



ISSN 2499-9768 print
ISSN 2499-9776 online

МОРСКОЙ
БИОЛОГИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ
MARINE BIOLOGICAL JOURNAL

Том 5 № 1

2020

МОРСКОЙ БИОЛОГИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

включён в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК Российской Федерации.

Журнал реферируется международной библиографической и реферативной базой данных Scopus (Elsevier),

международной информационной системой по водным наукам и рыболовству ASFA (ProQuest),

Всероссийским институтом научно-технической информации (ВИНИТИ),

а также Российским индексом научного цитирования (РИНЦ) на базе Научной электронной библиотеки eLibrary.ru.

Все материалы проходят независимое двойное слепое рецензирование.

Редакционная коллегия

Главный редактор

Егоров В. Н., акад. РАН, д. б. н., проф., ФИЦ ИнБЮМ

Заместитель главного редактора

Солдатов А. А., д. б. н., проф., ФИЦ ИнБЮМ

Ответственный секретарь

Корнийчук Ю. М., к. б. н., ФИЦ ИнБЮМ

Адрианов А. В., акад. РАН, д. б. н., проф.,
ИБМ ДВО РАН

Азовский А. И., д. б. н., проф., МГУ

Генкал С. И., д. б. н., проф., ИБВВ РАН

Довгаль И. В., д. б. н., проф., ФИЦ ИнБЮМ

Зуев Г. В., д. б. н., проф., ФИЦ ИнБЮМ

Коновалов С. К., чл.-корр. РАН, д. г. н., ФИЦ МГИ

Милячакова Н. А., к. б. н., ФИЦ ИнБЮМ

Миронов О. Г., д. б. н., проф., ФИЦ ИнБЮМ

Неврова Е. Л., д. б. н., ФИЦ ИнБЮМ

Празукин А. В., д. б. н., ФИЦ ИнБЮМ

Руднева И. И., д. б. н., проф., ФИЦ ИнБЮМ

Рябушко В. И., д. б. н., ФИЦ ИнБЮМ

Самышев Э. З., д. б. н., проф., ФИЦ ИнБЮМ

Совга Е. Е., д. г. н., проф., ФИЦ МГИ

Трапезников А. В., д. б. н., ИЭРИЖ УрО РАН

Финенко З. З., д. б. н., проф., ФИЦ ИнБЮМ

Arvanitidis Chr., D. Sc., HCMR, Greece

Bat L., D. Sc., Prof., Sinop University, Turkey

Ben Souissi J., D. Sc., Prof., INAT, Tunis

Kociolek J. P., D. Sc., Prof., CU, USA

Magni P., D. Sc., CNR-IAS, Italy

Moncheva S., D. Sc., Prof., IO BAS, Bulgaria

Pešić V., D. Sc., Prof., University of Montenegro,

Montenegro

Zaharia T., D. Sc., NIMRD, Romania

Editorial Board

Editor-in-Chief

Egorov V. N., Acad. of RAS, D. Sc., Prof., IBSS

Assistant Editor

Soldatov A. A., D. Sc., Prof., IBSS

Managing Editor

Kornychuk Yu. M., PhD, IBSS

Adrianov A. V., Acad. of RAS, D. Sc., Prof.,
IMB FEB RAS, Russia

Arvanitidis Chr., D. Sc., HCMR, Greece

Azovsky A. I., D. Sc., Prof., MSU, Russia

Bat L., D. Sc., Prof., Sinop University, Turkey

Ben Souissi J., D. Sc., Prof., INAT, Tunis

Dovgal I. V., D. Sc., Prof., IBSS

Finenko Z. Z., D. Sc., Prof., IBSS

Genkal S. I., D. Sc., Prof., IBIW RAS, Russia

Kociolek J. P., D. Sc., Prof., CU, USA

Konovlov S. K., Corr. Member of RAS, D. Sc., Prof.,
MHI RAS, Russia

Magni P., D. Sc., CNR-IAS, Italy

Milchakova N. A., PhD, IBSS

Mironov O. G., D. Sc., Prof., IBSS

Moncheva S., D. Sc., Prof., IO BAS, Bulgaria

Nevrova E. L., D. Sc., IBSS

Pešić V., D. Sc., Prof., University of Montenegro, Montenegro

Prazukin A. V., D. Sc., IBSS

Rudneva I. I., D. Sc., Prof., IBSS

Ryabushko V. I., D. Sc., IBSS

Samyshev E. Z., D. Sc., Prof., IBSS

Sovga E. E., D. Sc., Prof., MHI RAS, Russia

Trapeznikov A. V., D. Sc., IPAE UB RAS, Russia

Zaharia T., D. Sc., NIMRD, Romania

Zuyev G. V., D. Sc., Prof., IBSS

Адрес редакции и издателя

ФИЦ «Институт биологии южных морей
имени А. О. Ковалевского РАН».

Пр. Нахимова, 2, Севастополь, 299011, РФ.

Тел.: +7 8692 54-41-10.

E-mail: mbj@imbr-ras.ru.

Зоологический институт РАН.

Университетская наб., 1, Санкт-Петербург, 199034, РФ.

Address of the Editorial Office

A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas
of Russian Academy of Sciences.

2 Nakhimov ave., Sevastopol, 299011, Russia.

Тел.: +7 8692 54-41-10.

E-mail: mbj@imbr-ras.ru.

Zoological Institute Russian Academy of Sciences.

Universitetskaya emb., 1, St.-Petersburg, 199034, Russia.

МОРСКОЙ БИОЛОГИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

MARINE BIOLOGICAL JOURNAL

2020 Том 5 № 1

Основан в феврале 2016 г.

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Выходит 4 раза в год

СОДЕРЖАНИЕ

Научные сообщения

Бат Л., Аричи Е., Озтекин А., Шахин Ф.

Токсичные металлы в каменных крабах южной части Чёрного моря:
оценка риска для здоровья человека (in Eng.) 3–11

Геворгиз Р. Г., Железнова С. Н.

Эффективность фиксации углерода в биомассе
Cylindrotheca closterium (Ehrenberg) Reimann & J. C. Lewin (Bacillariophyceae)
в условиях накопительного культивирования 12–19

Давидович Н. А., Давидович О. И.

Оптимальные солёности для вегетативного размножения и полового воспроизведения
диатомовой водоросли *Toxarium undulatum* 20–28

Донец М. М., Цыганков В. Ю., Боярова М. Д., Гумовский А. Н.,
Гумовская Ю. П., Христофорова Н. К.

Хлороорганические соединения в камбалах рода *Hippoglossoides* Gottsche, 1835
из дальневосточных морей России 29–42

Ковалёва И. В.

Количественная связь интенсивности солнечной радиации
и среднесуточной величины насыщения фотосинтеза фитопланктона по свету
для глубоководной части Чёрного моря 43–49

Полякова Т. А.

Цестоды рыб акватории Карадагского природного заповедника
и прилегающих районов Чёрного моря 50–63

Рябушко Л. И., Бондаренко А. В.

Микроводоросли грязевого вулкана Булганакского сопочного поля Крымского полуострова 64–77

Садогурский С. Е.

К изучению макрофитобентоса прибрежной акватории Караджинского участка
полуострова Тарханкут (Крым, Чёрное море) 78–89

Харчук И. А.

Хранилище ангидробиозных культур микроводорослей и цианобактерий
Института биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН 90–98

Юрахно В. М., Озер А. Н.

История формирования и особенности фауны микроспоридий рыб
Понто-Каспийского бассейна (in Eng.) 99–110

Хроника и информация

Памяти Ювеналия Петровича Зайцева (18.04.1924 – 08.01.2020) 111–113

Памяти Юрия Михайловича Бурченко (09.05.1945 – 22.02.2020) 114

МОРСКОЙ БИОЛОГИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

MARINE BIOLOGICAL JOURNAL

2020 Vol. 5 no. 1

Established in February 2016

SCIENTIFIC JOURNAL

4 issues per year

CONTENTS

Scientific communications

Bat L., Arici E., Öztekin A., and Şahin F.

Toxic metals in the warty crab in the southern Black Sea: Assessment of human health risk 3–11

Gevorgiz R. G. and Zheleznova S. N.

The carbon fixation efficiency in biomass
of *Cylindrotheca closterium* (Ehrenberg) Reimann & J. C. Lewin (Bacillariophyceae)
under the conditions of cumulative cultivation (in Russ.) 12–19

Davidovich N. A. and Davidovich O. I.

Salinity optima for vegetative growth and sexual reproduction
of the diatom *Toxarium undulatum* (in Russ.) 20–28

*Donets M. M., Tsygankov V. Yu., Boyarova M. D., Gumovsky A. N.,
Gumovskaya Yu. P., and Khristoforova N. K.*

Organochlorine compounds in flounders of genus *Hippoglossoides* Gottsche, 1835
from the Far Eastern seas of Russia (in Russ.) 29–42

Kovalyova I. V.

Quantitative relationship between solar radiation intensity
and average daily value of photosynthesis light saturation for phytoplankton
in the deep-water area of the Black Sea (in Russ.) 43–49

Polyakova T. A.

Fish cestodes of the Karadag nature reserve and adjacent water areas of the Black Sea (in Russ.) 50–63

Ryabushko L. I. and Bondarenko A. V.

Microalgae of mud volcano of the Bulganak sopochnoe field on the Crimean Peninsula (in Russ.) 64–77

Sadogurskiy S. Ye.

To the study of macrophytobenthos of coastal waters of Karadzhinsky Plot
on Tarkhankut Peninsula (Crimea, Black Sea) (in Russ.) 78–89

Kharchuk I. A.

The storage of anhydrobiotic cultures of microalgae and cyanobacteria
of A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS (in Russ.) 90–98

Yurakhno V. M. and Özer A. N.

