

УДК 551.465

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ЭКОСИСТЕМЫ ШЕЛЬФОВО-СКЛОНОВОЙ ЗОНЫ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ НА ОСНОВЕ ИНДЕКСА ТРОФНОСТИ (TRIX)

© 2016 г. Н. Д. Романова¹, В. К. Часовников², Е. Г. Арашкевич¹, С. А. Мошаров¹, А. Б. Никишина¹, А. В. Костылева², Н. Е. Луппова²

¹ Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, Москва

² Южное отделение Института океанологии РАН, Геленджик

e-mail: Romanova-Nadya@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.05.2015 г.

На основе данных мониторинга шельфово-склоновой зоны и бухт северо-восточной части Черного моря была проведена оценка состояния и трофического статуса акватории в 2007–2014 гг. Показано, что в настоящее время концентрация биогенных элементов и хлорофилла “а” в исследованном районе находятся на уровне значений, наблюдавшихся в конце 70-х годов, до периода эвтрофикации. В верхнем слое воды концентрация минерального азота колебалась от 0.19 до 5.64 мкМ. Концентрация фосфатов изменялась от аналитического нуля до 0.56 мкМ. Концентрация хл “а” в разные сезоны колебалась от 0.24 до 0.89 мкг/л. Значения индекса трофности (TRIX) характеризуют состояние морской шельфовой экосистемы в области г. Геленджика как “отличное” даже в бухтах. Достоверных межгодовых различий в значениях индекса не было, разница между его значениями в бухтах и в открытом море была достаточно мала: 3.7 и 3.2 соответственно.

DOI: 10.7868/S0030157416010159

ВВЕДЕНИЕ

В 80-е и первой половине 90-х годов эвтрофикация вод, вызванная усиленной химизацией сельского хозяйства, оказала чрезвычайно негативное влияние на все трофические уровни черноморской экосистемы [8]. Хотя в последние десятилетия ситуация изменилась к лучшему [7], постоянный мониторинг степени эвтрофикации вод и в настоящее время представляется чрезвычайно важным, особенно в прибрежных районах, которые испытывают наибольшую антропогенную нагрузку. Чтобы сделать такую оценку универсальной и удобной, следует использовать параметры, обычно измеряемые при рутинном мониторинге и отражающие состояние основных компонентов экосистемы, влияющих на эвтрофикацию. Индекс трофности экосистемы TRIX основан на показателях концентрации основных биогенных элементов (азота и фосфора), степени насыщения воды кислородом и концентрации хлорофилла [11]. Преимущество данного индекса в том, что он позволяет дать не только качественную, но и количественную оценку состояния водоема, классифицируя трофический статус экосистемы по десятибалльной шкале от “отличного” (малопродуктивные прозрачные воды, нет кислородного голодания; значения индекса менее “4”) до “плохого” (высокопродуктивные мут-

ные воды, эпизодическая гипоксия; значения индекса более “6”). На основании данного индекса и параметров, используемых для его расчета, были исследованы изменения трофического статуса шельфово-склоновой зоны Черного моря в районе г. Геленджика.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Пробы воды с поверхности моря отбирали в прибрежной зоне (глубина 25 м), на шельфе (глубина 50–100 м) и над континентальным склоном (глубина 500–1000 м) весной, летом и осенью 2007–2009 и 2012–2014 гг. Отбор проб проводился также в Голубой бухте (2012–2013 гг.) и в Геленджикской бухте (2013–2014 гг.).

Концентрацию растворенного кислорода измеряли методом Винклера с поправкой на содержание кислорода в реагентах [4]. Фосфаты определяли методом Королева [5]. Аммонийный азот определяли по методу [10]. Нитритный азот (нитриты) измеряли по [5]. Нитратный азот (нитраты) определяли колориметрически после его восстановления на кадмиевых колонках до нитритного азота. Для всех биогенных элементов измерение оптической плотности проводили фотометрически. Концентрацию хлорофилла “а” (хл “а”) определяли флуорометрически [6]. Пробы воды

