

УДК 551.463.8 (262.5)

А. В. Пархоменко¹, А. С. Кукушкин²**ОЦЕНКА ПОТОКА ВЗВЕШЕННОГО
ОРГАНИЧЕСКОГО ФОСФОРА ИЗ ЗОНЫ
ФОТОСИНТЕЗА ГЛУБОКОВОДНОЙ ОБЛАСТИ
ЧЕРНОГО МОРЯ**

Проведено обобщение одновременно измеренных концентраций взвешенного органического фосфора ($P_{\text{ВОВ}}$), взвешенного органического углерода ($C_{\text{ВОВ}}$) и хлорофилла в слое 0—100 м, полученных в период с 1985 по 1994 г. в западной и центральной частях Черного моря. По этим показателям и рассчитанным на их основании уравнениям регрессий восстановлен ряд средневзвешенных значений концентраций $P_{\text{ВОВ}}$ в глубоководной области моря на протяжении года. На основании рассчитанных средневзвешенных концентраций $P_{\text{ВОВ}}$ и скоростей его осаждения получены оценки внутригодовой изменчивости седиментационного потока $P_{\text{ВОВ}}$ из зоны фотосинтеза. Максимальные его величины соответствовали холодному, минимальные — теплому периоду года, Среднегодовые значения потока $P_{\text{ВОВ}}$, полученные на основании среднемесячных средневзвешенных его концентраций и рассчитанных по многолетним среднемесячным величинам «новой» первичной продукции, были практически одинаковыми и составляли соответственно 46 и 44,9 мг-ат $P \cdot м^{-2} \cdot год^{-1}$.

Ключевые слова: Черное море, взвешенный органический фосфор, седиментационный поток, зона фотосинтеза.

Седиментационный поток взвешенного органического фосфора ($P_{\text{ВОВ}}$), является одним из важнейших элементов биогеохимического цикла фосфора, обеспечивающих его баланс в морских и пресноводных водоемах.

Из концепции «новой» и регенерационной продукции следует, что при стационарном состоянии системы в эвфотической зоне открытых районов океана между составляющими биогеохимических циклов азота и фосфора поддерживается динамическое равновесие. Восходящий поток биогенных элементов (азота и фосфора), поступающих в зону фотосинтеза из глубинного слоя моря за счет гидрофизических процессов, соответствует седиментационному потоку взвешенного органического азота и фосфора и равен скорости их потребления фитопланктоном [26, 27]. Нарушение динамического равновесия биогенных элементов возможно при воздействии на морскую экосистему антропогенного фактора, вызывающего изменение биопродукционных процессов и, как следствие, трофности водоемов, что придает особую актуальность проблеме изучения динамики седиментационного потока $P_{\text{ВОВ}}$ [2].

© А. В. Пархоменко, А. С. Кукушкин, 2014

В последние десятилетия в результате проведения крупномасштабных исследований на шельфе и в открытой части Черного моря, с использованием традиционного метода отбора проб, седиментационных ловушек (СЛ) и уран-ториевого метода, накоплен большой массив данных по пространственно-временному и вертикальному распределению концентрации общего (ОВ) и взвешенного органического вещества (ВОВ) и их потоков [3, 4, 8, 12, 19, 28, 30, 31].

Однако в связи с методическими трудностями использования СЛ на малых глубинах (40—60 м) и трудностью методов определения концентрации отдельных компонентов ВОВ (взвешенного органического углерода ($C_{\text{ВОВ}}$), азота ($N_{\text{ВОВ}}$) и фосфора ($P_{\text{ВОВ}}$)) [3, 8, 23], исследования их потоков из зоны фотосинтеза носили ограниченный характер. Имеющиеся в литературе сведения в основном отражали исследования потоков $C_{\text{ВОВ}}$ и $N_{\text{ВОВ}}$ [4, 8, 19, 31]. В то же время оценки внутригодовой изменчивости потока $P_{\text{ВОВ}}$ из зоны фотосинтеза глубоководной области Черного моря до настоящего времени практически отсутствуют, за исключением модельных расчетов его среднегодовой величины в западной части моря [10].

Цель работы заключалась в оценке внутригодовой изменчивости седиментационного потока $P_{\text{ВОВ}}$ и среднегодовой его величины из зоны фотосинтеза глубоководной области Черного моря.

Материал и методика исследований. В статье использовали результаты многолетних измерений концентраций $P_{\text{ВОВ}}$, $C_{\text{ВОВ}}$ и хлорофилла a ($Хл\ a$) из банка данных отдела экологической физиологии водорослей ИнБЮМ и Морского гидрофизического института, полученные в открытой части Черного моря в 10 научных экспедициях на 51 станции в период 1985—1994 гг.

Методика отбора проб морской воды и определения концентраций $C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$ и $P_{\text{ВОВ}}$ подробно изложены в работах [3, 5, 13]. Концентрация $P_{\text{ВОВ}}$ определялась сжиганием взвеси на стекловолкнистых фильтрах GF/F в плаве кислых солей [13].

В основном одновременные измерения содержания $P_{\text{ВОВ}}$, $C_{\text{ВОВ}}$ и $Хл\ a$ проводили в западной и центральной частях Черного моря. Для этих районов моря рассчитывали средневзвешенные концентрации этих показателей. Средневзвешенные концентрации отдельных компонентов ВОВ в зоне фотосинтеза определяли суммированием концентраций в отдельных слоях, образующих эту зону. В отдельном слое средневзвешенная концентрация компонентов ВОВ рассчитывалась как произведение их среднего содержания в этом слое на величину отношения его толщины к толщине зоны фотосинтеза.

