

ОЦЕНКА ПОТОКОВ МИНЕРАЛЬНОГО ФОСФОРА В ЭВТРОФНЫХ ВОДАХ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ¹

© 2020 г. А. В. Пархоменко^а, *, А. С. Кукушкин^б, **

^аИнститут биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН
Севастополь, 299011 Россия

^бМорской гидрофизический институт РАН
Севастополь, 299011 Россия

*e-mail: parkhomenko.al@yandex.ua

**e-mail: kukushkinas@mail.ru

Поступила в редакцию 16.10.2017 г.

После доработки 25.10.2018 г.

Принята к публикации 25.12.2018 г.

По многолетним данным построены пространственные распределения солености и рассчитаны сезонная и среднегодовая площади распространения трансформированных речных вод в северо-западной части Черного моря. Получены среднегодовые оценки основных потоков поступления и оттока фосфатов в районе распространения этих вод. Показано, что эвтрофный статус вод в этом районе обеспечивается за счет как внешних, так и внутренних потоков фосфора. Установлено, что поступление фосфатов из внешних источников в северо-западную часть моря, включая и поток их выноса из нее в открытую часть моря, не оказывает существенного влияния на среднегодовую первичную продукцию в пелагиали Черного моря.

Ключевые слова: Черное море, поток, минеральный фосфор, минерализация, трансформированные речные воды.

DOI: 10.31857/S0321059620010113

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия особое внимание уделяется исследованию потоков биогенных веществ (азота и фосфора), поступающих в северо-западную часть Черного моря (СЗЧМ) из разных источников, и их влиянию на экологическое состояние этой части моря [4, 11, 26, 28]. К одному из важнейших источников поступления биогенных веществ в СЗЧМ относят речной сток (реки Дунай, Днепр, Днестр и Южный Буг), доля которого составляет 80% объема речного стока, поступающего в акваторию Черного моря [4, 11]. Значительный вклад в химическое загрязнение прибрежных вод вносят неочищенные промыш-

ленно-бытовые стоки и береговые стоки с сельскохозяйственных полей, содержащие биогенные вещества, растворенные и взвешенные органические вещества и другие химические загрязнители [4, 11, 26, 28]. Ранее было показано, что поступление минеральных форм азота и фосфора из наземных источников в СЗЧМ – ключевой фактор в эвтрофировании прибрежных вод, возникновении гипоксических зон и деградации прибрежных биоценозов, расположенных в предустьевых участках рек и в районах выпуска промышленно-бытовых стоков [4, 21, 28, 32]. Однако наряду с внешними источниками поступления фосфора важную роль в эвтрофировании водоемов играют и внутренние его потоки (поток фосфатов за счет минерализации взвешенного органического фосфора гетеротрофными организмами, седиментационный поток взвешенного органического фосфора и поток фосфатов из донных отложений (ДО) [8, 11, 35]), которые до настоящего времени в СЗЧМ слабо изучены.

Цель исследования – количественная оценка потоков минерального фосфора (поступление и вынос) в районах СЗЧМ, подверженных влиянию трансформированных речных вод, и оценка их

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания в Институте биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН (Институт морских биологических исследований) по теме “Функциональные, метаболические и токсикологические аспекты существования гидробионтов и их популяций в биотопах с различным физико-химическим режимом” (проект № 0556-2019-0003, номер гос. регистрации № АААА-А18-118021490093-4) и Морского гидрофизического института РАН по теме “Фундаментальные исследования процессов взаимодействия в системе океан-атмосфера, определяющих региональную пространственно-временную изменчивость природной среды и климата” (проект № 0827-2019-0001).

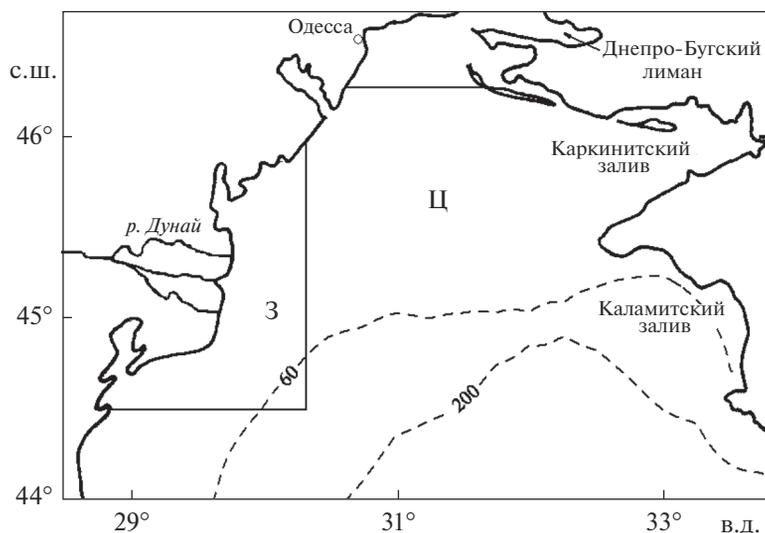


Рис. 1. Районы северо-западной части Черного моря: западный (3), северный (С) и центральный (Ц). Пунктирной линией обозначены изобаты 60 и 200 м.

влияния на уровень первичной продукции в СЗЧМ и в пелагиали Черного моря.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для оценки площади распространения трансформированных речных вод (ТРВ) на северо-западном шельфе использовали результаты многолетних измерений солености в поверхностном слое (~55 тыс. данных измерений в 1947–2010 гг. из банка данных Морского гидрофизического института РАН).

Критерием оценки трофности вод служили среднегодовые величины первичной продукции. Для олиготрофных вод величина этого показателя соответствовала 70, для мезотрофных вод – 150 и для эвтрофных вод – 365 гС/м² год [3]. В зависимости от уровня трофности вод “новую” и регенерационную первичную продукцию рассчитывали по их доле в процентах от среднегодовой первичной продукции в районах СЗЧМ, подверженных влиянию трансформированных речных вод. Для вод с эвтрофным статусом это отношение принимали равным 64 и 36% соответственно [19, 20].