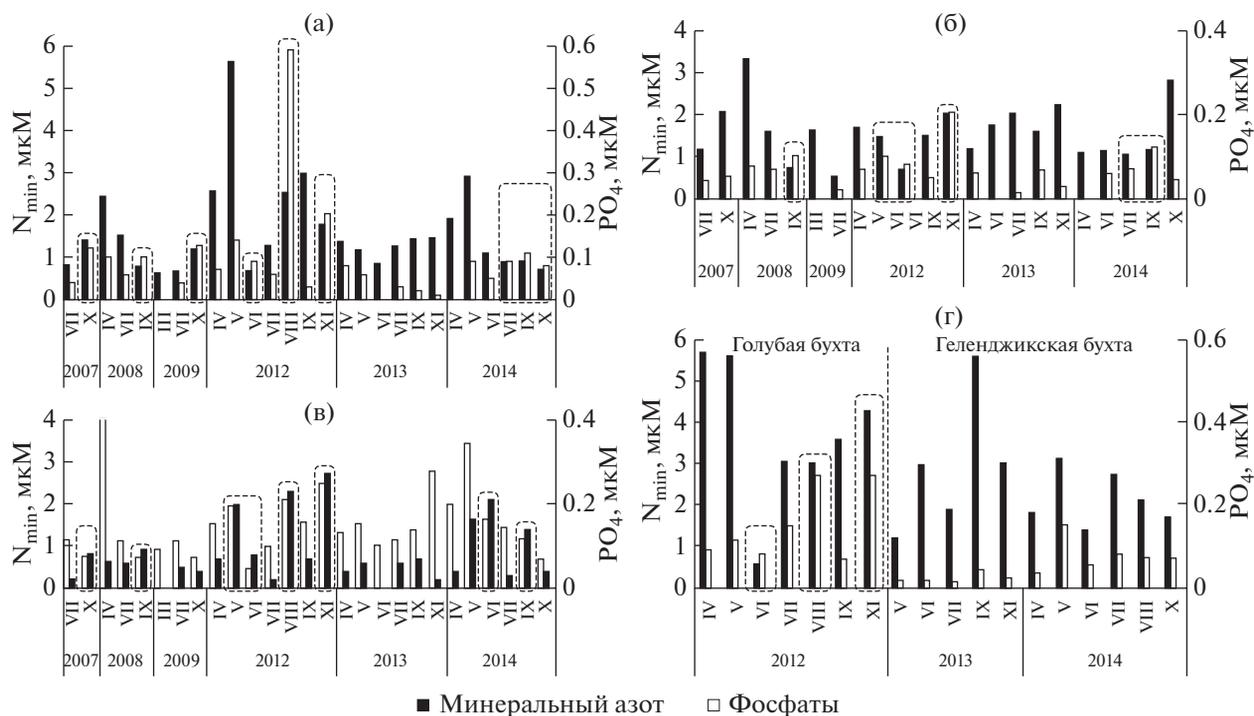


Рис. 1. Концентрация минерального азота (N_{\min}) и фосфора (PO_4) в поверхностном слое воды: (а) прибрежная зона; (б) шельф; (в) склон; (г) бухта. Пунктиром обведены точки, где $N : P > 16$.

объемом 0.5–1.0 л фильтровали через стекловолоконные фильтры GF/F. Экстракцию пигментов проводили в 90% ацетоне при температуре +4°C в течение 24 ч.

Трофический индекс TRIX рассчитывался по формуле [11]:

$$TRIX = (\lg[\text{chl "a"} * D\%O * N * P] + 1.5) / 1.2,$$

где chl "a" – концентрация хлорофилла-а (мкг/л), $D\%O$ – модуль величины отклонения насыщения воды кислородом от 100%, N – концентрация минерального азота (мкг/л), P – концентрация фосфатов (мкг/л).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Концентрация биогенных элементов. В прибрежной зоне концентрация минерального азота колебалась от 0.64 до 5.63 мкМ (рис. 1а). Максимальные значения были отмечены в 2012 г., для остальных пяти лет наблюдений межгодовые изменения были не столь выражены. Средние для сезона значения концентрации минерального азота в поверхностном слое воды снижались с 1.96 мкМ весной до 1.32 мкМ осенью. Концентрация фосфатов изменялась от значений, близких к аналитическому нулю, до 0.56 мкМ. Средние для сезона значения увеличивались от весны к осени от 0.05 до 0.1 мкМ.

В области шельфа концентрация азота изменялась в пределах от 0.53 до 3.3 мкМ, содержание фосфатов колебалось от аналитического нуля до 0.2 мкМ (рис. 1б).

В области континентального склона концентрация азота колебалась от 0.47 до 4.12 мкМ (рис. 1в). Среднее для сезона содержание азота в воде снижалось от 1.74 мкМ весной до 0.74 мкМ осенью. Концентрация фосфатов колебалась от аналитического нуля до 0.27 мкМ; средняя сезонная концентрация фосфатов в поверхностном слое возрастала с 0.03 мкМ весной до 0.06 мкМ осенью.

