

Содержание биогенных элементов и лимитирование первичной продукции фитопланктона в устьевой области реки Водопадной (Южный берег Крыма)

В. Н. Егоров^{1,2*}, Н. И. Бобко¹, Ю. Г. Марченко¹,
С. Е. Садогурский²

¹ ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН»,
Севастополь, Россия

² ФГБУН «Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН»,
Ялта, Россия

*e-mail: egorov.ibss@yandex.ru

Поступила 26.07.2021 г.; принята к публикации 12.08.2021 г.; опубликована 25.09.2021 г.

Работа посвящена изучению эвтрофикации вод акватории г. Ялты в результате стока р. Водопадной, а также оценке ее влияния на характеристики лимитирования первичной продукции фитопланктона биогенными элементами. Работы велись в течение 2020 г. Пробы воды для гидрохимических анализов отбирали в пресной воде нижнего течения р. Водопадной и в морской воде ее приустьевой зоны. По материалам наблюдений 2020 г. охарактеризовано содержание соединений минерального азота (в форме нитритов, нитратов, аммония, суммарное) и минерального фосфора в устьевой области р. Водопадной, впадающей в акваторию Черного моря в черте г. Ялты. Определено влияние атмосферных осадков на изменение концентраций биогенных элементов в водах устьевого участка и устьевого взморья. Установлено, что поступление биогенных элементов с речным стоком может изменять лимитирование первичной продукции фитопланктона с азотного на фосфорное. Показано, что речной сток является одним из ключевых факторов, влияющих на степень эвтрофикации морских вод в границах рекреационной зоны г. Ялты. Это необходимо учитывать при разработке стратегий оптимизации городской среды и развития рекреационно-туристической инфраструктуры региона.

Ключевые слова: Черное море, река Водопадная, устьевая область, биогенные элементы, первичная продукция фитопланктона, лимитирование.

Благодарности: работа выполнена в рамках тем ФИЦ ИнБЮМ «Молисмологические и биогеохимические основы гомеостаза морских экосистем» (121031500515-8) и НБС-ННЦ РАН «Проведение мониторинговых исследований и определение современного состояния биоты Государственного природного заповедника «Мыс Мартьян»» (№ АААА-А20-120110690010-4).

© Егоров В. Н., Бобко Н. И., Марченко Ю. Г., Садогурский С. Е., 2021



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

Для цитирования: Содержание биогенных элементов и лимитирование первичной продукции фитопланктона в устьевой области реки Водопадной (Южный берег Крыма) / В. Н. Егоров [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 3. С. 37–51. doi:10.22449/2413-5577-2021-3-37-51

Nutrient Content and Limitation of the Phytoplankton Primary Production in the Estuary Area of the Vodopadnaya River (South Coast of Crimea)

V. N. Egorov^{1,2}*, N. I. Bobko¹, Yu. G. Marchenko¹, S. Ye. Sadogurskiy²

¹ *A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russia*

² *Nikitsky Botanical Gardens – National Scientific Center of RAS, Yalta, Russia*

**e-mail: egorov.ibss@yandex.ru*

Submitted 26.07.2021; revised 12.08.2021; published 25.09.2021

The paper studies eutrophication of the waters of the Yalta water area caused by the Vodopadnaya River runoff and provides assessment of its influence on the characteristics of the phytoplankton primary production limitation by nutrients. The work was performed during 2020. Water samples for hydrochemical analyses were taken in fresh water of the Vodopadnaya River lower reaches and in seawater of its estuarine area. Based on the materials of observations in 2020, the paper characterizes the content of mineral nitrogen compounds (in the form of nitrites, nitrates, ammonium, and total content) and mineral phosphorus in the estuarine area of the Vodopadnaya River, which flows into the Black Sea within the city of Yalta. The influence of atmospheric precipitation on the change in the concentrations of nutrients in the waters of the mouth reach and estuarine front was determined. It was established that nutrient input with the river runoff can shift the nitrogen limitation of the phytoplankton primary production to the phosphorus one. It was shown that river runoff is one of the key factors affecting the degree of eutrophication of sea waters within the recreational zone of Yalta. This should be taken into account when developing strategies for optimizing the urban environment and recreational and tourist infrastructure of the region.

Keywords: Black Sea, Vodopadnaya River, estuarine area, nutrients, phytoplankton primary production, limitation.

Acknowledgements: the research is performed under topic “Molismologic and biogeochemical base of marine ecosystem homeostasis” of A. O. Kovalevsky IBSS (121031500515-8) and NBG-NSC RAS “Conducting monitoring studies and determining the current state of the biota of the State Nature Reserve ‘Cape Martian’” (no. AAAA-A20-120110690010-4).

For citation: Egorov, V.N., Bobko, N.I., Marchenko, Yu.G. and Sadogurskiy, S.Ye., 2021. Nutrient Content and Limitation of the Phytoplankton Primary Production in the Estuary Area of the Vodopadnaya River (South Coast of Crimea). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 37–51. doi:10.22449/2413-5577-2021-3-37-51 (in Russian).