History of formation and peculiarities of Ponto-Caspian fish myxosporean fauna 99–110

Chronicle and information

To the memory of Yuvenali Zaitsev (18.04.1924 – 08.01.2020) (in Russ.) 111–113

To the memory of Yuri Burchenko (09.05.1945 – 22.02.2020) (in Russ.) 114



НАУЧНЫЕ СООБЩЕНИЯ

UDC 574.64:595.384.2(262.5)

**TOXIC METALS IN THE WARTY CRAB IN THE SOUTHERN BLACK SEA:
ASSESSMENT OF HUMAN HEALTH RISK**

© 2020 L. Bat, E. Arici, A. Öztekin, and F. Şahin

Sinop University, Sinop, Turkey
E-mail: leventbat@gmail.com

Received by the Editor 07.11.2019; after revision 05.03.2020;
accepted for publication 27.03.2020; published online 31.03.2020.

The present study was performed to assess Cd, Pb, and Hg contaminations and human health risk in the warty crab *Eriphia verrucosa* (Forskål, 1775) in Akliman shores of Sinop Peninsula of the Black Sea. Heavy metals analysis was performed by inductively coupled plasma mass spectrometry. Among studied toxic metals, Pb had the highest mean concentration in *E. verrucosa*. The highest mean concentration of Pb (0.2 mg per kg of wet weight) was observed in male samples of the warty crab. However, higher concentrations of Cd and Hg (0.11 and 0.019 mg per kg of wet weight, respectively) were observed in females of *E. verrucosa*. The mean Cd values found in the warty crabs were higher in May and June than those in July and August. On the other hand, Pb values were recorded in July and August. The mean Hg values were not different between months except July and August for male samples of *E. verrucosa*. Foraging seasons of these crabs are different, which can lead to differences in prey size and ultimately metals intake. However, the results show that a toxic heavy metal concentration in edible tissues of crab from the southern Black Sea was within the permissible limits given by national and international food codices. Target hazard quotient (THQ) for each metal and hazard index (HI) were calculated to evaluate non-carcinogenic human health risks. Estimated THQs of Cd, Pb, and Hg suggest that these metals in the warty crab do not pose any apparent threat to humans, when the HI value is below the value of 1. The result of the analysis has shown that the warty crab *E. verrucosa* can be used as bioindicator as it contains variable levels of the metals observed. Since consumption is the main source of heavy metal intake by humans, monitoring studies are needed to protect public health and take preventive measures.

Keywords: heavy metal, Black Sea, *Eriphia verrucosa*, hazard index, target hazard quotient

The Black Sea takes up a variety of contaminants from agricultural, mining, touristic, domestic, and other anthropogenic activities via direct dumping from major rivers and in other ways [1]. Toxic metals such as mercury, cadmium, and lead, among others, are of great importance, since their anthropogenic contribution outweighs the one which is provided through life span and likewise because they show much toxic properties along the food chain. Toxic metals eventually enter seafood, and their bioaccumulation and magnification can cause physiological and morphological alterations not only in marine coastal animals but in people as well [2]. With the ever-increasing contamination of the coastal ecosystem, risk of toxic metal contamination of seafood is increasing day by day.

Many crustacean species were used as organisms for biomonitoring toxic metals in contaminated marine coastal ecosystems due to a number of suitable characteristics such as their convenient size, ease of sampling, abundance, ease of handling in the laboratory, and ability to accumulate metals. Therefore, it is of great interest to carry out investigations on metal concentrations in crustaceans [3].

People in Sinop city of the southern Black Sea consume a considerable amount of seafood. Since seafood is an important diet for humans, its quality and safety aspects are of particular interest. Over the past many decades, the amounts of heavy metals in seafood have been studied off the coasts of the Black Sea. Heavy metals are known to accumulate in benthic organisms and increase in the food chain. Since consumption is the main source of heavy metal intake by humans, the major interest is in the edible commercial species like the warty crab. It is necessary to have data on the levels of heavy metals in the warty crab in order to assess whether there is a health hazard.

The aim of this study is to evaluate the levels of Cd, Pb, and Hg in the warty crab *Eriphia verrucosa* (Forskål, 1775) in Akliman shores of Sinop Peninsula of the Black Sea.

MATERIAL AND METHODS

E. verrucosa is a type of crab which is locally called “küflü” and consumed extensively by people in spring and summer. All the warty crab samples were captured in 2017. This crab usually lives in shallow water under rocks and between seagrasses. *E. verrucosa*, which is a characteristic form for the hard substratum of the upper-infralittoral at depths of 1–8 m, has an average length of (10 ± 1.5) cm (Fig. 1).



Fig. 1. *Eriphia verrucosa* in Akliman shores of Sinop Peninsula of the Black Sea

Рис. 1. *Eriphia verrucosa* на Аклиманском побережье Синопского полуострова Чёрного моря

The meat was removed from the shell and washed with double-distilled water. Then the samples were frozen at the temperature of -21 °C and stored in polyethylene bags until analysis. Water temperatures at the time of sampling in May, June, July, and August were of $+15.8$, $+21.5$, $+25.6$, and $+26.2$ °C, respectively. A total of 40 warty crabs, 20 males and 20 females, were used for the heavy metal analysis. Ten individuals were analyzed in each sampling month.

Warty crabs is active at dawn and at night. Diet of *E. verrucosa* consists of molluscs, crustaceans, and worms. Chelipeds (claws) are not equal to each other and are strong. Warty crab catches prey with its claws and cuts it into suitable pieces with cutter plates in its mouth. It should be noted that the size of the claws has an influence on the prey: with increasing size, crab can hunt bigger organisms.

Location of sampling areas is given in Fig. 2. Akliman is located on the outer harbor side of Sinop Peninsula. The distance to the city center is of 11 km. The coast length is of approximately four thousand meters. The slope of the beach is quite low. Sampling covered areas of direct or indirect influence of urban releases and touristic and fishing activities, those located near the mouths of Karasu and Sirakaraagaçlar streams which carry domestic and agricultural discharges to the Akliman coasts of Sinop province as well as a locality not under the influence of industrial releases. However, under the influence of the prevailing winds,

pollutants reach the shore by the discharge. The sampling station was chosen to reflect progression of contamination, ecological particularity, and human activities in the area. Tourist activities are very intense in Akliman area, especially during summer months.

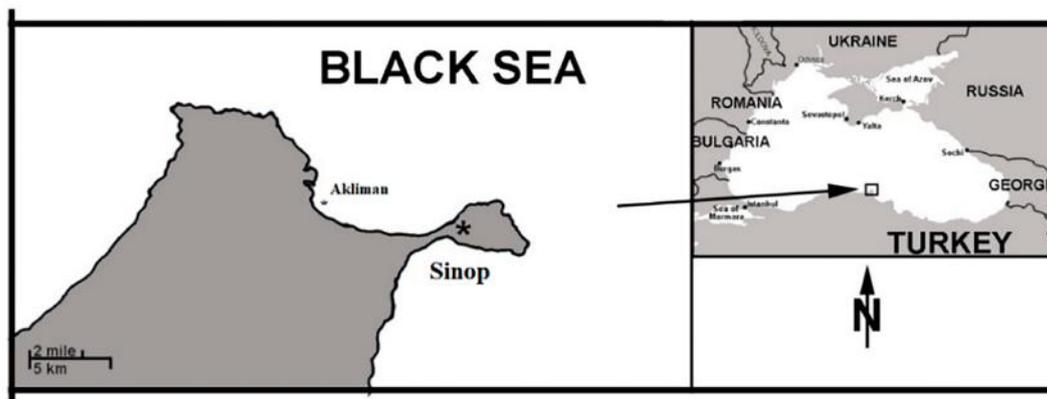


Fig. 2. Sampling area

Рис. 2. Район отбора проб

About 1 g of edible tissues was wet digested with Suprapur® HNO₃ (nitric acid) using a microwave digestion system (Start D 260, Milestone Systems) for analysis and evaluations of concentrations of three non-essential heavy metals. Cd, Pb, and Hg were determined using inductively coupled plasma mass spectrometry (7700x ICP-MS, Agilent).

The element standard solutions used for calibration were prepared by diluting a stock solution of 1000 mg per L (Cd, Hg, and Pb) supplied by Merck (Germany). Standard reference material of lobster hepatopancreas TORT-3 for the metals was used to validate the analysis. Recovery percentages results ranged 95 to 102 %, indicating the accuracy of the results (Table 1).

Table 1. Reference concentration values of standard reference material TORT-3 (mg per kg)

Таблица 1. Контрольные значения концентрации стандартного образца TORT-3 (мг·кг⁻¹)

	Cd	Hg	Pb
Certified	42.3	0.137	0.225
Found	41.47	0.140	0.237

Toxic metals in warty crab tissues were expressed as milligram of metal per kilogram of wet weight sample. The sensitivity of the method was determined according to the detection limits established for the spectrometer, which were of < 0.001 µg per L for Pb and Cd and of < 0.01 µg per L for Hg. The operating conditions of ICP-MS set for the analysis of the metals are shown in Table 2.

Assessments of hazard index of toxic metals in the warty crab. The estimated daily intake (hereinafter EDI) depends on both the metal level and the quantity of seafood consumption. The EDI of toxic metals was computed using Equation (1) below modified from [15]:

$$EDI = \frac{F_{ir} \times C_m}{W_{ab}} \times 10^{-3}, \quad (1)$$

where F_{ir} is the seafood ingestion rate (g·person⁻¹·day⁻¹), which was considered to be of 15 g·person⁻¹·day⁻¹ in Turkey [17], and this value was calculated as 105 g a week;

C_m is the level of toxic metal in the warty crab (mg per kg of wet weight);

W_{ab} is the mean adult body weight (70 kg).

Table 2. ICP-MS operating conditions for the metal analysis**Таблица 2.** Условия работы масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой для анализа металлов

Operating conditions	Values
Plasma mode	normal, robust
RF power (W)	1550
Sampling depth (mm)	8
Nebulizer (ml per min)	0.2
Spray chamber temperature (°C)	+2
Carrier gas flow (L per min)	0.95
Dilution gas flow (L per min)	0.15
Extraction lens 1 (V)	0
Kinetic energy discrimination (V)	4
Cell gas (He) flow (ml per min)	4
Background on-mass (cps)	< 2
Integration time (µs)	100

The estimated weekly intake (hereinafter EWI) values were calculated from EDI values. Intake estimates were determined as per unit body weight ($\text{mg}\cdot\text{week}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ of body weight).