В Геленджикской бухте концентрация фосфатов, в основном, не превышала 0.1 мкМ (рис. 1г). Концентрация минерального азота в воде колебалась от 0.19 до 5.6 мкМ. В Голубой бухте концентрация фосфатов была существенно выше, чем в Геленджикской бухте (0.07–0.27 мкМ). Концентрация минерального азота изменялась от 0.58 до 5.64 мкМ с минимальными значениями летом.

Концентрация растворенного кислорода. Насыщение воды кислородом в абсолютном большинстве случаев превышало 100%. Чуть большие средние для сезона значения наблюдались летом (108–110%). Насыщение воды кислородом менее 100% наблюдалось осенью в области склона (среднее для сезона значение 93%).

Концентрация хлорофилла. Во всех исследованных зонах наблюдался схожий характер сезон-

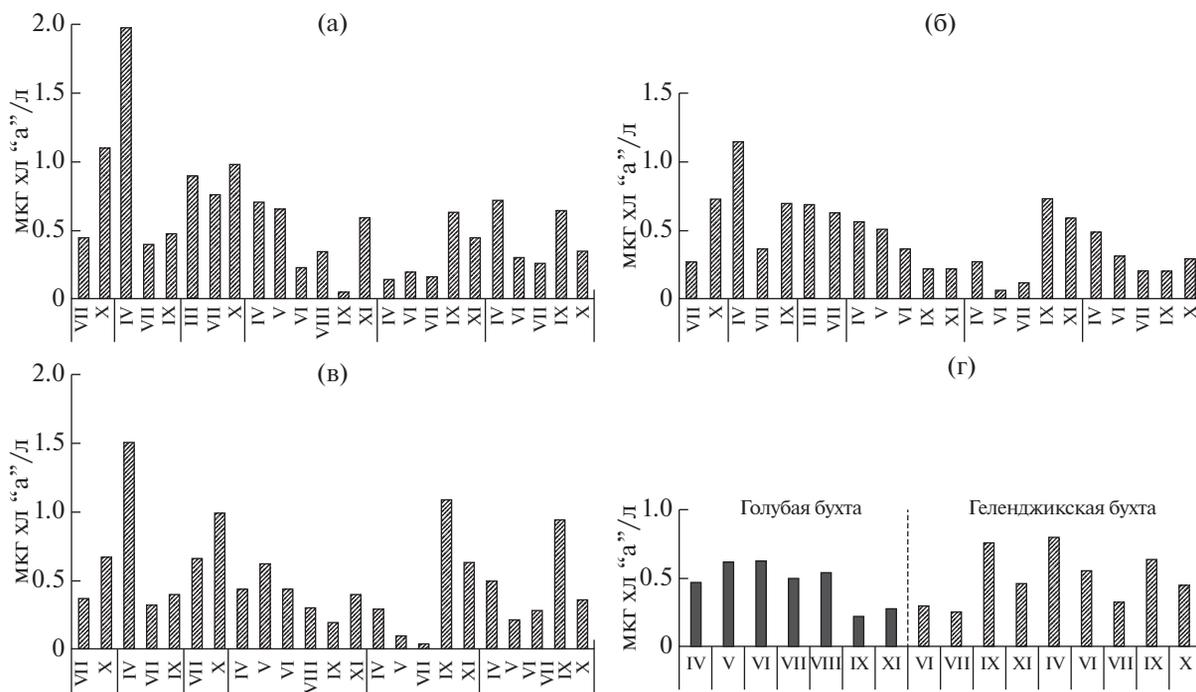


Рис. 2. Концентрация хлорофилла (мкг хл "а"/л) в поверхностном слое воды: (а) – прибрежная зона; (б) – шельф; (в) – склон; (г) – бухта.

ной динамики концентрации хл "а" в поверхностном слое воды с максимумом весной и осенью и минимумом летом (рис. 2).

Средние для периода исследования концентрации хл "а" составляли в прибрежной зоне 0.89, 0.41 и 0.67 мкг/л, на шельфе – 0.58, 0.25 и 0.45 мкг/л, в области склона – 0.61, 0.24 и 0.58 мкг/л весной, летом и осенью соответственно. Сезонные значения концентрации хл "а" в Геленджикской бухте мало отличались от прибрежной зоны (0.81, 0.35 и 0.56 мкг/л весной, летом и осенью соответственно), в то время как в Голубой бухте сезонный минимум хл "а" наблюдался осенью (0.53, 0.56, 0.27 мкг/л весной, летом и осенью соответственно).