В морской воде неорганические и органические соединения фосфора представлены в виде растворенных и взвешенных его форм. В работе основное внимание сосредоточено на растворимой форме минерального фосфора, играющей важную роль в процессе биосинтеза первичной продукции и функционировании планктонного сообщества. Среднегодовые потоки поступления минерального фосфора в СЗЧМ оценивали по

литературным данным (натурные измерения) и по среднегодовым величинам первичной продукции (расчет).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Оценка площади СЗЧМ, подверженной влиянию трансформированных речных вод

Для определения площади, занимаемой ТРВ в СЗЧМ, необходимо знать границу или передний фронт их распространения. Этим параметром может быть соленость, одна из наиболее консервативных характеристик морских вод [1, 2]. Сезонное и среднегодовое распространение ТРВ в СЗЧМ и в отдельных его районах (рис. 1) оценивали по площади шельфа, ограниченной береговой линией западного и северного его побережий и изохалиной 17‰ (рис. 2, 3). На рис. 2 показано, что западный и северный районы шельфа в течение года постоянно находились под влиянием речного стока, а их площади составляли 10200 и 4400 км² соответственно. Площадь распространения ТРВ в центральном и юго-западном районах зависела от сезона года. Зимой она была 1740 и 1040 км², весной заметно увеличивалась до 10630 и 3650 км², летом достигала максимальных величин 14360 и 4800 км², а осенью снижалась до 7230 и 1550 км² соответственно. По оценкам авторов, среднегодовая площадь СЗЧМ, подверженная влиянию ТРВ, составляла 29340 км². Общая площадь СЗЧМ, ограниченная на юге 44° с.ш., составляла 51470 км² (рис. 3, табл. 1).

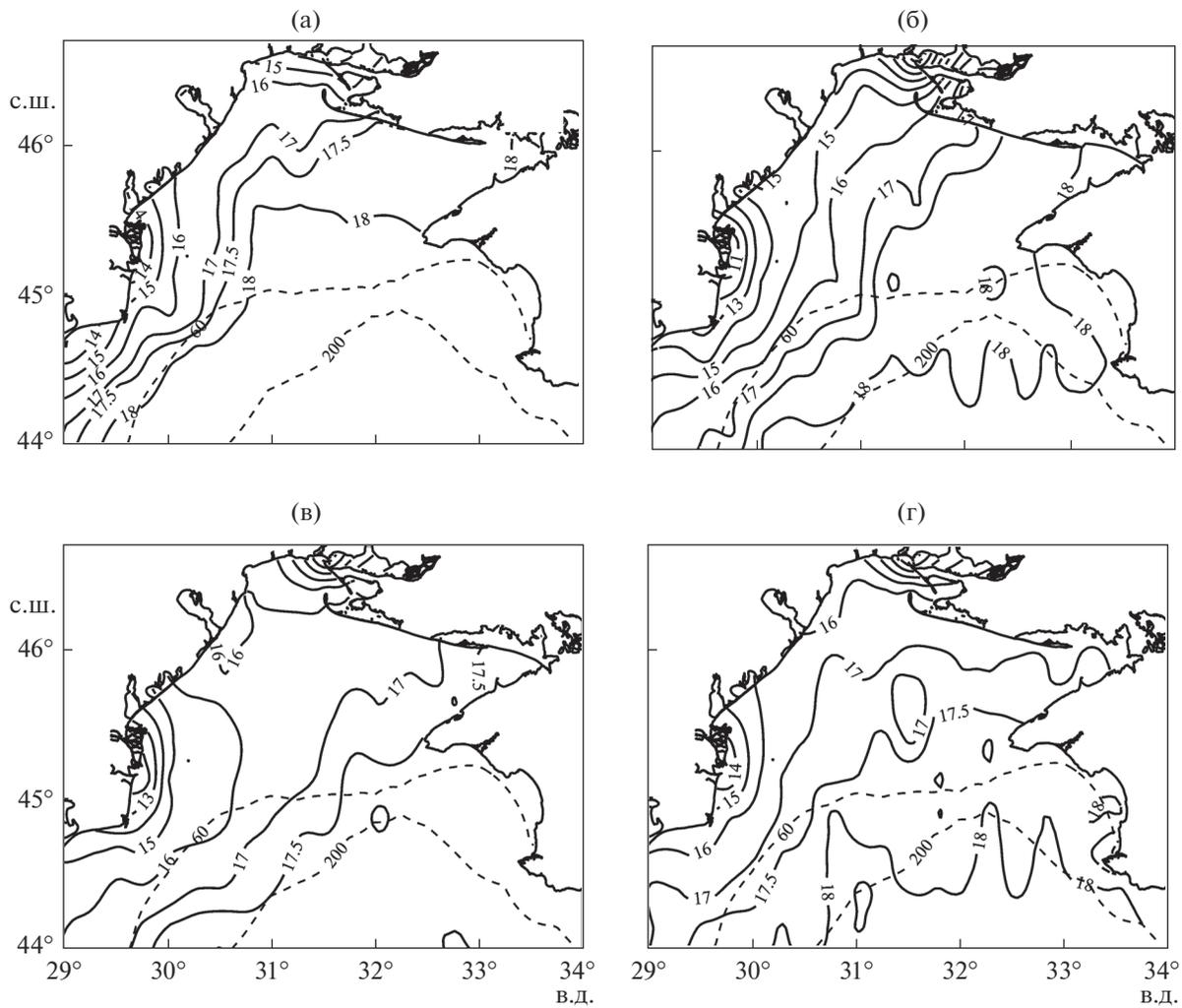


Рис. 2. Распределение солёности в поверхностном слое СЗЧМ в зимний (а), весенний (б), летний (в) и осенний (г) периоды.