Target hazard quotient (hereinafter THQ) [15], which is a proportion of the estimated exposure (EDI) to the oral reference dose (hereinafter R_fD), is used to evaluate the potential non-carcinogenic risk to humans from the sensed contaminated crab, and is shown by Equation (2):

$$THQ = \frac{EDI}{R_fD}, \quad (2)$$

where the R_fD values for Hg and Cd are of 0.0003 and $0.001 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{day}^{-1}$, respectively [20].

R_fD is not available for Pb [5]. The U. S. Department of Health and Human Services Public Health Service [16] pointed out that it would be unsuitable to develop R_fD for inorganic Pb and its compounds, because some of the sanitary impacts related to the exposure to Pb occur with blood Pb levels as low as to be essentially without a threshold [21]. Therefore, the R_fD value for Pb in this study was of $0.0035 \text{ mg}\cdot\text{day}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ of body weight as used by many researchers [5, 10, 11].

Exposure to more than one contaminant may induce contribution and/or interactive impacts; hereby, accumulative health effect from plural contaminants' exposure was determined by summing THQ value of individual contaminant and clarified as hazard index (hereinafter HI) as shown in Equation (3):

$$HI = THQ_{Cd} + THQ_{Pb} + THQ_{Hg}. \quad (3)$$

HI value of > 1 shows the possibility of reverse health effects and commits the necessity for bearing a further appraisal and likely remedial action. However, HI of < 1 shows no feasible health consequence from exposure of the examined contaminants at existing consumption rate.

Statistical analysis. Statistical analysis was carried out using IBM SPSS Statistics V21. One-way ANOVA and Duncan multiple range test were used to calculate a significant difference in the concentration of different studied metals with respect to different sexes and months. The significance was set at 5 % confidence level.

RESULTS

Mean values of toxic metal concentrations (mg per kg \pm SD wet weight) found in the warty crab *E. verrucosa* in Akliman shores of Sinop Peninsula of the Black Sea are presented in Fig. 3.

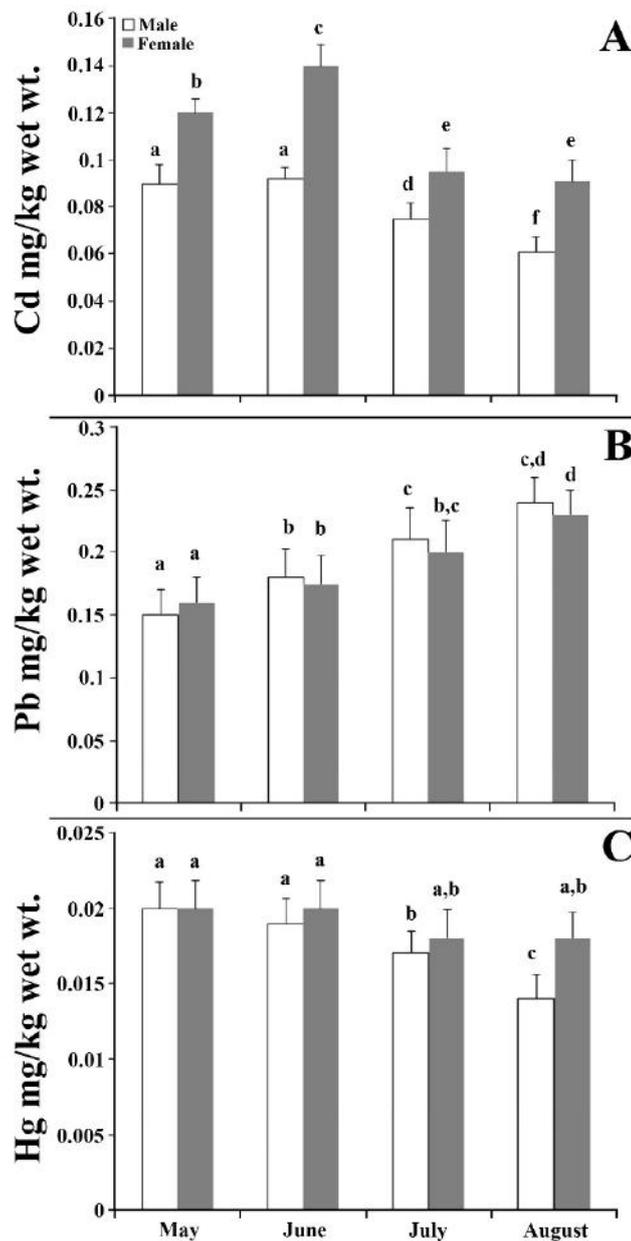


Fig. 3. Mean (\pm SD) Cd (A), Pb (B), and Hg (C) levels in *E. verrucosa* (N = 40) among sexes and months. Different letters beside vertical bars indicate that the values are significantly different ($p < 0.05$)

Рис. 3. Средние (\pm SD) уровни Cd (A), Pb (B) и Hg (C) в разные месяцы в самках и самцах *E. verrucosa* (N = 40). Разные буквы рядом с вертикальными полосами указывают на то, что значения существенно различаются ($p < 0,05$)

The risk to human health as a result of consuming the warty crab was evaluated by calculating EDI, EWI, provisional tolerable weekly/daily intake (hereinafter PTWI and PTDI, respectively), THQ, and HI. The maximum toxic metal values in the edible tissues of *E. verrucosa* were used to evaluate the human health risk from the consumption. EDI, EWI, PTWI, PTDI, R_fD , THQ, and HI of these metals are shown in Table 3.

Table 3. Human health risk parameters in the warty crab collected from the Black Sea**Таблица 3.** Параметры риска для здоровья человека от употребления каменного краба из Чёрного моря

Health risks parameters	Toxic heavy metals		
	Cd	Pb	Hg
Estimated daily intake, EDI, mg·day ⁻¹ ·kg ⁻¹ of body weight	2.39×10 ⁻⁵	4.18×10 ⁻⁵	4.07×10 ⁻⁶
Estimated weekly intake, EWI, mg·week ⁻¹ ·kg ⁻¹ of body weight	1.67×10 ⁻⁴	2.93×10 ⁻⁴	2.85×10 ⁻⁵
Provisional tolerable weekly intake, PTWI, mg·week ⁻¹ ·kg ⁻¹ of body weight	7×10 ⁻³	2.5×10 ⁻²	4×10 ⁻³
Provisional tolerable weekly intake, PTWI, mg per week per 70 kg of body weight	0.49	1.75	0.28
Provisional tolerable daily intake, PTDI, mg per day per 70 kg of body weight	0.07	0.25	0.04
Oral reference dose, R _f D, mg·day ⁻¹ ·kg ⁻¹ of body weight	1×10 ⁻³	3.5×10 ⁻³	3×10 ⁻⁴
Target hazard quotient, THQ	2.39×10 ⁻²	1.19×10 ⁻²	1.36×10 ⁻²
Hazard index, HI	4.94×10 ⁻²		

DISCUSSION

The non-essential metals such as Cd, Pb, and Hg are highly toxic contaminants, and their uptake and bioaccumulation in coastal ecosystems may cause serious effects straight on food chain as well as on human beings. Among toxic metals studied, Pb had the highest mean concentration in *E. verrucosa*. Higher mean concentration of Pb (0.2 mg per kg of wet weight) was observed in male samples of the warty crab (Fig. 3B). However, the highest concentrations of Cd and Hg (0.14 and 0.019 mg per kg of wet weight, respectively) were observed in females of *E. verrucosa* (Figs 3A and 3C). The mean Cd values found in the warty crabs were higher in May and June than those in July and August ($p < 0.05$). On the other hand, Pb values were recorded in July and August ($p < 0.05$). The mean Hg values were not different between months ($p > 0.05$) except July and August for male samples of *E. verrucosa*. High metal levels may change within individuals depending on feeding habits of crabs, age, size, and length as well as on their habitats and metabolisms. *E. verrucosa* is carnivore and mainly feed on benthic organisms such as mussels, and this can be one of the reasons for their metal bioaccumulation. In this study, female individuals with eggs were found in May and June. The warty crabs were collected from the cliffs and habitats where the sea meadows were abundant. Individuals collected from rocks can take up metals from food and water, while those from seagrass habitat can also accumulate metals from sediment. As known, sediments are the final destination where heavy metals sink [6]. The increased amounts of toxic metals in sediments are the result of higher levels of these metals in surrounding water, which is easily adsorbed on the surface of the sediment and poses an ecological risk, especially to benthic species. In summer, increase in tourist activities and excess of domestic wastes pollute the coastal areas. Although the central population of Sinop is 65 thousand, it reaches 400 thousand, especially in July and August. Akliman coast is also used extensively as a picnic area. During these periods, this coast is exposed to contamination.

Although heavy metal studies related to *E. verrucosa* were conducted in the early 1990s, very little literature is available. These data were recently reviewed by Bat and Arici [3]. According to these studies, Cd, Pb, and Hg values in *E. verrucosa* were determined as 0.06–5.04, 0.06–0.8, and 0.02–0.022 mg per kg of wet weight, respectively [4, 7, 12, 14]. Data obtained in the current study were compared with the literature data, and Hg values were similar while Cd and Pb values were very low.

Durmus et al. [9] studied the edible tissues of *E. verrucosa* recorded on the Ordu coasts in the Black Sea with regard to toxic heavy metals Cd and Pb. Their values were of 0.17–0.32 and 0.13–0.36 mg per kg of wet weight, respectively. In our study, when the maximum values were compared, the values on Sinop coasts were lower than those on Ordu coasts. It is concluded that this was due to the difference between the regions [9]. This may also be caused by the contaminants carried by the streams of various sizes on the southeastern coast of the Black Sea [1].

