



УДК 574 (262.5)

О ТРОФИЧЕСКОМ СТАТУСЕ ПЕЛАГИЧЕСКИХ ЭКОСИСТЕМ В РАЗНЫХ РЕГИОНАХ ЧЕРНОГО МОРЯ

© В. Е. Занка

Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского Национальной Академии наук Украины,
Севастополь, Украина

Поступила 21 марта 2003 г.

В обзоре обсуждены определения и терминология по проблеме антропогенной эвтрофикации морской пелагиали, причины и следствия этого процесса. Сравняются используемые количественные показатели трофического статуса акваторий. С середины прошлого века трофический статус глубоководных районов Черного моря сменился с олиготрофно-мезотрофного на мезотрофно-эвтрофный. В прибрежных и эстуарных регионах к концу 1980-х гг. трофическое состояние вод достигало иногда гипертрофного уровня. С начала 1990-х гг. в разных частях Черного моря отмечается некоторое снижение уровня трофности и улучшение состояния среды. Подчеркивается целесообразность оценки трофического статуса не для моря в целом, а для конкретных акваторий.

Ключевые слова: Черное море, трофический статус, антропогенная эвтрофикация

The review concentrates on the definitions and terminology related to eutrophication of pelagic zone of the sea and compares between characteristics describing trophic status of a water area. Since the mid-20th century, trophic status of deep-water areas of the Black Sea had been changing from oligo-mesotrophic to meso-eutrophic, and by the Late 1980-s some coastal and estuarine localities were defined as hypertrophic. Since 1992, the marine environment has been ameliorating and the trophic level declining. Special emphasis is placed on that trophic status should be assessed for each area of the sea separately.

Key words: the Black Sea, trophic status, antropogenic eutrophication

В международном научном документе BSOFS Science Plan [12] антропогенным фактором, доминирующим по действию в Черном море, названа сильная эвтрофикация поверхностных слоев. Это делает актуальным анализ и систематизацию многочисленных, отчасти противоречивых оценок нынешнего трофического статуса различных черноморских акваторий.

Литература по эвтрофикации водоемов огромна. Много публикаций и по эвтрофикации Черного моря. Поэтому ограничимся только важнейшими работами по морским акваториям, помогающими последовательно осветить вынесенные на обсуждение вопросы.

Терминология и определения. В русскоязычной научной литературе даже написание термина эвтрофикация не является обще-

принятым. Рекомендация одного из гидробиологических съездов СССР писать "эвтрофикация" не была широко подхвачена, как и другие известные варианты термина (эвтрофирование, эвтрофизация). Вопрос этот не биологический, потому используемый в данной работе вариант термина примем без обоснования.

Остановимся на следующем формальном определении термина: эвтрофикация - это существенное увеличение трофического статуса, по сравнению с характерным для данной экосистемы, из-за необычно высокого снабжения биогенами эвфотического слоя.

В этом определении, принятом на международной конференции по эвтрофикации Средиземного моря [17], учтено, что снабжение экосистемы биогенами имеет сезонные и межгодовые колебания. Упрощенно эвтрофикацию можно назвать "переудобрением" [21].

Под трофическим статусом экосистемы понимается уровень продуктивности, в первую очередь, достигаемая величина первичной продукции фитопланктона. В течение почти ста лет принято выделять следующие типы (стадии, уровни) трофического статуса акваторий (в порядке повышения трофности): олиготрофные, мезотрофные, эвтрофные, гипертрофные (=гиперэвтрофные). Выделяют также дистрофные озера, имеющие низкую продуктивность из-за большого содержания гуминовых кислот.

Различают эвтрофикацию природную и антропогенную. Первая - медленный процесс, измеряемый тысячелетиями, вторая - быстрый процесс, измеряемый годами и десятилетиями. Природная эвтрофикация нами обсуждаться не будет. Антропогенная эвтрофикация вызывается попаданием (обычно регулярным) в рассматриваемую морскую аквато-

рию питательных солей (азота и фосфора) со сточными водами, со смывами с сельскохозяйственных полей, с речными стоками, с течениями, через атмосферные выпадения.

Антропогенную эвтрофикацию, вызываемую ростом нагрузки биогенами, принято отличать от загрязнения вод органическими веществами. Но нестойкие органические соединения можно считать "связанными биогенами", которые в результате микробиологических процессов легко высвобождаются. Кроме того, некоторые органические вещества непосредственно усваиваются клетками фитопланктона, стимулируют рост водорослей. Наконец, при быстром массовом размножении фитопланктона его потребители не успевают выесть растущую биомассу водорослей, и после отмирания последних происходит вторичное загрязнение пелагиали и, особенно, бентали избытком органики. Поэтому понятна позиция некоторых авторов, тесно связывающих обогащение экосистемы органическим веществом с процессом эвтрофикации, тем более, что дополнительные биогены и органика часто поступают "из одной трубы".

