

Вторичная эвтрофикация черноморского шельфа

О. А. Юнев

*Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН,
Севастополь, Россия
e-mail: o.yunev@ibss-ras.ru*

Поступила 20.02.2020 г.; принята к публикации 08.05.2020 г.; опубликована 25.06.2020 г.

Целью настоящей работы является исследование возможных механизмов эвтрофикации черноморского шельфа. Данное исследование базировалось на анализе результатов долговременных изменений индикаторов эвтрофикации (фосфатов, нитратов и кислорода) и проводилось для разных слоев моря с осреднением данных для различных временных интервалов: концентрации биогенных веществ в поверхностном слое (январь – март), кислорода в поверхностном слое и слое под термоклином (май – сентябрь). Данные по изменению содержания кислорода в двух слоях были использованы в качестве косвенного показателя изменения летней первичной продукции в зоне фотосинтеза. Концентрация биогенных веществ на северо-западном шельфе в зимний период характеризовалась постепенным увеличением в 1970-х – первой половине 1980-х гг., уменьшением во второй половине 1980-х и стабилизацией в 1990-х гг. В то же время синхронные изменения содержания кислорода в поверхностном слое и слое под термоклином свидетельствовали об увеличении летней первичной продукции вплоть до начала 1990-х гг. Анализ этих результатов выявил, что в эвтрофикации черноморского шельфа можно выделить два этапа. С начала 1970-х до первой половины 1980-х гг. основным источником эвтрофирования шельфа было необычно интенсивное поступление биогенных веществ в море с речным стоком. Во второй половине 1980-х и начале 1990-х гг., когда поступление биогенных веществ в море со стоком рек стабилизировалось, источником эвтрофирования черноморского шельфа стали регенерированные биогенные элементы, поступающие в водную толщу из донных отложений.

Ключевые слова: черноморский шельф, индикаторы эвтрофикации, долговременные изменения, этапы эвтрофикации.

Благодарности: работа выполнена по теме государственного задания ФИЦ ИнБЮМ РАН № АААА-А18-18021490093-4 («Функциональные, метаболические и токсикологические аспекты существования гидробионтов и их популяций в биотопах с различным физико-химическим режимом»). Автор выражает благодарность за ценные замечания по работе, сделанные д. г. н. Еленой Евгеньевной Совгой, ведущим научным сотрудником МГИ РАН.

Для цитирования: Юнев О. А. Вторичная эвтрофикация черноморского шельфа // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 2. С. 80–91. doi:10.22449/2413-5577-2020-2-80-91

© Юнев О. А., 2020



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Second-Phase Eutrophication of the Black Sea Shelf

O. A. Yunev

*A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS,
Sevastopol, Russia
e-mail: o.yunev@ibss-ras.ru*

Submitted 20.02.2020; revised 08.05.2020; published 25.06.2020

The objective of this paper is to study possible mechanisms of the Black Sea shelf eutrophication. The research was based on the analysis of long-term changes in eutrophication indicators (phosphates, nitrates, and oxygen) and was performed for various sea layers with averaging for different periods: the nutrient concentration in the surface layer (January – March) and oxygen concentration in the surface layer and layer under thermocline (May – September). The data on oxygen content variability in the two layers were used as an indirect indicator of the summer primary production change in the photosynthetic zone. The nutrients concentration at the north-western shelf in winter was marked by a gradual increase in the 1970s through the first half of the 1980s, decrease in the second half of the 1980s, and stabilization in the 1990s. At the same time, simultaneous changes in oxygen content in the surface layer and layer under thermocline indicated an increase of summer primary production up to the early 1990s. Analysis of these results showed that two stages can be identified in the Black Sea shelf eutrophication. From the early 1970s to the first half of the 1980s, the major source of shelf eutrophication was unusually intense nutrient input to the sea with river runoff. In the second half of the 1980s and early 1990s, when nutrient input to the sea with river runoff stabilized, regenerated nutrients, which entered the water layer from bottom sediments, became a eutrophication source.

Keywords: eutrophication indicators, long-term changes, Black Sea shelf, eutrophication phases.

Acknowledgements: the research is performed under state order No. AAAA-A18-18021490093-4 on topic “Functional, metabolic and toxicological aspects of existence of hydrobionts and their populations in biotops with different physical and chemical regime”. The author is grateful to Elena E. Sovga, Leading Research Associate of MHI RAS, Dr.Sci. (Geogr.), for valuable comments on the paper.

For citation: Yunev, O.A., 2020. Second-Phase Eutrophication of the Black Sea Shelf. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 80–91. doi:10.22449/2413-5577-2020-1-80-91 (in Russian).