Введение

Южный берег Крымского побережья Черного моря, включая береговую зону в черте г. Ялты, является зоной интенсивного рекреационного природопользования. В границах этой зоны антропогенный пресс обусловлен наличием на побережье развитой рекреационно-туристической, муниципальной и отчасти аграрной инфраструктуры, что и определяет поступление разного рода поллютантов со склоновым и речным стоком. По современной классификации качества морской среды прибрежно-морские воды у Южного берега Крыма относятся к критическим зонам [1], в которых концентрации загрязняющих веществ могут превышать природные уровни или достигать предельно допустимых концентраций (ПДК), регулируемых по санитарно-гигиеническим критериям. Одной из наиболее значимых современных экологических проблем является гиперэвтрофикация вод [2, 3]. Она обусловлена поступлением избыточных количеств биогенных элементов, которые служат причиной повышения первичной продуктивности фитопланктона, что влечет за собой структурно-функциональную перестройку гомеостаза прибрежно-морских экосистем [4, 5]. В акватории относительно небольшого открытого Ялтинского залива (URL: www.waterresources.ru/zalivy/yaltinskiy-zaliv) ситуация осложняется впадением в него двух рек – Быстрой (Дереккой) и Водопадной (Учан-Су). Обе реки в среднем и нижнем течении протекают в границах урбанизированной территории, имеют паводочный водный режим, поэтому расход воды в устьях прямо зависит от динамики интенсивности и объема атмосферных ¹⁾ осадков [6]. Когда публикация готовилась к печати, на Крым обрушился мощный циклон. В Ялте за сутки 18 июня 2021 г. выпало 134 мм осадков, что составило три месячные нормы (URL: www.pogodaiklimat.ru/monitor.php?id=33990). Это вызвало катастрофическое наводнение, в частности вдоль русла р. Водопадной сошел мощный селевой поток. Кроме всего прочего, он обусловил поступление в прилегающую морскую акваторию колоссального объема наносов и разного рода поллютантов. Но следует отметить, что явления подобного масштаба регистрируются здесь примерно лишь раз в столетие.

Целью настоящего исследования является определение содержания биогенных элементов в водах устьевого участка и устьевого взморья р. Водопадной в 2020 г., а также оценка влияния речного стока и атмосферных осадков на концентрацию биогенных элементов и характер лимитирования первичной продукции фитопланктона в рекреационной зоне г. Ялты.

Материал и методика

Отбор фактического материала осуществлялся в поверхностном слое вод устьевой области р. Водопадной, впадающей в акваторию Ялтинского залива Черного моря в границах г. Ялты (рис. 1). Длина реки составляет 7.0 км, площадь водосборного бассейна – 28.9 км². Исток расположен под кромкой Ай-Петринской яйлы, а открытая бездельтовая устьевая область в соответствии с общепринятым делением включает две части: а) устьевой участок реки – часть ее нижнего течения, подверженную влиянию сгонно-нагонных колебаний уровней воды; б) открытую прибрежную зону приемного водоема,

¹⁾ Михайлов В. Н., Добролюбов С. А. Гидрология. Москва ; Берлин : Директ-Медиа, 2017. 752 с.



Рис. 1. Схематическая карта района исследований и локализация пунктов отбора проб в устьевой области р. Водопадной (в границах г. Ялта): 1 – устьевое взморье (44°29'14.8" с. ш., 34°09'41.9" в. д.); 2 – устьевой участок (44°29'22.0" с. ш., 34°09'46.6" в. д.)

Fig. 1. Schematic map of the research area and localization of sampling points in the estuarine area of the Vodopadnaya River (within the boundaries of Yalta): 1 – estuarine front (44°29'14.8"N, 34°09'41.9"E); 2 – mouth reach (44°29'22.0"N, 34°09'46.6"E)

подверженную влиянию речного стока, которая в морских устьях рек называется устьевым взморьем¹⁾. Соответственно, пункты отбора проб расположены в обеих частях дельтовой области р. Водопадной в районе отеля «Ореанда» (г. Ялта): п. 1 – в прибрежно-морской солонатоводной акватории устьевое взморья у южной оконечности Приморского пляжа (44°29'14.8" с. ш., 34°09'41.9" в. д.); п. 2 – в пресноводной акватории устьевое участка реки (44°29'22.0" с. ш., 34°09'46.6" в. д.) (рис. 1). Расстояние по прямой между ними составляет 245 м.

Пробы поверхностной воды отбирались в пластиковые емкости объемом 1500 мл и до выполнения химических анализов хранились в темноте в бытовом холодильнике. Концентрация нитритов, нитратов и аммония определялась стандартным методом²⁾. Степень лимитирования продукционных процессов в фитопланктоне определялась из стехиометрического соотношения Редфилда (R_{at}), которое при выраженной в мкг/л размерности входящих в него компонентов (нитритов, нитратов, аммония и минерального фосфора) имело следующий вид [7, 8]:

$$R_{at}(N/P) = 1.53 (1.35 NO_2 + NO_3 + 3.44 NH_4)/PO_4. \quad (1)$$

²⁾ Руководство по методам химического анализа морских вод. Л. : Гидрометеиздат, 1977. 208 с.

При $R_{at} > 16$ лимитирование первичной продукции фитопланктона (ППФ) рассчитывалось по минеральному фосфору, а при $R_{at} < 16$ – по азоту. Погрешность измерений оценивали по среднеквадратичному отклонению (СКО). Данные об интенсивности атмосферных осадков в районе г. Ялты, непосредственно определяющих объем и динамику стока р. Водопадной (которая при незначительных протяженности и площади водосбора характеризуется дождевым типом питания и паводочным водным режимом), приведены по материалам веб-сайта www.pogodaiklimat.ru/history/33990_2.htm.

Результаты

Результаты измерения концентраций соединений азота и фосфора на устьевом взморье (п. 1) и устьевом участке (п. 2) р. Водопадной, а также оценка параметра Редфилда приведены в таблице. Их анализ показывает, что в пресной воде устьевого участка наименьшее количество азота было представлено в форме нитритов ($NO_2 = 10.30\text{--}43.80$ мкг·л⁻¹ или в среднем 18.69 мкг·л⁻¹), содержание аммонийной формы азота значительно варьировало ($NH_4 = 9.40\text{--}147.20$ мкг·л⁻¹ или в среднем 40.24 мкг·л⁻¹), а наибольшее ее количество было представлено в форме нитратов ($NO_3 = 555.00\text{--}1860.00$ мкг·л⁻¹ или в среднем 897.12 мкг·л⁻¹). Концентрация фосфатов варьировала в пределах $31.30\text{--}92.80$ мкг·л⁻¹ (или в среднем 62.12 мкг·л⁻¹). Это свидетельствует о высоком уровне эвтрофированности вод р. Водопадной, но согласно перечню параметров, нормируемых для пресных вод по санитарно-гигиеническим критериям, их нитратное загрязнение не превышало 20 % от ПДК = 10 мг·м⁻³. В то же время в морской воде устьевого взморья концентрация биогенных элементов была ниже, чем в пресных водах устьевого участка р. Водопадной (таблица). Концентрация азота составляла: в форме нитритов – $1.60\text{--}4.60$ мкг·л⁻¹ или в среднем 2.61 мкг·л⁻¹, в форме аммония – $6.80\text{--}24.30$ мкг·л⁻¹ или 13.34 мкг·л⁻¹ и в форме нитратов – $8.00\text{--}32.00$ мкг·л⁻¹ или в среднем 14.25 мкг·л⁻¹. Концентрация фосфатов на устьевом взморье составила $3.40\text{--}17.00$ мкг·л⁻¹ (в среднем 9.16 мкг·л⁻¹). Значения параметра Редфилда колебались в пределах $R_{at} = 5.12\text{--}42.32$ (в среднем 14.08), и это свидетельствовало о том, что только в одном случае (при $R_{at} = 42.32$) ППФ лимитировалась по фосфору, а в остальных (при $R_{at} < 16$) – по азоту.