Показатели эвтрофикации. В соответствии с определением антропогенной эвтрофикации, наличие этого процесса можно выявить при сравнении нагрузки акватории биогенами и ее трофического статуса в последовательные годы. Количество попадающих со сточными или речными водами биогенов легче определить еще на входе, так как в эвфотическом слое моря попадающий в воду лимитирующий биогенный элемент может очень быстро изыматься водорослями и оставаться в воде лишь в следовых количествах.

Хорошими показателями эвтрофикации служат первичная продукция фитопланктона и тесно коррелирующие с ней параметры

- содержание хлорофилла “а”, биомасса фитопланктона. Если первичная продукция и другие названные выше индикаторы эвтрофикации могут считаться ее прямыми признаками, то многие другие меняющиеся при этом параметры экосистемы должны быть отнесены к ее последствиям.

При повышении трофического статуса акватории, вызванном эвтрофикацией, происходит существенная и разноплановая трансформация всей экосистемы, включая ее биотические и абиотические компоненты, подсистемы пелагиали и бентали.

В сжатом перечислении трансформация пелагической экосистемы затрагивает: видовой состав фитопланктона, прежде всего, состав доминирующих видов и плотность их популяций (появление “цветений”); прозрачность воды; содержание в воде растворенного кислорода; число и расположение пиков вертикального распределения фитопланктона; толщину слоя фотосинтеза; скорость первичной продукции; содержание органического вещества и соотношение его растворенной и взвешенной в воде фракций; численность, биомассу и скорость продукции бактериопланктона. Все эти непосредственные или отдаленные последствия эвтрофикации достаточно хорошо изучены и иногда используются при индикации эвтрофикации, что мы увидим ниже.

Реже в литературе обсуждают изменения в пелагических звеньях зоопланктона и ихтионектона, хотя они, несомненно, происходят. Гораздо больше внимания уделяется последствиям эвтрофикации бентали при возникновении гипоксии, особенно драматическим в случае массовых замороз донной фауны. Но такие признаки, если и используются, то как показатели отдаленных последствий эв-

трофикации.

В таблице сгруппированы количественные показатели, чаще других используемые при определении трофического статуса морских акваторий.

Кажется довольно очевидным, что использование столь различающихся звеньев экосистемы, далеко не синхронно реагирующих на изменения в самой системе, в качестве показателей трофического состояния, должно приводить к несовпадению оценок. Это мы и увидим на примере Черного моря.

В последние годы появились индексы, объединяющие в одну формулу по несколько переменных и позволяющие унифицировать количественную оценку качества воды и одновременно трофического статуса пелагических вод морских акваторий [26]. Есть примеры применения Индекса трофического состояния TRIX к черноморским акваториям [4, 23].

При вычислении индекса используются четыре переменных (содержание минерального азота, общего фосфора, хлорофилла, а также насыщения воды кислородом), объединенные в следующую формулу [23]:

$$\text{TRIX} = \text{Log} ([\text{chl}] * [\text{D}\% \text{O}] * [\text{PT}] * [\text{DIN}] + 1.5) / 1.2$$

где chl - хлорофилл “а”, мг/л, D%O - отклонение растворенного кислорода от 100% насыщения, PT - общий фосфор, мг/л, DIN - растворенный неорганический азот, мг/л. В [23] модифицировали индекс, заменив фосфор на кремний.

Численно TRIX меняется от 0 до 10 и при значении 5 и выше отражает эвтрофный статус акватории и низкое качество среды (см. табл.) [23].