Введение

К концу 20-го столетия стало очевидным, что современный человек существенным образом влияет на естественную среду, химию земной атмосферы и воды, скорости и баланс биогеохимических процессов на планете [1]. Деятельность человека нарушает естественный ход этих процессов, существенно увеличивая поступление биогенных элементов азота и фосфора с берега в морские экосистемы. Это, в свою очередь, приводит к их эвтрофикации [2]. По наблюдениям, наиболее интенсивно биогенные вещества поступали в Черное море со стоком рек в 1970-е – первой половине 1980-х гг. [3]. Однако ярко выраженные проявления эвтрофикации на северо-западном шельфе были отмечены и после середины 1980-х гг. – в период стабилиза-

ции поступления биогенных веществ со стоком рек [3–5]. Закономерным является вопрос о существовании приблизительно с середины 1980-х гг. других источников эвтрофикации черноморского шельфа, помимо традиционно рассматриваемого необычно высокого поступления биогенных веществ в море с речным стоком [3, 4, 6]. Исследование данного вопроса является целью настоящей работы.

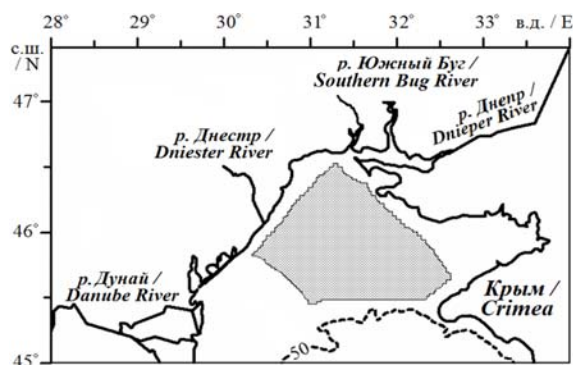
Материал и методы

Для исследования эвтрофикации пресноводных водоемов на уровне экосистемы в целом могут привлекаться экспериментальные озера с искусственно меняющейся интенсивностью поступления в них биогенных веществ [7]. Однако понимание механизмов эвтрофикации прибрежных районов и эстуариев может прийти только из анализа результатов долговременных (в течение десятилетий) наблюдений в период, когда концентрация биогенных элементов азота и фосфора в системе увеличивается [8]. В Черном море такое увеличение и, соответственно, интенсивное эвтрофирование экосистемы наблюдались приблизительно с начала 1970-х до середины 1990-х гг. При этом период с середины 1990-х гг. по настоящее время характеризуется уменьшением поступления биогенных веществ в море и их концентрации на шельфе и, следовательно, – деэвтрофикацией черноморской экосистемы [4, 5, 9]. Поэтому настоящее исследование сфокусировано на периоде эвтрофикации, а временные ряды были ограничены 2000-м годом.

Другой методологической основой исследования различных аспектов эвтрофикации морских экосистем является анализ долговременных изменений характеристик, как имеющих прямое отношение к явлению (индикаторы эвтрофикации), так и отражающих качественные изменения в экосистеме, происшедшие в результате этого явления (непрямые индикаторы эвтрофикации) [10]. К первой группе индикаторов эвтрофикации пелагической зоны относятся характеристики фитопланктона (первичная продукция, биомасса фитопланктона и хлорофилл *a*), а также биогенные вещества нитраты и фосфаты. Во вторую группу входят видовой и размерный состав фитопланктона, силикаты, аммоний, кислород и глубина видимости диска Секки. Набор параметров, базисных для исследования механизмов эвтрофикации, в каждом конкретном случае в значительной степени определяется доступностью данных для анализа их долговременных изменений. Вместе с тем в качестве экспертной оценки также могут привлекаться опубликованные исследования, использующие индикаторы эвтрофикации, которые являются средними величинами для непродолжительных межгодовых периодов или доступны только для некоторых отдельных лет.

Основным источником данных для настоящего исследования послужила международная база данных, созданная в рамках проекта *NATO TU Black Sea*¹⁾. Она содержит основные физические, химические, биологические и биооптические характеристики почти для всех районов Черного моря. База охватывает период значительных изменений в черноморской экосистеме под воздействием антропогенных и природных факторов (1980-е – начало 2000-х гг.),

¹⁾ *Black Sea Data Base*. Supplied with Ocean Base 3.07 DBMS/NATO Sfp-971818 ODBMS Black Sea Project. July 15 2003.



Р и с . 1. Район исследования на северо-западном шельфе Черного моря (выделенная область), для которого рассчитывались средние концентрации биогенных веществ и кислорода

F i g . 1. The study area (grayed out) at the northwestern shelf of the Black Sea, for which nutrient and oxygen average concentrations were calculated

для настоящего исследования был выбран район северо-западного шельфа (глубины < 50 м) в открытой части моря (рис. 1) с незначительной пространственной вариабельностью гидрохимических характеристик [4]. В то же время следует отметить, что расположенный юго-западнее район придунайского шельфа не может быть объединен с выбранным для настоящего исследования районом вследствие его существенно большей продуктивности [4, 5].