Обсуждение

Анализ годового тренда распределения и динамики концентрации биогенных элементов в пресной воде устьевого участка р. Водопадной (п. 2) показывает, что в 2020 г. минеральный азот в основном был представлен в форме нитратов (NO_3) (рис. 2). Снижение концентрации суммы соединений азота ($\sum N$) наблюдалось от зимы к лету, когда величина этого показателя в общем стабилизировалась. В сентябре было зарегистрировано небольшое увеличение концентрации $\sum N$, связанное с ростом содержания нитратов (рис. 2, *a*). Концентрация фосфатов на устьевом участке в первую половину года была достаточно высокой и варьировала относительно слабо. В летний период отмечено значительное увеличение значений этого показателя, которые в ноябре вновь снизились до значений, сопоставимых с весенним минимумом (см. рис. 2, *b*).

Концентрация соединений минерального азота (в форме NH₄, NO₂, NO₃ и их суммы ΣN) и минерального фосфора (в форме PO₄), а также значения параметра Редфилда (R_{at}) в устьевой области р. Водопадной в 2020 г.

Concentration of mineral nitrogen compounds (in the form of NH₄, NO₂, NO₃ and their sum ΣN) and mineral phosphorus (in the form of PO₄), as well as the value of the Redfield parameter (R_{at}) in the estuarine area of the Vodopadnaya River in 2020

Дата / Date	Концентрация (мкг·л ⁻¹) / Concentration (µg·L ⁻¹)					R _{at}
	NH ₄ ± СКО / NH ₄ ± SD	NO ₂ ± СКО / NO ₂ ± SD	NO ₃ ± СКО / NO ₃ ± SD	ΣN	PO ₄ ± СКО / PO ₄ ± SD	
Пункт 1 – устьевое взморье (морская вода) / Point 1 – estuarine front (sea water)						
16.01.2020	11.50 ± 0.60	2.70 ± 0.04	32.00 ± 0.96	46.2	17.00 ± 0.26	6.77
05.03.2020	9.10 ± 0.44	2.90 ± 0.04	20.30 ± 0.61	32.3	12.20 ± 0.18	6.96
23.06.2020	24.30 ± 1.17	1.60 ± 0.02	8.30 ± 0.25	34.2	3.40 ± 0.05	42.32
14.08.2020	19.10 ± 0.92	4.60 ± 0.07	10.50 ± 0.32	32.2	9.70 ± 0.15	13.00
02.10.2020	6.80 ± 0.33	1.90 ± 0.03	10.50 ± 0.32	19.2	10.90 ± 0.16	5.12
15.10.2020	11.90 ± 0.36	2.90 ± 0.04	12.80 ± 0.38	27.6	6.10 ± 0.09	14.46
26.11.2020	14.00 ± 1.58	2.30 ± 0.03	11.60 ± 0.35	27.9	6.50 ± 0.10	14.80
17.12.2020	10.00 ± 0.48	2.00 ± 0.03	8.00 ± 0.24	20.0	7.50 ± 0.11	9.20
Среднее / Mean	13.34	2.61	14.25	30.2	9.16	14.08
Пункт 2 – устьевой участок (пресная вода) / Point 2 – mouth reach (fresh water)						
16.01.2020	72.50 ± 3.74	19.50 ± 0.29	1860 ± 56	1952	44.50 ± 0.67	н/р / N/C
05.03.2020	23.10 ± 1.20	10.40 ± 0.16	960 ± 29	994	31.30 ± 0.47	н/р / N/C
23.06.2020	147.20 ± 7.07	43.80 ± 0.66	586 ± 18	777	53.40 ± 0.80	н/р / N/C
14.08.2020	9.40 ± 0.35	16.50 ± 0.25	690 ± 21	716	86.30 ± 1.50	н/р / N/C
02.10.2020	23.00 ± 1.0	21.30 ± 0.32	755 ± 22	799	92.80 ± 1.40	н/р / N/C
15.10.2020	12.70 ± 0.61	10.30 ± 0.15	1005 ± 30	1028	70.00 ± 1.05	н/р / N/C
26.11.2020	24.00 ± 1.1	11.32 ± 0.17	555 ± 17	590	43.90 ± 0.66	н/р / N/C
17.12.2020	22.00 ± 1.06	16.40 ± 0.25	766 ± 23	792	74.80 ± 1.12	н/р / N/C
Среднее / Mean	40.24	18.69	897.12	956	62.12	н/р / N/C

Примечание: н/р – не рассчитывалось.

Note: N/C – not calculated.