In the present study, Cd, Pb, and Hg concentrations in *E. verrucosa* edible tissues were found to be below the permissible limit which was of 0.5 mg per kg of wet weight for these metals studied in Crustaceans [8, 18, 19]. Our research also aimed to assess whether there is an impact on the health of people consuming these warty crabs. In this sense, the current study has been carried out in accordance with the Marine Environment Policy Marine Strategy Framework Directive [13]. Marine Strategy Framework Directive Descriptor 8 “Concentrations of contaminants are at levels not giving rise to pollution effects” and Descriptor 9 “Contaminants in seafood for people consumption do not exceed amounts established by Community legislation or other relevant standards” are aiming the subject of marine contamination. For this purpose, EDI, EWI, PTWI, PTDI, THQ, and HI calculations were performed. The amount of fish consumed in Turkey is much higher compared to amount of other seafood. Crustacean species are mostly consumed in the coastal cities, and Sinop is one of them. Cd, Pb, and Hg are non-essential toxic metals in organisms; the presence of these metals in seafood may cause risk to human health via consumption. Values given in the present study are significantly lower than the recommended values of Turkish Food Codex [18, 19]. Estimated THQs of Cd, Pb, and Hg suggest that these metals in the warty crab do not pose any apparent threat to humans, where the HI value was of < 1 (U. S. Environmental Protection Agency) as shown in Table 3.

Conclusion. The toxic and non-essential metals in warty crab samples have been analyzed. According to the results obtained, Cd, Pb, and Hg are present in *E. verrucosa*, but in low concentrations. The concentrations of Cd, Pb, and Hg in *E. verrucosa* samples from Akliman shores of Sinop of the Black Sea did not exceed the permissible limits set for metals by EU Commission Regulation and Turkish Food Codex. EDI, EWI, PTWI, PTDI, THQ, and HI of these metals were estimated taking into account the mean concentration value of metal in all the warty crab individuals and the average consumption of them per day for adults. Since HI is of < 1 described by U. S. Environmental Protection Agency, *E. verrucosa* is considered safe for consumption. It is suggested that further investigation should be carried out of the parameters in coastal waters as well as sediment analysis which may help find the cause of each metal bioaccumulation in these species. This kind of biomonitoring studies is necessary to assess the risk to human health due to dynamic character of the marine ecosystems and their constant exposure to toxic metals as mentioned in Marine Strategy Framework Directive.

REFERENCES / СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bat L., Öztekin A., Şahin F., Arıcı E., Özsandıkçı U. An overview of the Black Sea pollution in Turkey. *Mediterranean Fisheries and Aquaculture Research*, 2018, vol. 1, no. 2, pp. 67–86.
2. Bat L. Pollution and fishing. In: *Black Sea and Fishing Workshop Book* / M. Sezgin, F. Şahin, U. Özsandıkçı (Eds). Sinop : University of Sinop, 2017, pp. 17–54. (in Turkish).
3. Bat L., Arıcı E. Heavy metal levels in fish, molluscs, and crustacea from Turkish seas and potential risk of human health. In: *Handbook of Food Bioengineering*. Vol. 13. *Food Quality: Balancing Health and Disease* / A. M. Holban, A. M. Grumezescu (Eds). [London] : Elsevier ; Academic Press, 2018, chap. 5, pp. 159–196. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811442-1.00005-5>
4. Bat L., Öztekin H. C. Heavy metals in *Mytilus galloprovincialis*, *Rapana venosa* and *Eriphia verrucosa* from the Black Sea coasts of Turkey as bioindicators of pollution. *Walailak Journal of Science and Technology*, 2016, vol. 13, no. 9, pp. 715–728.
5. Bat L., Şahin F., Öztekin A., Arıcı E., Yardim O. Assessment of Cd, Hg, Pb, Cu, and Zn amounts

- in muscles of *Cyprinus carpio* from Karasu Stream, Sinop. *Current Agriculture Research Journal*, 2019, vol. 7, no. 2, pp. 171–180. <https://dx.doi.org/10.12944/CARJ.7.2.05>
6. Bat L., Özkan E. Y. Heavy metal levels in sediment of the Turkish Black Sea coast. In: *Oceanography and Coastal Informatics: Breakthroughs in Research and Practice*, [S. 1.] : [S. n.], 2019, chap. 4, pp. 86–107. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-7308-1.ch004>
 7. Bat L. *A Study on Trace Element Levels in Some Organisms Collected From Upper-infralittoral of Sinop Peninsula*. MSc thesis. Sinop : Ondokuz Mayıs University, 1992, 108 p. (in Turkish).
 8. *Commission Regulation (EC) No. 1881/2006 setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs*. 19 Dec., 2006. URL: <https://openlaws.com/detail/b61d36b4-4f02-4383-b65f-d0438b9ddd96/en/SINGLE> (accessed 25.10.2019).
 9. Durmus M., Ayas D., Aydin M., Kosker A. R., Ucar Y., Ozogul Y. The effects of sex and seasonality on the metal levels of warty crab (*Eriphia verrucosa*) in the Black Sea. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 2018, vol. 27, iss. 6, pp. 749–758. <https://doi.org/10.1080/10498850.2018.1485196>
 10. Harmanescu M., Alda L. M., Bordean D. M., Gogoasa I., Gergen I. Heavy metals health risk assessment for population via consumption of vegetables grown in old mining area; a case study: Banat County, Romania. *Chemistry Central Journal*, 2011, vol. 5, article no. 64 (10 p.). <https://doi.org/10.1186/1752-153X-5-64>
 11. Khan S., Cao Q., Zheng Y. M., Huang Y. Z., Zhu Y. G. Health risks of heavy metals in contaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing, China. *Environmental Pollution*, 2008, vol. 152, iss. 3, pp. 686–692. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.056>
 12. Mulayim A., Balkis H. Toxic metal (Pb, Cd, Cr, and Hg) levels in *Rapana venosa* (Valenciennes, 1846), *Eriphia verrucosa* (Forsk., 1775), and sediment samples from the Black Sea littoral (Thrace, Turkey). *Marine Pollution Bulletin*, 2015, vol. 95, iss. 1, pp. 215–222. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.04.016>
 13. Directive 2008/56/EC of the European Parliament and of the Council of 17 June, 2008 establishing a framework for community action in the field of marine environmental policy (Marine Strategy Framework Directive). *Official Journal of the European Union*, 2008, L 164, pp. 19–40.
 14. Öztürk M., Bat L. Heavy metal levels in some edible organisms from Sinop coast of the Black Sea. *EÜ Fen Fakültesi Dergisi*, 1994, vol. 16, no. 1, pp. 177–186. (in Turkish).
 15. *Supplementary Guidance for Conducting Health Risk Assessment of Chemical Mixtures* : Risk assessment forum technical panel / U. S. Environmental Protection Agency. Washington, DC : National Center for Environmental Assessment, 2000, [209 p.]. (EPA/630/R00/002).
 16. *Toxicological Profile for Lead : Draft for Public Comment. May, 2019* / U. S. Department of Health and Human Services Public Health Service. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. URL: <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp13.pdf> (accessed 25.10.2019).
 17. *TUIK, Turkish Fishery Statistics*, 2019 : [site]. URL: <http://www.tuik.gov.tr/> (accessed 25.10.2019).
 18. *Turkish Food Codex. Official Gazette of Republic of Turkey*. Notifications about determination of the maximum levels for certain contaminants in foodstuffs of Turkish Food Codex, 2002. (Notification no.: 2002/63), iss. 24885. (in Turkish).
 19. *Turkish Food Codex. Official Gazette of Republic of Turkey*. Notifications changes to the maximum levels for certain contaminants in foodstuffs, 2009. (Notification no.: 2009/22), iss. 27143 (in Turkish).
 20. *U. S. Environmental Protection Agency, Integrated Risk Information System*. 2018 : [site]. URL: <https://www.epa.gov/risk/regional-screening-levels-rsls-generic-tables> (accessed 25.10.2019).
 21. *U. S. Environmental Protection Agency IRIS, Lead*. Integrated Risk Information System. Washington, DC, 2005 : [site]. URL: <http://www.epa.gov/iris/> (accessed 25.10.2019).

ТОКСИЧНЫЕ МЕТАЛЛЫ В КАМЕННЫХ КРАБАХ ЮЖНОЙ ЧАСТИ ЧЁРНОГО МОРЯ: ОЦЕНКА РИСКА ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ ЧЕЛОВЕКА

Л. Бат, Е. Аричи, А. Оздекин, Ф. Шахин

Синопский университет, Синоп, Турция

E-mail: leventbat@gmail.com

Проведена оценка загрязнения тяжёлыми металлами — Cd, Pb и Hg — каменных крабов *Eriphia verrucosa* (Forskål, 1775), обитающих на Акклиманском побережье Синопского полуострова Чёрного моря, и потенциальных рисков для здоровья человека. Анализ содержания тяжёлых металлов выполнен методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Среди изученных токсичных металлов свинец имел самую высокую среднюю концентрацию в тканях *E. verrucosa*. При этом максимальные концентрации Pb отмечены в тканях самцов краба ($0,2 \text{ мг}\cdot\text{кг}^{-1}$ сырой массы), тогда как у самок зарегистрированы более высокие, чем у самцов, концентрации Cd и Hg ($0,11$ и $0,019 \text{ мг}\cdot\text{кг}^{-1}$ сырой массы соответственно). Средние значения содержания Cd в каменных крабах были выше в мае и июне, чем в июле и августе. Pb отмечен только в июле и августе. Средние значения содержания Hg в образцах самцов *E. verrucosa* были примерно одинаковыми в разные месяцы, за исключением июля и августа. Сезоны активного питания самцов и самок каменных крабов отличаются, что может приводить к различиям в размере пищевых объектов и в итоге — в уровнях накопления металлов. В целом концентрация токсичных тяжёлых металлов в съедобных тканях каменных крабов из южной части Чёрного моря находилась в допустимых пределах, установленных национальным и международным стандартами для пищевых продуктов. Для оценки рисков неканцерогенной природы для здоровья человека определены целевой коэффициент опасности (target hazard quotient) для каждого металла и индекс опасности (hazard index). По рассчитанным целевым коэффициентам опасности Cd, Pb и Hg можно заключить, что эти металлы в каменном крабе не представляют явной угрозы для людей, если, по результатам измерений, значение индекса опасности ниже 1. Результаты анализа показали, что *E. verrucosa* могут быть использованы в качестве биоиндикатора, так как рассмотренные металлы содержатся в этих каменных крабах в разных количествах. Поскольку пищевой путь поступления тяжёлых металлов является для человека основным, необходимо проводить дальнейшие мониторинговые исследования, чтобы защитить здоровье населения.