Исследование долговременных изменений гидрохимических характеристик проводили для разных слоев моря с использованием осреднения для различных временных интервалов. Биогенные вещества исследовали только в поверхностном слое и в период январь – март (холодный период времени, который в дальнейшем будет условно называться зимой), а характеристики кислорода – в поверхностном слое и на горизонте под термоклином в среднем с мая по сентябрь, т. е. условно в среднем в летний период. Выбор января – марта для анализа биогенных веществ и летних месяцев для анализа кислорода был продиктован тем, что анализ многолетних изменений биогенных веществ на черноморском шельфе в зимние месяцы позволяет проследить за связью изменения поступления биогенных веществ со стоком рек в море с их концентрацией на шельфе. При этом данные об изменении содержания кислорода в поверхностном слое и на горизонте под термоклином могут быть использованы в качестве косвенного показателя изменения первичной продукции [12].

В общем для исследования изменений гидрохимических характеристик с 1960 по 2000 г. в выбранном районе шельфа (рис. 1) было использовано следующее количество измерений: фосфатов – 470, нитратов – 285 и кислорода – 1500. Оценка достоверности многолетних изменений гидрохимических характеристик проводилась путем сравнения средних для продолжительных квазистационарных периодов по t -критерию Стьюдента²⁾.

²⁾ Парчевская Д. С. Статистика для радиозоологов. Киев : Наукова думка, 1969. 114 с.

а также более спокойный период, предшествующий этим изменениям (1960-е – начало 1970-х гг.) [11]. Доступными для анализа долговременных изменений на северо-западном шельфе оказались биогенные вещества: нитраты и фосфаты, а также кислород.

Значительная пространственная вариабельность перечисленных индикаторов эвтрофикации на черноморском шельфе [4] может быть маскирующим фактором, влияющим на достоверность результатов исследования их долговременных изменений. Поэтому

Результаты и обсуждение

Долговременные изменения концентрации фосфатов и нитратов на северо-западном шельфе в зимний период характеризовались постепенным увеличением концентраций в 1970-х – первой половине 1980-х гг., уменьшением и стабилизацией во второй половине 1980-х – 1990-х гг. (рис. 2, *a* и *b*). Концентрация фосфатов достоверно увеличилась с 0.13 ± 0.07 мкМ (1961–1969 гг.) до 0.33 ± 0.04 мкМ в 1983–1986 гг. и нитратов с 0.32 ± 0.14 мкМ (1961–1968 гг.) до 1.66 ± 0.25 мкМ в 1981–1985 гг. Затем концентрации обоих биогенных веществ достоверно уменьшились приблизительно в середине 1980-х г. и стабилизировались на уровне 0.21 ± 0.05 мкМ (фосфаты) и 1.31 ± 0.22 мкМ (нитраты) до конца исследованного периода.

В свою очередь, концентрация кислорода в летний период постепенно увеличивались в поверхностном слое с ~ 5.7 (первая половина 1960-х гг.) до ~ 7.1 мг/л (вторая половина 1980-х – начало 1990-х гг.) и одновременно уменьшались на горизонте под термоклином с ~ 6.9 до ~ 4.7 мг/л. После 1992 гг. произошло резкое статистически значимое синхронное уменьшение концентрации кислорода в поверхностном слое и ее увеличение ниже сезонного термоклина. После этого в обоих слоях наблюдались незначительные изменения концентрации кислорода вплоть до конца исследованного периода.