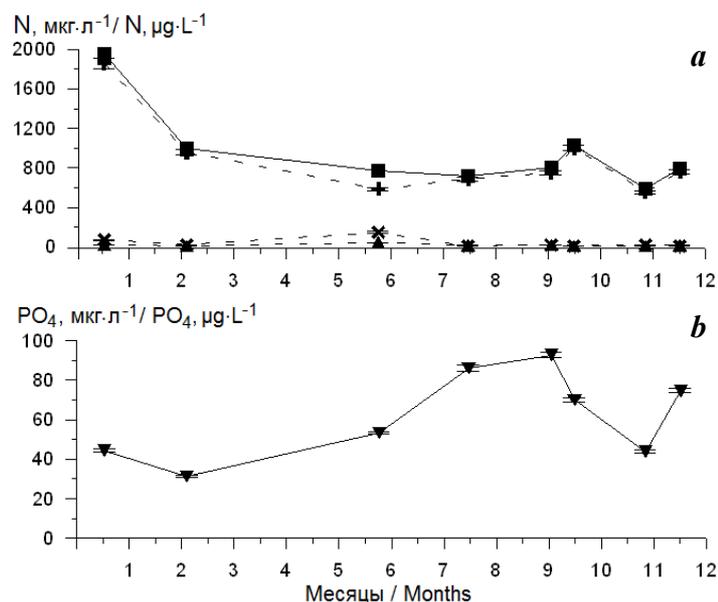


Рис. 2. Концентрации биогенных элементов в пресной воде устьевого участка р. Водопадной (п. 2) в 2020 г.: *a* – NO_2 (▲), NH_4 (×), NO_3 (+), сумма соединений азота ΣN (■); *b* – PO_4 (▼)

Fig. 2. Concentrations of nutrients in fresh water of the mouth reach of the Vodopadnaya River (Point 2) in 2020: *a* – NO_2 (▲), NH_4 (×), NO_3 (+), sum of nitrogen compounds ΣN (■); *b* – PO_4 (▼)

Данные изменения концентраций соединений азота в морской воде устьевого взморья (п. 1) свидетельствуют о том, что зимой 2020 г. было отмечено снижение содержания аммония (NH_4), его стабилизация в весенне-летний период и некоторое уменьшение поздней осенью (рис. 3, *a*). Особенности же зависимости ΣN в основном формировались разнонаправленным изменением содержания нитратного (NO_3) и аммонийного (NH_4) азота (рис. 3, *a*). Концентрация фосфатов (PO_4), будучи максимальной в начале года, к концу весны заметно снизилась, но вновь выросла в конце лета – осенью.

Представленные на рис. 2 и 3 данные в целом свидетельствуют о наличии внешнего источника поступления биогенных элементов в пресную воду устьевого участка (п. 2) р. Водопадной и далее в морскую воду устьевого взморья (п. 1). Для выявления этого источника была проанализирована информация о динамике количества атмосферных осадков в районе г. Ялты (рис. 4). Видно, что лишь в феврале 2020 г. значения превышали средне-многолетний показатель за 2001–2020 гг. Прочие месяцы и 2020 г. в целом ($408 \text{ мм}\cdot\text{год}^{-1}$) были одними из наиболее засушливых за два десятилетия XXI в. (URL: www.pogodaiklimat.ru/history/33990_2.htm).

Сопоставление данных о динамике количества атмосферных осадков (см. рис. 4) с данными о динамике содержания биогенных элементов в устьевой области р. Водопадной в 2020 г. показало следующее. Максимальные значения концентрации ΣN в пресной воде устьевого участка (п. 2)

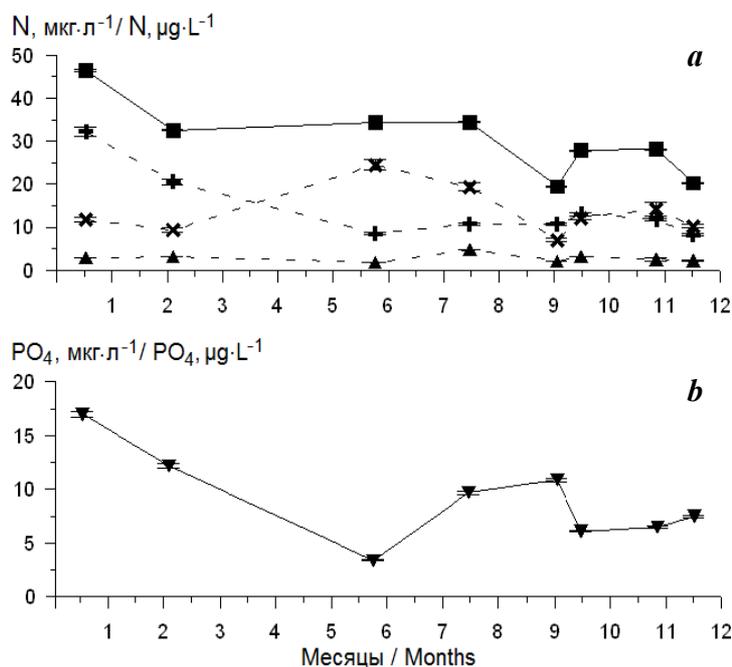


Рис. 3. Концентрации биогенных элементов в морской воде устьевого взморья р. Водопадной (п. 1) в 2020 г.: *a* – NO_2 (▲), NH_4 (×), NO_3 (+), сумма соединений азота ΣN (■); *b* – PO_4 (▼)

Fig. 3. Concentrations of nutrients in seawater of the estuarine front of the Vodopadnaya River (Point 1) in 2020: *a* – NO_2 (▲), NH_4 (×), NO_3 (+), sum of nitrogen compounds ΣN (■); *b* – PO_4 (▼)

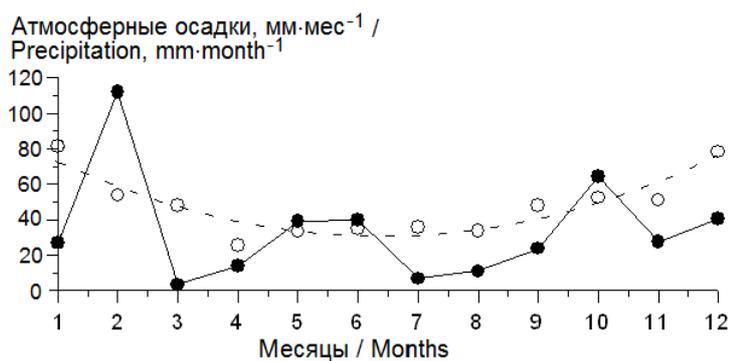


Рис. 4. Динамика количества атмосферных осадков в районе г. Ялты (URL: www.pogodaiklimat.ru/history/33990_2.htm): 2020 г. (●), средняя за 2001–2020 гг. (○)

Fig. 4. Dynamics of the atmospheric precipitation amount in the area of Yalta (URL: www.pogodaiklimat.ru/history/33990_2.htm): 2020 (●), average for 2001–2020 (○)

(см. рис. 2, *a*) и в соленой воде устьевого взморья (п. 1) (см. рис. 3, *a*) в определенной мере совпадают по времени с максимальными значениями количества атмосферных осадков в районе исследований (рис. 4).

