

## ЕКОЛОГІЯ ОКЕАНІВ ТА МОРИВ

УДК 551.46.262.5

**Е.Е. Совга**, доктор геогр. наук, ведучий научн. сотр.

**Н.Ф. Кириленко**, аспирант

Отдел гидрофизики шельфа

Морской гидрофизический институт НАН Украины

ул. Капитанская, 2, Севастополь-11, 99011, Украина

### МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЭКОСИСТЕМЕ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО ШЕЛЬФА ЧЕРНОГО МОРЕА

Оценена динамика поставки биогенных элементов рекой Дунай за два периода 1960-1990 гг. и 1990-2005 гг., ее влияние на уровень эвтрофикации северо-западной части Черного моря и трансформацию биогенных элементов в системе вода-донные отложения в условиях гипоксии и обмена с открытой частью моря.

**Ключевые слова:** Экосистема, северо-западный шельф, биогенные элементы.

#### Введение

Северо-западный шельф (СЗШ) Черного моря – один из самых высокопродуктивных районов моря, первичная продукция которого находится в прямой зависимости от наличия и поставки жизненно важных биогенных элементов (азот, фосфор, кремний). В то же время влияние избыточного поступления биогенов является причиной эвтрофикации водоема и связано как с природно-климатическими, так и с антропогенными факторами. **Объект исследований** – экосистема СЗШМ. **Предметом настоящего исследования** является поступление биогенов с речными водами реки Дунай.

По данным различных источников [8, 9] за период 1980-1990 годы преобладающая роль в поступлении биогенных элементов на северо-западный шельф отводится именно реке Дунай. Кроме того, в работе [7] было высказано предположение о наступлении периода деэвтрофикации северо-западной части Черного моря в период 1995-2005 годы за счет уменьшения поступления биогенных элементов с речным стоком.

В свете указанных работ была поставлена **цель** – оценить динамику поступления биогенных элементов с речными водами Дуная за несколько временных периодов (1980-1990 годы и 1995-2005 годы) с учетом особенностей циркуляции вод, водообмена между северо-западной частью и глубоководной зоной, объемов сбросов от береговых источников. Кроме того, дана оценка трансфор-

мации биогенных элементов с учетом процессов, протекающих в донных отложениях в период гипоксии.

### Материалы и методы исследований

В данной работе были использованы материалы анализа химического состава морской воды, полученные в многочисленных морских экспедициях, при участии Морского гидрофизического института НАН Украины, Института биологии южных морей НАН Украины и данные, заимствованные из публикаций зарубежных авторов.

### Результаты исследований и их анализ

Проведем анализ многолетней изменчивости поставки биогенных элементов в северо-западную часть Черного моря по каждому из биогенов.

**Фосфор.** Существует несколько природных источников поступления фосфора в море – это реки, атмосферные осадки, эоловый перенос, обмен с донными отложениями и водообмен через проливы. В наше время появился дополнительный источник фосфора – антропогенный. Средние содержания фосфатов в верхнем квазиоднородном слое вод за десятилетия 1950-60 гг. и 1985-95 гг. (период сильного эвтрофирования бассейна) возросли примерно в два раза. Рост поступления фосфора за период 1972-90 гг., по-видимому, мог стать одной из причин расширения зон гипоксии и заморозов на северо-западном шельфе до 40 000 км<sup>2</sup> и гибели донной фауны от 3,0 до 8,0 млн. т в год [8]. Среднегодовое поступление фосфатов в северо-западную часть моря (10<sup>3</sup> т/год) приведено в таблице 1.

Таблица 1

Среднегодовое поступление фосфатов в северо-западную часть моря, 10<sup>3</sup> т/год [5].