Таблица. Показатели различных уровней трофического статуса пелагиали
Table. Variables and indices of different trophic status for marine pelagic water

Показатель	Источ- ник	Трофический статус акватории			
		Олиготрофный	Мезотрофный	Эвтрофный	Гипертрофный
P-PO ₄ , мкм*моль*дм ³	[17]	0.03 - 0.05	-	0.12	0.30
NO ₃ , мкм*моль*дм ³	[17]	0.5 - 1.0	-	1.5	4.0
Хлорофилл "а", мг.м ³	[3]	0.01 - 1.0	0.06 - 2.0	0.5 - 10	-
" - "	[1]	0.09 - 0.21	0.15 - 0.35	2.5 - 8.5	-
Биомасса фитопл., усл. ед.	[7]	2	20	20	2000
Первичная продукция, мгС/м ³ *сут	[1]	<0.1 - 10	<0.1 - 100	1.0 - 100	-
" - "	[9]	2 - 20	20 - 100	100 - 1000	1000 - 3000
мгС/м ² *сут					
Численность бакте- рий, п*10 ⁶ /мл	[9]	0.12 - 0.40	0.40 - 2.0	2.0 - 5.00	5.0 - 20.0
Биомасса бактерий, мг/м ³ (сырой)	[9]	10 - 50	50 - 300	300 - 1000	1000 - 5000
" - ", усл. ед.	[7]	0.2	4	2	60
Продукция бактерий, мг/м ³ *сут	[9]	10 - 50	50 - 200	200 - 500	500 - 2000
Кол-во взвешенного детрита, усл. ед.	[7]	10	3	3	200
Индекс TRIX, усл. ед.	[23]	<4	4 - 5	5 - 6	>6

Изменения трофического статуса Черного моря во времени и по районам.

Антропогенное изменение трофического статуса акваторий происходит прежде всего в прибрежной зоне. Степень эвтрофикации зависит не только от количества поступающих извне биогенов, но и от многих параметров водоема, его глубины, открытости, проточности и т. д. Большую роль играет характер стратификации вод. Влияет также расстояние акватории от берега, от впадающих в море рек, направление течений. Отсюда следует, что разные части одного моря обычно имеют неодинаковый трофический статус. Это относится и к Черному морю.

Антропогенная эвтрофикация обратима, как показал пример акваторий, для которых удалось снизить нагрузку биогенами. Следовательно, искусственный трофический статус акватории, поддерживаемый деятель-

ностью человека, довольно лабилен. Все это необходимо иметь в виду при анализе работ, в которых обсуждаются изменения в трофическом состоянии черноморских вод.

Для большинства олиготрофных вод лимитирующим биогенным элементом считается фосфор, и эвтрофикация многих водоемов обусловлена увеличением именно фосфорной нагрузки. Воды Черного моря исходно были богаче вод умеренных широт в отношении фосфатного фосфора, аммиачного азота и кремния, но уступали в количестве нитратного азота [6].

По общему содержанию и вертикальному распределению минерального азота открытые районы Черного моря до начала существенной эвтрофикации характеризовали как олиготрофно-мезотрофные, с преобладанием мезотрофных акваторий [8, 9].

Трофический статус сначала стал пе-

риодически повышаться под влиянием хозяйственных стоков в закрытых черноморских бухтах с затрудненным водообменом. Считается, что, по меньшей мере, с 1950 - 1960-х годов в Черное море стали поступать дополнительные биогены с речным стоком, возрос уровень фосфатов и нитратов [13, 15], однако какой из элементов был до этого лимитирующим точно не выяснено [22].

Классическим примером эвтрофированных прибрежных вод в мировом океане считаются воды эстуариев [16, 17, 25]. Поэтому не случайно наиболее высокий трофический статус всегда имели воды мелководного северо-западного шельфа Черного моря. Наибольшие концентрации биогенных солей приурочены к устьям рек, причем дунайские воды ясно прослеживаются в море до глубины 20 м [5].

В 1974 - 1975 гг. биогенный сток Дуная вырос на 1-2 порядка. Это вызвало быструю эвтрофикацию приэстуарных областей. Начинаясь в северо-западном районе моря под действием стоков Дуная, Днестра, эвтрофикация распространяется вдоль западного шельфа. За последние 20 лет степень эвтрофикации выросла, что отражается в более частых цветениях и высокой скорости продукции. В настоящее время прибрежные воды у Румынии считаются мезо- и эвтрофными [11, 15].

В результате переноса обогащенных биогенами вод основным черноморским течением эвтрофикации подверглась вся западная, а затем и восточная половина моря. В открытых районах моря выросла первичная продукция. Подчеркивается [18], что эвтрофикация Черного моря вызвала модификацию всей пелагической экосистемы открытого моря в 1960 - 1980-х годах. Упала прозрачность воды, толщина зоны фотосинтеза сократилась с 40 -

50 до 25 - 35 м, изменилась вертикальная структура фитопланктона - исчез нижний (на глубине 40-50 м) пик диатомовых, возник пик перидиной на 25-30 м. Концентрация хлорофилла в верхнем слое выросла в 2-3 раза. По результатам съемки в зимне-весенний период и другие сезоны получены значения первичной продукции, характерные для мезотрофных вод [10]. Рост концентрации биогенов показан даже для аноксических глубинных вод Черного моря [20] и считается результатом эвтрофикации.