В то же время концентрация фосфатов на устьевом участке (п. 2) по отношению к динамике количества атмосферных осадков изменялась почти в противофазе (см. рис. 2, *b* и рис. 4). Лишь пик концентрации в водах устьевого взморья (п. 1) в определенной мере можно связать с увеличением количества атмосферных осадков (см. рис. 3, *b* и рис. 4). Тренды изменения концентраций фосфатов в пресной (п. 2) и в морской (п. 1) воде устьевой области р. Водопадной были однотипны и мало зависели от динамики количества атмосферных осадков в районе исследований (см. рис. 2, *b*, рис. 3, *b* и рис. 4). Это свидетельствует о существовании дополнительных факторов, которые, помимо атмосферных осадков (определяющих расход воды в устье), влияют на концентрацию биогенных элементов в границах обследованной области и в целом в прибрежно-морской акватории г. Ялты, являющейся ключевым элементом и ресурсом ее рекреационной зоны.

Установлено, что динамика концентрации нитритов (NO_2) в морской воде устьевого взморья (п. 1) почти не коррелирует ($R^2 = 0.207$) с динамикой их концентрации в пресной воде устьевого участка (п. 2) (рис. 5, *a*). Содержание аммония (NH_4) на устьевом взморье с определенной степенью достоверности ($R^2 = 0.424$) зависело от его концентрации на устьевом участке (рис. 5, *b*), а концентрация нитратов (NO_3) на устьевом взморье с высокой степенью достоверности ($R^2 = 0.860$) зависела от их содержания на устьевом участке (рис. 5, *b*). Зависимость между концентрациями фосфатов (PO_4) на устьевом взморье (п. 1) и на устьевом участке (п. 2) имела следующие особенности. При уровнях ниже $50 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$ их удельное содержание в пресной воде устьевого участка практически не влияло на изменение концентрации в морской воде устьевого взморья (рис. 5, *d*). При более высоких концентрациях фосфатов зависимость их содержания в морской воде устьевого взморья от концентрации в воде устьевого участка становилась почти функциональной ($R^2 = 0.995$).

Отмеченные эффекты свидетельствовали о том, что содержание биогенных элементов в реке влияет на изменение их концентрации в прилегающей прибрежно-морской акватории. Если тренды уменьшения содержания биогенных элементов в морской воде могут быть объяснены их поглощением водорослями в ходе первичных продукционных процессов, то пиковые повышения концентраций обусловлены поступлением биогенных элементов с речными водами. Это влияние может определяться как сезонным изменением количества атмосферных осадков, так и, по-видимому, летним увеличением загрязнения речных вод фосфатами и азотом из внешних источников. Особенности проявления такого влияния представлены на рис. 6. Так, в течение года концентрация в пресной воде превышает таковую в морской воде для $\sum\text{N}$ в 20.9–42.2 раза, а для фосфатов – в 2.6–15.7 раза (рис. 6, *a*). В результате соотношение концентраций минерального фосфора и минерального азота ($\text{PO}_4/\sum\text{N}$) может изменяться в пределах от 0.10 до 0.57 (рис. 6, *b*). При достижении им минимального значения режим лимитирования ППФ сменяется с азотного на фосфорный (рис. 6, *c*).