Источники фосфора	Формы фосфорных соединений		Сумма	Потери
	Растворенные	Взвешенные		
Терригенный аэрозоль	0,61	0,89	1,5	Отток с морскими водами в глуб. зону
Речной сток	11,100	28,788	39,888	
Дренаж с суши	1,92	5,01	6,93	111,318
В том числе:				
Сброс сточных вод	1,73		1,73	33,000 (в осадки)
Подземный сток	0,19		0,19	
Приток с морскими водами из глуб.зоны	96,000		96,000	
<b>Всего:</b>	<b>109,63</b>	<b>34,688</b>	<b>144,318</b>	<b>144,318</b>

Согласно данным таблицы 1, поток фосфора в глубоководную зону из северо-западной части превышает его поток из глубоководной зоны на величину 15318 т фосфора за год. Эта величина, по-видимому, характеризует уровень антропогенного влияния северо-западной части моря на экосистемы его глубоководной зоны.

Для оценки изменения поставок фосфора со стоком реки Дунай за период 1990-2005 гг. анализировались данные работы [9], где приведена информация о поставке фосфора и неорганического азота рекой Дунай за указанный период (рис. 1).

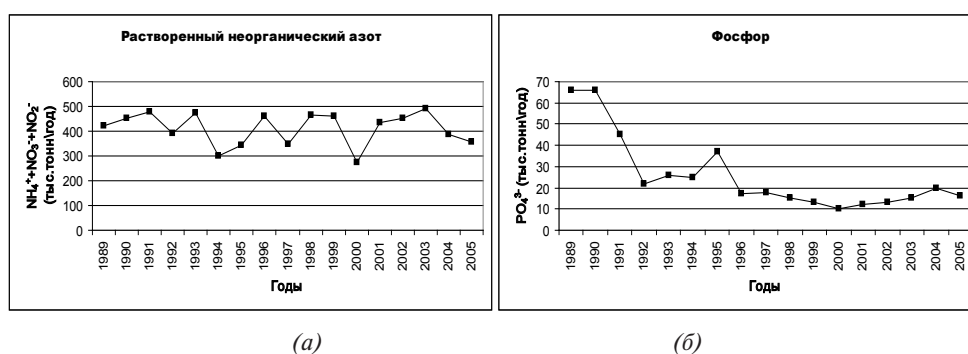


Рис. 1. Динамика поставки неорганических форм азота (а) и фосфора (б) рекой Дунай за период 1990-2005 гг.

Согласно этим данным поступление фосфора с реками уменьшилось почти в четыре раза (рис. 1б), что в определенной мере может быть подтверждением начала периода «деэвтрофикации» (по терминологии, предложенной в работе [7]). Другая ситуация наблюдается для неорганических форм азота (рис. 1а).

**Азот.** Сведения о стоке рек и поставках неорганических форм азота реками северо-западной части моря в 60-90-е годы приведены в работе [6]. Из данных работы [6] следует, что в речных водах нитраты составляют 67%, при этом 81% от неорганических форм азота поставляет в море река Дунай. Содержание аммиачной формы азота в Дунайской воде в 80-е годы составляла 0,24 мг/л, в последующие 90-е годы отмечена тенденция его увеличения из-за антропогенного влияния и уменьшения нитрификации [4], а также в связи с поступлением аммиачного азота из донных отложений согласно [6,7].

Итоговым является преобладание потока всех форм азота из мелководья в глубоководную часть моря. В количественном исчислении это преобладание выражается в 17000 т всех форм азота за год. Очевидно, такой величиной можно оценить антропогенное влияние северо-западной части моря на экосистемы открытого моря. Результаты расчетов потоков неорганических форм азота для северо-западной части моря представлены в таблице 2.

