС	2	10.0 ± 2.0	1.7 ± 0.7	3.8 ± 1.5	1.25 ± 0.1	106: 18:0.4	100 ± 29
	ФС	2/4	9.4 ± 1.7	1.4 ± 0.2	3.0 ± 0.8	1.34 ± 0.02	106:15.2:0.34	85 ± 17
Центральный район								
Зима	ПС	13	7.8 ± 2.2	1.0 ± 0.41	2.5 ± 0.7	0.67 ± 0.19	106:13.6:0.34	140 ± 68
	ФС	9/59	8.2 ± 2.6	0.96 ± 0.3	2.5 ± 0.6	0.67 ± 0.18	106:12.4:0.32	147 ± 51
Весна	ПС	12	13.3 ± 5.9	1.87 ± 0.77	5.2 ± 2.6	0.51 ± 0.39	106:14.9:0.4	313 ± 219
	ФС	12/90	9.4 ± 3.4	1.46 ± 0.61	3.9 ± 1.4	0.59 ± 0.32	106:16.5:0.44	191 ± 162
Лето	ПС	5	19.4 ± 3.9	3.41 ± 1.28	7.4 ± 1.7	0.42 ± 0.32	106:18.6:0.4	554 ± 351
	ФС	5/22	22.6 ± 8.4	3.37 ± 1.43	8.1 ± 3.0	0.49 ± 0.14	106:15.8:0.38	553 ± 207
Осень	ПС	5	11.0 ± 2.6	1.62 ± 0.36	3.1 ± 0.5	0.27 ± 0.09	106:15.6:0.3	489 ± 235
	ФС	2/15	12.9	1.87	4.4	0.25 ± 0.05	106:15.4:0.36	619 ± 55

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

и приближались к оптимальному атомарному соотношению (106:16:1), а величины отношения C/N (5.8–5.9) были ниже оптимальной, что, видимо, связано с повышенным содержанием азота в детрите. Высокие величины отношения C/хл“а” (378–628) в обоих слоях этого района свидетельствуют о высоком содержании детрита в ВОВ. Высокая биомасса фитопланктона (более 1 гС/м^3) и ее доля в $C_{\text{ВОВ}}$ – 51% отмечалась на станции, расположенной в 12 милях к западу от входа в Днепро-Бугский лиман. Южнее этой станции (примерно на 20 миль) среднее значение биомассы фитопланктона в трансформированных речных водах соответствовало 43.5 мгС/м^3 в поверхностном слое и 35 мгС/м^3 в зоне фотосинтеза и составляло около 5% от содержания $C_{\text{ВОВ}}$. Это свидетельствует об очень высокой доле детрита в ВОВ.

В центральном районе, на западные и северные участки которого в весенний период распространились трансформированные речные воды, биомасса фитопланктона составляла 25.5 и 29.5 мгС/м^3 , а доля фитопланктона в $C_{\text{ВОВ}}$ – 16

и 26% в поверхностном слое и в зоне фотосинтеза соответственно. Величины отношений C/N и C/P весной были ниже по сравнению с зимним периодом. Относительно высокая средняя величина отношения C/хл“а”, равная 313, и отношения C/N – 7.1 в поверхностном слое указывают на малый вклад живого вещества в ВОВ, состоящего в основном из трансформированного детрита. В зоне фотосинтеза, где средняя величина отношения C/хл“а” снижалась до 191, доля фитопланктона в ВОВ была несколько выше. По сравнению с зимним периодом величины отношения C/P в поверхностном слое и в зоне фотосинтеза центрального района снижались, но были несколько выше, чем в западном районе, находящемся под постоянным влиянием речного стока.

Вертикальное распределение содержания $C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$, $P_{\text{ВОВ}}$ и хл “а” в весенний период на меридиональном разрезе по $31^{\circ}15'$ в.д. от северного мелководного района (ст. 117) до свала глубин (ст. 44) представлено на рис. 4. На мелководных станциях (станции 112, 113, 117) концентрации

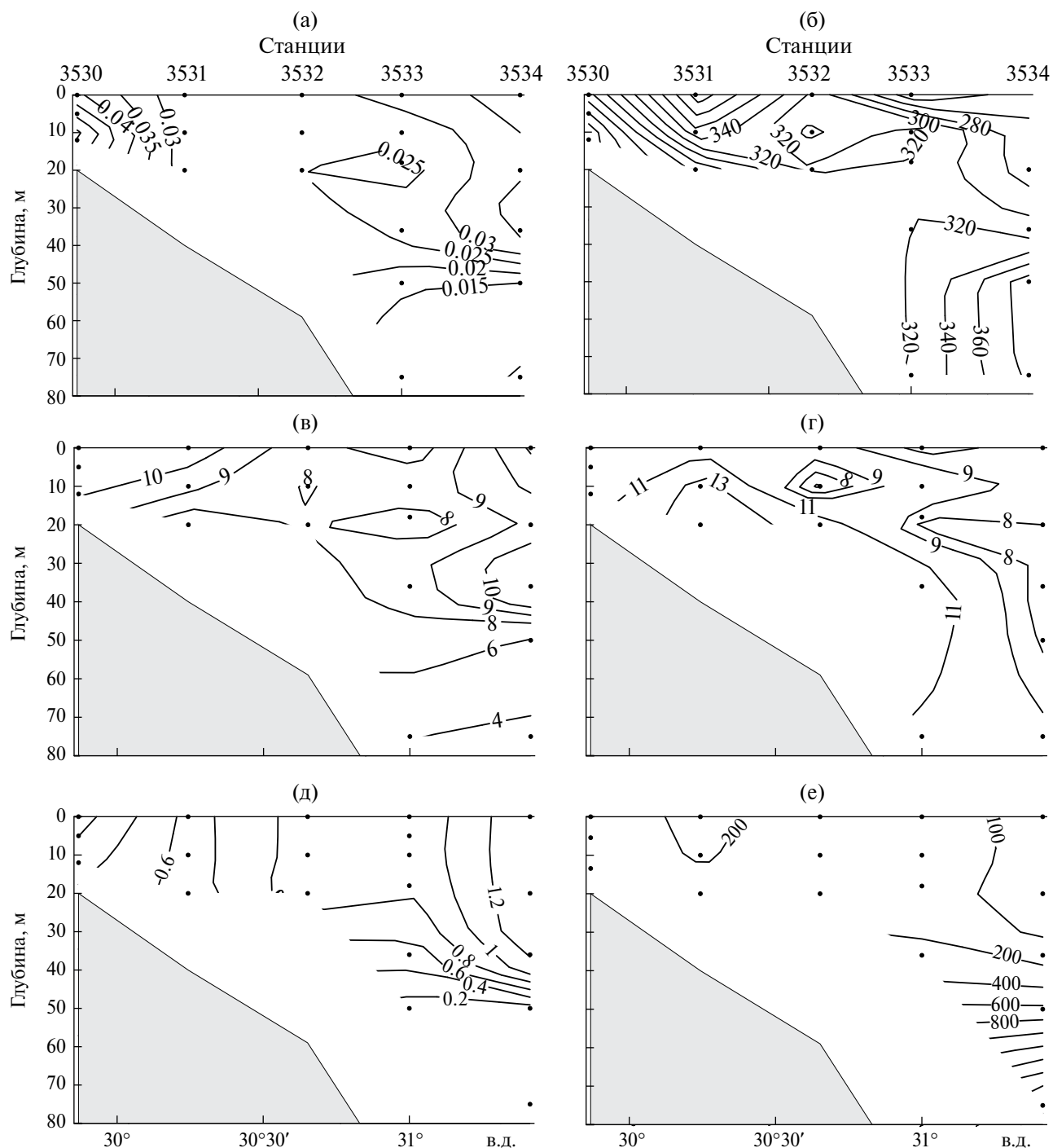


Рис. 3. Распределение концентраций P_{BOV} , мкМ (а), S_{BOV} , мкМ (в), $C_{\text{ХЛ}}$, мг/м³ (д) и отношений концентраций C/P (б), C/N (г) и $C/\text{хл}^{\text{а}}$ (е) на разрезе от устья Дуная (ст. 3530) до свала глубин в декабре 1987 г.