Глубину зоны фотосинтеза определяли по степенному уравнению, полученному эмпирически с использованием поверхностной концентрации $Хл\ a$ [22].

Для оценки седиментационного потока $P_{\text{ВОВ}}$ из зоны фотосинтеза необходим ряд среднемесячных значений средневзвешенных концентраций

1. Параметры уравнений регрессии ($y = ax + b$), связывающие средневзвешенные концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ со средневзвешенными концентрациями $Xл\ a$, $C_{\text{ВОВ}}$ и $N_{\text{ВОВ}}$ в слое фотосинтеза глубоководной области Черного моря

y	x		Зима	Весна	Лето	Осень
$P_{\text{ВОВ}}$, мг-ат $P \cdot M^{-3}$	$Xл\ a$, мг·м ⁻³	a	0,020	0,069	0,240	0,081
		b	0,017	0,02	-0,019	0,010
		r	0,74	0,61	0,8	0,8
		σ	0,018	0,026	0,015	0,015
		N	129	122	14	47
$P_{\text{ВОВ}}$, мг-ат $P \cdot M^{-3}$	$C_{\text{ВОВ}}$, мг-ат $C \cdot M^{-3}$	a	0,0036	0,0050	0,0028	0,0013
		b	0,001	0,0012	0,0130	0,0010
		r	0,71	0,83	0,83	0,81
		σ	0,017	0,020	0,013	0,013
		N	181	242	91	115
$P_{\text{ВОВ}}$, мг-ат $P \cdot M^{-3}$	$N_{\text{ВОВ}}$, мг-ат $N \cdot M^{-3}$	a	0,030	0,032	0,016	0,016
		b	0,003	0,005	0,018	0,016
		r	0,79	0,82	0,75	0,73
		σ	0,016	0,021	0,016	0,015
		N	181	228	100	126

П р и м е ч а н и е. N — количество пар измеренных параметров.

$P_{\text{ВОВ}}$, обеспечивающий их статистическую достоверность. При решении этой задачи использовали одновременно измеренные средневзвешенные концентрации $C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$, $P_{\text{ВОВ}}$ и $Xл\ a$. Расчет концентраций $P_{\text{ВОВ}}$ по этим значениям проводили с использованием уравнений регрессии, полученных для различных сезонов (табл. 1) [12].

Степень связи между переменными в линейных уравнениях регрессии вида $y = ax + b$, где y — $P_{\text{ВОВ}}$, x — $Xл\ a$, $C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$ оценивали по коэффициенту корреляции (r), его достоверности (p) и стандартной ошибке регрессии (σ) (см. табл. 1) [18]. Коэффициенты корреляции (0,61—0,83) для полученных зависимостей оказались достоверными при высоких уровнях значимости ($p < 0,001$).

Скорость осаждения $P_{\text{ВОВ}}$ (w_s) оценивали как частное от деления значений седиментационного потока $P_{\text{ВОВ}}$, рассчитанного по среднемесячным значениям «новой» первичной продукции, и средневзвешенных концентраций $P_{\text{ВОВ}}$ в зоне фотосинтеза глубоководной области моря.

В качестве индикатора трансформации ВОВ использовали атомарное отношение концентраций $C_{\text{ВОВ}}$ и $P_{\text{ВОВ}}$ (C/P) [17]. Средняя величина этого отношения в фитопланктоне при оптимальных условиях соответствует отно-

шению Редфилда 106:16:1 [17, 25]. Долю фитопланктона в составе ВОВ оценивали по отношению концентраций $C_{\text{ВОВ}}$ и $Xл\ a$ ($C/Xл\ a$) [29].