В то же время, по величинам концентрации хлорофилла "а" в Черном море выделены области от почти олиготрофных до сильно эвтрофных (последние - в северо-западной прибрежной зоне и вдоль западного побережья Черного моря) [2, 19]. Поэтому вряд корректно называть Черное море в целом "типичным примером эвтрофного моря" [14].

Наконец, на основе данных по бактериопланктону статус прибрежных вод у восточного побережья был охарактеризован как мезотрофный, а в некоторых бухтах достигал гипертрофного (например, в 1988 г.). Северо-западную зону шельфа к 1990-м годам тоже стали называть гипертрофной, так как численность сапрофитных бактерий в 1970-е годы стала в 4 раза больше, чем в 1960-х, а в 1990-е годы в лиманах она выросла в 3 - 5 раз по сравнению с 1980-ми годами [9, 28].

С 1992 г. отмечается тенденция улучшения состояния акваторий [9, 15, 28]. Максимум выноса биогенов Дунаем был в 1999 г. Рост выноса фосфора с 1977 г. по 1999 г. связан с увеличением как концентрации, так размеров стока. В последние годы снизились и размеры стока, и расход фосфатов в качестве сельхозудобрений [15].

Характер изменения концентрации

хлорофилла “а” в Черном море свидетельствует, что в 1993 - 2000 гг. шло снижение средней биомассы фитопланктона, а также содержания азота в эвфотическом слое моря. Это совпадает со сменой тенденции понижения температуры поверхностного слоя на ее повышение, что дало авторам возможность предположить связь усиления эвтрофикации с колебаниями климата [27]. Отмечено, что в 1996 - 2001 гг. снизилось также поступление неорганического азота из Черного моря в Мраморное, хотя поступление фосфатов осталось на прежнем уровне, а вынос хлорофилла повысился [24].

Сравнение Черного моря с другими морями Средиземноморского бассейна с помощью индекса TRIX показало, что акватории у побережья Болгарии (за исключением точки у Варненского залива) имеют приблизительно ту же степень эвтрофикации, что некоторые изученные акватории Адриатического и Эгейского морей [23]. Применение того же индекса для прибрежных вод района Севастополя дало

неожиданные результаты: полученные значения индекса заставляют считать статус этих вод переходным от олиготрофного к мезотрофному. Накопление материалов по индексу TRIX, с использованием различных модификаций, позволит более уверенно применять его для оценки трофического статуса акваторий.

Впрочем, рассмотренные данные по Черному морю убеждают, что приписывать определенный трофический статус большому бассейну в целом не корректно, поэтому сравнивать лучше именно конкретные акватории в конкретные сезоны. Можно надеяться, что уточнение методов расшифровки спутниковых данных по содержанию в поверхностных черноморских водах растительных пигментов даст возможность перейти к построению карт распределения трофического состояния моря.

1. *Алимов А. Ф.* Введение в продукционную гидробиологию. - Л.: Гидрометеиздат, 1989. - 152 с.
2. *Берсенева Г. П.* Сезонная динамика концентрации хлорофилла “а” / Планктон Черного моря. - Киев: Наук. думка, 1993. - С. 92 - 109.
3. *Ведерников В. И.* Зависимость ассимиляционного числа и концентрации хлорофилла “а” от продуктивности вод в различных температурных областях Мирового океана // *Океанология* - 1975 - **15**, вып.4. - С. 703 - 707
4. *Губанов В. И., Стельмах Л. В., Клименко Н. П.* Комплексные оценки качества вод Севастопольского взморья (Черное море) // *Экология моря*. - 2000. - Вып. 62. - С. 76 - 80.
5. *Коновалов С. Н., Елецкий Б. Д., Лукьянова А. Н.* Гидрохимические особенности прибрежной зоны Черного моря / *Экология прибрежной зоны Черного моря*. - М.: ВНИРО, 1992. - С. 42 - 59.
6. *Рождественский А. В.* Химические основы продуктивности / Основы биологической продуктивности Черного моря. - Киев: Наук. думка, 1979 - С.34 - 53.
7. *Секи Х.* Органические вещества в водных экосистемах. - Л.: Гидрометеиздат, 1986 - 199 с.
8. *Сорокин Ю. И.* Черное море. - М.: Наука, 1982. - 217 с.
9. *Сорокин Ю. И., Вишивцев В. С., Домников В. С.* Биологическая структура вод, ее изменчивость и состояние гидробионтов / Техногенное загрязнение и процессы естественного самоочищения. - М.: Недра, 1996. - С. 266 - 312.
10. *Финенко З. З., Крупаткина Д. К.* Первичная продукция и размерная структура фитопланктона в зимне-весенний период / *Планктон Черного моря*. - Киев: Наук. думка, 1993. - С. 74 - 91.