этих компонентов BOV уменьшались с глубиной (рис. 4а, 4в, 4д) в отличие от их однородного распределения в зимний период (рис. 3а, 3в, 3д).

В летний период повышенные концентрации P_{BOV} , как и в весенний период, наблюдались в западном, северном и частично центральном районах (рис. 2д, 2е). По сравнению с весенним

периодом содержание P_{BOV} в районе постоянного влияния речного стока снижалось в поверхностном слое в 1.6 раза, а в зоне фотосинтеза – в 1.3 раза (табл. 2). В центральном районе его содержание в поверхностном слое повышалось примерно в 1.5 раза, а в зоне фотосинтеза – в 2.1 раза. Распределение P_{BOV} в этой зоне хорошо

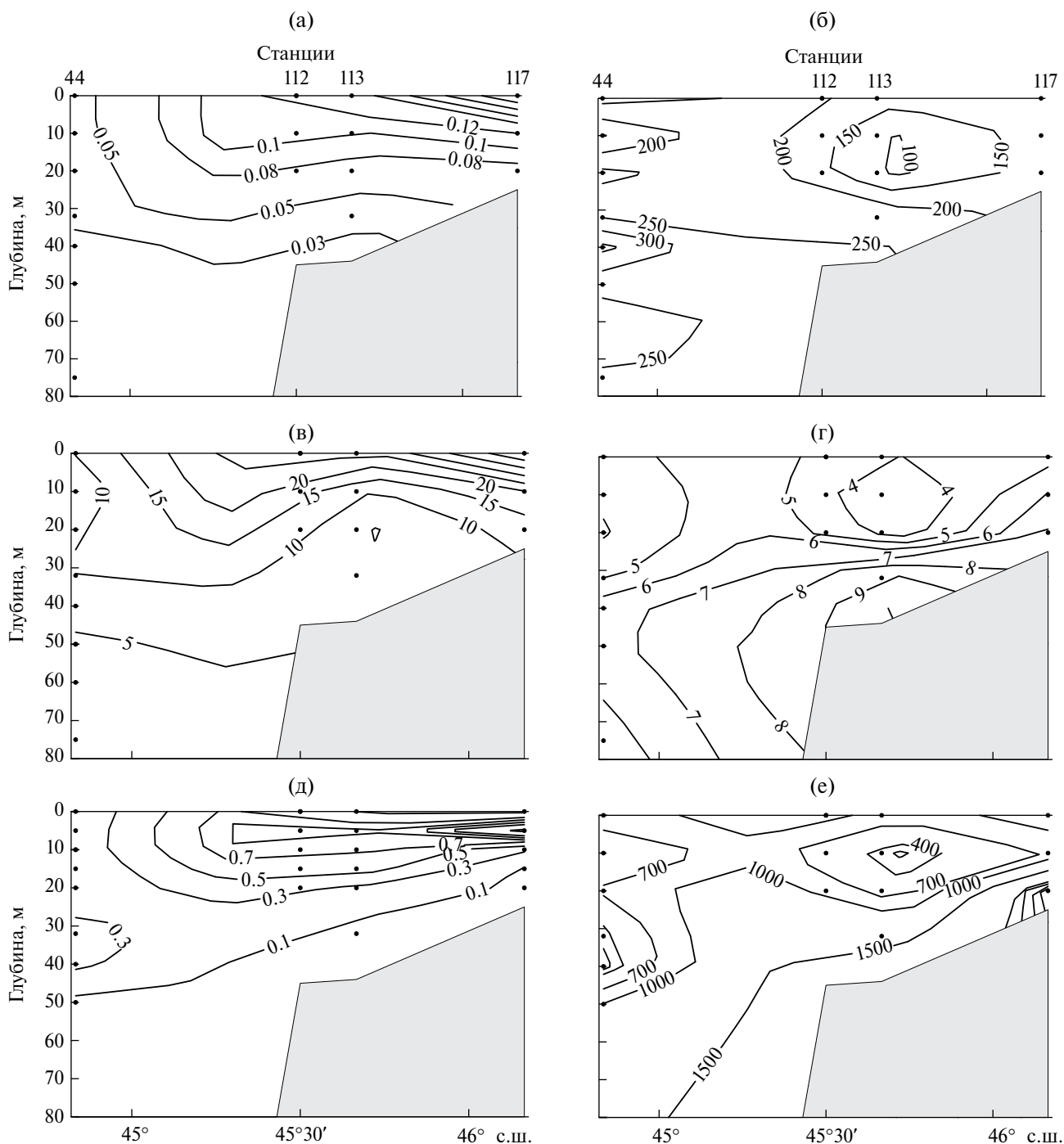


Рис. 4. Распределение концентраций $P_{\text{ВОВ}}$, мкМ (а), $C_{\text{ВОВ}}$, мкМ (в), $C_{\text{ХЛ}}$, мг/м³ (д) и отношений С/Р (б), С/Н (г) и С/хл“а” (е) на разрезе по 31°15' в.д. от входа в Днепро-Бугский лиман (ст. 117) до свала глубин в мае 1994 г.

совпадало с его распределением в поверхностном слое, а средневзвешенная его концентрация была близка к концентрации в поверхностном слое. В западном районе отмечены высокие величины отношения С/хл“а” в поверхностном слое – 375 и в зоне фотосинтеза – 229, а также близкая к оптимальной величина отношения С/Н, равная 6.5

и 6.0 в этих слоях соответственно, что указывает на достаточно высокое содержание детрита в ВОВ. Это подтверждается и сравнительно небольшим вкладом биомассы фитопланктона в состав ВОВ, который в поверхностном слое и в зоне фотосинтеза составлял 13 и 22% соответственно. В то же время в годовом цикле абсолютная величина

биомассы фитопланктона летом была максимальной и составляла 102 и 145.5 мгС/м³ в этих слоях соответственно. В центральном районе в поверхностном слое и зоне фотосинтеза содержание фитопланктона в составе ВОВ было низким (величина отношения С/хл“а” в обоих слоях была равна 553), а доля фитопланктона в С_{ВОВ} составляла всего лишь 9%. В зоне фотосинтеза ВОВ в основном

было представлено трансформированным детритом (С/Н = 6.7).