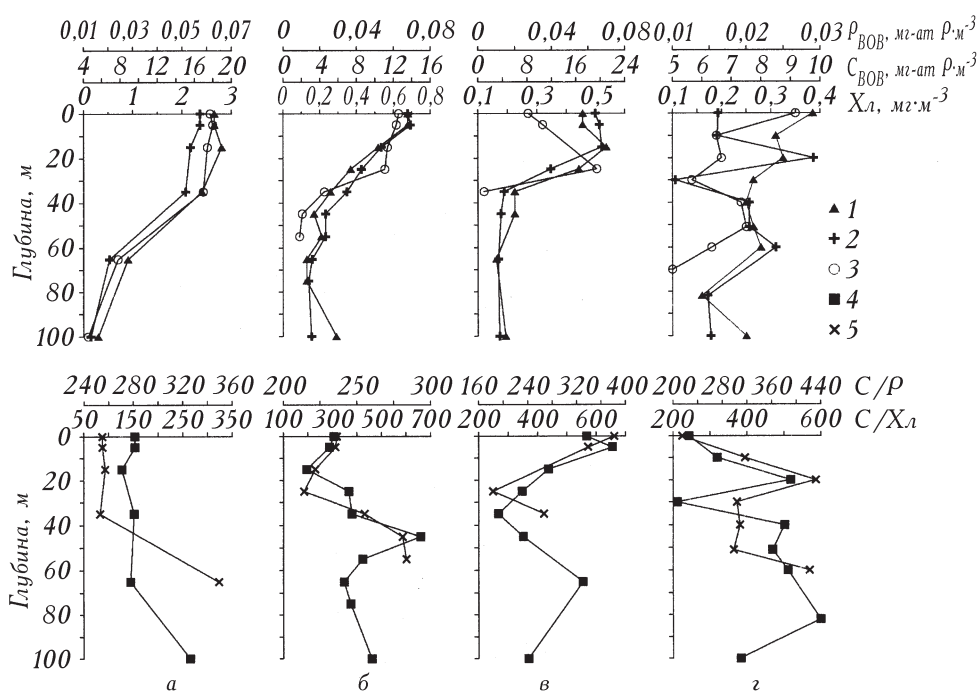
Результаты исследований и их обсуждение

Общая характеристика вертикального распределения концентраций $P_{\text{ВОВ}}$, $C_{\text{ВОВ}}$ и $Xл\ a$ в слое 0—100 м, полученных в разные сезоны года. Сезонные изменения вертикальных профилей среднемесячных значений концентраций $P_{\text{ВОВ}}$, $C_{\text{ВОВ}}$ и $Xл\ a$, полученные по результатам одновременных измерений в отдельных немногочисленных съемках, представлены на рисунке 1. Анализ этих данных показал, что в зимний период (начало марта 1988 г.) при отсутствии сезонного термоклина и усилении вертикального обмена, в надпикноклинном слое отмечаются повышенные концентрации $P_{\text{ВОВ}}$, $C_{\text{ВОВ}}$ и $Xл\ a$ и их равномерное вертикальное распределение. Высокая концентрация $Xл\ a$ (2,0—2,3 мг·м⁻³) и низкие величины отношения $C_{\text{ВОВ}}/Xл\ a$ (~90) свидетельствуют о значительном вкладе фитопланктона в состав ВОВ (рис. 1, а). В слое оксиклина с увеличением глубины концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ и $C_{\text{ВОВ}}$ равномерно снижались и на глубине 100 м достигали минимальных значений. Величина отношения $C/Xл\ a$ в верхней части оксиклина (50—60 м) увеличилась до 320, а значение C/P в этой части практически не изменилось, но во всем слое оксиклина оно в среднем возросло до 300. Это указывает на увеличение доли детрита и снижение концентрации фосфора в ВОВ, обусловленное процессом его минерализации по сравнению с зоной фотосинтеза.

В весенний период (апрель), который характеризуется ослаблением конвективного и ветрового перемешивания вод и началом формирования сезонного термоклина, в вертикальном распределении среднемесячных концентраций $P_{\text{ВОВ}}$ и $C_{\text{ВОВ}}$ в зоне фотосинтеза отмечается переход от равномерного их распределения к одномодальному типу профиля (рис. 1, б).

Это проявляется в наличии слабо выраженных максимумов в профилях $P_{\text{ВОВ}}$, $C_{\text{ВОВ}}$ и $Xл\ a$ на глубинах 5—10 м. С увеличением глубины до нижней границы зоны фотосинтеза значения этих показателей снижаются. Величины отношений C/P и $C/Xл\ a$ в зоне фотосинтеза составляли 250 и 420, а в верхней части оксиклина (50 м) они увеличивались соответственно до 300 и 600. Вероятнее всего, увеличение этих показателей в зоне фотосинтеза связано как с повышением температуры и освещенности, так и с ослаблением конвекционно-ветрового перемешивания, с последующим снижением содержания биогенных элементов и сменой видового состава фитопланктона, а в слое оксиклина — с деградацией диатомовых водорослей после завершающей стадии позднезимнего «цветения» воды.

Летом, в период четко выраженной температурной стратификации вод и наибольшей устойчивости верхнего деятельного слоя, вертикальные профили концентраций $P_{\text{ВОВ}}$, $C_{\text{ВОВ}}$ и $Xл\ a$, как правило, соответствуют одномодальному типу [3, 21]. Согласно представленным данным (рис. 1, в, начало сентября 1993 г.) максимумы концентраций $C_{\text{ВОВ}}$ и $P_{\text{ВОВ}}$ не совпадали, а величина отношения $C/Xл\ a$ с глубиной уменьшалась до нижней границы фотосинтеза, что, вероятнее всего, обусловлено снижением фотосинтетической активности фитопланктона на этих глубинах. Максимум концентраций



1. Вертикальные распределения концентраций $P_{\text{ВОВ}}$ (1), $C_{\text{ВОВ}}$ (2), $X_{\text{л а}}$ (3) и их отношений C/P (4), $C/X_{\text{л а}}$ (5): а — март; б — апрель; в — сентябрь; г — ноябрь.

$P_{\text{ВОВ}}$, $C_{\text{ВОВ}}$ и $X_{\text{л а}}$ наблюдались 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 высокие величины отношения C/P и $C/X_{\text{л а}}$ достигающие соответственно 400 и 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 соответствовала минимальным значениям. Следует отметить, что близкие значения $P_{\text{ВОВ}}$, $C_{\text{ВОВ}}$ и их профили были получены и в более поздних исследованиях для летнего периода (1990—1998 гг.) в западной глубоководной области Черного моря [24].

В осенний период вертикальные профили концентраций $P_{\text{ВОВ}}$, $C_{\text{ВОВ}}$, и $X_{\text{л а}}$ были получены на одной станции в ноябре 1993 г и не могут отражать их типичный характер в осенний период (см. рис. 1, г). Поэтому для общей характеристики вертикального профиля $P_{\text{ВОВ}}$ использовали имеющиеся в литературе сведения о внутригодовых изменениях вертикальных профилей концентраций $X_{\text{л а}}$ и $C_{\text{ВОВ}}$ в глубоководной области моря. Так, в осенний период было показано, что вертикальный профиль концентрации $X_{\text{л а}}$ в зоне фотосинтеза постепенно переходит от одномодального к равномерному (т. е. зимнему) его распределению. Одновременно с этим переходом его концентрация в ВПС возрастала [21]. Такие же изменения отмечаются и в вертикальном профиле $C_{\text{ВОВ}}$, когда постепенно исчезает пик в термоклине,

а его концентрация в ВПС повышается [3]. Аналогичная тенденция наблюдалась в зоне фотосинтеза и в изменении вертикальных профилей концентраций $P_{\text{ВОВ}}$ и $Xл\ a$ (см. рис. 1, *r*). В слое 40—100 м концентрация $P_{\text{ВОВ}}$, как и в предыдущие сезоны, закономерно снижалась.