Таблица 2

**Исходная информация для расчета потоков минеральных форм азота и результаты расчетов для СЗШ Черного моря [6].**

Параметр	Размерность	Зима		Лето	
		Приток	Отток	Приток	Отток
<b>Объём морских вод</b>	$\text{м}^3/\text{с} \cdot 10^4$	<b>33,1</b>	<b>29,4</b>	<b>12,80</b>	<b>19,2</b>
Средняя концентрация в слое :					
$\text{NO}_3^-$	$\text{мгN}/\text{м}^3$	23,0	3,7	7,30	2,7
$\text{NO}_2^-$		0,8	0,4	0,50	0,2
$\text{NH}_4^+$		26,0	55,0	20,00	17,7
Суммарные потоки в слое :					
$\text{NO}_3^-$	$\text{тN}/\text{год} \cdot 10^4$	6,0	0,8	0,90	0,4
$\text{NO}_2^-$		0,2	0,9	0,05	0,3
$\text{NH}_4^+$		6,6	12,5	2,00	2,6
<b>Сумма потоков</b>		<b>12,8</b>	<b>14,2</b>	<b>2,95</b>	<b>3,3</b>

Средний приток за год (зима + лето) –  $15,8 \cdot 10^4 \text{т}$ .

Средний отток за год (зима + лето) –  $17,5 \cdot 10^4 \text{т}$ .

Сравнивая эту величину с аналогичной для фосфора, приведенной в таблице 1 и в работе [5], следует отметить, что она существенно ниже, если исходить из стехиометрического соотношения потребления азота и фосфора при синтезе органического вещества. Это отношение P:N=1:16, при существующем потоке фосфора из СЗШ, для азота она должна бы составить величину 252800 т/год. Очевидно, в значительном уменьшении поступающего из СЗШ азота могли сыграть роль процессы денитрификации, связанные с образованием молекулярного азота и его потерей в атмосферу.

В северо-западную часть моря поступает относительно небольшая часть  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  из атмосферы – 4,6%, и почти поровну с речным стоком (35,4%) и с морскими водами из открытой части моря (32,0%), и с побережья (28,0%). Из общего поступления на СЗШ 35,7% всех неорганических форм азота уходит в глубоководную зону, остальная часть 64,3% переходит в активный ил осадков [6]. Величина диффузионного потока азота со дна в воду в северо-западной части равна  $11,0 \text{ мг}/\text{м}^2 \cdot \text{сут}$ . Диапазон колебания плотностей потоков азота для отложений на СЗШ от  $-5,97$  (поток в осадки) до  $+41,01 \text{ мг-ат N}/\text{м}^2 \cdot \text{сут}$  (из осадков в воду).

Из представленной на рис. 1а сравнительной динамики поставки неорганических форм азота рекой Дунай за период 1995-2005 гг. следует, что в отличие от фосфатов (рис. 1б), содержание неорганических форм азота в водах реки Дунай не уменьшилось в последние годы. Так, в 2003 г. оно было на уровне

1991, 1993, 1996 и 1999 годов, очень незначительное уменьшение наблюдалось только в 2005 г. Таким образом, анализ динамики поступления неорганического азота со стоком реки Дунай за последнее десятилетие не позволяет согласиться с утверждением автора [7] о наступлении периода деэвтрофикации для северо-западного шельфа Черного моря за счет уменьшения поступления биогенных элементов с реками.

Следует также отметить, что трансформация биогенных элементов, поступающих в акваторию СЗШ Черного моря как со стоками реки Дунай, так и из других источников, перечисленных выше, осуществляется через многие процессы различной природы (физические, гидрохимические, геологические, микробиологические и др.).

Одним из важных в динамике биогенных элементов процессом, который характерен для СЗШ Черного моря и определяется комплексом как антропогенных, так и природно-климатических факторов, является гипоксия. В последние десятилетия из общей площади СЗШ (~70000 км<sup>2</sup>) примерно 40000 км<sup>2</sup> бывают подвержены гипоксии [3]. Доля азота, захороненного в донных отложениях, составляет 64,3% от его внешней нагрузки.