Вертикальное распределение концентраций С_{ВОВ}, N_{ВОВ}, P_{ВОВ} и их отношений С/Н и С/Р на станциях разреза, расположенного вдоль западного побережья СЗЧМ, показано на рис. 5. На ст. 3 (у входа в Днепро-Бугский лиман) концентрации P_{ВОВ} и С_{ВОВ} на разрезе были максимальными и при

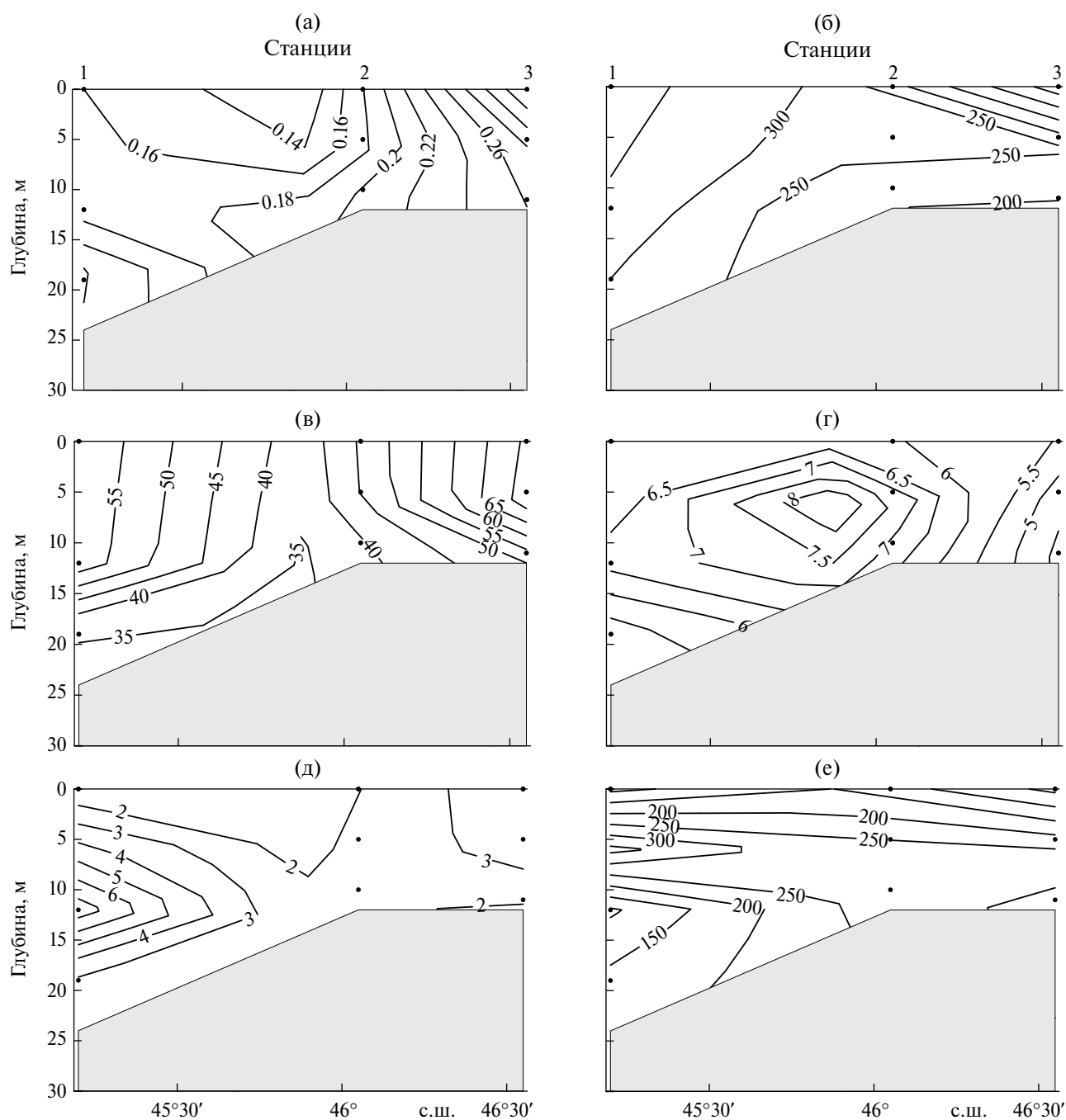


Рис. 5. Распределение концентраций P_{ВОВ}, мкМ (а), С_{ВОВ}, мкМ (в), С_{ХЛ}, мг/м³ (д) и отношений С/Р (б), С/Н (г) и С/хл“а” (е) на разрезе вдоль западного побережья СЗЧМ (ст. 1 – устье Дуная, ст. 2 – вход в Днестровский лиман, ст. 3 – вход в Днепро-Бугский лиман).

приближении ко дну они уменьшались (рис. 5а, 5в, 5д). Также уменьшались величины отношений C/P и C/N (рис. 5б, 5г). При этом величина отношения C/N (5.5–4.2) была ниже оптимальной величины, что указывало на повышенное содержание азота в детрите. По нашим расчетам биомасса фитопланктона в поверхностном слое составляла 193 мгС/м^3 , в зоне фотосинтеза — 166.5 мгС/м^3 , а доля фитопланктона в составе ВОВ в этих слоях составляла 23 и 20% соответственно. Относительно высокое значение отношения $C/\text{хл}^{\text{а}}$ (более 220) и отличающаяся от оптимальной величина отношения C/N , равная 5.5 в поверхностном слое и 4.8 — в зоне фотосинтеза, свидетельствовали о значительном вкладе в ВОВ детрита.

У входа в Днестровский лиман (ст. 2) значения концентрации $C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$, $P_{\text{ВОВ}}$ на разрезе были минимальными (рис. 5). Содержание $P_{\text{ВОВ}}$ и хл “а” с увеличением глубины до дна заметно повышалось, а концентрация $C_{\text{ВОВ}}$ изменялась незначительно. Максимальные значения отношений между всеми показателями были получены на горизонте 5 м, где находившийся детрит, видимо, был наиболее трансформирован. Биомасса фитопланктона в поверхностном слое составляла 59 мгС/м^3 , в зоне фотосинтеза — 70.5 мгС/м^3 , что соответствовало 15 и 17% от $C_{\text{ВОВ}}$. Высокое значение отношения $C/\text{хл}^{\text{а}}$ (более 300) и выше оптимальной величина отношения C/N (7.7) в зоне фотосинтеза указывают на преобладание детрита в составе ВОВ и относительно высокой его трансформации.

В придунайском районе на ст. 1 максимальные концентрации $P_{\text{ВОВ}}$, $C_{\text{ВОВ}}$ и хл “а” были зарегистрированы в слое (0–12 м). Величина отношения $C/\text{хл}^{\text{а}}$ на горизонте 12 м (92), отношения C/N (6.7) и высокая концентрация хл “а” (7.59 мг/м^3) указывали на значительный вклад фитопланктона в составе ВОВ. Это подтверждается и рассчитанной высокой величиной его биомассы (379.5 мгС/м^3) и ее доли в ВОВ, равной 54%. В исследованном слое (0–19 м) биомасса фитопланктона была равна 229 мгС/м^3 , что составляло 35% от $C_{\text{ВОВ}}$.

В осенний период в районе постоянного влияния речного стока (западный и северный районы) содержание $P_{\text{ВОВ}}$ в поверхностном слое и в зоне фотосинтеза по сравнению с летним периодом снижалось более чем в 6 раз и в годовом цикле было минимальным (рис. 2ж, 2з, табл. 2). Относительно низкая величина отношения $C/\text{хл}^{\text{а}}$ (85–100), близкая к оптимальной величина отношения C/N (6.7) и сравнительно высокая концентрация хл “а” ($1.25\text{--}1.34 \text{ мг/м}^3$) в зоне фотосинтеза свидетельствовали о достаточно высоком содержании фитопланктона в составе ВОВ, что подтверждается вкладом фитопланктона в $C_{\text{ВОВ}}$, составляющим

39% в поверхностном слое и 60% в зоне фотосинтеза.