Таким образом, анализ сезонной изменчивости вертикальных профилей $P_{\text{ВОВ}}$, $C_{\text{ВОВ}}$ и $Xл\ a$ показал, что полученные в различные сезоны года вертикальные профили этих показателей имеют общий характер изменения в слое 0—100 м, что указывает на связь $P_{\text{ВОВ}}$ и $C_{\text{ВОВ}}$ с сезонной изменчивостью концентрации $Xл\ a$ и гидрологической структурой вод надпикноклинного слоя. На протяжении года основная часть содержания $P_{\text{ВОВ}}$ и $C_{\text{ВОВ}}$ сосредоточена в зоне фотосинтеза.

Внутригодовая изменчивость средневзвешенной концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ и скорости его оседания в зоне фотосинтеза глубоководной области моря. Одной из проблем оценки внутригодовой изменчивости седиментационного потока $P_{\text{ВОВ}}$ является относительно небольшой массив данных натуральных измерений его концентраций и неоднородность их распределения в глубоководной области моря. Для обеспечения статистической достоверности массива среднемесячных средневзвешенных концентраций $P_{\text{ВОВ}}$ в зоне фотосинтеза глубоководной области моря последние рассчитывали с помощью линейных уравнений регрессии, связывающих концентрацию $P_{\text{ВОВ}}$ с концентрациями $C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$ и $Xл\ a$ (см. табл. 1). Отметим, что различие рассчитанных и измеренных средневзвешенных концентраций $P_{\text{ВОВ}}$ было незначительным и варьировало в интервале 10—15% (табл. 2). Кроме этого, результаты расчетов показали удовлетворительное совпадение годового хода рассчитанных средневзвешенных концентраций $P_{\text{ВОВ}}$ в слое фотосинтеза в западной и восточной частях моря (их различие не превышало 5—10%). Приведенные выше данные указывают на корректность выполненных расчетов средневзвешенных концентраций $P_{\text{ВОВ}}$, что позволяет использовать их для оценки потока $P_{\text{ВОВ}}$ в слое фотосинтеза всей глубоководной части моря по изобате 200 м.

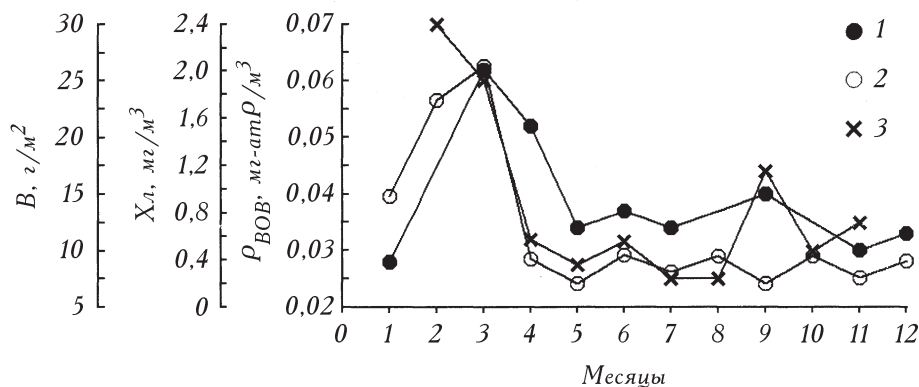
Анализ внутригодовой изменчивости средневзвешенных концентраций $P_{\text{ВОВ}}$ в зоне фотосинтеза показал, что максимальные значения $P_{\text{ВОВ}}$ наблюдаются в конце зимы — начале весны (февраль — март) и в осенний период (сентябрь) (рис. 2). В летнее время отмечается продолжительный минимум со слабо выраженным пиком $P_{\text{ВОВ}}$ (июнь). Однако в сентябре отмечается нарушение синхронной изменчивости показателей биомассы фитопланктона и $Xл\ a$, что, вероятнее всего, связано с рядом причин. Во-первых, для определения среднемесячных величин этих показателей были использованы ряды многолетних данных, полученных в разные периоды времени (для $Xл\ a$ — с 1985 по 1994 г., а для биомассы фитопланктона — с 1948 по 2001 г.). Во-вторых, динамика внутригодовой изменчивости $Xл\ a$ и биомассы фитопланктона из года в год может существенно изменяться, что связывают, прежде всего, с изменчивостью метеорологических условий, оказывающих влияние на сроки сезонной смены видового состава фитопланктона, на абсолютные значения биомассы фитопланктона, количество и продолжительность ее сезонных максимумов [1, 7, 14]. В третьих, в Черном море в теплый период (май — октябрь), когда в верхнем слое глубоководной области моря

2. Внутригодовые изменения измеренной ($P_{\text{ВОВ ЭКСП}}$) и рассчитанной ($P_{\text{ВОВ РАСЧ}}$) средневзвешенной концентрации взвешенного органического фосфора и его седиментационного потока (СП $P_{\text{ВОВ}}$) из зоны фотосинтеза (ЗФ) глубоководной области моря