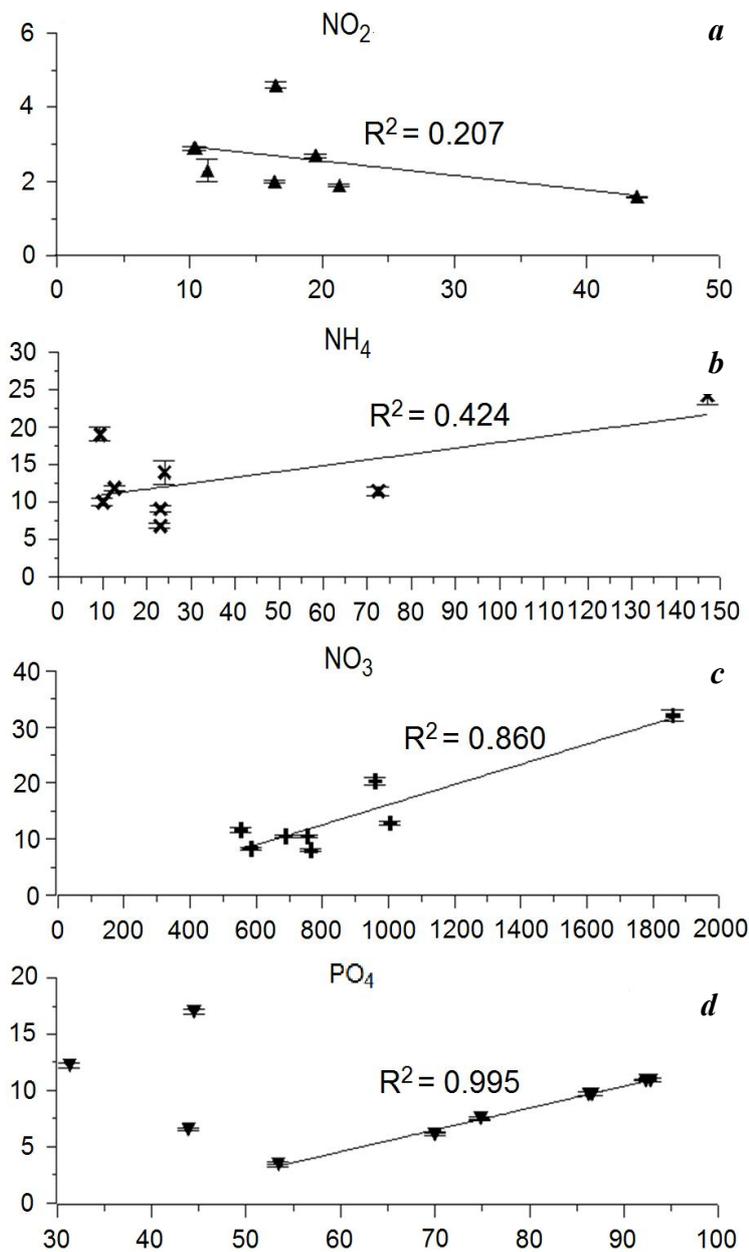
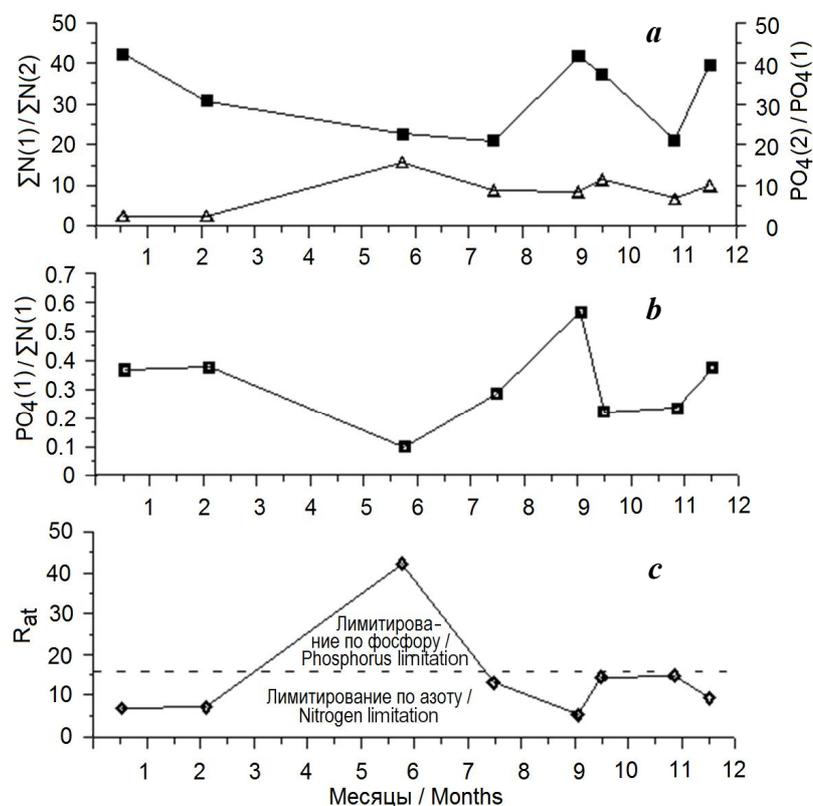


Рис. 5. Соотношения между концентрациями биогенных элементов ($\mu\text{г}\cdot\text{л}^{-1}$) в пресной воде устьевого участка (по оси абсцисс) и в морской воде устьевого взморья (по оси ординат) р. Водопадной в 2020 г.: *a* – NO_2 , *b* – NH_4 , *c* – NO_3 , *d* – PO_4

Fig. 5. Relationship between concentrations of nutrients ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) in fresh water of the mouth reach (on the abscissa) and in the seawater of the estuarine front (on the ordinate) of the Vodopadnaya River in 2020: *a* – NO_2 , *b* – NH_4 , *c* – NO_3 , *d* – PO_4



Р и с . 6. Соотношение концентраций ($\mu\text{г}\cdot\text{л}^{-1}$) биогенных элементов в устьевой области р. Водопадной в 2020 г.: *a* – отношение концентрации суммы соединений азота ΣN в пресной воде устьевго участка в п. 2 $\Sigma N(2)$ к ее концентрации в морской воде устьевго взморья в п. 1 $\Sigma N(1)$ (■); отношение концентрации фосфатов PO_4 в пресной воде устьевго участка в п. 2 $PO_4(2)$ к их концентрации в морской воде устьевго взморья в п. 1 $PO_4(1)$ (Δ); *b* – отношение концентрации PO_4 в п. 1 $PO_4(1)$ к концентрации ΣN в морской воде устьевго взморья в п. 1 $\Sigma N(1)$; *c* – значения параметра Редфилда R_{at} для морской акватории устьевго взморья в п. 1

Fig. 6. Concentration ratio ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) of nutrients in the Vodopadnaya River estuarine area in 2020: *a* – ratio of concentration of the sum of nitrogen compounds ΣN in fresh water of the mouth reach at Point 2 $\Sigma N(2)$ to that in seawater of the estuarine front at Point 1 $\Sigma N(1)$ (■); ratio of concentration of phosphates PO_4 in fresh water of the mouth reach at Point 2 $PO_4(2)$ to that in seawater of the estuarine front at Point 1 $PO_4(1)$ (Δ); *b* – ratio of PO_4 concentration at Point 1 $PO_4(1)$ to ΣN concentration in seawater of the estuarine front at Point 1 $\Sigma N(1)$; *c* – values of the Redfield parameter R_{at} for the offshore area of the estuarine front at Point 1

В литературе имеются сведения [7, 8], что при новообразовании органического вещества по отношению к углероду коэффициент поглощения фосфора составит 0.025, а азота – 0.175. Поэтому фактором, лимитирующим ППФ, выступает тот биогенный элемент, пропорция которого в водной среде меньше, чем стехиометрическое отношение N:P равно 16:1 по молярной или 7:1 по весовой концентрации. Для обеспечения фотосинтеза в одном килограмме сырой массы фитопланктона должно содержаться 2 г фосфора, 14 г азота и 80 г углерода³⁾. Учет этого обстоятельства позволил оценивать новую продукцию при определении влияния ППФ на оборот биогенных элементов в прибрежных акваториях [9, 10].