В центральном районе содержание $P_{\text{ВОВ}}$ по сравнению с летним периодом в поверхностном слое понизилось в 2.4 раза, а в зоне фотосинтеза — в 1.8 раза и было несколько выше, чем в зимний период. В целом распределения $P_{\text{ВОВ}}$ в осенний и зимний периоды хорошо совпадали (рис. 2а, 2б, 2ж, 2з). Высокие средние величины отношения $C/\text{хл}^{\text{а}}$ в поверхностном слое (489) и в зоне фотосинтеза (619) и близкие к оптимальной величине отношения ($C/N = 6.8\text{--}6.9$) указывают на преобладание в составе ВОВ трансформированного детрита. Величина биомассы фитопланктона в центральном районе в годовом цикле была минимальной ($12.5\text{--}13.5 \text{ мгС/м}^3$), как и ее доля в составе ВОВ, равная 8–10%.

Таким образом, результаты проведенных исследований показали хорошее совпадение сезонных пространственных распределений $P_{\text{ВОВ}}$ в поверхностном слое и в зоне фотосинтеза СЗЧМ. Повышенные концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ в годовом цикле и максимальные его значения в весенний период отмечались в районе постоянного влияния рек (западный и северный районы СЗЧМ). В центральном районе в этот период были получены низкие величины концентрации $P_{\text{ВОВ}}$, поскольку трансформация вод речного стока в основном проходила в границах западного района СЗЧМ. В летне-осенний период распространение трансформированных речных вод, обогащенных биогенными элементами и ВОВ, в центральном районе было связано как с волнами половодья [5], так и с часто наблюдаемой в СЗЧМ антициклонической циркуляцией водных масс, обусловленной благоприятной ветровой ситуацией. Это, с одной стороны, способствовало активному развитию фитопланктона и увеличению его биомассы, а с другой — увеличению содержания $P_{\text{ВОВ}}$ и $C_{\text{ВОВ}}$, сопоставимого с их величинами, полученными в районе постоянного влияния речного стока в зимне-весенний период. Характер сезонных пространственных распределений $P_{\text{ВОВ}}$ совпадал с распределениями $C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$ и хл “а”. В глубоководной области моря также наблюдалось совпадение распределений этих показателей [22]. Из анализа атомарных отношений C/P и C/N и $C/\text{хл}^{\text{а}}$ следует, что в районах постоянного влияния речного стока, в наибольшей степени подверженных антропогенному влиянию, в весенне-летний период увеличивается не только биомасса фитопланктона, но и содержание детрита, что может быть связано с увеличением объема речного стока и, как следствие, с возрастающим поступлением в СЗЧМ аллохтонного ВОВ.

Сравнение измеренных сезонных концентраций $P_{\text{ВОВ}}$ в поверхностном слое и зоне фотосинтеза западного и центрального районов СЗЧМ (табл. 2)

и глубоководной области моря [22] показало следующее. В западном районе содержание $P_{\text{ВОВ}}$ в исследуемых слоях в зимний период было несколько выше (на 20–25%), в осенний – оно примерно одинаково, а в весенне-летний период содержание $P_{\text{ВОВ}}$ в 5–6 раз выше по сравнению с глубоководной области моря. В центральном районе во все сезоны (кроме летнего) содержание $P_{\text{ВОВ}}$ было более низким относительно значений этого показателя, полученных в пелагиали моря. Повышенные концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ (примерно в 2 раза) по сравнению с глубоководной областью моря в летний период связаны, прежде всего, с поступлением в этот район обогащенных биогенными элементами трансформированных речных вод, создающих благоприятные условия для развития фитопланктона.

Внутригодовая изменчивость содержания $P_{\text{ВОВ}}$. Отсутствие в отдельные месяцы данных измерений концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ не позволяло статистически достоверно получить оценки внутригодовой и сезонной межгодовой ее изменчивости. Поэтому для решения этой задачи было проведено объединение измеренных и рассчитанных данных по содержанию $P_{\text{ВОВ}}$, основанное на удовлетворительном их совпадении во все сезоны. Различие измеренных и рассчитанных концентраций $P_{\text{ВОВ}}$ в западной и центральной части СЗЧМ в зимний период в среднем не превышало 10%, а весенне-осенний период оно находилось в пределах 10–25%.

При исследовании внутригодовой изменчивости биомассы фитопланктона для исключения возможного влияния её межгодовой изменчивости использовали результаты измерений [30], совпадающие с измеренными концентрациями $P_{\text{ВОВ}}$, $S_{\text{ВОВ}}$ и хл “а” в одни и те же годы и сезоны. В случае их несовпадения использовали данные по биомассе фитопланктона, полученные в те годы и сезоны, когда климатические условия были близки условиям в годы проведения измерений $P_{\text{ВОВ}}$, $S_{\text{ВОВ}}$ и хл “а”. Сформированный таким образом массив данных по биомассе фитопланктона использовали для оценки внутригодовой ее изменчивости в западной и центральной части СЗЧМ.

Анализ сезонной изменчивости содержания $P_{\text{ВОВ}}$, $S_{\text{ВОВ}}$, хл “а” и биомассы фитопланктона в зоне фотосинтеза западной части СЗЧМ показал, что во время половодья в весенний период наблюдалось увеличение абсолютных величин этих показателей с максимумами в апреле и мае (рис. 6а, 6в, 6д, 6ж). В летний и осенний периоды в целом были отмечены малые величины исследуемых показателей со слабо выраженными пиками $P_{\text{ВОВ}}$, $S_{\text{ВОВ}}$ (рис. 6а, 6в). В то же время в годовом ходе хл “а” и биомассы фитопланктона в весенний и осенний периоды отмечались примерно одинаковые их

максимумы (рис. 6д, 6ж). Однако, в работах [1, 24] было показано, что на всей акватории западного и северо-западного шельфа май характеризуется небольшими величинами биомассы фитопланктона. В тоже время концентрация хл “а” достигала максимальных величин [1, 4]. Можно предположить, что наблюдаемое несоответствие значений этих показателей было обусловлено адаптационным увеличением внутриклеточного содержания хл “а” в водорослях в связи с ухудшением световых условий для развития водорослей, связанное со снижением прозрачности воды в период весеннего половодья. Отмеченные несовпадения в отдельные месяцы годового хода биомассы фитопланктона и содержания $P_{\text{ВОВ}}$, $S_{\text{ВОВ}}$ и хл “а” в западном и центральном районах СЗЧМ могли быть связаны и с межгодовой изменчивостью этих показателей, которая в значительной степени обусловлена изменениями объемов речного стока и гидрометеорологическими условиями.