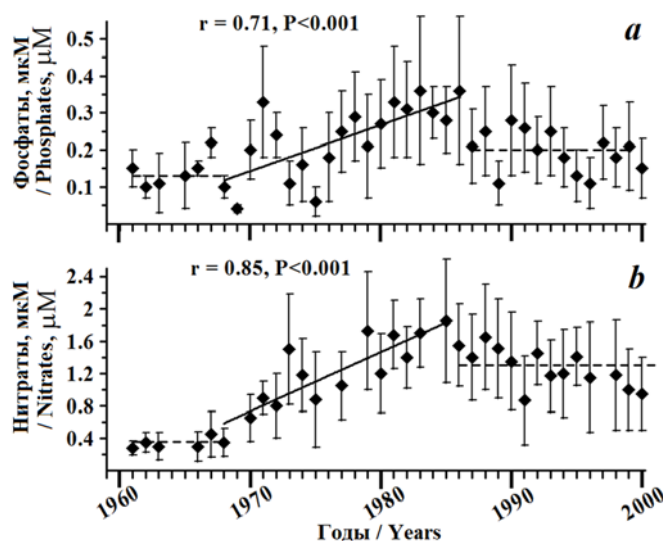
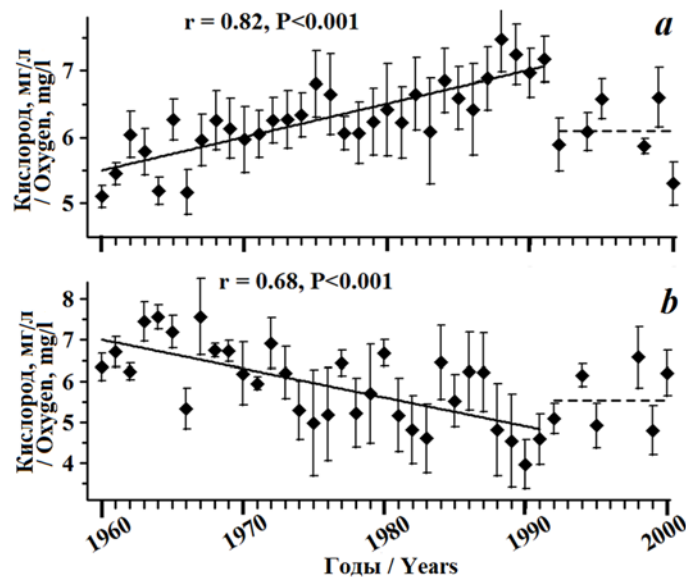


Рис. 2. Долговременные изменения среднегодовых концентраций фосфатов (*a*) и нитратов (*b*) в исследованном районе северо-западного шельфа в январе – марте. На этом и следующем рисунке показаны стандартные отклонения, сплошные толстые линии обозначают тренды, штриховые линии – средние значения для квазистационарных периодов

Fig. 2. Long-term changes of average annual concentrations of phosphates (*a*) and nitrates (*b*) in the studied area of the north-western shelf in January – March. In this and next figure, standard deviations are shown, solid heavy line is trends, dashed lines are quasistationary periods



Р и с . 3. Долговременные изменения концентрации кислорода в поверхностном слое (а) и на горизонте под термоклином (b) на северо-западном шельфе в летний период

Fig. 3. Long-term changes of oxygen concentration in the surface layer (a) and at the horizon under thermocline (b) at the north-western shelf in summer

Сопоставление данных по многолетним изменениям концентрации нитратов и фосфатов в зимний период, а также концентрации кислорода в летний период (см. рис. 2, 3) с данными по изменению поступления биогенных веществ в Черное море с речным стоком (значительное увеличение с начала 1970-х до середины 1980-х гг. и дальнейшая стабилизация поступления до начала 1990-х гг. [3, 4, 6]) позволяет выделить два периода с существенными различиями в изменении функционально связанных гидрохимических и биологических характеристик. Для 1970-х – середины 1980-х гг. были характерны как увеличение концентраций фосфатов и нитратов в зимний период, совпадающее с увеличением поступления биогенных веществ с речным стоком в течение года, так и изменения содержания кислорода в поверхностном слое и горизонте под термоклином в летний период. Это свидетельствует об увеличении первичной продукции в эвфотическом слое. Во второй половине 1980-х – начале 1990-х гг. концентрация нитратов и фосфатов на шельфе и их поступление в Черное море с речным стоком стабилизировались. Вместе с тем увеличение первичной продукции в течение этого периода, согласно данным по изменению кислорода, продолжалось. Таким образом, согласованность в изменениях биогенных веществ и первичной продукции в первом периоде и их различие во втором указывают на два различных этапа эвтрофикации: до и после середины 1980-х гг.

Для первого этапа эвтрофикации черноморского шельфа (1970-е – первая половина 1980-х гг.) характерен наиболее распространенный механизм эвтрофикации прибрежных экосистем, когда интенсивное поступление азота

и фосфора на шельф из береговых источников (главным образом с речным стоком) приводит к увеличению первичной продукции и, соответственно, к увеличению биомассы фитопланктона. Полученные нами синхронные изменения концентрации кислорода в поверхностном слое и под термоклином в выбранном районе шельфа (рис. 3), свидетельствующие об увеличении первичной продукции, полностью совпадают с изменением концентрации кислорода в придунайском районе [5] и находят подтверждение в многолетних изменениях прямых индикаторов эвтрофикации в этом районе (таблица). Следует отметить, что придунайский район характеризуется наиболее подробным мониторингом фитопланктона, начиная с 1960-х гг. ¹⁾

Характерной особенностью второго этапа эвтрофикации черноморского шельфа (вторая половина 1980-х – начало 1990-х гг.) является стабилизация изменений концентрации фосфатов и нитратов на шельфе (рис. 2, *a, b*), совпадающая со стабилизацией их поступления со стоком рек [3, 4, 6]. Следовательно, одновременное с этим увеличение первичной продукции, полученное по синхронным изменениям кислорода в поверхностном слое и под термоклином в летние месяцы (см. рис. 3), указывает на то, что на черноморском шельфе после середины 1980-х гг. эвтрофикация стала осуществляться за счет других источников, вместо традиционно рассматриваемой интенсификации поступления биогенных веществ в море со стоком рек [3, 4, 6].