При эпизодически возникающих в северо-западной части моря явлениях гипоксии и заморов сильно увеличивается поток фосфора из донных отложений. Большая часть фосфора (55-65%), выделяющегося из илов в воду, сорбируется взвешенным веществом и переходит в форму минерального взвешенного. Переход растворенных минеральной и органической форм фосфора одна в другую происходит быстрее, чем диффузия  $PO_4^{3-}$  из ила в воду. При анаэробных условиях (гипоксия) сорбционно-обменные процессы в илах с участием  $PO_4^{3-}$  идут быстрее, чем взаимопревращение минерального и органического фосфора.

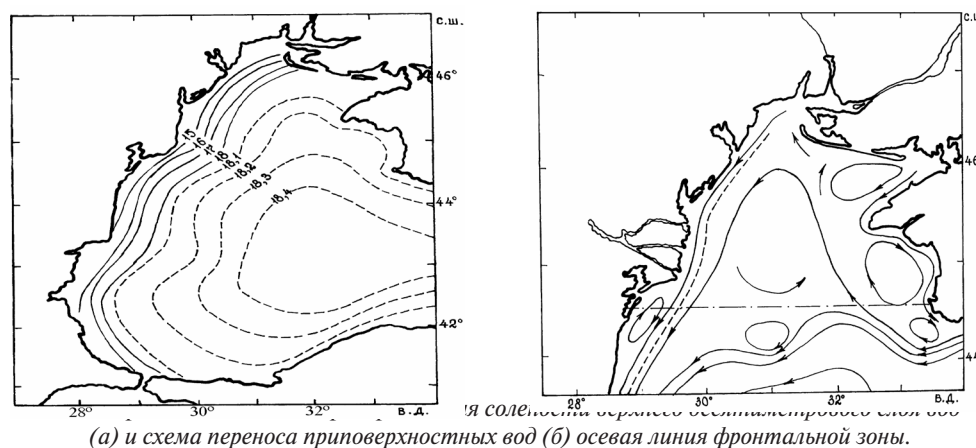
Таким образом, увеличение или уменьшение поступления биогенных элементов с водами реки Дунай не означает однозначного повышения или уменьшения их в водах северо-западного шельфа моря. Ведь в условиях гипоксии, периодически возникающей на северо-западном шельфе физические процессы сорбции и десорбции способствуют увеличению поступления фосфора и азота из донных отложений. В то же время протекающая в условиях гипоксии микробиологическая денитрификация ведет к уменьшению солевых форм азота и его потери в атмосферу в виде молекулярного азота. Количественных оценок данного процесса пока не имеется.

Кроме гипоксии, значительное влияние на динамику биогенных элементов имеют гидродинамические процессы, которые в свою очередь определяются природно-климатическими факторами.

Вдоль северо-западных берегов рассматриваемой акватории во все сезоны года наблюдаются резко выраженные фронты солености и плотности. Температурный фронт здесь хорошо выражен с ноября по март [1]. Для выявления климатических особенностей распространения сильно распресненных и загрязненных вод построена среднегодовая схема распределения соленос-

ти верхнего десятиметрового слоя вод западной части Черного моря и схема переноса приповерхностных вод (рис.2). При пересечении фронтальной зоны концентрации фосфатов в поверхностной воде уменьшаются в пределах 9,5-132 раза, нитраты – 8-17 раз, аммонийный азот – до 8 раз.

Из полученных нами оценок также следует, что при эпизодических прорывах Дунайских вод через фронтальную зону, которые происходят при преобладании ветров определенных направлений, наибольшую нагрузку для экосистемы СЗШ будут давать дополнительные количества азота в виде нитратов и аммония, поскольку кроме малого выведения этих элементов через физико-химические процессы, протекающие во фронтальной зоне, речная вода согласно данным представленным в работе [2] отличается чрезвычайно высоким содержанием нитратов, близким к их содержанию в сточных водах.



Кроме дополнительных количеств фосфора и азота, поступающих с речными водами, для исследуемого региона существует еще один источник этих биогенных элементов – сточные воды.