В центральном районе, в отличие от западного, внутригодовая изменчивость содержания $P_{\text{ВОВ}}$, $S_{\text{ВОВ}}$, хл “а” и биомассы фитопланктона имела в целом подобный характер. В зимне-весенний период наблюдались малые величины этих показателей, а в летне-осенний период проявлялись их максимумы (июль – октябрь) (рис. 6б, 6г, 6е, 6з). Это, по-видимому, обусловлено распространением на весь центральный район обогащенных биогенными элементами трансформированных речных вод. Очевидно, что увеличение интенсивности и масштаба распространения трансформированных речных вод оказывает существенное влияние на развитие фитопланктона, что, в конечном счете, способствует увеличению его биомассы в центральном районе. Отличие характера внутригодовой изменчивости содержания $P_{\text{ВОВ}}$, $S_{\text{ВОВ}}$, хл “а” и биомассы фитопланктона в центральном районе по сравнению с западным районом, вероятнее всего, можно объяснить более поздним поступлением трансформированных речных вод, обогащенных биогенными элементами.

Общим и характерным для внутригодовой изменчивости $P_{\text{ВОВ}}$, $S_{\text{ВОВ}}$, хл “а” и биомассы фитопланктона в западном и центральном районах СЗЧМ являются минимальные величины исследуемых показателей и слабое развитие фитопланктона в период с ноября по январь, что также выражается в минимальных величинах биомассы фитопланктона (рис. 6). Характер внутригодовой изменчивости содержания $P_{\text{ВОВ}}$ и $S_{\text{ВОВ}}$ (рис. 6а, 6д) в целом удовлетворительно согласуется с годовым ходом хл “а” и биомассы фитопланктона, полученными в результате использования нами всех известных архивных данных [18], что указывает на ключевую роль фитопланктона в образовании и изменчивости содержания $P_{\text{ВОВ}}$.

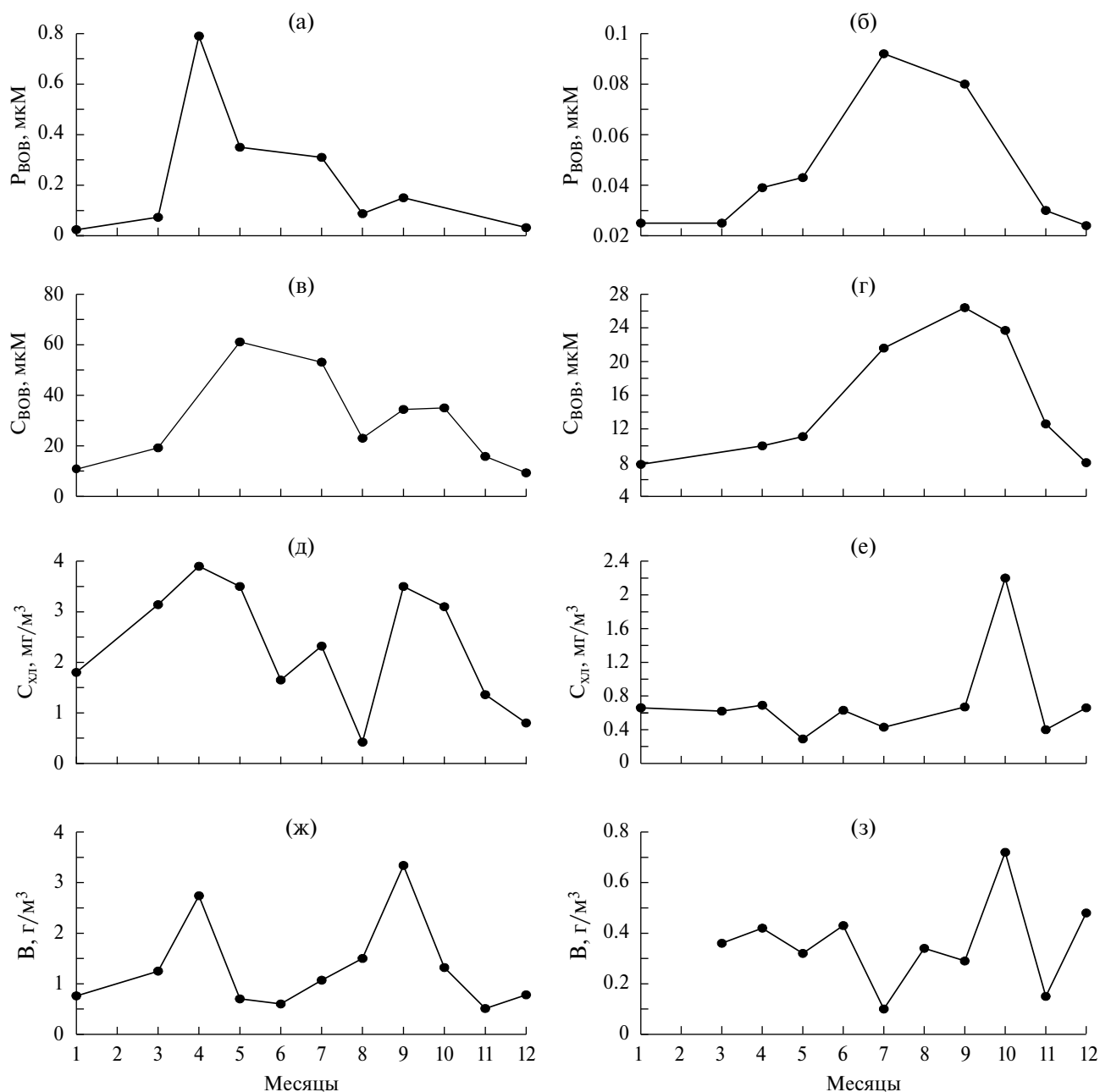


Рис. 6. Годовой ход концентраций $P_{ВОВ}$ (а, б), $C_{ВОВ}$ (в, г) и $C_{ХЛ}$ (д, е) и биомассы фитопланктона B (ж, з) в поверхностном слое в западном (а, в, д, ж) и центральном (б, г, е, з) районах СЗЧМ.

Межгодовая изменчивость содержания $P_{ВОВ}$.

Использованные для анализа внутригодовой изменчивости содержания $P_{ВОВ}$ экспериментальные данные были дополнены его значениями, рассчитанными по данным спутниковых (радиометр CZCS, 1979–1986 гг.) наблюдений концентрации хл “а” в различные сезоны. Обобщение измеренных и рассчитанных сезонных концентраций $P_{ВОВ}$ позволило получить хорошую статистическую их обеспеченность, позволившую исследовать

межгодовую изменчивость $P_{ВОВ}$ в поверхностном слое западного и центрального районов СЗЧМ.

Известно, что в западном районе на распределение содержания $P_{ВОВ}$, $C_{ВОВ}$ и хл “а” в зимне-весенний период оказывают влияние региональные гидрометеорологические условия и объемы стока рек, изменения которых, в свою очередь, обусловлены изменчивостью крупномасштабных процессов в системе океан-атмосфера [11, 12, 20]. 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 небольшими осадками и низкими значениями температуры воздуха, приводит к снижению объема стока рек и уменьшению площади зоны их влияния в СЗЧМ в зимний период. В период весеннего половодья влияние речного стока на водные массы СЗЧМ возрастает. При этом в зоне смешивания речных и морских вод активно развивается фитопланктон, интенсивность развития которого зависит от количества поступающих минеральных соединений азота и фосфора (определяемого, главным образом, объемом речного стока), температуры воды и освещенности. В период нормальных зим (отсутствие Эль-Ниньо) отмечается активизация циклонической активности над центральной и южной частями Европы. Это способствует увеличению осадков над площадями водосборов рек в зимний период, что приводит к повышению объема речного стока и расширению зоны его влияния на воды СЗЧМ. В зоне трансформации этих вод в связи с дополнительным поступлением биогенных элементов и аллохтонного взвешенного вещества активно развивается фитопланктон, что способствует увеличению содержания ВОВ.