Ключевые слова: тяжёлый металл, Чёрное море, *Eriphia verrucosa*, индекс опасности, целевой коэффициент опасности

УДК 582.261.1:551.464.6

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФИКСАЦИИ УГЛЕРОДА В БИОМАССЕ
CYLINDROTHECA CLOSTERIUM (EHRENBERG) REIMANN & J. C. LEWIN
(BACILLARIOPHYCEAE)
В УСЛОВИЯХ НАКОПИТЕЛЬНОГО КУЛЬТИВИРОВАНИЯ**

© 2020 г. **Р. Г. Геворгиз, С. Н. Железнова**

Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»,
Севастополь, Российская Федерация
E-mail: r.gevorgiz@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.10.2019; после доработки 28.01.2020;
принята к публикации 27.03.2020; опубликована онлайн 31.03.2020.

Эффективность утилизации углерода является важной характеристикой объекта культивирования. Известно, что диатомовая водоросль *Cylindrotheca closterium* (Ehrenberg) Reimann & J. C. Lewin может эффективно использовать углерод из водной среды, так как имеет множество уникальных карбоаноангидраз и углеродных транспортёров. Между тем эффективность фиксации углерода для многих видов диатомей в культуре по-прежнему неизвестна. Для её расчёта ряд авторов используют разную терминологию и способы, что приводит к значительным трудностям при сравнении эффективности фиксации углерода в биомассе различных видов микроводорослей. Цели работы: 1) на основе современных представлений о фиксации углерода в биомассе микроводорослей, а также о поглощении неорганического углерода культурой микроводорослей актуализировать используемые в литературе термины и определения; 2) оценить эффективность фиксации углерода в биомассе диатомеи *C. closterium* в условиях накопительного культивирования. Культуру *C. closterium* выращивали при температуре +20 °С в интенсивном режиме на питательной среде RS. В процессе выращивания культуру барботировали воздухом (1,1 л воздуха на 1 л культуры в минуту). Температура воздуха на выходе из суспензии составляла +19 °С, максимальная продуктивность культуры — 1,254 г·л⁻¹·сут⁻¹. По результатам СНН-анализа, доля углерода в сухой биомассе *C. closterium* составляла 23 %. В условиях накопительного культивирования у *C. closterium* эффективность фиксации углерода в биомассе достигла 90 %. По сравнению с другими видами водорослей *C. closterium* характеризуется достаточно высокой эффективностью фиксации CO₂. Так, у зелёных микроводорослей *Chlorella protothecoides* и *Ch. vulgaris* эффективность фиксации CO₂ составляет 20 % и 55,3 % соответственно, у цианобактерии *Spirulina* sp. — 38 %, у красной микроводоросли *Porphyridium purpureum* — 69 %. Отмечено, что для обеспечения прироста 1 г сухой биомассы *C. closterium* в сутки при температуре +19 °С необходимо затратить минимум 0,46 л CO₂, или 1132 л воздуха. Возможно, именно высокая эффективность фиксации углерода, а также низкая доля углерода в биомассе *C. closterium* позволяют объяснить высокие продукционные показатели этого вида. В равных условиях культивирования по свету и обеспеченности углеродом продуктивность *C. closterium* может превышать продуктивность других видов микроводорослей в 5–10 раз. Так, у *Spirulina* sp. продуктивность достигает 0,2 г·л⁻¹·сут⁻¹, у *C. closterium* — 1,254 г·л⁻¹·сут⁻¹.

Ключевые слова: диатомовая водоросль *Cylindrotheca closterium*, культивирование, эффективность фиксации углерода

Морские микроводоросли широко используются в современной биотехнологии в качестве продуцентов ценных биологически активных соединений [11, 14, 20]. Многие виды морских микроводорослей способны синтезировать уникальные пигменты, жирные кислоты, углеводы и другие

соединения [9, 14, 15]. Среди продуцентов ценных веществ в промышленных масштабах особый интерес представляют бентосные диатомовые водоросли, поскольку они характеризуются высокой эффективностью утилизации световой энергии. Кроме того, за счёт повышенного содержания кремния при отсутствии перемешивания они достаточно быстро оседают на дно фотобиореактора, что в значительной мере удешевляет и облегчает сбор урожая [2].

Морская диатомовая водоросль *Cylindrotheca closterium* (Ehrenberg) Reimann & J. C. Lewin, 1964 является одним из наиболее перспективных объектов культивирования для получения ценных полиненасыщенных жирных кислот и фукоксантина в промышленных масштабах. Это обусловлено тем, что *C. closterium* обладает достаточно высокими продукционными показателями [2, 4] и способна накапливать фукоксантин до 2,3–2,6 % сухой массы [18, 21]. Также она характеризуется высоким (до 10 % сухой массы) содержанием полиненасыщенных жирных кислот в биомассе [17, 19].

Углерод, наряду с азотом, является основным компонентом в жизнедеятельности микроводорослей. Обеспеченность углеродом определяет химический состав клеток и скорость биосинтеза продуктов жизнедеятельности, поэтому эффективность его утилизации — важная характеристика объекта культивирования [13]. Диатомовые по сравнению с другими микроводорослями способны достаточно эффективно использовать углерод из водной среды, поскольку имеют множество углеродных транспортёров [12], однако эффективность его фиксации для многих видов диатомей в культуре по-прежнему неизвестна.

Для расчёта эффективности фиксации углерода ряд авторов используют различную терминологию и применяют разные способы [6, 7, 8], что приводит к значительным трудностям при сравнении эффективности фиксации углерода в биомассе различных видов микроводорослей. Цели данной работы: 1) на основе современных представлений о фиксации углерода в биомассе микроводорослей, а также о поглощении неорганического углерода культурой микроводорослей актуализировать используемые в литературе термины и определения; 2) оценить эффективность фиксации углерода в биомассе диатомовой водоросли *C. closterium* в условиях накопительного культивирования.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В работе использовали культуру диатомовой водоросли *Cylindrotheca closterium* из коллекции культур ФИЦ ИнБЮМ. Культуру *C. closterium* выращивали на питательной среде RS [16], увеличив концентрацию каждого компонента в 3 раза [5], при постоянной температуре суспензии (20 ± 1) °С, в режиме накопительного культивирования в фотобиореакторах плоскопараллельного типа с рабочим объёмом 2 л, слоем 5 см, при круглосуточном освещении люминесцентными лампами SE-PII-1-LF 46W/54-765. Средняя облучённость рабочей поверхности фотобиореактора составляла $150 \text{ мкмоль квантов} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ($33 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$). В процессе выращивания культуру барботировали воздухом (1,1 л воздуха на 1 л культуры в минуту) посредством компрессорной установки; температура потока воздуха на выходе из суспензии составляла ($19 \pm 0,5$) °С. Для увеличения растворимости атмосферного CO_2 в культуральной среде использовали насадку-диспергатор. Плотность культуры в начале накопительного культивирования составляла 0,1–0,2 г сухого вещества на 1 л.

Плотность культуры определяли двумя методами: 1) методом йодатной окисляемости [1]; 2) прямым взвешиванием сырой массы *C. closterium* в полипропиленовых пробирках на аналитических весах с погрешностью 0,1 мг после осаждения клеток центрифугированием (1600g в течение 2 минут). Для пересчёта полученных данных на сухую массу использовали коэффициент связи между сухой и сырой массой ($k = 0,1$; $n = 20$). Для определения доли углерода в биомассе суспензию клеток *C. closterium* отбирали на 6-й день эксперимента, центрифугировали 1–2 минуты при 1600g и дважды промывали изотоническим раствором NaCl ($9 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$). Затем сырую биомассу высушивали при $+105$ °С в течение 24 ч до постоянного веса. СНN-анализ образцов сухой биомассы выполняли на анализаторе Flash EA 1112 (Thermo Finnigan, Италия) в ЦКП Российского технологического университета (г. Москва). В качестве стандарта использовали ацетанилид.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Максимальную плотность культуры *C. closterium* ($B_{\max} = 3 \text{ г}\cdot\text{л}^{-1}$) наблюдали на 6-й день эксперимента (рис. 1), а максимальный прирост ($P_{\max} = 1,254 \text{ г}\cdot\text{л}^{-1}\cdot\text{сут}^{-1}$) — на 5-й. По результатам CHN-анализа, доля углерода в сухой биомассе *C. closterium* составляла 23 %.

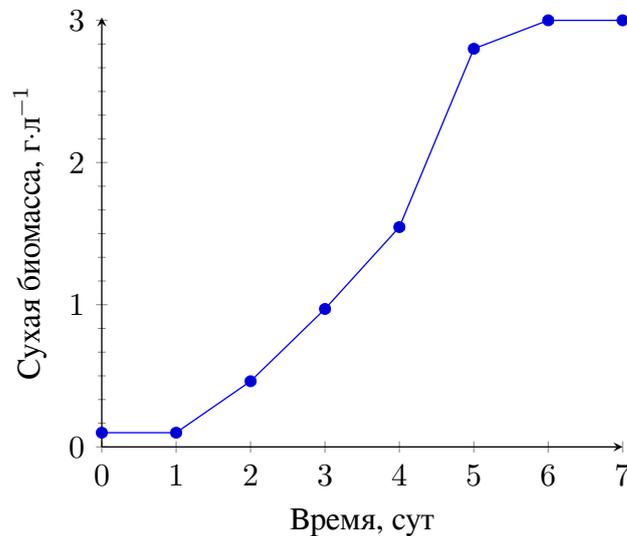


Рис. 1. Динамика плотности накопительной культуры диатомовой водоросли *Cylandrotheca closterium* на питательной среде RS [16]

Fig. 1. Dynamics of density of *Cylandrotheca closterium* batch culture on a nutrient medium RS [16]

Исследованию углеродного питания культур микроводорослей посвящено множество публикаций, при этом авторы оперируют различными терминами, например «связывание углерода», «утилизация углерода», «использование», «ассимиляция», «адсорбция» и пр. [6, 7, 8, 12, 13]. В некоторых случаях это приводит к нечёткости в понимании изучаемых процессов, поэтому для исключения неоднозначности приведём определения терминов, применяемых в данной работе.