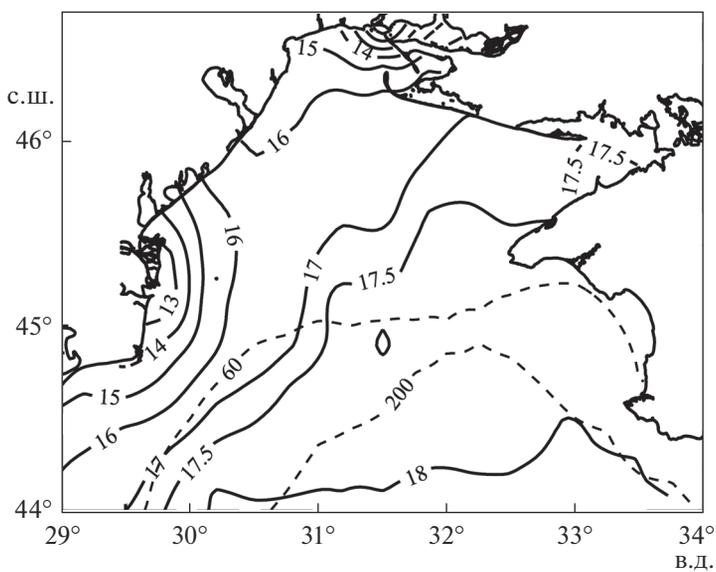


Рис. 3. Распределение среднегодовой солёности в поверхностном слое СЗЧМ.

Таблица 1. Среднегодовые величины первичной продукции (ПП), продукции фитопланктона (ПФ) и потоки минерального фосфора (Р), обеспечивающие синтез ПП в исследуемых районах СЗЧМ

Районы СЗЧМ	Площадь района, км ²	ПП, гС/м ² год	ПФ, 10 ⁶ тС/год	Р, тР/год
Западный	10200	422	4.30	57718
Северный	4400	422	1.80	24160
Центральный	11200	184	2.05	27516
Юго-западный	3540	297	1.05	14093
Район с ТРВ	29340	314	9.20	123487

*Оценка основных потоков,
составляющих баланс фосфора в СЗЧМ*

В процессе функционирования водных экосистем поступающий в водоемы минеральный фосфор включается в биотический круговорот, определяя в значительной степени трофический уровень вод водоема. Трофический статус вод исследуемого района СЗЧМ оценивали по величине среднегодовой первичной продукции, полученной по многолетним данным за период 1973–1996 гг. [9]. Поток поступления фосфатов в эвтрофный район СЗЧМ рассчитывали, исходя из основных положений концепции о “новой” и регенерационной первичной продукции [33, 34]. Согласно этой концепции, при стационарном состоянии элементов биотического баланса азота в фотическом слое открытых районов океана поддерживается следующее соотношение: восходящий поток нитратов, поступающих в поверхностные воды за счет физических процессов, эквивалентен нисходящему потоку взвешенного органического азота и равен скорости потребления нитратов фитопланктоном. Аналогичное соотношение получено авторами и в отношении биотического баланса фосфора в зоне фотосинтеза пелагиали Черного моря [15].

Среднегодовые величины основных потоков, составляющих баланс фосфора в эвтрофных водах СЗЧМ, рассчитывали с учетом сезонной и межгодовой изменчивости биогенных элементов, взвешенного органического вещества и первичной продукции, содержание которых меняется год от года в зависимости от ряда факторов [15–17]. Поэтому для получения достоверных статистических оценок среднегодовых величин основных потоков, составляющих баланс фосфора, использовали результаты многолетних исследований за период 1973–2000 гг., позволяющих оценить среднемноголетний его баланс. Исходя из вышесказанного, принимали, что в рамках выбранного временного масштаба осреднения основных потоков в баланс фосфора в эвтрофных водах СЗЧМ соблюдается условие стационарности (иными словами, поток фосфора, поступающий из внешних источников в зону фотосинтеза, эквивалентен нисходящему потоку взвешенного органиче-

ского фосфора и равен скорости его потребления фитопланктоном). При этом в эвтрофных водах СЗЧМ поток фосфатов из внешних источников и его вторичный поток из ДО обеспечивает биосинтез “новой” первичной продукции. Поток фосфатов в водной толще, образованный в результате минерализации растворенного и взвешенного органического фосфора гетеротрофными организмами, обеспечивает биосинтез регенерационной первичной продукции. Среднегодовые потоки поступления минерального фосфора, обеспечивающие биосинтез “новой”, регенерационной и суммарной первичной продукции в эвтрофных водах СЗЧМ, рассчитывали по результатам многолетних исследований первичной продукции, полученных в 1973–1997 гг. [9]. Так, среднегодовая первичная продукция в западном районе шельфа составляла 422, в юго-западном районе с глубиной <60 м – 297, в центральном районе с глубиной <60 м – 184 гС/м² год (табл. 1). Среднегодовая величина первичной продукции для северного района в цитируемой работе не приводится. В то же время, воды северного района по статусу трофности соответствовали водам западного района, что подтверждается практически одинаковыми концентрациями хлорофилла “а” [16] и биогенных элементов (азот и фосфор) в слое 0–30 м [5]. Поэтому среднегодовую величину первичной продукции для северного района принимали равной 422 гС/м² год. В этом случае среднегодовая первичная продукция в целом для эвтрофных вод СЗЧМ составляла 314 гС/м² год, а годовая продукция фитопланктона – 9.2×10^6 тС/год (табл. 1). Известно, что в эвтрофных водах “новая” первичная продукция относится к регенерационной так: 60 : 40% или 70 : 30% [19, 20]. Тогда в эвтрофных водах СЗЧМ они будут составлять 5.5×10^6 и 3.7×10^6 и 6.7×10^6 и 2.8×10^6 тС/год соответственно. С использованием близкого к реальному весового отношения С : Р = 41 : 0.55 [17] получено, что для биосинтеза “новой” первичной продукции необходим поток фосфатов, равный 73 000–85 000 тР/год (в среднем 79 000 тР/год), регенерационной продукции – 38 000–50 000 тР/год (в среднем 44 000 тР/год), а

суммарной среднегодовой первичной продукции — 123000 тР/год.

Анализ литературных данных показал, что наибольший среднегодовой поток поступления минерального фосфора в СЗЧМ из внешних источников приходился на речной сток (реки Дунай, Днепр, Днестр и Южный Буг) [4, 10, 14]. Так по оценкам, его среднегодовое поступление с речным стоком менялось от 40000 до 49500 тР/год (в среднем 44700 тР/год). Оценки среднегодового потока фосфора с промышленно-бытовыми стоками по сравнению с речным стоком были на порядок ниже и составляли 1300–2200 тР/год [14, 26, 39] (в среднем 1800 тР/год). Среднегодовые значения потока фосфора с атмосферными осадками сопоставимы с его поступлением с промышленно-бытовыми стоками и менялись в диапазоне 1500–3000 тР/год [4, 14] (в среднем 2200 тР/год). Таким образом, суммарный среднегодовой поток фосфора из внешних источников в СЗЧМ, равный 48700 тР/год, мог обеспечить биосинтез “новой” первичной продукции только на 61.6%, а по расчетам авторов, для 100% ее биосинтеза необходимо 79000 тР/год. Следовательно, недостающая часть минерального фосфора должна была восполняться его поступлением из ДО, поскольку поток фосфатов из ДО в придонный слой на шельфе СЗЧМ по значимости сравним со среднегодовым его поступлением с речным стоком [4, 35].