Учитывая вышеизложенное, для оценки межгодовых изменений содержания $R_{\text{ВОВ}}$ в зимне-весенний период были использованы значения аномалий объемов стока Дуная (рис. 7а) и температуры воздуха (рис. 7б) [11, 12, 14]. Из анализа этих данных следует, что умеренно тёплые зимы (кроме зимы 1980 г.) и относительно высокие объемы стока Дуная в течение 1979–1982 гг. способствовали интенсивному развитию фитопланктона в районе влияния рек в зимне-весенний период. Концентрация хл “а” в эти годы была выше средней (рис. 7в) и отмечалось увеличение концентрации $R_{\text{ВОВ}}$ (рис. 7г). В центральном районе СЗЧМ, который в этот период не был подвержен влиянию речного стока, также наблюдалось увеличение концентрации $R_{\text{ВОВ}}$ и хл “а” (рис. 7в, 7д). В западном районе, после заметного уменьшения этих показателей в 1983 г., было отмечено значительное их увеличение в 1986 и 1988 гг. Зимой концентрации $R_{\text{ВОВ}}$ и хл “а” в центральном районе были выше их средних значений только в 1986 г. Весной после 1983 г. концентрации этих показателей снижались и минимальные значения были получены в 1989 г. при низком объеме стока Дуная. Весной этого года в западном районе наблюдалась высокая пространственная изменчивость содержания $R_{\text{ВОВ}}$. Вблизи устья Дуная (на расстоянии примерно 6 миль) измеренная его концентрация составляла 1.54 мкМ, а на таком же расстоянии от входа в Днепро-Бугский лиман – 0.21 мкМ.

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. с малым объемом стока Дуная. Проведенные зимой 1992 г. измерения только в центральном районе показали низкие концентрации хл “а” и $R_{\text{ВОВ}}$. Весной 1993 г. концентрации этих показателей повысились, но были ниже средних многолетних их значений. Умеренно теплые зимы 1994 и 1995 гг. и близкие к средним значениям объема стока Дуная способствовали более интенсивному весеннему развитию фитопланктона и заметному повышению содержания $R_{\text{ВОВ}}$ в СЗЧМ по сравнению с предшествующими годами [12].

В летний период можно выделить два временных интервала 1979–1985 и 1986–1992 гг., отличающихся различной изменчивостью содержания $R_{\text{ВОВ}}$ (рис. 8б) и хл “а” (рис. 8а). Для первого интервала характерно уменьшение их концентраций в обоих районах к 1985 г. При этом характер изменения концентраций $R_{\text{ВОВ}}$ и хл “а” был сходным, хотя расчёты концентрации $R_{\text{ВОВ}}$ проводились как по $C_{\text{ХЛ}}$, так и по $C_{\text{ВОВ}}$. Характер изменения концентрации хл “а” (особенно в центральном районе) хорошо согласовывался с изменениями средней температуры в летний период [14, 29]. В 1979–1981 гг. лето было умеренно теплым, а концентрации $R_{\text{ВОВ}}$ и хл “а” были повышенными по сравнению с последующими годами. В период с 1982 по 1984 гг. лето было умеренно холодным и характеризовалось пониженными концентрациями этих показателей. Значительное снижение концентраций $R_{\text{ВОВ}}$ и хл “а” наблюдалось холодным летом 1985 г. (рис. 8б). Во втором временном интервале (1986–1992 гг.) отмечалось повышение концентраций $R_{\text{ВОВ}}$ и хл “а” в обоих районах СЗЧМ. Вероятнее всего, измеренные высокие концентрации $R_{\text{ВОВ}}$ и хл “а” в летнее время в период с 1989 по 1992 гг. были обусловлены поступлением в центральный район биогенных элементов и ВОВ с трансформированными речными водами. Распространению этих вод в районе способствовала наблюдаемая на шельфе антициклоническая циркуляция водных масс [18]. Относительно высокие концентрации $R_{\text{ВОВ}}$ и хл “а” наблюдались и в западном районе в период аномально теплого лета 1992 г. после холодной зимы. В 1993 г. лето было умеренно холодным и измеренные концентрации $R_{\text{ВОВ}}$ и хл “а” в западном районе уменьшились. В центральном районе концентрации этих показателей несколько повысились, а их значения оказались близкими концентрациям в начальный период наблюдений (1979–1981 гг.).

В осенний период (рис. 8), также как и в летний, можно выделить два временных интервала (1979–1985, 1987–1992 гг.) с различным характером