Поток неорганического углерода — количество переносимого неорганического углерода за единицу времени. Единицы измерения — моль·с⁻¹, кг·с⁻¹, л·мин.⁻¹.

Плотность потока неорганического углерода — количество углерода, подаваемого в суспензию микроводорослей (на единицу объёма или единицу площади поверхности раздела фаз) за единицу времени. Измеряется в моль·л⁻¹·сут⁻¹, моль·м⁻²·сут⁻¹, г·л⁻¹·сут⁻¹, г·м⁻²·сут⁻¹.

В альгологической практике для обеспечения водорослей углеродом обычно используют смесь воздуха и CO₂, поэтому *плотность потока углерода* выражается в объёме газовой смеси, подаваемой в культуру микроводорослей, на единицу объёма суспензии за одну минуту, и обозначается как коэффициент вентиляции культуры, л·л⁻¹·мин.⁻¹. С учётом молярного объёма газа при заданной температуре поток углерода легко выражается в массовых единицах. Например, при подаче 2%-ной газовой смеси (то есть с учётом доли углерода в воздухе 2,04 % об.) со скоростью 1 л на 1 л суспензии в минуту при температуре +20 °С плотность потока углерода равна 10,2 мг на л суспензии в минуту.

Ассимиляция (связывание, утилизация) неорганического углерода культурой микроводорослей — это совокупность биологических процессов в суспензии микроводорослей, в результате которых неорганический углерод преобразуется в органические вещества. При этом связанный углерод входит в состав органических веществ как самой биомассы, так и экзопродуктов микроводорослей (экзополисахариды, белки и пр.).

Фиксация неорганического углерода культурой микроводорослей — это совокупность процессов ассимиляции углерода и углерод-концентрирующего механизма в клетках микроводорослей. Это означает, что в биомассе, кроме связанного органического углерода, присутствует и некоторое количество неорганического. Если рассматривается фиксация углерода только в биомассе (без учёта экзометаболитов), то скорость фиксации углерода (F_C^b) определяется выражением:

$$F_C^b = c \times P, \quad (1)$$

где c — доля углерода в биомассе;

P — скорость прироста биомассы (продуктивность), $\text{г} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$.

Поглощение неорганического углерода культурой микроводорослей — это совокупность процессов фиксации и физико-химической абсорбции неорганического углерода (растворимость CO_2 в культуральной среде, образование HCO_3^- и CO_3^{2-}).

Эффективность поглощения углерода культурой микроводорослей — это отношение массы поглощаемого культурой микроводорослей неорганического углерода к массе углерода, подаваемого в суспензию микроводорослей:

$$E_C = (F_0 - F)/F_0 \times 100\%, \quad (2)$$

где F_0 и F — плотность потока углерода на входе в суспензию клеток и на выходе соответственно.

Эффективность фиксации углерода в биомассе микроводорослей — это отношение массы углерода, фиксируемого в биомассе, к массе углерода, подаваемого в суспензию микроводорослей:

$$E_C^b = F_C^b/F_0 \times 100\%, \quad (3)$$

где F_C^b — скорость фиксации углерода в биомассе микроводорослей;

F_0 — плотность потока углерода на входе в суспензию клеток.

В случае, когда для обеспечения культуры неорганическим углеродом используется CO_2 , с учётом (1) скорость фиксации углерода в биомассе ($F_{CO_2}^b$) может быть рассчитана следующим образом:

$$F_{CO_2}^b = M(\text{CO}_2)/M(\text{C}) \times F_C^b = 44/12 \times c \times P, \quad (4)$$

где $M(\text{CO}_2)$ и $M(\text{C})$ — молярная масса углекислоты и углерода соответственно, $\text{г} \cdot \text{моль}^{-1}$.

Из формул (1) и (4) следует предельное соотношение, указывающее на минимальную плотность потока CO_2 ($\text{г} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$), которая необходима для обеспечения заданной скорости роста микроводорослей:

$$F_C^b = M(\text{C})/M(\text{CO}_2) \times F_{CO_2}^b = c \times P,$$

то есть

$$P = 0,273/c \times F_{CO_2}^b. \quad (5)$$

Для случаев, когда в суспензию подаётся газоздушная смесь с заданным процентом CO_2 , выражение (5) преобразуется в следующее:

$$P = \frac{0,273}{c} \frac{M(\text{CO}_2)}{V_{CO_2}(T)} \frac{\nu}{100} 1440 F_{ГВ}^{\min}, \quad (5a)$$

где $V_{CO_2}(T)$ — молярный объём газа при заданной температуре, $\text{л} \cdot \text{моль}^{-1}$;

ν — доля CO_2 в газоздушной смеси, % об.;

$F_{ГВ}^{\min}$ — минимальная плотность потока газоздушной смеси, необходимая для обеспечения заданной скорости роста микроводорослей, $\text{л} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{мин}^{-1}$.

При температуре, отличной от +273 °К, объём газа равен:

$$V_{CO_2}(T) = \frac{V_0}{T_0}T = 0,082T, \quad (6)$$

где V_0 — молярный объём газа в нормальных условиях ($V_0 = 22,4$ л·моль⁻¹ при $T_0 = +273$ °К).

С использованием выражений (3), (5a) и (6) можно рассчитать эффективность фиксации углерода в биомассе любых видов культивируемых водорослей по формуле:

$$E_C^6 = \frac{c \times P}{0,273 \frac{M(CO_2)}{0,082T} \frac{\nu}{100} 1440 F_{ГВ}} 100\%, \quad (7)$$

где $F_{ГВ}$ — плотность потока газовой смеси на входе в суспензию клеток, л·л⁻¹·мин.⁻¹.

Применительно к нашему эксперименту с культивированием *C. closterium* в условиях накопительной культуры скорость фиксации углерода с 4-го по 5-й день эксперимента имела следующее значение: $F_C^6 = 0,23 \times 1,254 = 0,29$ г·л⁻¹·сут⁻¹.

Эффективность фиксации углерода в биомассе составила:

$$E_C^6 = \frac{0,23 \times 1,254}{0,273 \frac{44}{0,082 \times (273+19)} \frac{0,0405}{100} 1440 \times 1,1} 100\% \approx 90\%.$$

Для сравнения: у зелёных микроводорослей *Chlorella protothecoides* и *Ch. vulgaris* эффективность фиксации CO₂ в биомассе составляет 20 % и 55,3 % соответственно, у цианобактерий *Spirulina* sp. — 38 % [7, 10], у красной микроводоросли *Porphyridium purpureum* — 69 % [6], то есть по сравнению с другими видами водорослей *C. closterium* характеризуется достаточно высокой эффективностью фиксации CO₂.

Важно отметить, что в расчётах эффективности фиксации углерода культурой микроводорослей многие авторы не учитывают увеличение объёма газа при повышении температуры в соответствии с формулой (6). Обычно используют значения для нормальных условий, хотя условия эксперимента с культурой микроводорослей таковыми не являются; это приводит к ошибочным результатам. Например, если эксперименты с культурой *C. closterium* проведены при +30 °С, а расчёт эффективности фиксации углерода сделан для нормальных условий (0 °С), то полученные значения будут существенно занижены. Это легко проверить, подставив значения температуры в формулу (7). Для нормальной температуры (0 °С) эффективность фиксации углерода E_C^6 составляет 84 %, а для +30 °С — 93 %.

В практике интенсивного культивирования микроводорослей часто возникает необходимость подсчёта затрат CO₂ для получения единицы биомассы. Полагая, что весь углерод, поступающий в суспензию микроводорослей, преобразуется в органическую массу, можно оценить затраты CO₂, используя предельное соотношение (5a). При этом необходимо учесть, что концентрация углекислоты в атмосфере достигла, по данным Всемирной метеорологической организации, в 2018 г. 0,0405 % об. [3].

Таким образом, подставляя данные нашего эксперимента в (5a), мы получаем, что для обеспечения прироста 1 г сухой биомассы *C. closterium* в сутки при температуре +19 °С необходимо затратить минимум 0,46 л CO₂, или 1132 л воздуха.