Месяцы	ЗФ, м	$P_{\text{ВОВ ЭКСП}}$, мг-ат $P \cdot M^{-3}$	$\frac{N}{n}$	$P_{\text{ВОВ РАСЧ}}$, мг-ат $P \cdot M^{-3}$	$\frac{N}{n}$	w_s , $M \cdot \text{СУТ}^{-1}$	СП $P_{\text{ВОВ}}$, мг-ат $P \cdot M^{-2} \cdot \text{СУТ}^{-1}$
Январь	40	$0,028 \pm 0,002$	$\frac{1}{3}$	$0,036 \pm 0,010$	$\frac{2}{52}$	7,2	0,259
Февраль	30	×	×	$0,055 \pm 0,010$	$\frac{2}{6}$	6,2	0,341
Март	45	$0,062 \pm 0,010$	$\frac{1}{10}$	$0,060 \pm 0,011$	$\frac{3}{59}$	4,1	0,246
Апрель	50	$0,052 \pm 0,014$	$\frac{2}{12}$	$0,051 \pm 0,010$	$\frac{2}{87}$	×	×
Май	60	$0,034 \pm 0,002$	$\frac{1}{3}$	$0,035 \pm 0,004$	$\frac{1}{12}$	0,6	0,021
Июнь	60	$0,037 \pm 0,007$	$\frac{1}{6}$	$0,045 \pm 0,014$	$\frac{2}{28}$	1,3	0,058
Июль	65	0,034	$\frac{1}{2}$	$0,046 \pm 0,019$	$\frac{1}{15}$	3,2	0,147
Август	50	×	×	$0,048 \pm 0,012$	$\frac{3}{46}$	1,3	0,062
Сентябрь	50	$0,042 \pm 0,005$	$\frac{1}{2}$	$0,045 \pm 0,012$	$\frac{1}{55}$	1,2	0,054
Октябрь	55	×	×	$0,040 \pm 0,006$	$\frac{3}{20}$	0,7	0,028
Ноябрь	45	0,030	$\frac{1}{1}$	$0,041 \pm 0,012$	$\frac{4}{39}$	2,6	0,107
Декабрь	40	$0,033 \pm 0,003$	$\frac{1}{2}$	$0,024 \pm 0,004$	$\frac{1}{25}$	2,7	0,065
Z	×	×	×	×	×	×	46,0

П р и м е ч а н и е. w_s — скорость осаждения $P_{\text{ВОВ}}$; Z — среднегодовая величина, мг-ат $P \cdot M^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$; N — количество экспедиционных рейсов; n — количество станций, × — исследования и расчеты не проводились.

отмечается стратификация вод, содержание Хл *a* и биомасса фитопланктона изменяются с глубиной не прямо пропорционально. При этом максимум биомассы фитопланктона в расчете на единицу углерода располагается на меньшей глубине, чем максимум Хл *a*, поскольку формирование глубинного максимума Хл *a* связано не с увеличением биомассы фитопланктона, а с повышением внутриклеточного его содержания в результате адаптации водорослей к низкой интенсивности света [21]. Тем не менее, несмотря на на-



2. Годовой ход средневзвешенных концентраций P_{BOV} (1), $X_{л}$ (2) и биомассы фитопланктона (3) в зоне фотосинтеза в глубоководной области Черного моря [11].

блюдаемое нарушение синхронности $X_{л}$ и биомассы фитопланктона в сентябре, на протяжении года в целом сохраняется синхронная динамика этих показателей, что указывает на ключевую роль фитопланктона в формировании взвешенного органического вещества, в том числе P_{BOV} .

Скорость осаждения P_{BOV} в зоне фотосинтеза рассчитывали как частное от деления среднемесячного значения седиментационного потока P_{BOV} , полученного в модельных расчетах (табл. 3) и средневзвешенных концентраций P_{BOV} для глубоководной области моря (см. табл. 2). Как показали расчеты, среднемесячные значения скорости осаждения P_{BOV} в зоне фотосинтеза на протяжении года изменялись в диапазоне $0,6-7,2$ м·сут⁻¹ (см. табл. 2). В холодный период года (ноябрь — март), когда возрастает интенсивность конвективно-ветрового перемешивания вод и усиливается вертикальный обмен вод надпикноклининого слоя, получены наибольшие значения скорости ($2,6-7,2$ м·сут⁻¹). Минимальные величины скорости ($0,6-3,2$ м·сут⁻¹) соответствовали теплomu периоду года (апрель — октябрь), который характеризуется устойчивой стратификацией вод, наличием ВПС и четко выраженного сезонного термоклина, затрудняющего вертикальный обмен в зоне фотосинтеза. Следовательно, рассчитанные нами значения среднемесячных скоростей осаждения P_{BOV} в зоне фотосинтеза в определенной степени учитывают сезонные изменения P_{BOV} планктонного сообщества, его трансформацию и изменение гидрологической структуры верхнего деятельного слоя.

По результатам полученных в работе [8] с помощью уран-ториевого метода средневзвешенных значений концентраций S_{BOV} и N_{BOV} и их потоков, а также резидентного времени пребывания BOB в зоне фотосинтеза и ее толщины в западной части Черного моря в период 1992—1994 гг., нами была рассчитана скорость осаждения взвеси. В течение года ее значения изменялись в диапазоне $0,6-8,1$ м·сут⁻¹ и практически соответствовали величинам скорости, принятым нами для расчета годового хода седиментационного потока P_{BOV} (см. табл. 2). Близкие значения скорости осаждения взвеси ($0,3-2,5$ м·сут⁻¹) были получены и при использовании седиментационных лову-

шек, установленных на глубине 60 м [19, 31] для теплого периода года (май, июль, сентябрь).