Для оценки скорости поступления фосфатов из ДО использовали результаты натурных измерений, полученные как на шельфе СЗЧМ, так и в морских и пресноводных водоемах в аэробных и анаэробных условиях в разные сезоны года [19, 31, 35, 38]. Известно, что при смене аэробных условий на анаэробные интенсивность восстановительных процессов на границе вода–ДО возрастает, что способствует снижению редокс-потенциала и интенсификации процесса восстановления Fe^{3+} в Fe^{2+} в поверхностном слое ДО. Это приводит к снижению адсорбционной способности ДО с последующим выделением адсорбированных ортофосфатных ионов в придонный слой [37]. Поэтому поток фосфатов из ДО оценивали с учетом анаэробных и аэробных условий. Площадь шельфа с анаэробными условиями, сохранявшимися в среднем четыре месяца (май, июнь, июль, август), составляла 18000 км² [21]. Поток фосфатов на этой площади шельфа в течение этого периода (123 сут) и при его среднесуточной скорости 3.5–15 мгР/м² сут [19, 26, 31, 35, 38] (в среднем 20400 тР/год). В остальные 8 мес., когда на этой площади преобладали аэробные условия, поток фосфатов из ДО при среднесуточных его значениях 1.5–2.7 мгР/м² сут [19, 31, 35, 38] составлял в среднем 9200 тР/год. Аэробные условия в течение всего года также преобладали на пло-

щади шельфа 11300 км², которую рассчитывали по разности площади исследуемого района СЗЧМ и площади с анаэробными условиями. Поток фосфатов на этой площади из ДО, рассчитанный по среднесуточным его значениям, менялся в пределах 1.5–3.5 мгР/м² сут [19, 31, 35, 38] (в среднем 10300 тР/год). Суммарный среднегодовой поток фосфатов из ДО на исследуемой площади северо-западного шельфа составлял 39700 тР/год, что сопоставимо с данными [4, 35].

Оценка потоков осаждения и оттока фосфора из СЗЧМ

Седиментационный поток $P_{\text{воб}}$ — один из важнейших потоков выноса фосфора из водной толщи. Этот поток из зоны фотосинтеза оценивали по результатам измерений содержания взвешенного органического углерода ($C_{\text{воб}}$) с учетом весового отношения $C : P$, в среднем равного 41 : 0.55 во взвешенном веществе (табл. 2) [17]. Сезонный поток $C_{\text{воб}}$ рассчитывали как произведение средневзвешенной его концентрации в зоне фотосинтеза (мг С/м³) и скорости его осаждения ω_s (м/сут) [24], длительности сезона T (сут) и площади распространения трансформированных речных вод (км²). Среднегодовые величины седиментационного потока $C_{\text{воб}}$ и $P_{\text{воб}}$ из зоны фотосинтеза СЗЧМ и их средние квадратические отклонения, рассчитанные по многолетним данным [17], составляли $5.78 \times 10^6 \pm 3.37$ тС/год и $77.5 \times 10^3 \pm 33.6$ тР/год соответственно.

Согласно [1, 2, 18], в оттоке фосфатов с шельфовыми водами из СЗЧМ важную роль играет циркуляция вод, основные особенности которой получены на основе инструментальных наблюдений и численных расчетов. В этих исследованиях показано, что циркуляция вод в СЗЧМ, в значительной степени определяемая ветровыми условиями, отличается большой сезонной изменчивостью. В осенне-зимний период, когда преобладают ветры северных направлений, циркуляция вод на шельфе имеет циклоническую направленность и шельфовые воды, подверженные влиянию трансформированных речных вод, выносятся из СЗЧМ в основном западным вдольбереговым течением в южном направлении. Весной и летом повторяемость северного ветра снижается и чаще наблюдаются ветры-западного и южного направлений, что приводит к ослаблению циклонической циркуляции вод на шельфе. В исключительных случаях при продолжительном (> 8–10 сут) юго-западном ветре возможна полная перестройка циркуляции вод на антициклоническую. Во время половодья и после его завершения (май–август) значительные объемы ТРВ распространяются в приповерхностном слое (0–10 м) в восточном направлении. Этому также способствуют

Таблица 2. Сезонные и среднегодовые седиментационные потоки $C_{\text{ВОВ}}$ и $P_{\text{ВОВ}}$ из зоны фотосинтеза в районах СЗЧМ, подверженных влиянию трансформированных речных вод

Район	Сезон	Площадь с ТРВ, км ²	Средне взвешенная концентрация $C_{\text{ВОВ}}$, мг С/м ³	Седиментационный поток $C_{\text{ВОВ}}$, мгС/м ² сут	Годовой седиментационный поток $C_{\text{ВОВ}}$, 10 ⁶ т С/год	Годовой седиментационный поток $P_{\text{ВОВ}}$, 10 ³ т Р/год
Западный	Зима	10200	120 ± 44	720 ± 266	0.67 ± 0.25	9.0 ± 2.5
	Весна	10200	620 ± 555	1054 ± 949	0.98 ± 0.88	13.1 ± 8.8
	Лето	10200	302 ± 241	665 ± 530	0.62 ± 0.49	8.3 ± 4.9
	Осень	10200	170 ± 109	340 ± 218	0.31 ± 0.2	4.2 ± 2.0
Северный	Зима	4400	112 ± 20	676 ± 122	0.27 ± 0.05	3.6 ± 0.5
	Весна	4400	840 ± 647	1428 ± 1100	0.57 ± 0.44	7.6 ± 4.4
	Лето	4400	672 ± 222	1478 ± 488	0.59 ± 0.2	7.9 ± 2.0
	Осень	4400	138 ± 49	276 ± 98	0.11 ± 0.04	1.5 ± 0.4
Центральный	Зима	1740	85 ± 29	511 ± 173	0.08 ± 0.03	1.1 ± 0.3
	Весна	10630	153 ± 70	261 ± 118	0.25 ± 0.12	3.3 ± 1.2
	Лето	14360	212 ± 77	467 ± 169	0.61 ± 0.24	8.2 ± 2.3
	Осень	7230	130 ± 86	261 ± 173	0.17 ± 0.12	2.3 ± 1.2
Юго-западный	Зима	1040	146 ± 37	878 ± 223	0.08 ± 0.02	1.1 ± 0.2
	Весна	3650	360 ± 254	612 ± 432	0.2 ± 0.14	2.7 ± 1.4
	Лето	4800	240 ± 138	528 ± 304	0.23 ± 0.13	3.1 ± 0.3
	Осень	1550	122 ± 55	244 ± 110	0.04 ± 0.02	0.5 ± 0.2
Районы с ТРВ	Год	29340	—	—	5.78 ± 3.37	77.5 ± 33.6