Долговременные изменения характеристик фитопланктона в прибрежных водах Румынии

Long-term changes of phytoplankton characteristics in the Romanian coastal waters

Характеристика / Characteristic	Годы / Years	Значение / Value
1. Средняя за период биомасса фитопланктона в летние месяцы (мг/м ³)* / 1. Average phytoplankton biomass in summer months (mg/m ³)*	1959–1963 1971–1975 1976–1980 1983–1990	495 719 2244 4105
2. Средняя за период максимальная численность <i>Prorocentrum cordatum</i> (10 ³ клеток/л)** / 2. Average maximum abundance of <i>Prorocentrum cordatum</i> (10 ³ cells/L)**	1960–1970 1971–1980 1981–1990	50 814 196 920 807 600
3. Средняя за период максимальная численность <i>Skeletonema costatum</i> (10 ³ клеток/л)** / 3. Average maximum abundance of <i>Skeletonema costatum</i> (10 ³ cells/L)**	1960–1970 1971–1980 1981–1990	18 080 97 360 141 400
4. Среднегодовая и средняя за межгодовой период концентрация хлорофилла <i>a</i> в поверхностном слое (мг/м ³ ***) / 4. Average annual and average interannual concentration of chlorophyll <i>a</i> in the surface layer (mg/m ³ ***)	1963 1976 1980–1992	0.66 1.67 6.68

* Согласно данным [13] / According to the data [13].

** Согласно данным [14] / According to the data [14].

*** Согласно данным [5] / According to the data [5].

Этот тезис подтверждается увеличением всех приведенных в таблице характеристик фитопланктона в этот межгодовой период

В связи с этим следует отметить, что поступление биогенных элементов в эвфотический слой на черноморском шельфе (глубины < 50 м) может потенциально осуществляться (помимо рассмотренного внесения с речным стоком) также следующим образом: 1) с атмосферными осадками, 2) из локальных источников в виде промышленных и коммунальных стоков, а также стоков птицеводческих и животноводческих ферм и 3) из донных отложений на шельфе. В последнем случае биогенные вещества образуются в результате минерализации бактериями и бентосными организмами поступающего и накапливающегося в донных отложениях органического вещества [4, 15]. По оценкам, которые проводились в 1970-х – 1980-х гг. [4], первые два источника вносили незначительный вклад в общее поступление биогенных веществ в Черное море. Напротив, поступление биогенных элементов в эвфотический слой на шельфе из донных отложений, которое оценивалось во второй половине 1990-х гг., составляло (в среднем за месяц гипоксии) приблизительно 80 тыс. т аммонийного азота и 20 тыс. т фосфора и было сопоставимо с их поступлением в Черное море с речным стоком [16].

При этом следует отметить, что гипоксия на северо-западном шельфе Черного моря в летне-осенний период во второй половине 1990-х гг. могла развиваться в течение периода до трех месяцев и на площади до 60 000 км². Также показано, что поступление регенерированных биогенных элементов азота и фосфора из донных отложений особенно увеличивается при восстановительных условиях на границе вода – донные отложения во время гипоксии [17]. И наконец, о сопоставимости поступления биогенных элементов из донных отложений с их поступлением со стоком рек свидетельствуют измерения биогенных элементов, проведенные *in situ* с использованием проточных камер [18]. Эти измерения показали, что количество поступающего азота в форме аммония из донных отложений в придонный слой моря может быть того же порядка, что и количество нитратов, поступающих на шельф со стоком рек.

Однако, как было отмечено выше, данные об эвтрофировании черноморского шельфа и их связь с поступлением из донных отложений регенерированных биогенных элементов были получены во второй половине 1990-х гг., когда эвтрофикация шельфа продолжалась уже в течение 20–25 лет [4]. Следовательно, донные отложения значительно обогащались органическим веществом. Поэтому приведенные выше оценки интенсивности поступления биогенных элементов в эвфотический слой черноморского шельфа из различных источников не объясняют, за счет чего происходило увеличение первичной продукции на шельфе с середины 1980-х до начала 1990-х гг., когда таких оценок не проводилось.

Вместе с тем такую оценку могут дать данные по долговременным изменениям концентрации аммония на северо-западном шельфе: его поступления на шельф с речным стоком, концентрации в поверхностном и придонном слоях [4]. Аммоний является основной формой азота, которая образуется в процессе минерализации органического вещества бактериями и бентосными организмами [18]. Поэтому увеличение его концентрации

в придонном слое в середине 1980-х гг. при одновременном уменьшении его поступления на шельф со стоком рек [4] свидетельствует прежде всего об интенсификации процесса минерализации, который был к тому же усилен с 1983 по 1990 г. образованием необычно большой гипоксической зоны в северо-западной части Черного моря – с площадью до 30–40 тыс. км² [19].