Таким образом, экологическое влияние загрязненных речных вод на функционирование экосистемы центральной части северо-западного района зависит от синоптических ситуаций в регионе. Они обеспечивают продолжительность и частоту прорыва фронтальной зоны и проникновение загрязненных вод на акваторию шельфа.

### Выводы

Показано, что за последние годы количество поступающего с Дунайскими водами биогенного фосфора существенно уменьшилось, а количество неорганического азота осталось без изменений. Это не позволяет однозначно судить

о наступлении периода деэвтрофикации в северо-западной части Черного моря за счет уменьшения поставки биогенных элементов реками.

Гипоксия и сопровождающие ее заморы сказываются на величине дополнительного поступления биогенных азота и фосфора, вследствие возникновения на границе вода – дно восстановительных условий и перехода азота и фосфора из донных отложений в придонную воду, способствуя, таким образом, вторичному загрязнению акватории. Одновременно протекающие в период гипоксии процессы денитрификации ведут к уменьшению солевых форм азота и потерей его в атмосферу в виде молекулярного азота.

### Список использованной литературы

1. *Альтман Э. Н.*, Климатические поля солёности и температура воды Черного моря./ Э.Н.Альтман, И.Ф.Гертман, З.А.Голубева. – Севастополь : СОГОИН, 1987. –108 с.
2. *Беляев В. И.* Оценка уровня антропогенных нагрузок на прибрежные зоны и экотоны Черноморского побережья Украины / В.И.Беляев, С.И.Дорогунцов, Е.Е. Совга, Т.С. Николаенко // Морской гидрофиз. журнал. –2001. – № 1. – С.55-63.
3. *Зайцев Ю. П.* Экологическое состояние шельфовой зоны Черного моря у побережья Украины / Ю.П.Зайцев // Гидробиологический журнал. – 1992. – № 4. – С. 3-18.
4. *Рождественский А. В.* Геохимия и гидрохимия Дунайского стока и атмосферных осадков в связи с современными седиментами Черного моря / А.В.Рождественский // Труды на Института по океанология БАН. – Варна, –1998. Т.2. – С.20-26.
5. *Совга Е. Е.* Многолетняя изменчивость потоков фосфора в северо-западной части Черного моря / Е.Е. Совга, С.Г.Богуславский, В.А. Жоров // Морской гидрофиз. журнал. – 2000. – № 4. – С. 69-79.
6. *Совга Е. Е.* Потоки азота в северо-западной части Черного моря / Е.Е. Совга, С.Г. Богуславский, В.А. Жоров // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. (Памяти акад. В.И. Беляева) – Севастополь : МГИ НАНУ, 2001. – С. 88-97.
7. *Юнев О. А.* Антропогенная эвтрофикация Черного моря: количественная оценка, механизмы, роль в распределении органического вещества по основным трофическим цепям в пелагиали : Автореф. дис. доктора биол. наук 03.00.17. / Юнев Олег Алексеевич; ИнБЮМ НАН Украины. – Севастополь, 2012. – 44с.
8. *Biological diversity in the Black Sea A Study of Change and decline.* Black Sea environmental Series, vol.3,1997. United Nations Publications, 1997.–№ 4. –180p.
9. *Oguz, T.* The state of eutrophication. In : State of the Environment of the Black Sea (2001-2006/7). / T. Oguz. [et al.] / Edited by T.Oguz. Publications of the Commission on the Protection of the Black Sea Against Pollution (BSC), Chapter 2. Istanbul. Turkey. –2009. – 421 pp.