западные и южные ветры и формирование антициклонического круговорота в придунайском районе шельфа, расположение и размеры которого определяют масштаб распространения ТРВ. Следовательно, можно считать, что трансформированные воды из СЗЧМ в основном выносятся с юго-западным вдольбереговым течением. Очевидно, что в течение года поток фосфатов зависит от объема воды, скорости течения и концентрации фосфатов. В связи с отсутствием данных по исследованию сезонной изменчивости этих показателей в акватории СЗЧМ с условной границей по 44° с.ш., для их оценок использовали схему среднегодового распределения солёности (рис. 3) и величины скорости течений, полученные в [1]. Среднегодовая граница шельфовых вод, занимаемая ТРВ и выделенная по изохалине 17‰ на разрезе по 44° с.ш., находилась в 60 км от береговой линии. Для оценки среднегодового выноса фосфатов принимали следующие параметры вдольберегового течения: ширина 40 км, скорость 0.12 м/с, концентрация фосфатов в слое 0–10 м в интервале 0.05–0.08 мг/л [5]. При выбранных параметрах отток фосфатов из СЗЧМ менялся в пределах 75 000–121 000 тР/год (в среднем 98 000 тР/год), что сопоставимо с данными [26].

В исследованиях выноса фосфатов с шельфовыми водами в открытую часть моря выделяют ряд основных факторов (ветровой режим, прони-

кающая в СЗЧМ ветвь Основного черноморского течения, квазистационарный “севастопольский” антициклонический круговорот и др.), оказывающих влияние на водообмен между СЗЧМ и открытой частью моря [18]. Модель, учитывающая все отмеченные выше факторы и позволяющая оценить поток биогенных элементов из СЗЧМ в открытую часть моря, до настоящего времени не разработана [18]. Вероятнее всего, это и служит объяснением того, что имеющиеся в литературе оценки потока выноса фосфатов с шельфовыми водами из СЗЧМ в открытую часть моря различаются в диапазоне от 9000 до 40000 тР/год [11, 18, 26]. В то же время имеются оценки потока выноса фосфатов с шельфовыми водами из СЗЧМ в открытую часть моря, рассчитанные под влиянием квазистационарного антициклонического круговорота [18]. Однако следует отметить, что круговорот над материковым склоном юго-западнее Крыма не оказывает существенного влияния на трансформированные речные воды исследуемого района северо-западного шельфа над глубинами <60 м, поскольку при приближении к шельфу на глубинах <200 м он разрушается [6]. В то же время захваченные северной ветвью антициклонического круговорота морские шельфовые воды с солёностью >17‰, содержащие минеральный фосфор, могут переноситься к крымскому побережью и в открытое море, а также сохраняться, заглубляясь в центральной области круговорота,

Таблица 3. Баланс минерального фосфора в исследуемом районе СЗЧМ

Источники поступления минерального фосфора	10 ³ тР/год	Вынос и осаждение минерального фосфора	10 ³ тР/год
Речной сток [4, 10, 14]	(40–49.5)* 44.7	С ЮЗ вдольбереговым течением ***	(75–121) 98
Промышленно-бытовые стоки [14, 26, 39]	(1.3–2.2) 1.8	Вынос минерального фосфора с трансформированными водами из СЗЧМ в открытую часть моря [11, 18, 26]	(9–40) 21
Атмосферные осадки [4, 14]	(1.5–3.0) 2.2	Накопление в донных осадках**	(23.6–51.8) 37.7
Поток из ДО***	(20.4–59.3) 39.7	–	–
Поток за счет минерализации Р _{вов} в водной толще***	(38–50) 44	–	–
Среднегодовой поток поступления минерального фосфора в СЗЧМ	132.4	Среднегодовой поток выноса и накопления минерального фосфора в осадках	156.7

* Цифры над чертой соответствуют пределам изменчивости значений потока фосфора, цифры под чертой – среднегодовой его величине.

** Накопление фосфора в осадках оценивали по разнице между седиментационным потоком Р_{вов} и потоком минерального фосфора из ДО.

*** Расчетные данные.

не оказывая при этом заметного влияния на гидрохимические характеристики вод открытой части Черного моря. Согласно [11, 18, 26], среднегодовые величины выноса фосфатов с трансформированными речными водами СЗЧМ в открытую часть моря менялись в интервале 9000–40000 тР/год (в среднем 21000 тР/год).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Количественные оценки среднегодовых потоков поступления и выноса минерального фосфора позволили оценить его баланс в эвтрофном районе СЗЧМ. Согласно данным табл. 3, среднегодовой поток поступления фосфатов из внешних источников (натурные измерения) и ДО (расчет), обеспечивающих синтез “новой” первичной продукции, составил 88400 тР/год и был сопоставим с величиной, рассчитанной по многолетним данным первичной продукции – 79000 тР/год. Доля потока минерального фосфора из ДО относительно суммарного потока его поступления (88400 тР/год) в эвтрофные воды СЗЧМ – 44.9%, что указывает на значительную роль этого потока в обеспечении синтеза “новой” первичной продукции (табл. 3). При исследованиях в морских и пресноводных водоемах выяснено, что потоки минеральных соединений азота и фосфора из ДО могут не только оказывать влияние на изменение химического состава водной толщи, но и обеспечивать значительную часть потребности фитопланктона в биогенных веществах [19, 36]. Так, в морских экосистемах потоки аммонийного азота

и минерального фосфора из ДО обеспечивают соответственно ~25 и 50% от необходимого количества минеральных соединений азота и фосфора для биосинтеза первичной продукции [38]. По оценкам авторов, поток минерального фосфора из ДО в эвтрофных водах составлял ~30% среднегодового его поступления в СЗЧМ. Как показано в [19, 20], поток фосфатов из ДО в водах с мезотрофным статусом может увеличиваться до 39%, а в эвтрофных и гипертрофных водах он повышался от 50 до 100% относительно среднегодового седиментационного потока Р_{вов}. В эвтрофных водах СЗЧМ величина этого показателя составляла 51% (табл. 2, 3).