В свою очередь, существенное увеличение концентрации аммония в поверхностном слое в 1983–1988 гг. [4] свидетельствует о том, что в Черноморском регионе во второй половине 1980-х – начале 1990-х гг. были факторы, способствовавшие поступлению регенерированных биогенных элементов из придонного слоя в зону фотосинтеза. Наиболее вероятно, одним из таких факторов были низкие зимние температуры воздуха и воды в этот период, которые интенсифицировали обновление вод холодного промежуточного слоя в зимние месяцы [4, 20]. Это отражало интенсивное перемешивание на шельфе придонных и поверхностных вод и, как следствие, увеличение концентрации аммония в поверхностном слое.

Таким образом, увеличение продукции фитопланктона на черноморском шельфе во второй половине 1980-х – начале 1990-х гг. (при стабилизировавшемся поступлении нитратов и фосфатов в море со стоком рек) стало возможным благодаря интенсификации поступления регенерированных биогенных элементов из донных отложений в водную толщу. Эта интенсификация была обусловлена как антропогенными факторами (эвтрофикацией и, соответственно, интенсивным поступлением и накоплением органического вещества в донных отложениях до середины 1980-х гг., а также образованием необычно больших гипоксических зон во второй половине 1980-х гг.), так и изменением гидрометеорологических условий в регионе (существенным похолоданием, способствовавшим усилению зимнего конвективного перемешивания придонных и поверхностных вод).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Human domination of Earth's ecosystems / P. M. Vitousek [et al.] // *Science*. 1997. Vol. 277, iss. 5325. P. 494–499. doi:10.1126/science.277.5325.494
2. Nixon S. W. Coastal marine eutrophication: a definition, social causes, and future concerns // *Ophelia*. 1995. Vol. 41, iss. 1. P. 199–219. <https://doi.org/10.1080/00785236.1995.10422044>
3. Mee L. D. The Black Sea in crisis: a need for concerted international action // *Ambio*. 1992. Vol. 21, no. 4. P. 278–286. URL: www.jstor.org/stable/4313943 (date of access: 10.06.2020).
4. Северо-западная часть Черного моря: биология и экология / под ред. Ю. П. Зайцева, Б. Г. Александрова, Г. Г. Миничевой. Киев : Наукова думка, 2006. 701 с.
5. Nutrient and phytoplankton trends on the western Black Sea shelf in response to cultural eutrophication and climate changes / O. A. Yunev [et al.] // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2007. Vol. 74, iss. 1–2. P. 63–76. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.03.030>
6. The nutrient stock of the Romanian shelf of the Black Sea during the last three decades / A. Cociasu [et al.] // *Sensitivity to change: Black Sea, Baltic Sea and North Sea* / Eds. E. Özsoy, A. Mikaelyan. Dordrecht : Springer, 1997. P. 49–63. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-5758-2>
7. Schindler D. W. Detecting ecosystem responses to anthropogenic stress // *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 1987. Vol. 44, no. S1. P. s6–s25. <https://doi.org/10.1139/f87-276>