### References

- [1] Altman E.N., Gertman I.F., Golubeva Z.A. 1987. Klimaticheskie polya solenosti i temperatura vody Chernogo morya. Sevastopol: SOGOIN.
- [2] Belyaev V.I., Doroguncov S.I., Sovga E.E., Nikolaenko T.S. 2001. Ocenka urovnya antropogennyh nagruzok na pribrezhnye zony i ekotony Chernomorskogo poberezhya Ukrainy. Morskoj gidrofiz. zhurnal. (1): 55-63.
- [3] Zajcev Yu. P. 1992. Ekologicheskoe sostoyanie shelfovoy zony Chernogo morya u poberezhya Ukrainy. Gidrobiologicheskij zhurnal. (4): 3-18.
- [4] Rozhdestvenskij A. V. 1998. Geohimiya i gidrohimiya Dunajskogo stoka i atmosferyh osadkov v svyazi s sovremennymi sedimentami Chernogo morya. Trudove na Instituta po okeanologiya BAN. Varna. 2: 20-26.
- [5] Sovga E.E., Boguslavskij S.G., Zhorov V.A. 2000. Mnogoletnyaya izmenchivost potokov fosfora v severo-zapadnoj chasti Chernogo morya. Morskoj gidrofiz. zhurnal. (4): 69-79.
- [6] Sovga E.E., Boguslavskij S.G., Zhorov V.A. 2001. Potoki azota v severo-zapadnoj chasti Chernogo morya. Ekologicheskaya bezopasnost pribrezhnoj i shelfovoy zon i kompleksnoe ispolzovanie resursov shelfa. (Pamyati akad. V.I. Belyaeva). Sevastopol: MGI NANU.
- [7] Yunev O. A. 2012. Antropogennaya evtrofikaciya Chernogo morya: kolichestvennaya ocenka, mehanizmy, rol v raspredelenii organicheskogo veschestva po osnovnym troficheskim cepyam v pelagiali : Avtoref. dis. doktora biol. nauk 03.00.17. InBYuM NAN Ukrainy. Sevastopol.

- [8] Biological diversity in the Black Sea A Study of Change and decline. Black Sea environmental Series, vol.3,1997. United Nations Publications, 1997. (4). 180p.
- [9] Oguz, T. 2009. The state of eutrophication. In : State of the Environment of the Black Sea (2001-2006/7). Edited by T.Oguz. Publications of the Commission on the Protection of the Black Sea Against Pollution (BSC), Chapter 2. Istanbul. Turkey.

Поступила 2.03.2014 г.

**О.С.Совга**, доктор географічних наук, ведучий науковий співробітник  
**Н.Ф.Кириленко**, аспірант  
відділ гідрофізики шельфу,  
морський гідрофізичний інститут НАН України  
вул. Капітанська, 2, м. Севастополь, 99011, Україна

### **БАГАТОРІЧНА ДИНАМІКА БІОГЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ В ЕКОСИСТЕМІ ПІВНІЧНО-ЗАХІДНОГО ШЕЛЬФУ ЧОРНОГО МОРЯ**

#### **Резюме**

Наведені оцінки динаміки надходження біогенних елементів з водами ріки Дунай за два періоди 1960-1990 рр. і 1990-2005 рр., його вплив на рівень евтрофікації північно-західної частини Чорного моря та трансформацію біогенних елементів в системі вододонні відклади в умовах гіпоксії та обміну з відкритою частиною моря.

**Ключові слова:** екосистема, північно-західний шельф, біогенні елементи.

**E.E. Sovga**, doctor of geography, senior researcher  
**N.F. Kyrylenko**, PhD student  
Shelf Hydrophysics Department  
Marine hydrophysical institute (MHI) NAS of Ukraine  
Kapitanskaya st., 2, Sevastopol, 99011, Ukraine

### **LONG-TERM DYNAMICS OF BIOGENIC ELEMENTS IN THE NW BLACK SEA SHELF**

#### **Abstract**

Dynamics of biogenic elements deposit by the river Danube has been estimated for two periods 1960-1990 and 1990-2005 as well as its influence on the rate of eutrophication of the north-western part of the Black sea and transformation of biogenic elements in the coupled system sea-bottom sediment while hypoxia and open sea exchange processes were taking place.

**Keywords:** ecosystem, north-western shelf, biogenic elements