Исходя из представлений об эквивалентности седиментационного потока Р_{вов} и потоков фосфатов, обеспечивающих синтез “новой” первичной продукции, получено, что среднегодовой поток осаждения Р_{вов} (77500 т Р/год) сопоставим со среднегодовым потоком фосфатов из внешних источников (88400 т Р/год) и рассчитанным по данным первичной продукции (79000 т Р/год). Среди внутренних потоков важную роль играет поток фосфатов, образующийся в результате минерализации Р_{вов} микрофлорой и зоопланктоном в зоне фотосинтеза и обеспечивающий синтез регенерационной первичной продукции. По оценкам авторов настоящей статьи, на его долю приходилось ~33.4% суммарного поступления минерального фосфора в эвтрофный район СЗЧМ (табл. 3).

В зависимости от трофности вод среднегодовые величины “новой” первичной продукции увеличиваются, а величины регенерационной первичной продукции снижаются относительно среднегодовой величины первичной продукции [19]. Так, среднегодовая первичная продукция в пелагиали Черного моря, полученная по многолетним данным за период 1973–1997 гг., составляла $135 \text{ гС/м}^2 \text{ год}$ [9], что указывало на мезотрофный статус вод. Среднегодовой поток экскреции фосфатов гетеротрофными организмами в зоне фотосинтеза пелагиали моря обеспечивал регенерационную первичную продукцию в размере $\sim 64\%$ от среднегодовой первичной продукции [23]. В этом потоке на долю простейших приходился 51, мезопланктона 32, желетелого макропланктона 17% [23]. Следует отметить, что в зоне фотосинтеза пелагиали моря бактерии не являются прямым поставщиком минерального фосфора для фитопланктона, поскольку они сами активно его усваивают. Их вклад в этот процесс составлял $\sim 30\%$ суммарного поглощения фосфатов микропланктоном (бактерии, фитопланктон) [22]. Для эвтрофных озер также отмечалось, что вклад микроорганизмов в обеспечение фитопланктона минеральным фосфором относительно общего регенерационного потока был небольшим и составлял $\sim 14\%$. В то же время на долю зоопланктона приходилось 23–36% с учетом простейших, нектона и бентоса [8, 12]. По оценкам авторов статьи, регенерационный поток фосфатов за счет биохимической трансформации $P_{\text{воб}}$ гетеротрофными организмами в эвтрофных водах составлял 44000 тР/год , или 33% суммарного потока поступления фосфатов в СЗЧМ (табл. 3), что в целом сопоставимо с данными [8, 12].

Анализ потоков поступления фосфора в СЗЧМ показал, что эвтрофный статус вод обеспечивается не только его поступлением из внешних источников, но и внутренними биотическими потоками (минерализация $P_{\text{воб}}$ микрофлорой и зоопланктоном в водной толще и бентический поток фосфатов). На долю этих потоков приходилось $\sim 63.4\%$ среднегодового поступления минерального фосфора в СЗЧМ. Сравнение величин среднегодового поступления фосфатов в эвтрофные воды СЗЧМ, рассчитанного с использованием натурных измерений, а также по данным первичной продукции, показало, что их различие $\leq 7\%$ (табл. 3).

Поз представленным в табл. 3 данным видно, что баланс фосфора в эвтрофных водах СЗЧМ обеспечивается потоками его осаждения в ДО, выносом с вдольбереговым течением в южном направлении и оттоком его с шельфовыми водами, подверженными влиянию трансформированных речных вод, из СЗЧМ в открытую часть моря. Сравнение среднегодовых величин седиментаци-

онного потока $P_{\text{воб}}$ и потока поступления фосфатов, обеспечивающего биосинтез “новой” продукции (расчет по данным первичной продукции в эвтрофных водах), показало, что они практически одинаковы, и это в целом согласуется с представлениями об эквивалентности седиментационного потока $P_{\text{воб}}$ и восходящего потока минерального фосфора [33, 34].

В выносе фосфора из СЗЧМ ключевая роль принадлежит вдольбереговому течению в юго-западном направлении, с его водами выносятся $\sim 63\%$ суммарного среднегодового потока выноса фосфора из эвтрофного района СЗЧМ. При этом доля накопления фосфора в ДО составляла 24%, а отток с шельфовыми водами фосфатов в открытую часть моря $\sim 13\%$. Сравнение среднегодовых потоков поступления и выноса фосфатов в эвтрофных водах СЗЧМ показало их различие $\leq 15\%$, что указывает на корректность расчетов и полученных оценок (табл. 3).