Оценка седиментационного потока P_{BOB} по средневзвешенным величинам P_{BOB} . Поток P_{BOB} рассчитывали как произведение средневзвешенной концентрации P_{BOB} и скорости его осаждения (см. табл. 2). На протяжении года величины этого показателя варьировали в широком диапазоне (0,021—0,341 мг-ат $\text{P}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$). Наибольшие значения потока P_{BOB} (0,065—0,341 мг-ат $\text{P}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$) соответствовали холодному периоду года (ноябрь — март), в теплый период (апрель — октябрь) величины потока снижались и изменялись от 0,021 до 0,147 мг-ат $\text{P}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$, а среднегодовая его величина составляла 46 мг-ат $\text{P}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$. Внутригодовая изменчивость потока P_{BOB} в целом соответствовала годовому ходу средневзвешенных значений концентрации P_{BOB} , Хл *a* и биомассы фитопланктона в зоне фотосинтеза, что указывает на влияние не только сезонной изменчивости фитопланктона, но и гидрофизических процессов на интенсивность седиментационного потока P_{BOB} . Такие же выводы получены и в исследованиях седиментационных потоков S_{BOB} и N_{BOB} в зоне фотосинтеза центральной части западного циклонического круговорота в Черном море [8].

Оценка седиментационного потока P_{BOB} по среднемесячным величинам «новой» первичной продукции. В основу модельных расчетов были положены среднемесячные значения «новой» первичной продукции, поскольку ее величина соответствует количеству органического вещества, экспортируемого из фотического слоя в глубинные слои моря [26, 27].

«Новую» первичную продукцию определяли как разницу между экспериментально измеренными среднемесячными величинами суммарной первичной продукции (СПП) за период с 1973 по 1997 г. [9] и величинами регенерационной продукции, рассчитанной по интегральным значениям регенерационного потока фосфора (РПФ) [16] с учетом поглощения минерального фосфора бактериями [15].

Поток P_{BOB} оценивали по интегральным среднемесячным величинам «новой» первичной продукции (НПП) и атомарному отношению $\text{C} : \text{P} = 106 : 1$ (табл. 3). Его годовой ход хорошо совпал с годовым ходом потока P_{BOB} , рассчитанного по средневзвешенным его концентрациям в зоне фотосинтеза (см. табл. 2), а среднегодовые их значения были практически одинаковыми и составляли соответственно 44,9 и 46 мг-ат $\text{P}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$, что указывает на высокую точность модельных расчетов. Таким образом, используемые нами различные подходы для расчета седиментационного потока P_{BOB} из зоны фотосинтеза, в основу которых положены как инструментальные измерения, так и теоретические предпосылки, позволили корректно оценить его годовой ход и среднегодовую величину в глубоководной области Черного моря.

Согласно общим представлениям о формировании гидрохимического режима вод в пелагических районах океана, содержание неорганических соединений азота и фосфора в зоне фотосинтеза поддерживается противоположно направленными и находящимися в динамическом равновесии по-

3. Суммарная первичная продукция (СПП), регенерационный поток фосфора (РПФ), регенерационная первичная продукция (РПП), «новая» первичная продукция (НПП), седиментационный поток $P_{\text{ВОВ}}$ (СП)

Месяцы	СПП, мг-ат $C \cdot M^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$	РПФ, мг-ат $P \cdot M^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$	РПП, мг-ат $C \cdot M^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$	НПП, мг-ат $C \cdot M^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$	СП, мг-ат $P \cdot M^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$
1	35,4	0,071	7,5	27,5	0,259
2	45,8	0,096	10,2	35,6	0,336
3	43,1	0,154	16,3	26,8	0,252
5	24,0	0,206	21,8	2,2	0,021
6	27,7	0,203	21,5	6,2	0,058
7	44,2	0,258	27,3	16,5	0,155
8	26,2	0,229	24,2	2	0,019
9	29,2	0,219	23,2	6	0,057
10	26,4	0,219	23,2	3,2	0,030
11	22,2	0,103	10,9	11,3	0,106
12	15,8	0,084	8,9	6,9	0,065
Z					44,89

Примечание. Среднемесячную величину СПП для апреля в расчетах не учитывали, так как она значительно превосходит значения этого показателя, имеющиеся в литературе [6, 33]; Z — среднегодовая величина, мг-ат $P \cdot M^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$.

токами их поступления (за счет гидрофизических процессов и регенерации зоопланктоном) и потребления микропланктоном (фитопланктон, бактерии) [20]. Для сохранения баланса биогенных элементов в зоне фотосинтеза их поступление за счет восходящего потока компенсируется седиментационным выносом этих элементов. Сравнение среднегодовых значений восходящего потока фосфора [32] и седиментационного потока $P_{\text{ВОВ}}$, полученных в глубоководной области Черного моря, показало, что они составляли соответственно 45,1 и 46 мг-ат $P \cdot M^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$, что указывает на сбалансированность процессов среднегодового поступления фосфора и его седиментационного выноса из зоны фотосинтеза глубоководной области моря.

Очевидно, что исследования потоков биотического цикла биогенных элементов в зоне фотосинтеза, в частности седиментационного потока $P_{\text{ВОВ}}$, открывают новые возможности в решении задач, связанных с прогнозом продуктивности и изменения статуса трофности вод глубоководной области Черного моря под воздействием естественных и антропогенных факторов.