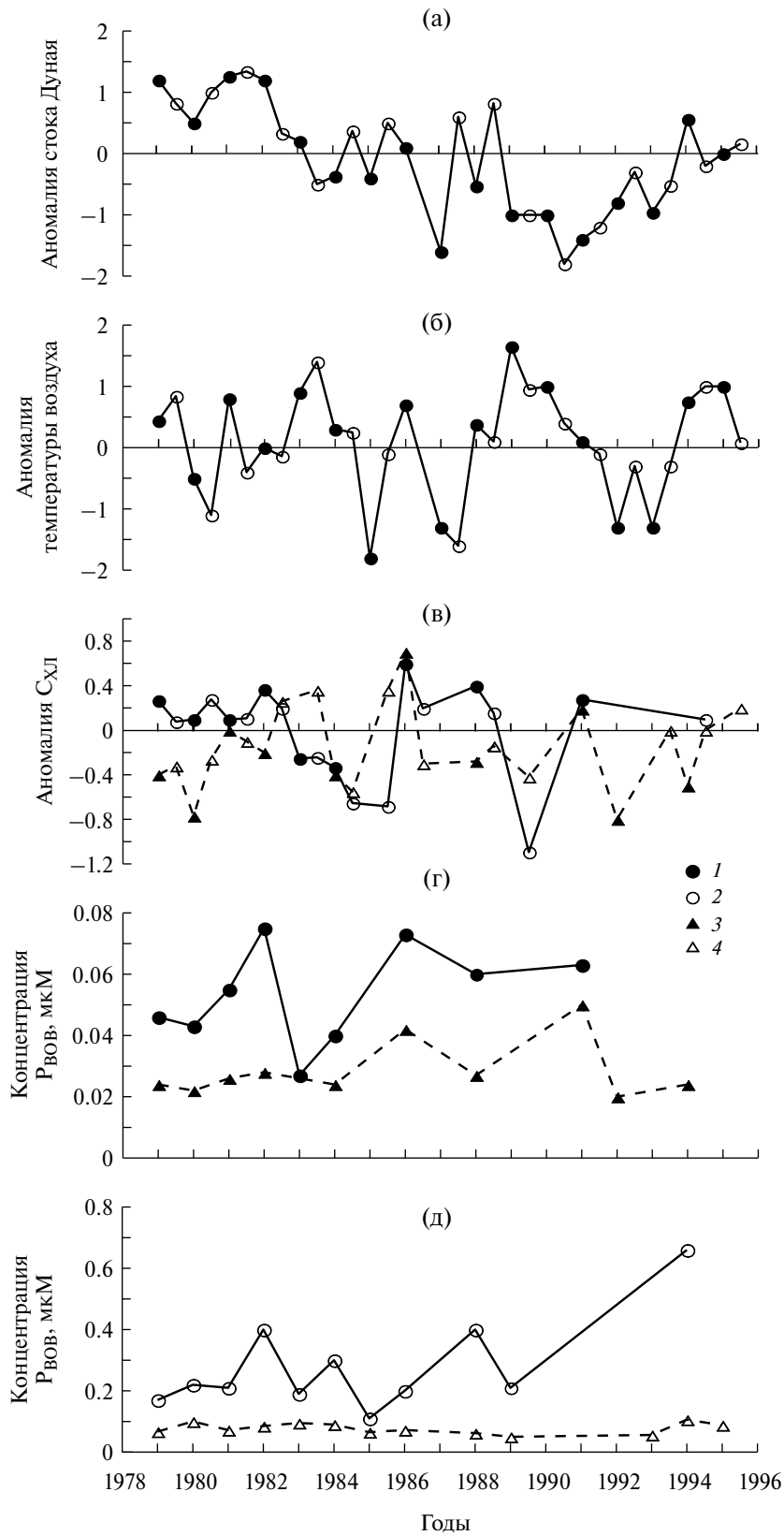


Рис. 7. Межгодовые изменения средних значений аномалий объема стока Дуная (а), температуры воздуха (б), концентрации хл “а” (в) и концентрации Р_{ВОВ} (г, д) в западном (1, 2) и центральном (3, 4) районах в зимний (1, 3) и весенний (2, 4) периоды.

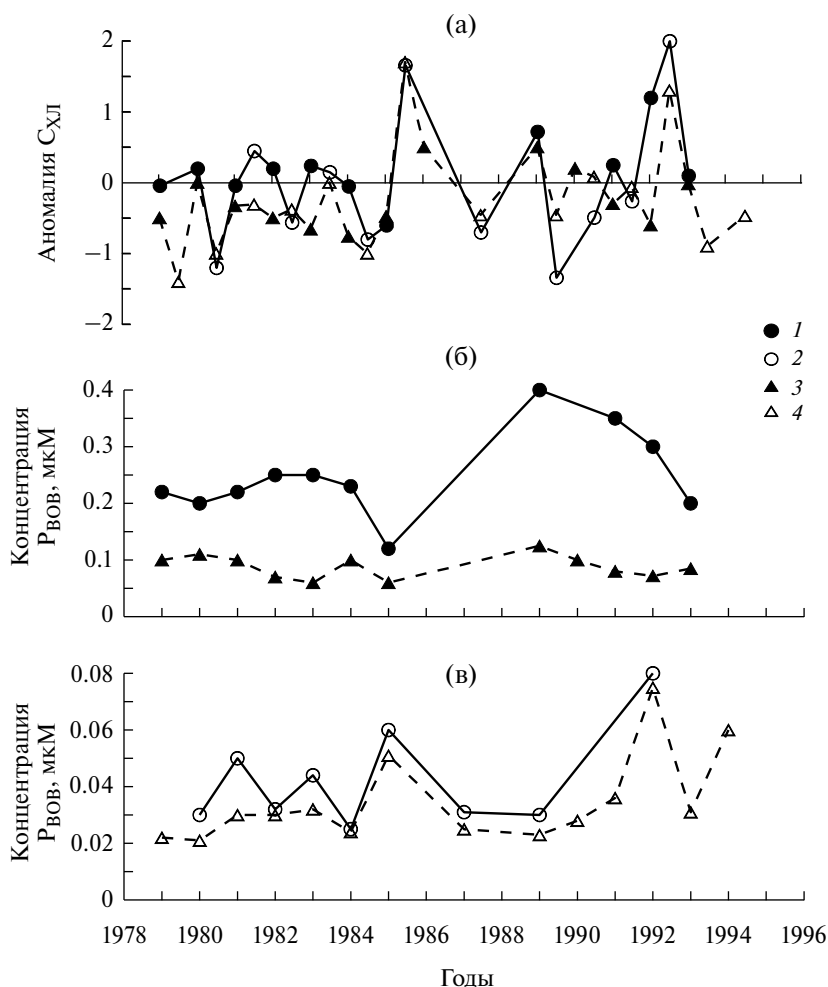


Рис. 8. Межгодовые изменения средних значений аномалий концентрации хл “а” (а) и концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ (б, в) в западном (1, 2) и центральном (3, 4) районах в летний (1, 3) и осенний (2, 4) периоды.

межгодовой изменчивости концентраций $P_{\text{ВОВ}}$ и хл “а”. В течение 1979–1985 гг. в обоих районах СЗЧМ было отмечено увеличение концентраций этих показателей, достигших максимальных значений в октябре 1985 г. Возможной причиной высоких концентраций $P_{\text{ВОВ}}$ и хл “а” может быть интенсивное развитие фитопланктона в связи с поступлением в центральный район трансформированных речных вод, обогащенных биогенными элементами [19]. Пониженные значения концентраций $P_{\text{ВОВ}}$ и хл “а” в начале декабря 1987 г. объяснялись низкой температурой воздуха и воды [7, 12, 19], а в 1989 и 1993 гг. – расположением станций на южном участке СЗЧМ, который находился под влиянием вод открытого моря. После 1989 г. в обоих районах наблюдался рост концентраций $P_{\text{ВОВ}}$, $S_{\text{ВОВ}}$ и $N_{\text{ВОВ}}$ (максимальные их значения были зарегистрированы в 1992 г.) [20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований выявлены основные особенности пространственного и вертикального распределения содержания $P_{\text{ВОВ}}$, внутригодовой и межгодовой его изменчивости в различные сезоны и в разных районах СЗЧМ. По регрессионному уравнению для расчета $P_{\text{ВОВ}}$ и данным экспериментальных и спутниковых наблюдений по содержанию хл “а” получены величины концентраций $P_{\text{ВОВ}}$, сопоставимые с измеренными его концентрациями в поверхностном слое моря и которые корректно отражали характер его сезонной, внутригодовой и межгодовой изменчивости. Характер сезонных пространственных распределений $P_{\text{ВОВ}}$ в поверхностном слое и в зоне фотосинтеза в западном и центральном районах СЗЧМ, различающихся по степени влияния стока рек и вод открытого моря совпадал с распределениями $S_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$ и хл “а”. Статистические оценки сезонных изменений одновременно измеренных

концентраций $P_{\text{ВОВ}}$, $C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$, хл “а” и их отношений в исследуемых слоях различных районов СЗЧМ позволили определить вклад фитопланктона и детрита в составе ВОВ. В западном районе СЗЧМ (районе постоянного влияния речного стока) получены максимальные величины содержания $P_{\text{ВОВ}}$ в весенний период, а также повышенные его значения и изменчивость в годовом цикле. В центральном районе увеличение концентраций $P_{\text{ВОВ}}$ наблюдалось в летне-осенний период, когда в район поступали речные воды, обогащенные биогенными элементами, что способствовало активному развитию фитопланктона и, как следствие, увеличению $P_{\text{ВОВ}}$.