8. Nutrients and the productivity of estuarine and coastal marine ecosystems / S. W. Nixon [et al.] // *Journal of the Limnological Society of Southern Africa*. 1986. Vol. 12, iss. 1–2. P. 43–71. <https://doi.org/10.1080/03779688.1986.9639398>
9. Современное экологическое состояние северо-западной части Черного моря / И. Д. Лоева [и др.] // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. Вып. 27. С. 237–242.
10. *Andersen J. H., Schlüter L., Ærtebjerg G.* Coastal eutrophication: recent developments in definitions and implications for monitoring strategies // *Journal of Plankton Research*. 2006. Vol. 28, iss. 7. P. 621–628. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbl001>
11. Physical, chemical and biological data sets of the TU Black Sea Data Base: description and evaluation / L. Ivanov [et al.] // *Ecosystem modeling as a management tool for the Black Sea* / Eds. L. Ivanov, T. Oguz. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1998. Vol. 1. P. 11–37. URL: <https://istina.msu.ru/publications/article/3554560/> (date of access: 13.05.2020).
12. *Юнев О. А., Коновалов С. К., Великова В.* Антропогенная эвтрофикация в пелагической зоне Черного моря: долговременные тренды, механизмы, последствия. М. : ГЕОС, 2019. 164 с. doi:10.34756/GEOS.2019.16.37827
13. Status and evolution of the Romanian Black Sea coastal ecosystem / A. Petranu [et al.] // *Environmental degradation of the Black Sea: challenges and remedies* / Eds. S. T. Beşiktepe, U. Ünlüata, A. S. Bologa. Dordrecht : Springer, 1999. P. 175–195. https://doi.org/10.1007/978-94-011-4568-8_11
14. *Bodeanu N.* Microalgal blooms in the Romanian area of the Black Sea and contemporary eutrophication conditions // *Toxic Phytoplankton Blooms in the Sea* / Eds. T. J. Smayda, Y. Shimizu. Amsterdam : Elsevier, 1993. P. 203–209.
15. The seasonal modulation of organic matter utilization by bacteria in the Danube-Black Sea mixing zone / S. Becquevort [et al.] // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2002. Vol. 54, iss. 3. P. 337–354. <https://doi.org/10.1006/ecss.2000.0651>
16. *Гаркавая Г. П., Богатова Ю. И.* Современные источники эвтрофирования северо-западной части Черного моря // *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету ім. В. Гнатюка. Серія: Біологія. Тернопіль, 2001. № 3(14) : Спеціальний випуск: Гідроекологія. С. 188–189.*
17. *Совга Е. Е., Кириленко Н. Ф.* Многолетняя динамика биогенных элементов в экосистеме северо-западного шельфа Черного моря // *Вісник Одеського національного університету. Географічні та геологічні науки*. 2014. Т. 19, вып. 1(20). С. 105–112.
18. Benthic nutrient cycling and diagenetic pathways in the north-western Black Sea / J. Friedrich [et al.] // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2002. Vol. 54, iss. 3. P. 369–383. <https://doi.org/10.1006/ecss.2000.0653>
19. *Zaitsev Y. P., Alexandrov B. G.* Recent man-made changes in the Black Sea ecosystem // *Sensitivity to Change: Black Sea, Baltic Sea and North Sea* / Eds. E. Özsoy, A. Mikaelyan. Dordrecht : Springer, 1997. P. 25–31. https://doi.org/10.1007/978-94-011-5758-2_3
20. *Belokopytov V.* Long-term variability of Cold Intermediate Layer renewal conditions in the Black Sea // *Ecosystem modeling as a management tool for the Black Sea*. Vol. 2 / Eds. L. Ivanov, T. Oguz. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1998. P. 47–52.

Об авторе:

Юнев Олег Алексеевич, ведущий научный сотрудник, Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2), доктор биологических наук, **Scopus Author ID: 6603005406**, o.yunev@ibss-ras.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Vitousek, P.M., Mooney, H.A., Lubchenco, J. and Melillo, J.M., 1997. Human Domination of Earth's Ecosystems. *Science*, 277 (5325), pp. 494–499. doi:10.1126/science.277.5325.494
2. Nixon, S.W., 1995. Coastal Marine Eutrophication: a Definition, Social Causes, and Future Concerns. *Ophelia*, 41(1), pp. 199–219. <https://doi.org/10.1080/00785236.1995.10422044>
3. Mee, L.D., 1992. The Black Sea in Crisis: A Need for Concerted International Action. *Ambio*, 21(4), pp. 278–286. Available at: www.jstor.org/stable/4313943 [Accessed: 10 June 2020].
4. Zaitsev, Y.P., Aleksandrov, B.G. and Minicheva, G.G., eds., 2006. *North-Western Part of the Black Sea: Biology and Ecology*. Kyiv: Naukova Dumka, 701 p. (in Russian).
5. Yunev, O.A., Carstensen, J., Moncheva, S., Khaliulin, A., Ærtebjerg, G. and Nixon, S., 2007. Nutrient and Phytoplankton Trends on the Western Black Sea Shelf in Response to Cultural Eutrophication and Climate Changes. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 74(1–2), pp. 63–76. doi:10.1016/j.ecss.2007.03.030
6. Cociasu, A., Diaconu, V., Popa, L., Buga, L., Nae, I., Dorogan, L. and Malciu, V., 1997. The Nutrient Stock of the Romanian Shelf of the Black Sea during the Last Three Decades. In: E. Özsoy and A. Mikaelyan, eds., 1997. *Sensitivity to Change: Black Sea, Baltic Sea and North Sea*. Dordrecht: Kluwer Springer, pp. 49–63. https://doi.org/10.1007/978-94-011-5758-2_5
7. Schindler, D.W., 1987. Detecting Ecosystem Responses to Anthropogenic Stress. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 44(S1), pp. s6–s25. <https://doi.org/10.1139/f87-276>
8. Nixon, S.W., Oviatt, C.A., Frithsen, J. and Sullivan, B., 1986. Nutrients and the Productivity of Estuarine and Coastal Marine Ecosystems. *Journal of the Limnological Society of Southern Africa*, 12(1–2), pp. 43–71. <https://doi.org/10.1080/03779688.1986.9639398>
9. Loeva, I.D., Ukrainskiy, V.V., Orlova, I.G. and Kovalishina, S.P., 2013. [Current Ecological State of the North-Western Part of the Black Sea]. In: MHI, 2013. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 27, pp. 237–242 (in Russian).
10. Andersen, J.H., Schlüter, L. and Ærtebjerg, G., 2006. Coastal Eutrophication: Recent Developments in Definitions and Implications for Monitoring Strategies. *Journal of Plankton Research*, 28(7), pp. 621–628. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbl001>
11. Ivanov, L.I., Konovalov, S., Melnikov, V., Mikaelyan, A., Yunev, O., Baştürk, O., Belokopytov, V., Beşiktepe, Ş., Bodeanu, N. [et al.], 1998. Physical, Chemical and Biological Data Sets of the TU Black Sea Data Base: Description and Evaluation. In: L. Ivanov and T. Oguz, eds., 1998. *Ecosystem Modeling as a Management Tool for the Black Sea*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, Vol. 1, pp. 11–37. Available at: <https://istina.msu.ru/publications/article/3554560/> [Accessed: 13 May 2020].