Заключение

На основании измеренных концентраций $P_{\text{ВОВ}}$, $C_{\text{ВОВ}}$ и Хл а в западной и центральной частях Черного моря получен общий характер сезонных изменений их вертикальных профилей в слое 0—100 м и годового хода средневзвешенных значений концентраций $P_{\text{ВОВ}}$, Хл а и биомассы фитопланктона в слое фотосинтеза.

По рассчитанным средневзвешенным концентрациям $P_{\text{ВОВ}}$ в зоне фотосинтеза (использовались регрессионные уравнения, связывающие концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ с $S_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$ и $X_{\text{л а}}$) и скорости осаждения взвеси, вычисленной по результатам модельных расчетов, получены оценки среднемесячных значений седиментационного потока $P_{\text{ВОВ}}$ в глубоководной области моря. Внутригодовая изменчивость средневзвешенных значений $P_{\text{ВОВ}}$ и его седиментационного потока тесно связана с годовым ходом хлорофилла и биомассы фитопланктона, что указывает на ключевую роль фитопланктона не только в образовании $P_{\text{ВОВ}}$, но и в изменении интенсивности его потока из зоны фотосинтеза. Среднегодовые значения потока $P_{\text{ВОВ}}$, полученные на основании среднемесячных средневзвешенных его концентраций и в модельных расчетах, были практически одинаковыми и составляли соответственно 46 и 44,9 мг-ат P м⁻² год⁻¹. Отношение среднегодовых значений восходящего потока фосфора и седиментационного потока $P_{\text{ВОВ}}$, равное единице, указывает на сбалансированность процессов среднегодового поступления фосфора и его седиментационного выноса из зоны фотосинтеза глубоководной области Черного моря.

**

Проведено узагальнення одночасно вимірюваних концентрацій зваженого органічного фосфору (P_{30P}), зваженого органічного вуглецю (S_{30P}) і хлорофілу в шарі 0—100 м, отриманих у період з 1985 по 1994 р. в західній і центральній частинах Чорного моря. За цими показниками і розрахованими на їхній основі рівняннями регресії відновлено ряд середньозважених значень концентрації P_{30P} у глибоководній ділянці моря протягом року. На підставі розрахованих середньозважених концентрацій P_{30P} і швидкості його осадження отримано оцінки внутрішньорічної мінливості седиментаційного потоку P_{30P} із зони фотосинтезу. Його максимальні значення відповідали холодному, мінімальні — теплому періоду року. Середньорічні величини потоку P_{30P} , отримані на основі виміряних середньомісячних середньозважених його концентрацій і розрахованих за багаторічними середньомісячними значеннями «нової» первинної продукції, були практично однаковими і становили відповідно 46,0 і 44,9 мг-ат P·м⁻²·рік⁻¹.

**

The generalization of simultaneously measured concentrations of particulate of organic phosphorus (POP), particulate organic carbon (POC) and chlorophyll in the 0—100 m layer, obtained in the period from 1985 to 1994 in the western and central parts of the Black Sea was carried out. According to these indicators and calculated on the basis of their regression equations a number of weighted averages of the concentrations of POP in the deep-water area of the sea throughout the year were restored. Calculated on the basis of the weighted average concentrations of POP and rate of its sediment, the annual variability of sediment flow of POP from the zone of photosynthesis was estimated. Its maximum values correspond to the cold, minimum – the warm period of the year. Average annual values of sediment flow of POP obtained on the basis of measured monthly average of its concentrations, and calculated on long-term monthly averages of the «new» primary production were practically identical and were 46 and 44,9 mg-at P·m⁻²·year⁻¹ respectively.

**

1. Берсенева Г.П., Чурилова Т.Я., Георгиева Л.В. Сезонная изменчивость хлорофилла и биомассы фитопланктона в западной части Черного моря // Океанология. — 2001. — Т. 44, № 3. — С. 389—398.

2. *Бордовский О.К., Якушев Е.В.* Моделирование вертикального распределения взвешенных форм органического углерода, азота и фосфора в юго-западной части Тихого океана // Там же. — 1995. — Т. 35, № 6. — С. 890—894.
3. *Бурлакова З.П., Еремеева Л.В., Коновалов С.К.* Сезонная и пространственная изменчивость содержания взвешенного органического вещества в деятельном слое Черного моря // Мор. гидрофиз. журн. — 1998. — № 5. — С. 30—62.
4. *Бурлакова З.П., Еремеева Л.В., Коновалов С.К.* Бюджет и потоки взвешенного органического углерода и азота по данным их вертикального распределения в глубоководной части Черного моря // Там же. — 2003. — № 3. — С. 34—49.
5. *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.
6. *Ведерников В.И., Демидов А.Б.* Вертикальное распределение первичной продукции и хлорофилла в различные сезоны в глубоководных районах Черного моря // Океанология. — 1997. — Т. 37, № 3. — С. 414—423.
7. *Ведерников В.И., Демидов А.Б.* Первичная продукция и хлорофилл в глубоководной области Черного моря // Там же. — 1993. — Т. 33, № 2. — С. 229—235.
8. *Гулин С.Б., Поликарпов Г.Г., Егоров В.Н. и др.* Изучение сезонной динамики седиментационного выноса взвешенного вещества, биогенных элементов и загрязняющих веществ из поверхностного слоя вод Черного моря с 1992 по 1994 г. // Геохимия. — 1995. — № 6. — С. 863—873.
9. *Демидов А.Б.* Сезонная изменчивость и оценка годовых величин первичной продукции фитопланктона в Черном море // Океанология. — 2008. — Т. 48, № 5. — С. 718—733.
10. *Егоров В.Н.* Нормирование потоков антропогенного загрязнения черноморских регионов по биогеохимическим критериям // Экология моря. — 2001. — Вып. 57. — С. 75—84.
11. *Кривенко О.В., Пархоменко А.В.* Пространственная и временная изменчивость биомассы фитопланктона в Черном море за период 1948—2001 гг. // Мор. экол. журн. — 2010. — Т. 9, № 4. — С. 5—24.
12. *Кукушкин А.С.* Многолетняя и сезонная изменчивость содержания взвешенного органического вещества в верхнем слое в глубоководных районах Черного моря // Устойчивость и эволюция океанологических характеристик экосистемы Черного моря. — Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. — С. 143—159.
13. *Люцарев С.В., Миркина С.Д.* Определение общего фосфора во взвешенном веществе // Методы гидрохимических исследований океана. — М.: Наука, 1978. — С. 175—179.
14. *Маштакова Г.П., Роухияйнен М.И.* Сезонная динамика фитопланктона / Основы биологической продуктивности Черного моря. — Киев: Наук. думка, 1979. — С. 85—88.