11. *Bologa A. S., Frangopol P. T., Vedernikov V. I. et al.* Distribution of planktonic primary production in the Black sea / Environmental degradation of the Black sea: challenges and remedies. - 1999. - P. 131 - 146.
12. Black Sea Observation and Forecasting System (BSOFS) Science Plan. - 1997. - Rep. No. 221 – CCMS / NATO.
13. *Caddy J. F., Griffiths R. C* A perspective on recent fishery-related events in the Black Sea // FAO Studies and Reviews. – 1990 - № 63 - P. 43 - 71.
14. *Coban-Yildiz Y., Tugrul S., Polat C. et al.* A comparative study on the abundance and elemental composition of seston in three interconnected basins: the Black, the Marmara and the Mediterranean seas / Oceanogr. of the Eastern Mediter. and Black Sea: Confer. Athens. – 1999. - P. 11 - 12.
15. *Cociasu A., Popa L.* Significant changes in Danube nutrient loads and their impact on the Romanian Black Sea shelf / Oceanogr. of the Eastern Mediter. and Black Sea: Confer. Ankara. - 2002 - P. 402.
16. *Day J. W., Hall Ch.A. S., Kemp W. M., et al* Estuarine Ecology. - N/Y.: Wiley-Intersci. Publ. - 1989 - 558 p.
17. Eutrophication in Mediterranean Sea: receiving capacity and monitoring of long-term effects. - Rep. Sci. Workshop. - Bologna, 1987. - UNESCO, 1988.
18. *Finenko Z. Z.* The eutrophication of the Black Sea waters / Proc. Black Sea Symp. 1991, Istanbul. - Istanbul: Publ. Acar. Mabaacilik, 1994. - P. 123 - 124.
19. *Finenko Z. Z., Churilova T. Ya* Photosynthetic properties of the Black Sea phytoplankton / Oceanogr. of the Eastern Mediterr. and Black Sea: Confer. Ankara. – 2002. - P. 273.
20. *Konovalov S. K., Ivanov L. I., Murray J. M et al.* The suboxic zone of the Black Sea / Environmental degradation of the Black sea: challenges and remedies. – 1999. - P. 75 - 92.
21. *Lincoln R. J., Boxhall G. A., Clark A.* A dictionary of ecology, evolution, and systematics. - Cambr. Univ. Press, 1985. - 298 p.
22. *Mee L. D., Mihnea R.* Eutrophication in the Black Sea: uncertainties and adaptive management / Oceanogr. of the Eastern Mediterr. and Black Sea: Confer. Ankara. – 2002. - P. 264 – 265.
23. *Moncheva S., Doncheva V* Eutrophication index (TRIX) - an operational tool for the Black Sea coastal water ecological quality assessment and monitoring / The Black Sea ecological problems. Sympos. on Strategic Action Plan implementations - Odessa, 2000. – SCSEIO. - P. 178-185.
24. *Okus E., Aslan-Yilmaz A., Tas S.* Time series analysis of nutrients in SW Black Sea and the Sea of Marmara. / Oceanogr. of the Eastern Mediterr. and Black Sea. – 2002. - Confer. Ankara. - p. 270
25. *Parsons T. R., Takahashi M., Hargrave B.* Biological Oceanographic Processes. - N.Y.:Pergamon Press, 1984. - 330 p.
26. *Vollenweider R. A., Giovanardi F, Montanari G. et al.* Characterization of the trophic condition of marine coastal waters, with special reference the NW Adriatic Sea. Proposal for a trophic scale, turbidity and generalized water quality index. Environmetrics, 9. – 1998. - P. 329 - 357.
27. *Yuney O., Yilmaz A., Shokurov M. et al.* Long-term variability of vertical chlorophyll profile in the open Black Sea during warm months: consequence of anthropogenic eutrophication or climatic changes / Oceanogr. of the Eastern Mediterr. and Black Sea: Confer. Ankara – 2002. - 276 p.
28. *Zaitsev Yu. P., Alexandrov B. G.* Black Sea biological diversity. Ukraine. - N.Y.: UN, 1998. - 350 p.