12. Yunev, O.A., Kononov, S.K. and Velikova, V., 2019. *Anthropogenic Eutrophication in the Black Sea Pelagic Zone: Long-Term Trends, Mechanisms, Consequences*. Moscow: GEOS, 164 p. doi:10.34756/GEOS.2019.16.37827 (in Russian).
13. Petranu, A., Apas, M., Bodeanu, N., Bologa, A.S., Dumitrache, C., Moldoveanu, M., Radu, G. and Tiganus, V., 1999. Status and Evolution of the Romanian Black Sea Coastal Ecosystem. In: S.T. Beşiktepe, Ü. Ünlüata and A.S. Bologa, eds., 1999. *Environmental Degradation of the Black Sea: Challenges and Remedies. NATO Science Series (2. Environmental Security), Vol. 56*. Dordrecht: Springer, pp. 175–195. https://doi.org/10.1007/978-94-011-4568-8_11
14. Bodeanu, N., 1993. Microalgal blooms in the Romanian area of the Black Sea and contemporary eutrophication conditions. In: T. J. Smayda and Y. Shimizu, eds., 1993. *Toxic Phytoplankton Blooms in the Sea*. Amsterdam: Elsevier, pp. 203–209.
15. Becquevort, S., Bouvier, T., Lancelot, C., Cauwet, G., Deliat, G., Egorov, V.N. and Popovichev, V.N., 2002. The Seasonal Modulation of Organic Matter Utilization by Bacteria in the Danube-Black Sea Mixing Zone. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 54(3), pp. 337–354. <https://doi.org/10.1006/ecss.2000.0651>
16. Garkavaya, G.P. and Bogatova, Yu.I., 2001. [Contemporary Sources of Eutrophication of the North-Western Part of the Black Sea]. In: TNPU, 2001. *Scientific Issues Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University. Series: Biology*. Ternopil, 2001. No. 3: Special Issue: Hydroecology, pp. 188–189 (in Russian).
17. Sovga, E.E. and Kyrylenko, N.F., 2014. Long-Term Dynamics of Biogenic Elements in the NW Black Sea Shelf. *Odessa National University Herald*, 19(1), pp. 105–112 (in Russian).
18. Friedrich, J., Dinkel, C., Friedl, G., Pimenov, N., Wijsman, J., Gomoiu, M.-T., Cociasu, A., Popa, L. and Wehrli, B., 2002. Benthic Nutrient Cycling and Diagenetic Pathways in the North-Western Black Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 54(3), pp. 369–383. <https://doi.org/10.1006/ecss.2000.0653>
19. Zaitsev, Y.P. and Alexandrov, B.G., 1997. Recent Man-Made Changes in the Black Sea Ecosystem. In: E. Özsoy and A. Mikaelyan, eds., 1997. *Sensitivity to Change: Black Sea, Baltic Sea and North Sea*. Dordrecht: Springer, pp. 25–31. https://doi.org/10.1007/978-94-011-5758-2_3
20. Belokopytov, V., 1998. Long-Term Variability of Cold Intermediate Layer Renewal Conditions in the Black Sea. In: L. Ivanov, and T. Oguz, eds., 1998. *Ecosystem Modeling as a Management Tool for the Black Sea, Vol. 2*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, pp. 47–52.

About the author:

Oleg A. Yunev, Leading Research Associate, A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS (2 Nakhimov Av., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Dr.Sci. (Biol.), **ORCID ID: 0000-0001-6307-1322**, **Scopus Author ID: 6603005406**, o.yunev@ibss-ras.ru

The author has read and approved the final manuscript.