Среднегодовые величины потоков поступления фосфора из внешних источников в открытую часть моря оценивали по разности потоков его поступления в акваторию всего Черного моря и СЗЧМ. Из приведенных в табл. 4 данных следует, что 55.5% от среднегодового потока минерального фосфора из внешних источников, поступающего в акваторию Черного моря, попадает в СЗЧМ. Допуская, что среднегодовой поток минерального фосфора, равный 60000 тР/год (табл. 4), поступает в глубоководную область Черного моря и равномерно распределяется по площади 311000 км^2 , его поток на единицу площади будет $0.19 \text{ гР/м}^2 \text{ год}$. Этот поток фосфатов может обеспечить прирост первичной продукции (при весовом отношении $C : P = 41 : 1$), в $7.8 \text{ гС/м}^2 \text{ год}$ и составляющий $\sim 5.7\%$ от среднегодовой первичной продукции ($135 \text{ гС/м}^2 \text{ год}$). В то же время поток выноса фосфатов с трансформированными речными водами в открытую часть моря может обеспечить прирост первичной продукции всего лишь на $2.5 \text{ гС/м}^2 \text{ год}$, что составляет $\sim 1.8\%$ от среднегодовой первичной продукции (табл. 4). Из расчетов следует, что среднегодовое поступление фосфора из внешних источников, включая поток его выноса с шельфовыми водами из СЗЧМ, не оказывает существенного влияния на уровень первичной продукции в открытой части моря. Подтверждением расчетов авторов служат оценки восходящего и регенерационного потоков минерального фосфора в пелагиали Черного моря, полученные на основе результатов многолетних исследований гидрологических и гидрохимических показателей в период 1973–2005 гг. [15]. Полученные оценки показали, что ключевая роль в поступлении фосфатов в зону фотосинтеза пелагиали моря площадью 311000 км^2 принадлежит восходящему и регенерационному потокам, обеспечивающим

Таблица 4. Потоки поступления минерального фосфора (10^3 т Р/год) из внешних источников в акваторию Черного моря (ЧМ), СЗЧМ и глубоководную область моря (ГОЧМ) и их соотношение (%)

Источники поступления минерального фосфора	ЧМ	%	СЗЧМ	%	ГОЧМ	%
Речной сток [7, 10, 14]	$\frac{(49.5-55)^*}{52}$	59.3	$\frac{(40-49.5)^*}{44.7}$	91.8	7.3	12.2
Атмосферные осадки [14, 25, 27]	$\frac{(17.2-33.9)}{24}$	27.3	$\frac{(1.5-3.0)}{2.2}$	4.5	21.8	36.3
Промышленно-бытовые стоки [30, 39]	$\frac{(8.6-15)}{11.8}$	13.4	$\frac{(1.3-2.2)}{1.8}$	3.7	10	16.6
Вынос с трансформированными водами в открытую часть моря из СЗЧМ [11, 18, 26]	—	—	—	—	$\frac{(9-40)^*}{21}$	34.9
Всего	87.8	100	48.7	100	60.1	100

* Цифры над чертой соответствуют пределам изменчивости значений потока фосфора, цифры под чертой — среднегодовой его величине.

среднегодовой уровень первичной продукции 135 гС/м^2 год с учетом поглощения фосфатов бактериями [22]. Кроме того, полученные данные хорошо согласуются и с результатами исследований межгодовой изменчивости первичной продукции и хлорофилла “а” в пелагиали Черного моря. В этих исследованиях не установлено увеличения среднегодовой интегральной первичной продукции и хлорофилла “а” за 30-летний период с 1978 по 2008 г. [9, 13, 29]. Среднегодовые величины первичной продукции изменялись в узком диапазоне $135-143 \text{ гС/м}^2$ год [9, 13, 29], что указывает на мезотрофный статус вод в пелагиали Черного моря.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований показали, что эвтрофный статус вод в СЗЧМ обеспечивается не только потоками поступления минерального фосфора из внешних источников, но и внутренними потоками (поток фосфатов за счет минерализации $P_{\text{вов}}$ в водной толще, поток фосфатов из ДО), вклад которых составлял $\sim 63.4\%$ от среднегодового его поступления в СЗЧМ. На долю потока фосфатов из ДО, обеспечивающего биосинтез “новой” первичной продукции, приходилось $\sim 45\%$ относительно общего их поступления в эвтрофные воды СЗЧМ. Получено, что в для сохранения баланса фосфора в эвтрофных водах важен поток его выноса с вдольбереговым течением в юго-западном направлении, составляющий $\sim 63\%$ относительно среднегодового его выноса из СЗЧМ,

и потока накопления фосфора в донных отложениях, равного 24% .

Показано, что среднегодовое поступление фосфатов из внешних источников в открытую часть моря, включая и его отток с трансформированными водами из СЗЧМ, может обеспечивать $\sim 6\%$ прироста первичной продукции относительно среднегодовой ее величины, что не оказывает существенного влияния на изменение трофического статуса вод открытой части Черного моря.

Рассмотренные результаты освещают лишь некоторые аспекты проблемы круговорота фосфора в морских экосистемах. Тем не менее решение даже этих вопросов может быть основой исследований механизмов обеспечения биогенными веществами планктонного сообщества и его функционирования в морских экосистемах в условиях антропогенной эвтрофикации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блатов А.С., Расулов М.А., Чечель И.И. Исследования циркуляции вод в северо-западной части Черного моря и ее связь с антропогенным воздействием на речной сток // Вод. ресурсы. 1983. № 4. С. 30–37.
2. Большаков В.С. Трансформация речных вод в Черном море. Киев: Наук. Думка, 1970. 328 с.
3. Виноградов М.Е., Шушкина Э.А. Общность продукционных процессов в пресноводных и морских экосистемах // Гидробиол. журн. 1988. Т. 25. № 3. С. 31–39.