Заключение. В равных условиях культивирования по свету и обеспеченности углеродом продуктивность *C. closterium* может превышать продуктивность других видов микроводорослей в 5–10 раз. В то время как у *Spirulina* sp. продуктивность достигает 0,2 г·л⁻¹·сут⁻¹, у *C. closterium* она составляет 1,254 г·л⁻¹·сут⁻¹. Возможно, именно высокая эффективность фиксации углерода, а также низкая доля углерода в биомассе *C. closterium* позволяют объяснить высокие продукционные показатели этого вида.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Исследование механизмов управления продукционными процессами в биотехнологических комплексах с целью разработки научных основ получения биологически активных веществ и технических продуктов морского генезиса» (№ гос. регистрации АААА-А18-118021350003-6) при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-34-00672.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Геворгиз Р. Г., Железнова С. Н., Никонова Л. Л., Бобко Н. И., Нехорошев М. В. Оценка плотности культуры фототрофных микроорганизмов методом йодатной окисляемости. Севастополь, 2015. 31 с. (Препринт / Ин-т морских биологических исследований РАН). [Gevorgiz R. G., Zheleznova S. N., Nikonova L. L., Bobko N. I., Nekhoroshev M. V. *Otsenka plotnosti kul'tury fototrofnykh mikroorganizmov metodom iodatnoi okislyaemosti*. Sevastopol, 2015, 31 p. (Priprint / Kovalevsky Institute of Marine Biological Research of RAS). (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.org/handle/299011/43>
2. Геворгиз Р. Г., Железнова С. Н., Зозуля Ю. В., Уваров И. П., Репков А. П., Лелеков А. С. Промышленная технология производства биомассы морской диатомеи *Cylindrotheca closterium* (Ehrenberg) Reimann & Lewin с использованием газовихревого фотобиореактора // *Актуальные вопросы биологической физики и химии*. 2016. № 1–1. С. 73–77. [Gevorgiz R. G., Zheleznova S. N., Zozulya Yu. V., Uvarov I. P., Repkov A. P., Lelekov A. S. Industrial production technology biomass marine diatoms *Cylindrotheca closterium* (Ehrenberg) Reimann & Lewin using gas vortex photobioreactor. *Aktual'nyye voprosy biologicheskoy fiziki i khimii*, 2016, no. 1–1, pp. 73–77. (in Russ.)]
3. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2018 году». Москва : Минприроды России ; НПП «Кадастр», 2019. 844 с. [*Gosudarstvennyi doklad "O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchei sredy Rossiiskoi Federatsii v 2018 godu"*. Moscow : Minprirody Rossii ; NPP "Kadastr", 2019, 844 p. (in Russ.)]
4. Железнова С. Н. Продукционные характеристики морской диатомовой водоросли *Cylindrotheca closterium* (Ehrenb.) Reimann et Lewin в интенсивной культуре при различных источниках азота в питательной среде // *Морской биологический журнал*. 2019. Т. 4, № 1. С. 33–44. [Zheleznova S. N. Production characteristics of the diatom *Cylindrotheca closterium* (Ehrenb.) Reimann et Lewin grown in an intensive culture at various nitrogen sources in the medium. *Morskoy biologicheskij zhurnal*, 2019, vol. 4, iss. 1, pp. 33–44. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.21072/mbj.2019.04.1.04>
5. Железнова С. Н., Геворгиз Р. Г., Бобко Н. И., Лелеков А. С. Питательная среда для интенсивной культуры диатомовой водоросли *Cylindrotheca closterium* (Ehrenb.) Reimann et Lewin – перспективного объекта биотехнологий // *Актуальная биотехнология*. 2015. № 3 (14). С. 46–48. [Zheleznova S. N., Gevorgiz R. G., Bobko N. I., Lelekov A. S. The culture medium for the intensive culture of diatomic alga *Cylindrotheca closterium* (Ehrenb.) Reimann et Lewin – promising biotech facility. *Aktual'naya biotekhnologiya*, 2015, no. 3 (14), pp. 46–48. (in Russ.)]
6. Лелеков А. С., Гудвилевич И. Н., Геворгиз Р. Г., Тренкеншу Р. П., Бадисова А. О. Оценка коэффициента абсорбции углерода культурой *Porphyridium purpureum* (Bory) Ross // *Морские биологические исследования: достижения и перспективы* : в 3-х т. : сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, приуроч. к 145-летию Севастопольской биологической станции, Севастополь, 19–24 сентября 2016 г. Севастополь, 2016. Т. 3. С. 404–407. [Lelekov A. S., Gudvilovich I. N., Gevorgiz R. G., Trenkenshu R. P., Badisova A. O. Evaluation of carbon absorption coefficient by *Porphyridium purpureum* (Bory) Ross. In: *Morskie biologicheskie issledovaniya: dostizheniya i perspektivy* : v 3-kh t. : sb. materialov Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem, priuroch. k 145-letiyu Sevastopol'skoi biologicheskoi stantsii, Sevastopol, 19–24 Sept., 2016. Sevastopol, 2016, vol. 3, pp. 404–407. (in Russ.)]
7. Klinthong W., Yang Y.-H., Huang C.-H., Tan C.-S. A review: Microalgae and their applications in CO₂ capture and renewable energy. *Aerosol and Air Quality Research*, 2015, vol. 15, iss. 2, pp. 712–742. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2014.11.0299>
8. Kroth P. G., Chiovitti A., Gruber A., Martin-jezequel V., Mock T., Parker M. S., Stanley M. S.,

- Kaplan A., Caron L., Weber T., Maheswari U., Armbrust E. V., Bowler C. A. Model for carbohydrate metabolism in the diatom *Phaeodactylum tricorutum* deduced from comparative whole genome analysis. *PLoS One*, 2008, vol. 3, iss. 1, article e1426. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0001426>
9. Lauritano C., Ferrante M. I., Rogato A. Marine natural products from microalgae: An -omics overview. *Marine Drugs*, 2019, vol. 17, iss. 5, pp. 269 (18 p.). <https://doi.org/10.3390/md17050269>
 10. Liu S., Elvira P., Wang Y., Wang W. Growth and nutrient utilization of green algae in batch and semi-continuous autotrophic cultivation under high CO₂ concentration. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2019, vol. 188, iss. 3, pp. 836–853. <https://doi.org/10.1007/s12010-018-02940-9>
 11. Martínez Andrade K. A., Lauritano C., Romano G., Ianora A. Marine microalgae with anti-cancer properties. *Marine Drugs*, 2018, vol. 16, iss. 5, pp. 165 (17 p.). <https://doi.org/10.3390/md16050165>
 12. Matsuda Y., Hopkinson B. M., Nakajima K., Dupont C. L., Tsuji Y. Mechanisms of carbon dioxide acquisition and CO₂ sensing in marine diatoms: A gateway to carbon metabolism. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 2017, vol. 372, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0403>
 13. Obata T., Fernie A. R., Nunes-Nesi A. The central carbon and energy metabolism of marine diatoms. *Metabolites*, 2013, vol. 3, iss. 2, pp. 325–346. <https://doi.org/10.3390/metabo3020325>
 14. Priyadarshani I., Rath B. Bioactive compounds from microalgae and cyanobacteria: Utility and applications. *International Journal of Pharma Sciences and Research*, 2012, vol. 3, iss. 11, pp. 4123–4130. [https://doi.org/10.13040/IJPSR.0975-8232.3\(11\).4123-30](https://doi.org/10.13040/IJPSR.0975-8232.3(11).4123-30)
 15. Quigg A., Finkel Z. V., Irwin A. J., Rosenthal Y., Ho T.-Y., Reinfelder J. R., Schofield O., Morel F. M., Falkowski P. G. The evolutionary inheritance of elemental stoichiometry in marine phytoplankton. *Nature*, 2003, vol. 425, pp. 291–294. <https://doi.org/10.1038/nature01953>
 16. Ryabushko V. I., Zheleznova S. N., Gevorgiz R. G., Bobko N. I., Lelekov A. S. The medium for intensive culture of the diatom *Cylindrotheca closterium* (Ehrenb.) Reimann et Lewin (Bacillariophyta). *International Journal on Algae*, 2016, vol. 18, iss. 3, pp. 279–286. <https://doi.org/10.1615/InterJAlgae.v18.i3.70>
 17. Suman K., Kiran T., Devi U. K., Sarma N. S. Culture medium optimization and lipid of *Cylindrotheca*, a lipid- and polyunsaturated fatty acid-rich pennate diatom and potential source of eicosapentaenoic acid. *Botanica Marina*, 2012, vol. 55, iss. 3, pp. 289–299. <https://doi.org/10.1515/bot-2011-0076>
 18. Wang S., Verma S. K., Said I. H., Thomsen L., Ullrich M. S., Kuhnert N. Changes in the fucoxanthin production and protein profiles in *Cylindrotheca closterium* in response to blue light-emitting diode light. *Microbial Cell Factories*, 2018, vol. 17, article no. 110 (13 p.). <https://doi.org/10.1186/s12934-018-0957-0>
 19. Ying L., Kang-sen M., Shi-chun S. Effects of harvest stage on the total lipid and fatty acid composition of four *Cylindrotheca* strains. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2002, vol. 20, iss. 2, pp. 157–161. <https://doi.org/10.1007/BF02849653>
 20. Zhang H., Tang Y., Zhang Y., Zhang S., Qu J., Wang X., Kong R., Han C., Liu Z. Fucoxanthin: A promising medicinal and nutritional ingredient. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2015, Article ID 723515 (10 p.) <http://dx.doi.org/10.1155/2015/723515>
 21. Zheleznova S. N., Gevorgiz R. G., Nekhoroshev M. V. Conditions optimization of the *Cylindrotheca closterium* (Ehrenberg) Reimann et Lewin cultivation in order to obtain a high yield of fucoxanthin. In: *3rd Russian Conference on Medicinal Chemistry*, Kazan, 28 Sept. – 03 Oct., 2017 : Abstr. book. Kazan : Kazan Federal University, 2017, pp. 261.