Как показано выше (см. таблицу), концентрация ΣN в пресной речной воде в среднем составляла $897.12 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$, а концентрация фосфора – $62.12 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$. Среднегодовой сток р. Водопадной составляет $0.384 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ или $12 \text{ млн м}^3 \cdot \text{год}^{-1}$ [11]. Так как в течение года лимитирование ППФ биогенными элементами могло меняться (см. таблицу), то степень эвтрофикации морских вод у берегов г. Ялты должна оцениваться при лимитировании ППФ как по соединениям азота, так и по соединениям фосфора. При лимитировании ППФ по соединениям азота ее значение достигнет $62 \cdot 10^9 \text{ мгС} \cdot \text{год}^{-1}$. Если оценивать ППФ в условиях ее лимитирования по соединениям фосфора, она может составить $30 \cdot 10^9 \text{ мгС} \cdot \text{год}^{-1}$.

Как известно, биогенной гиперэвтрофикации вод соответствует ППФ, превышающая $100 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{сут}^{-1}$ [12]. Если считать, что основная новая ППФ синтезируется в течение примерно 6–7 месяцев и что она будет равномерно распределена в столбе воды от поверхности до глубины 10 м, то площадь гиперэвтрофикации вод прибрежно-морской акватории у г. Ялты при фосфорном лимитировании продукционных процессов составит $30 \cdot 10^9 / (2 \cdot 10^5) = 150 \cdot 10^3 \text{ м}^2$, а при азотном – $62 \cdot 10^9 / (2 \cdot 10^5) = 310 \cdot 10^3 \text{ м}^2$. В заключение следует отметить, что в рекреационной зоне г. Ялты расположены муниципальные и санаторные пляжи. Их площадь соизмерима с нашей оценкой площади биогенной гиперэвтрофикации вод прибрежно-морской акватории, которая обусловлена поступлением биогенных элементов со стоком р. Водопадной.

Заключение

Исследование, выполненное в устьевой области р. Водопадной показало, что по сравнению с морскими водами устьевого взморья пресные речные воды устьевого участка характеризуются повышенным содержанием азота в форме нитритов в 7.2 раза, аммония в 3.0 раза, нитратов в 62.9 раза и минерального фосфора в 13.2 раза. В целом суммарная концентрация минеральных форм азота в речной воде была в 27.9 раза выше, чем в морской. Максимальные концентрации биогенных элементов, зарегистрированные в пресной воде устьевого участка, могут быть связаны как с увеличением объема атмосферных осадков, так и с поступлением поллютантов из иных источников, расположенных вдоль русла (особенно это актуально для фосфатов в летний период). Установлено статистически достоверное влияние стока

³⁾ Зилов Е. А. Гидробиология и водная экология (организация, функционирование и загрязнение водных экосистем). Иркутск : Изд-во Иркутск. гос. ун-та, 2009. 147 с.

р. Водопадной на динамику концентраций суммы соединений минерального азота и соединений минерального фосфора в водах прилегающей прибрежно-морской акватории. В последней преобладает азотное лимитирование ППФ, однако влияние речных вод таково, что периодически режим лимитирования ППФ может изменяться на фосфорный.

Годовое поступление биогенных элементов с речным стоком в устьевую область р. Водопадной при фосфорном лимитировании ППФ может привести к летней гиперэвтрофикации в прилегающей прибрежно-морской акватории на площади $150 \cdot 10^3 \text{ м}^2$, а при азотном лимитировании – на площади $310 \cdot 10^3 \text{ м}^2$. Таким образом, сток р. Водопадной является одним из ключевых факторов, влияющих на степень эвтрофикации морских вод в границах рекреационной зоны г. Ялты. Это необходимо учитывать при разработке стратегий оптимизации городской среды, а также развития рекреационно-туристической инфраструктуры и особо охраняемых природных объектов, которые расположены на прилегающих участках береговой зоны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зайцев Ю. П., Поликарпов Г. Г.* Экологические процессы в критических зонах Черного моря: синтез результатов двух направлений исследований с середины XX до начала XXI веков // *Морской экологический журнал*. 2002. Т. 1, № 1. С. 33–55.
2. *Виноградов М. Е., Сапожников В. В., Сушкина Э. А.* Экосистема Черного моря. М. : Наука, 1992. 110 с.
3. *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
4. *Зайцев Ю. П.* Экологическое состояние шельфовой зоны Черного моря у побережья Украины (обзор) // *Гидробиологический журнал*. 1992. Т. 28, № 4. С. 3–18.
5. *Егоров В. Н.* Биогехимические механизмы реализации компенсационного гомеостаза в Черноморских экосистемах // *Морской экологический журнал*. 2012. Т. 11, № 4. С. 5–17.
6. *Олиферов А. Н., Тимченко З. В.* Реки и озера Крыма. Симферополь : Доля, 2005. 214 с.
7. *Redfield A. C.* The biological control of chemical factors in the environment // *American Scientist*. 1958. Vol. 46, iss. 3. P. 205–221. URL: <https://www.jstor.org/stable/27827150> (date of access: 9.08.2021).
8. *Хатчинсон Д.* Лимнология. М. : Мир, 1969. 591 с.
9. The influence of phytoplankton primary production on the cycle of biogenic elements in the coastal waters off Sevastopol, Black Sea / V. N. Egorov [et al.] // *Russian Journal of Marine Biology*. 2018. Vol. 44, iss. 3. P. 240–247. doi:10.1134/S1063074018030057
10. *Егоров В. Н.* Теория радиоизотопного и химического гомеостаза морских экосистем. Севастополь : ИнБЮМ, 2019. 355 с. doi:10.21072/978-5-6042938-5-0
11. *Боровский Б. И., Тимченко З. В.* Гидроэнергетические потенциалы крымских рек // *Строительство и техногенная безопасность*. 2005. № 11. С. 182–186.
12. *Финенко З. З., Суслин В. В., Чурилова Т. Я.* Региональная модель для расчета первичной продукции Черного моря с использованием данных спутникового сканера цвета SeaWiFS // *Морской экологический журнал*. 2009. Т. 8, № 1. С. 81–106.