Для внутригодовой изменчивости содержания $P_{\text{ВОВ}}$, $C_{\text{ВОВ}}$, хл “а” и биомассы фитопланктона в западном и центральном районах СЗЧМ характерным были минимальные величины этих показателей и слабое развитие фитопланктона в период с ноября по январь. Внутригодовое изменение содержания $P_{\text{ВОВ}}$ в целом согласуется с изменчивостью структурных показателей фитопланктона (биомассы и концентрации хл “а”), что свидетельствует о его ключевой роли в образовании и изменчивости $P_{\text{ВОВ}}$. В зимне-весенний период межгодовые изменения $P_{\text{ВОВ}}$ в западном районе в основном связаны с объемом речного стока и температурой воздуха (суровостью зим), а в центральном районе — температурой воздуха. В летне-осенний период межгодовые его изменения в западном районе зависели от температуры воздуха (в период наблюдений и в предшествующие периоды). В центральном районе на межгодовую изменчивость $P_{\text{ВОВ}}$ заметное влияние оказывало поступление в район трансформированных речных вод и масштаб их распространения, зависящий от характера циркуляции вод в СЗЧМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берсенева Г.П. Сезонная динамика концентрации хлорофилла “а” / Планктон Черного моря. Киев: Наукова думка, 1993. С. 92–102.
2. Беляев Б.Н. Освещенность водной толщи северо-западного шельфа Чёрного моря в районах Каркинитского залива и филофорного поля Зернова // Экология моря. 1993. Вып. 43. С. 75–90.
3. Берлинский Н.А., Богатова Ю.И., Гаркавая Г.Н. Проблемы антропогенного эвтрофирования и развития гипоксии в северо-западной части Чёрного моря // Экология моря. 2003. Вып. 63. С. 17–52.
4. Болога А.С., Бурлакова З.П. Пространственно-временное распределение хлорофилла “а” и его соотношение с феофитином: Прибосфорский район и западная часть моря, весенний период 1982 г. // Динамика вод и продуктивность планктона Черного моря. М.: ИОАН СССР – КОЦ “Мировой океан”, 1988. С. 253–263).
5. Богдашова В.С. Трансформация речных вод в Черном море. Киев: Наукова думка, 1970. 328 с.
6. 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.
7. Бурлакова З.П., Еремеева Л.В., Крупаткина Д.К., Чистенко В.М. Распределение и элементный состав взвешенного вещества в западной и северо-западных частях Черного моря // Процессы формирования и внутригодовой изменчивости гидрофизических и гидрохимических полей Черного моря. Севастополь: МГИ АН УССР, 1988. С. 162–172.
8. 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.
9. Востоков С.В. Живое и неживое вещество органической взвеси прибрежных вод Болгарии и прилегающих районов моря // Современное состояние экосистемы Черного моря. М.: Наука, 1987. С. 68–77.
10. Востоков С.В. Взвешенное вещество как показатель продуктивности в западной части Черного моря // Океанология. 1996. Т. 36. № 2. С. 260–267.
11. Воскресенская Е.Н., Кукушкин А.С., Бурлакова З.П., Еремеева Л.В. О связи крупномасштабных атмосферных процессов с изменчивостью прозрачности и содержания взвешенного вещества в поверхностном слое вод северо-западной части Черного моря в зимний период // Метеорология и гидрология. 2004. № 12. С. 52–62.
12. 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.
13. Гаркавая Г.Н., Богатова Ю.И. Гидрохимические исследования: источники эвтрофирования // Северо-западная часть Черного моря: биология и экология. Киев: Наукова думка, 2006. С. 60–74.
14. Гидрометеорологические условия морей Украины // Черное море. Т. 2. Севастополь: УкрНИГМИ, 2012. 421 с.
15. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. // Черное море. Т. 4. Вып. 2. Гидрохимические условия и океанографические основы формирования

- биологической продуктивности. СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 219 с.
16. *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.
 17. *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. Т. 44. № 6. С. 870–881.
 18. *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. Т. 46. № 6. С. 834–845.
 19. *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. Т. 48. № 3. С. 333–344.
 20. *Кукушкин А.С.* Изменчивость содержания взвешенного органического вещества в северо-западной части Черного моря // *Океанология.* 2013. Т. 53. № 5. С. 626–642.
 21. *Кукушкин А.С.* Пространственно-временная изменчивость содержания взвешенного органического фосфора в верхнем слое западной глубоководной и северо-западной шельфовой частях Черного моря // *Морск. экологич. журн.* 2013. Т. 6. № 4. С. 62–71.
 22. *Кукушкин А.С., Пархоменко А.В.* Изменчивость содержания взвешенного органического фосфора в верхнем слое глубоководной области Черного моря // *Океанология.* 2015. Т. 55. № 2. С. 252–261.
 23. *Людцарев С.В., Миркина С.Д.* Определение общего фосфора во взвешенном веществе // *Методы гидрохимических исследований океана.* М.: Наука, 1978. С. 175–179.
 24. *Маштакова Г.П., Роухияйнен М.И.* Сезонная динамика фитопланктона // *Основы биологической продуктивности Черного моря.* Киев: Наукова думка, 1979. С. 85–88.
 25. *Пархоменко А.В., Ковальчук Ю.Л.* Исследование гидрохимического режима филофорного поля Зернова в летний период // *Экология моря.* 1993. Вып. 43. С. 69–75.
 26. *Романкевич Е.А.* Геохимия органического вещества в океане. М.: Наука, 1977. 256 с.
 27. *Румшинский Л.З.* Элементы теории вероятности. М.: Наука, 1970. 256 с.
 28. *Рудяков Ю.А., Сапожников В.В., Агатова А.И.* Изменения пищевой ценности разлагающегося планктона и некоторые особенности процесса регенерации азота и фосфора // *Фронтальные зоны юго-восточной части Тихого океана: (Биология, физика, химия)* М.: Наука, 1984. С. 92–100.
 29. *Титов В.Б.* О связи между сезонными атмосферными условиями и параметрами гидрологической структуры вод в северо-восточной части Черного моря // *Океанология.* 2003. Т. 43, № 3. С. 347–355.
 30. Black Sea Data base supplied with Ocean Base 3.07 DBMS // NANO SFP-971818 ODBMS Black Sea Project. July 15, 2003. CD-ROM.
 31. *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.
 32. *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.

Variability of Suspended Organic Phosphorus in the North-Western Part of the Black Sea

A. S. Kukushkin, A. V. Parkhomenko

According to the multi-year (1985–1995) observations the peculiarities of the seasonal variability of the spatial and vertical distribution of suspended organic phosphorus (P_{SOM}) in the surface layer and in the zone of photosynthesis north-western part of the Black Sea are considered. The regression equations, experimental data and satellite observations on the content of chlorophyll “a”, give the possibility to obtain estimations of the seasonal long-term (1979–1995) variation of P_{SOM} in the surface layer and in the zone of photosynthesis. The ratio of the concentrations of particulate organic carbon, nitrogen, phosphorus and chlorophyll “a” are calculated and produced statistical estimations of seasonal changes in the P_{SOM} in areas differing in the degree of influence of river runoff and water seas are obtained. The consistency of the intra-content changes P_{SOM} , chlorophyll “a” and phytoplankton biomass, is shown that indicates that the role of phytoplankton in the formation of P_{SOM} and intra and inter-annual variability in the northwestern part of the sea. It was found that the long-term seasonal changes P_{SOM} and related changes in the concentration of chlorophyll “a” depend on the volatility of the river flow, the extent of its spread in the north-western shelf and regional meteorological conditions.