15. Пархоменко А.В. Экскреция фосфора зоопланктоном в открытой части Черного моря // Мор. экол. журн. — 2005. — Т. 4, № 4.— С. 17—32.
16. Пархоменко А.В. Сезонная изменчивость поглощения неорганического фосфора микропланктоном в глубоководной области Черном море // Там же. — 2009. — Т. 8, № 2. — С. 5—23.
17. Романкевич Е.А. Геохимия органического вещества в океане. — М.: Наука, 1977. — 256 с.
18. Румшинский Л.З. Элементы теории вероятности. — М.: Наука, 1970.— 256 с.
19. Самышев Э.З. Содержание взвешенного органического вещества и интенсивность его седиментации в фотическом слое вод Черного моря // Системы контроля окружающей среды. — Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. — С. 352—359.
20. Сорокин Ю.И. Количественная оценка потоков минерального фосфора в планктонных сообществах пелагиали океана // Журн. общ. биологии. — 1985. — Т. 46, № 5.— С. 606—624.
21. Финенко З.З., Чурилова Т.Я., Ли Р.И. Вертикальное распределение хлорофилла и флуоресценции в Черном море // Морск. экол. журн. — 2005. — Т. 4, № 1. — С. 15—45.
22. Финенко З.З., Чурилова Т.Я., Пархоменко А.В., Тугрул С. Фотосинтетические характеристики фитопланктона в западной части Черного моря в период осеннего цветения // Там же. — 2008. — Т. 7, № 4. — С. 75—84.
23. Якушев Е.В., Коржикова Л.И. О распределении взвешенного фосфора по размерным фракциям в водах разной трофности // Океанология. — 1990. — Т. 30, № 2. — С. 241—245.
24. Coban-Yildiz Y., Chiavari G., Fabbri D. et al. The chemical composition of Black Sea suspended particulate organic matter: pyrolysis-GC/MS as a complementary tool to traditional oceanographic analyses // Mar. Chemistry. — 2000. — Vol. 69. — P. 55—67.
25. Copin-Montegut C., Copin-Montegut G. Stoichiometry of carbon, nitrogen and phosphorus in marine particulate matter // Deep-Sea Res. — 1983. — Vol. 30, N 1A. — P. 31—46.
26. Dugdale R.C., Goering J.J. Uptake of new and regenerated forms of nitrogen in primary productivity // Limnol. Oceanogr. — 1967. — Vol. 12, N 1. — P. 196—206.
27. Eppley R.W., Peterson B.J. Particulate organic matter flux and planktonic new production in the deep-ocean // Nature. — 1979. — Vol. 282, N 13. — P. 677—680.
28. Hay B.J., Honjo S., Kempe S. et al. Interannual variability in particle flux in the southwestern Black Sea // Deep-Sea Res. — 1990. — Vol. 37, N 6. — P. 911—928.
29. Hobson Z.A., Menzel D.W., Barber R.T. Primary productivity and sizes of pools of organic carbon in the mixed layer of the ocean // Mar. Biology. — 1973. — Vol. 19, N 4.— P. 298—306.
30. Izdar E., Konik T., Ittekkot V. et al., Particle flux in the Black Sea: nature of the organic matter // Proc. SCOPE /UNER workshop Particle Flux in the

- Ocean, Izmir (Turkey) / Ed. by E.T. Degens, E. Izdar, S. Honjo. — Hamburg: Hamburg University, 1987. — P. 1—18.
31. *Karl D.M., Knauer G. A.* Microbial production and particle flux in the upper 350 m of the Black Sea // *Deep-Sea Res.* — 1991.— Vol. 38. — P. 921—942.
32. *Krivenko O., Parkhomenko A.* Seasonality in upward and regeneration fluxes of inorganic nitrogen and phosphorus in euphotic zone of the deep-water areas of the Black Sea // *Intern. conf. Marine Research Horizon 2020, 17—20 Sept. 2013, Varna (Bulgaria).* — Varna Inst. of Oceanology-BAS. — 2013. — P. 40.
33. *Stelmakh L.V., Yunev O.A., Finenko Z.Z. et al.* Peculiarities of seasonal variability of primary production in the Black Sea // *Ecosystem modeling as a management tool for the Black Sea.* — Dordrecht: Kluwer Acad. publ., 1998. — Vol. 1. — P. 93—104.

¹ Институт биологии южных морей

НАН Украины, Севастополь

² Морской гидрофизический институт

НАН Украины, Севастополь

Поступила 02.09.14