Среднегодовые концентрации хл "а" в 2007–2009 гг. были в два раза выше, чем в 2012–2014 гг. (0.5–0.9 и 0.3–0.5 мкг хл "а"/л соответственно). Во все годы концентрация хл "а" в бухтах и в прибрежной зоне была несколько выше, чем над шельфом и склоном, но различия были незначительны.

Трофический индекс. Рассчитанные значения TRIX не превышали четырех во всех точках отбора, определяя трофический статус вод как "отличный" даже в бухтах (рис. 3). Значения индекса в бухтах (3.7 ± 0.2) были немного выше, чем в открытом море (3.2 ± 0.3). Разница между значениями индекса в прибрежных водах, на шельфе и в

открытом море была меньше его межгодовой изменчивости и не достоверна.

ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнивая данные, полученные в бухте и на разном удалении от берега, следует отметить близкие концентрации биогенных элементов и сходный характер их сезонной и межгодовой изменчивости. Концентрация биогенных элементов в бухтах и на прибрежной станции была менее чем в 1.5 раза выше значений, наблюдавшихся над шельфом и континентальным склоном. Это свидетельствует о хорошей вентиляции бухт и об интенсивном кросс-шельфовом водообмене. Пики концентрации азота приходились на весенние месяцы, что возможно связано с внесением подкормок сельскохозяйственных культур, а также на конец осени. Высокая изменчивость концентрации фосфатов в течение года может свидетельствовать о быстрой его регенерации гетеротрофами. Отклонение от соотношения Рэдфилда [3] в большинстве случаев указывало на лимитирование фосфором ($N : P > 16$), однако иногда, особенно осенью, лимитирующим элементом оказывался азот (рис. 1).

В период антропогенной эвтрофикации 1989–1995 гг. концентрация биогенных элементов в поверхностном слое в северо-восточной части моря достигала 10 мкМ для минерального азота и 2.5 мкМ для фосфатов [9]. Несмотря на увеличи-

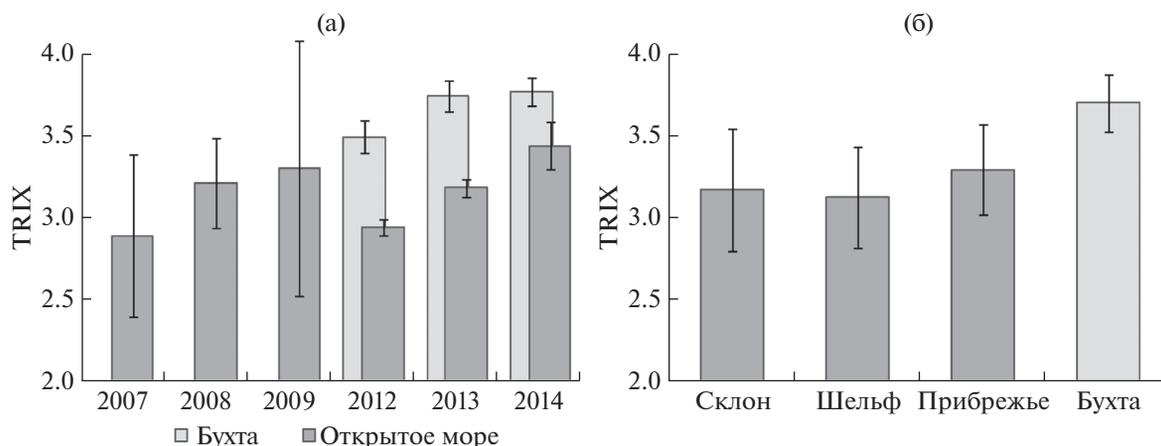


Рис. 3. Значения индекса трофности (TRIX). (а) – в разные годы наблюдений и (б) – на разрезе от бухты к открытому морю (средние значения для всего периода наблюдений \pm SD).

вающуюся рекреационную нагрузку на регион, значения концентрации биогенных элементов, полученные в период наших наблюдений (2007–2014 гг.) были на том же уровне, что и значения, полученные в “чистый” период (до эвтрофикации) [2].

Средние концентрации хл “а” в бухтах и в прибрежной воде были лишь немногим выше, чем значения этого параметра над шельфом и склоном. Сезонная изменчивость концентрации хлорофилла на разрезе от бухты в открытое море имела сходный характер. Значения концентрации хл “а” в поверхностном слое в период наших работ колебались в пределах, приведенных для 1973–1980 гг. в то время как в период эвтрофикации (данные 1989 г.) концентрация хл “а” возрас- тала почти на порядок величин [1].