4. *Гаркавая Г.П., Богатова Ю.И.* Гидрохимические исследования // Северо-западная часть моря; биология и экология. Киев: Наук. Думка, 2006. С. 60–83.
5. *Геворгиз Н.С., Кривенко О.В., Кондратьев С.И.* Обобщение данных многолетних исследований содержания основных биогенных элементов в северо-западной части Черного моря за период 1980–2002 гг. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005. Вып. 12. С. 177–187.
6. *Гинзберг А.И., Костянов А.Г., Соловьев Д.М., Станичный С.В.* Эволюция антициклонических вихрей в северо-западной части Черного моря // Иссл. Земли из космоса. 1996. № 4. С. 67–75.
7. *Губанов В. И.* Биогенные вещества // Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. М.: Наука, 1992. Т. 4. Вып. 2. С. 114–151.
8. *Гутельмахер Б.Л.* Метаболизм планктона как единого целого. (Трофометаболические взаимодействия зоо- и фитопланктона). Л.: Наука, 1986. 154 с.
9. *Демидов А.Н.* 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 антропогенно загрязненного черноморских регионов по биогеохимическим критериям // Экол. моря. 2001. Вып. 57. С. 75–84.
11. *Еремеев В.Н., Латун В.С., Совга О.С.* Влияние антропогенных загрязнителей и путей их переноса на экологическую обстановку в северо-западном районе Черного моря // Морск. гидрофиз. журн. 2001. № 5. С. 41–55.
12. *Жукова Т.В.* Режим фосфора, его роль в биотическом круговороте и эвтрофировании (на примере озер Нарочанской группы) // Гидробиол. журн. 1989. Т. 25. № 4. С. 24–28.
13. *Ковалева И.В.* Межгодовые и сезонные изменения концентрации хлорофилла “а” и первичной продукции в глубоководной области // Гидробиол. журн. 2014. Т. 50. № 3. С. 38–50.
14. *Кресин В.С., Еременко М.А., Захарченко М.А., Юрченко А.И.* Динамика поступления соединений фосфора в Украинские прибрежные воды Черного моря и комплекс водоохранных предприятий // Экологія довкілля та безпека життєдіяльності. 2008. № 5. С. 28–33.
15. *Кривенко О.В., Пархоменко А.В.* Восходящий и регенерационный потоки неорганических соединений азота и фосфора в глубоководной области Черного моря // Журн. общей биологии. 2014. Т. 75. № 5. С. 394–408.
16. *Кукушкин А.С.* Изменчивость содержания взвешенного органического вещества в северо-западной части Черного моря // Океанология. 2013. Т. 53. № 5. С. 626–642.
17. *Кукушкин А.С.* Пространственно-временная изменчивость содержания взвешенного органического фосфора в верхнем слое в западной глубоководной и северо-западной шельфовой частях Черного моря // Морск. экологич. журн. 2013. Т. 6. № 4. С. 62–71.
18. *Латун В.С.* Влияние антициклонических вихрей на водообмен между северо-западным мелководьем и глубоководной частью Черного моря // Комплексные экологические исследования Черного моря. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 1995. С. 37–47.
19. *Мартынова М.В.* Азот и фосфор в донных отложениях озер и водохранилищ. М.: Наука, 1984. 159 с.
20. *Мартынова М.В.* Закономерность процессов накопления, трансформации и выделения со дна водоемов соединений азота и фосфора. Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. Ростов на Дону: РГИ, 1988. 35 с.
21. *Орлова И.Г., Белевич Р.Р., Попов Ю.И., Украинский В.В., Бондарь С.Б.* Динамика гипоксических процессов в придонных водах северо-западного шельфа Черного моря // Океанология. 1999. Т. 39. № 4. С. 548–554.
22. *Пархоменко А.В.* Сезонная изменчивость поглощения неорганического фосфора микропланктоном в глубоководной области Черного моря // Морск. экологич. журн. 2009. Т. 8. № 2. С. 5–23.
23. *Пархоменко А.В.* Экскреция фосфора зоопланктоном в открытой части Черного моря // Морск. экологич. журн. 2005. Т. 4. № 4. С. 17–32.
24. *Пархоменко А.В., Кукушкин А.С.* Седиментационный поток взвешенного органического фосфора в пелагиали Черного моря // Океанология. 2018. Т. 58. № 2. С. 258–268.
25. *Рождественский А.В.* Геохимия и гидрохимия дунайского стока и атмосферных осадков в связи с современными седиментами Черного моря // Океанология (Болгария). 1998. Т. 2. С. 20–25.
26. *Совга Е.Е., Жоров В.А., Богуславский С.Г.* Многолетняя изменчивость потоков фосфора в северо-западной части Черного моря // Морск. гидрофиз. журн. 2000. № 4. С. 69–79.
27. Стан довкілля Чорного моря. Національна доповідь України 1996–2000 роки / Міністерство екології та природних ресурсів України. Український науковий центр екології моря (Активний центр з моніторингу і оцінки забруднення) Одеса: Астропринт, 2002. 80 с.
28. *Фащук Д.Я., Шапоренко С.И.* Сероводородная зона северо-западного шельфа Черного моря: природа, причины возникновения, механизмы динамики // Вод. ресурсы. 1995. Т. 22. № 5. С. 568–584.
29. *Финенко З.З., Суслин В.В., Чурилова Т.Я.* Оценка продуктивности фитопланктона Черного моря по спутниковым данным // ДАН. 2010. Т. 432. № 6. С. 845–848.
30. *Эдельштейн К.К.* Сброс фосфора с городскими сточными водами в прибрежную зону океана // Океанология. 1998. Т. 38. № 2. С. 216–220.
31. *Callender E., Hammond D.E.* Nutrient exchange across the sediment-water interface in the Potomac River estuary // Estuar. Coast. Shelf Sci. 1982. V. 15. P. 395–413.
32. *Cociasu A., Dorogan L., Humborg C., Popa L.* Long-term ecological changes in the Romanian coastal waters

- of the Black Sea // *Marine Pollution Bull.* 1996. V. 32. P. 32–38.
33. *Dugdale R.C., Goering J.J.* Uptake of new and regenerated forms of nitrogen in primary productivity // *Limnol. Oceanogr.* 1967. V. 12. № 1. P. 196–206.
34. *Eppley R.W., Peterson B.J.* Particulate organic matter flux and planktonic new production in the deep ocean // *Nature.* 1979. V. 282. № 13. P. 677–680.
35. *Friedrich J., Dinkel C., Friedl G., Pimenov N., Wijsman J., Gomoiu M., Cociasu A., Popa L., Wehrli B.* Benthic nutrient cycling and diagenetic pathways in the north-western Black Sea // *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 2002. V. 54. P. 369–383.
36. *Kristensen E.* Benthic fauna and biogeochemical processes in marine sediment: microbial activities and fluxes // *Nitrogen Cycling in Coastal Marine Environments* / Eds Blackburn T.N., Sorensen J. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 1988. P. 275–299.
37. *Krom M.D., Berns R.A.* Adsorption of phosphate in anoxic marine sediments // *Limnol. and Oceanogr.* 1980. V. 25. P. 797–806.
38. *Nixon S.W.* Remineralization and nutrient cycling in coastal marine ecosystems // *Nutrient Enrichment in Estuaries* / Eds. Neilson B. Clifton, N.J.: Humana Press, 1981. P. 111–138.
39. *The Black Sea.* Transboundary Diagnostic Analysis // Programme Coordination Unit. N. Y., 1997. № 4. 130 p.