Сведения об авторах:

Егоров Виктор Николаевич – научный руководитель, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, Севастополь, пр. Нахимова, 2), академик РАН, доктор биологических наук, профессор, **ORCID ID: 0000-0002-4233-3212, Scopus Author ID: 7202505157, ResearcherID: F-2541-2016, egorov.ibss@yandex.ru**

Бобко Николай Иванович – младший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, Севастополь, пр. Нахимова, 2), **Scopus Author ID: 57191094425, ResearcherID: H-3480-2016, ni.bobko@yandex.ru**

Марченко Юлия Григорьевна – ведущий инженер, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, Севастополь, пр. Нахимова, 2), **ORCID ID: 0000-0001-8446-1637, Scopus Author ID: 57202951344, ResearcherID: X-2891-2019, jul_marchenko07@mail.ru**

Садогурский Сергей Ефимович – ведущий научный сотрудник, ФГБУН «Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН» (298648, Россия, Ялта, пгт. Никита, Никитский спуск, 52), **ORCID ID: 0000-0002-5374-9838, Scopus Author ID: 56549945600, ssadogurskij@yandex.ru**

Заявленный вклад авторов:

Егоров Виктор Николаевич – общее научное руководство исследованием, формулировка цели и задач комплексного исследования, обсуждение результатов работ, редактирование рукописи

Бобко Николай Иванович – проведение гидрохимических работ

Марченко Юлия Григорьевна – анализ и интерпретация данных

Садогурский Сергей Ефимович – отбор проб, анализ и интерпретация данных

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Zaitsev, Yu.P. and Polikarpov, G.G., 2002. Ecological Processes in Critical Zones of the Black Sea (Results Synthesis of Two Research Directions, Middle of the XXth – Beginning of the XXIth Centuries). *Marine Ecological Journal*, 1(1), pp. 33–55 (in Russian).
2. Vinogradov, M.E., Sapozhnikov, V.V. and Sushkina, E.A., 1992. [*The Black Sea Ecosystem*]. Moscow: Nauka, 110 p. (in Russian).
3. 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).
4. Zaitsev, Yu.P., 1992. [Ecological state of the Black Sea shelf off the coast. Ukraine (review)]. *Hydrobiological journal*, 28(4), pp. 3–18 (in Russian).
5. Egorov, V.N., 2012. Biogeochemical Mechanisms for Realization of Compensatory Homeostasis in the Black Sea Ecosystems. *Marine Ecological Journal*, 11(4), pp. 5–17 (in Russian).
6. Oliferov, A.N. and Timchenko, Z.V., 2005. *Rivers and Lakes of Crimea*. Simferopol: Dolya, 214 p. (in Russian).
7. Redfield, A.C., 1958. The Biological Control of Chemical Factors in the Environment. *American Scientist*, 46(3), pp. 205–221. URL: <https://www.jstor.org/stable/27827150> [Accessed: 9 August 2021].

8. Hutchinson, G.E.A., 1969. *Limnology*. Moscow: Mir, 591 p. (in Russian).
9. Egorov, V.N., Popovichev, V.N., Gulin, S.B., Bobko, N.I., Rodionova, N.Yu., Tsarina, T.V. and Marchenko, Yu.G., 2018. The Influence of Phytoplankton Primary Production on the Cycle of Biogenic Elements in the Coastal Waters off Sevastopol, Black Sea. *Russian Journal of Marine Biology*, 44(3), pp. 240–247. doi:10.1134/S1063074018030057
10. Egorov, V.N., 2019. *Theory of Radioisotope and Chemical Homeostasis of Marine Ecosystems*. Sevastopol: IBSS, 356 p. doi:10.21072/978-5-6042938-5-0
11. Borovskiy, B.I and Timchenko, Z.V., 2005. [Hydropower Potential of the Crimean Rivers]. *Construction and Industrial Safety*, (10), pp. 182–186 (in Russian).
12. Finenko, Z.Z., Suslin, V.V. and Churilova, T.Ya., 2009. The Regional Model to Calculate the Black Sea Primary Production Using Satellite Color Scanner SeaWiFS. *Marine Ecological Journal*, 8(1), pp. 81–106 (in Russian).

About the authors:

Victor N. Egorov – Research Supervisor, A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS (2 Nakhimov Av., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Academician of RAS, Dr.Sci. (Biol.), Professor, **ORCID ID: 0000-0002-4233-3212**, **Scopus Author ID: 7202505157**, **ResearcherID: F-2541-2016**, *egorov.ibss@yandex.ru*

Nikolay I. Bobko – Junior Research Associate, A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS (2 Nakhimov Av., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **Scopus Author ID: 57191094425**, **ResearcherID: H-3480-2016**, *ni.bobko@yandex.ru*

Julia G. Marchenko – Leading Engineer, A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS (2 Nakhimov Av., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0001-8446-1637**, **Scopus Author ID: 57202951344**, **ResearcherID: X-2891-2019**, *jul_marchenko07@mail.ru*

Sergei Ye. Sadogurskiy – Leading Research Associate, Nikitsky Botanical Gardens – National Scientific Centre of RAS (52 Nikitsky Descent, village of Nikita, Yalta, 298648, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0002-5374-9838**, **Scopus Author ID: 56549945600**, *ssadogurskiy@yandex.ru*

Contribution of the authors:

Victor N. Egorov – general scientific supervising of the research, formulation of the goals and objectives for a comprehensive research, study results discussion, manuscript editing

Nikolai I. Bobko – hydrochemical analysis

Julia G. Marchenko – data analysis and interpretation

Sergei Ye. Sadogurskiy – sampling, data analysis and interpretation

All the authors have read and approved the final manuscript.