Значения индекса трофности TRIX для периода эвтрофикации Черного моря (1989–1995 гг.), рассчитанные по данным [1, 9], превышали значение “семь”, то есть указывали на плохое состояние экосистемы. Низкие значения индекса трофности (менее четырех), равно как и каждый используемый для его расчета параметр в отдельности, указывают на относительную стабильность экосистемы шельфово-склоновой зоны в 2007–2014 гг. Однако рост рекреационных возможностей Большого Геленджика, а также развитие сельскохозяйственного комплекса Краснодарского края требуют регулярного мониторинга состояния прибрежной экосистемы.

Исследование проводилось при поддержке РНФ (проект № 14-50-00095). Судовые работы выполнялись при поддержке Минобрнауки РФ (Соглашение № 14.604.21.0044, уникальный идентификатор проекта – RFMEFI60414X0044).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ведерников В.И., Демидов А.Б. Долговременная и сезонная изменчивость хлорофилла и первичной продукции в восточных районах Черного моря // Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря / Ред. Зацепин А.Г., Флинт М.В. М.: Наука, 2002. С. 212–234.
2. Чеботарев Ю.С., Моисеев Е.В., Копылов А.И. и др. Сезонные изменения биогенов и первичной продукции фитопланктона в прибрежной зоне Черного моря в районе Геленджикской бухты // Сезонные изменения черноморского планктона. М.: Наука, 1983. С. 84–91.
3. Banse K. Uptake of inorganic carbon and nitrate by marine plankton and the Redfield ratio // Global Biogeochemical Cycles. 1994. V. 8. № 1. P. 81–84.
4. Hansen H.P. Determination of oxygen // Methods of Seawater Analysis, Third Edition. 1999. P. 75–89
5. Hansen H.P., Koroleff F. Determination of nutrients // Methods of Seawater Analysis, Third Edition. 2007. P. 159–228.
6. Holm-Hansen O., Riemann B. Chlorophyll a determination: improvements in methodology // Oikos. 1978. P. 438–447.
7. Kideys A.E. Fall and rise of the Black Sea ecosystem // Science. 2002. № 297. P. 1482–1484.
8. Oguz T., Gilbert D. Abrupt transitions of the top-down controlled Black Sea pelagic ecosystem during 1960–2000: Evidence for regime-shifts under strong fishery exploitation and nutrient enrichment modulated by climate-induced variations // Deep-Sea Res. Pt. I. 2007. V. 54. № 2. P. 220–242.
9. Pakhomova S., Vinogradova E., Yakushev E. et al. Inter-annual variability of the Black Sea proper oxygen and nutrients regime: The role of climatic and anthropogenic forcing // J. of Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2014. V. 140. P. 134–145.
10. Solorzano L. Determination of ammonia in natural waters by the phenol hypochlorite method // Limn. Oceanogr. 1969. V 14. № 5. P. 799–801.

11. *Vollenweider R.A., Giovanardi F., Montanari G., Rinaldi A.* Characterization of the trophic conditions of marine coastal waters, with special reference to the NW Adriatic Sea: proposal for a trophic scale, turbidity and generalized water quality index // *Environmetrics*. 1998. V. 9. P. 329–357.

Evaluation of Ecosystem Status in the Shelf-Slope Zone of the North-Eastern Black Sea Based on the Trophic Index (TRIX)

**N. D. Romanova, V. K. Chasovnikov, E. G. Arashkevich, S. A. Mosharov,
A. B. Nikishina, A. V. Kostyleva, N. E. Louppova**

Conditions and trophic status of the water in offshore area and bays of the north-eastern Black Sea were evaluated on the basis of monitoring data in 2007–2014. It has been shown that currently the concentration of nutrients and chlorophyll-*a* (*Chl-a*) in the studied area are at the level observed in the late 70s, before the period of eutrophication. In the surface layer the concentration of mineral nitrogen ranged from 0.19 to 5.64 μM . The concentration of phosphates in the water varied from the analytical zero to 0.56 μM . The concentration of *Chl-a* in different seasons ranged from 0.24 to 0.89 $\mu\text{g/l}$. Value of the trophic index (TRIX) characterized the state of the marine ecosystem in the offshore area off Gelendzhik as “excellent”, even in the bays. No significant interannual differences in the index values was not found. The difference between TRIX values in the bays and offshore zone was quite low: 3.7 and 3.2, respectively.