**THE CARBON FIXATION EFFICIENCY IN BIOMASS
OF *CYLINDROTHECA CLOSTERIUM* (EHRENBERG) REIMANN & J. C. LEWIN
(BACILLARIOPHYCEAE)
UNDER THE CONDITIONS OF CUMULATIVE CULTIVATION**

R. G. Gevorgiz and S. N. Zheleznova

A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation
E-mail: r.gevorgiz@yandex.ru

The carbon utilization efficiency is an important characteristic of the cultivated object. Diatom *Cylindrotheca closterium* (Ehrenberg) Reimann & J. C. Lewin is known to use carbon from aquatic environment quite effectively, as it has many unique carbonic anhydrases and carbon transporters. However, the carbon fixation efficiency for many types of diatoms in culture is still unknown. When calculating the carbon fixation efficiency, researchers use different terminology and methods, and it leads to significant difficulties when comparing the carbon fixation efficiency in the biomass of various types of microalgae. The aims of this study are: 1) to update terms and definitions used in literature on the basis of modern concepts of carbon fixation in microalgae biomass, as well as absorption of inorganic carbon by microalgae culture; 2) to evaluate the carbon fixation efficiency in the biomass of *C. closterium* diatom under conditions of cumulative cultivation. *C. closterium* was grown at a temperature of +20 °C on a nutrient medium RS. During the cultivation, the culture was bubbled with air (1.1 L of air per 1 L of culture per minute). The air temperature at the outlet of the suspension was of +19 °C; the maximum productivity of the culture was of 1.254 g·L⁻¹·day⁻¹. According to the results of the CHN analysis, the proportion of carbon in *C. closterium* dry biomass was of 23 %. Under the conditions of cumulative cultivation in *C. closterium*, the carbon fixation efficiency in biomass was of 90 %. Compared with other algae species, *C. closterium* is characterized by a rather high CO₂ fixation efficiency. For example, in green microalga *Chlorella protothecoides* and *Ch. vulgaris*, the CO₂ fixation efficiency was of 20 % and 55.3 %, respectively; in cyanobacteria *Spirulina* sp. – of 38 %; in red microalgae *Porphyridium purpureum* – of 69 %. It was observed that to ensure an increase of 1 g of *C. closterium* dry biomass per day at a temperature of +19 °C, a minimum of 0.46 L of CO₂, or 1132 L of air, should be consumed. Possibly, it is high carbon fixation efficiency, as well as low carbon fraction in *C. closterium* biomass, that explains the high production indices of this species. Under equal conditions of cultivation in terms of light and carbon availability, the productivity of *C. closterium* can exceed the productivity of other types of microalgae by 5–10 times. So, while *Spirulina* sp. productivity reaches 0.2 g·L⁻¹·day⁻¹, *C. closterium* productivity is of 1.254 g·L⁻¹·day⁻¹.

Keywords: diatom *Cylindrotheca closterium*, cultivation, carbon fixation efficiency

УДК 582.261.1:581.16:551.465.62

ОПТИМУМЫ СОЛЁНОСТИ ДЛЯ ВЕГЕТАТИВНОГО РАЗМНОЖЕНИЯ И ПОЛОВОГО ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ДИАТОМОВОЙ ВОДОРΟΣЛИ *TOXARIUM UNDULATUM*

© 2020 г. Н. А. Давидович, О. И. Давидович

Карадагская научная станция имени Т. И. Вяземского — природный заповедник РАН —
филиал ФИЦ ИнБИОМ, Феодосия, Российская Федерация
E-mail: nickolaid@yandex.ru

Поступила в редакцию 03.09.2019; после доработки 03.09.2019;
принята к публикации 27.03.2020; опубликована онлайн 31.03.2020.

Распространение диатомовых водорослей ограничивается пределами их толерантности по отношению к факторам среды. Род *Toxarium* представлен всего двумя видами, хотя его эволюция продолжается более 100 млн лет. *Toxarium undulatum* широко распространён в тропических и субтропических морях; он встречается и в Чёрном море, солёность которого вдвое ниже океанической. Представляет интерес изучение эколого-физиологических характеристик этого вида с точки зрения его отношения к солёности. Клоновые культуры *T. undulatum* выделены из проб, собранных в озере Донузлав, сообщающемся с Чёрным морем (юго-запад Крымского полуострова), и в прибрежье острова Гран-Канария (архипелаг Канарских островов). Эксперименты по изучению пределов толерантности по отношению к солёности показали, что черноморские клоны жизнеспособны в диапазоне, охватывающем как минимум 30 ‰ (от 12 до 42 ‰). Такой же широкий диапазон солёностной толерантности, слегка сдвинутый в сторону больших значений, наблюдали у океанических клонов этого вида. Установлены оптимумы для вегетативного роста и полового воспроизведения. У черноморских клонов они оказались равными 27,8 и 27,2 ‰ соответственно, что заметно выше солёности, которая наблюдается в месте обитания популяции. Аналогичное превышение положения оптимумов в отношении вегетативного размножения и полового воспроизведения по сравнению с теми уровнями солёности, в которых находятся природные популяции, было отмечено для ряда других черноморских диатомовых, что свидетельствует об их океаническом (средиземноморском) прошлом. Сделан вывод о том, что *T. undulatum*, наряду с другими видами, начал заселять черноморский бассейн ориентировочно семь тысяч лет назад, после того как в распреснённое Новоевксинское море-озеро через образовавшийся пролив Босфор стала поступать вода из Средиземного моря. Между тем темпы эволюции не позволили привести физиологические и экологические характеристики изучаемого вида в полное соответствие с условиями окружающей среды. В его физиологических реакциях по отношению к солёности прослеживается океаническое происхождение. Обсуждается возможность видообразования в связи с заселением Чёрного моря океаническими видами.

Ключевые слова: диатомовые, *Toxarium undulatum*, эволюция, солёность, пределы толерантности

В Чёрном море обитает одна из самых крупных диатомей, *Toxarium undulatum* Bailey, 1854. Этот вид обычен для тропических и субтропических морей [22], отличающихся от Чёрного моря более высокой солёностью. Ранее нами было показано, что целый ряд видов диатомовых, встречающихся в Чёрном море, имеет большие оптимумы солёности для вегетативного роста и полового воспроизведения, чем в местах обитания их популяций [2, 3]. Самое рациональное объяснение этому мы видели в возможности заселения изученными видами — оригинально океаническими

и эволюционно адаптированными к солёности 35–36 ‰ — черноморского бассейна 7–8 тысяч лет назад, после образования Босфорского пролива, когда сильно опреснённое Новозёксинское море-озеро стало осолоняться водами, поступающими из Средиземного моря [5, 7]. Изучение физиологических реакций *T. undulatum* дало нам новые, изложенные в настоящей работе данные об этом виде-космополите, распространённом во всех прибрежных морях субтропического пояса, и его отношении к пониженной (черноморской) солёности.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Пробы перифитона собраны с глубины около 40 см у восточного берега оз. Донузлав (юго-запад Крымского полуострова, точка с координатами 45°22'23" с. ш., 33°05'40" в. д.) и на острове Гран-Канария (архипелаг Канарских островов, 27°59'27" с. ш., 15°22'06" з. д.). Из проб, доставленных в лабораторию, с использованием стеклянных микропипеток и инвертированных микроскопов Zeiss Primovert (Carl Zeiss AG, Германия) и Nib-100 (Китай) выделены одиночные клетки, давшие начало клоновым культурам (рис. 1). Культуры содержали в стеклянных колбах Эрленмейера объёмом 100 мл в модифицированной среде ESAW [9], периодически (раз в 7–14 дней) осуществляя пересевы в свежую среду. Условия содержания и порядок наименования клонов описаны в [1]. Черноморские клоны содержали при 20 ‰, канарские — при 30 ‰. В месте отбора проб солёность составляла 20 и 36 ‰ соответственно. Солёность измеряли рефрактометром RHS-10ATC (Китай).

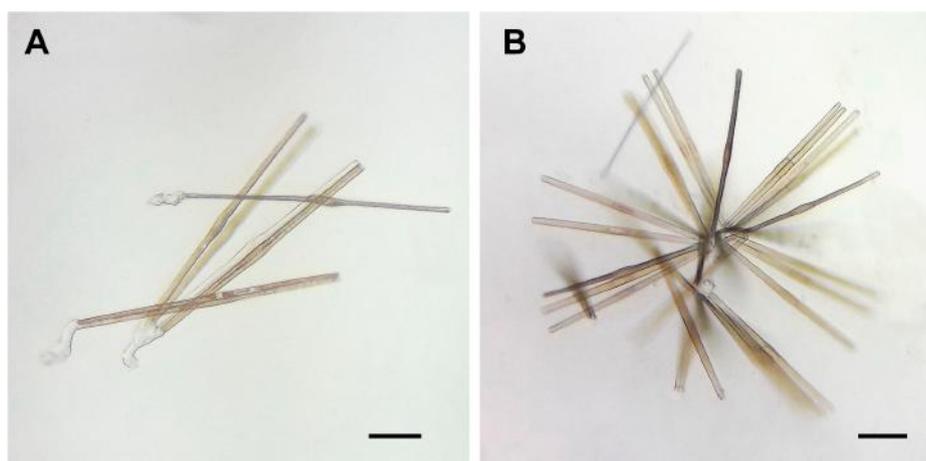


Рис. 1. *Toxarium undulatum*, который прикреплен к субстрату при помощи слизи, выделяемой одним из апикальных концов клетки, в процессе деления образует кустиковидные колонии. А — клон 8.0827-У, черноморская популяция; В — клон 9.0620-С, канарская популяция. Масштабная линейка — 100 мкм

Fig. 1. *Toxarium undulatum*, attached to substrate with the help of mucilage secreted by one of the apical ends of the cell, forms tuft colonies in the process of division. А – clone 8.0827-Y, the Black Sea population; В – clone 9.0620-C, the Canary population. Scale bar is 100 μm

После того как нам удалось инициировать половое воспроизведение в смешанных посевах клонов черноморской популяции, для дальнейших экспериментов были выбраны пары клонов (8.0820-Е + 8.0830-К) и (8.0827-У + 8.0830-К). В результате скрещивания последней пары получены инициальные клетки, которые характеризовались размерами, близкими к максимальным для вида. Несколько постинициальных клеток (средний размер — 1270 мкм) были выделены в культуру; впоследствии они использованы в экспериментах как клетки, находящиеся в начале жизненного цикла. Кроме них, в экспериментах задействованы клоны 8.0822-Д, 8.0920-Е и 8.1227-А из черноморской популяции со средними размерами клеток 642, 518 и 963 мкм соответственно. В клонах 9.0618-А, 9.0618-Е, 9.0620-В и 9.0621-ДД из популяции с о-ва Гран-Канария средний размер клеток на момент проведения экспериментов составил 680, 212, 284 и 334 мкм соответственно.

Действие фактора солёности на водоросль оценивали по смертности клеток при переносе их из среды, в которой они содержались в коллекции, в новую среду с градацией солёности: 8, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48, 54 ‰. Необходимую солёность получали путём разбавления приготовленной по рецепту среды ESAW (36 ‰) дистиллированной водой либо добавления к ней хлорида натрия. Клетки засеивали в стеклянные чашки Петри диаметром 50 мм (площадь дна — 494 мм²). Смертность определяли как отношение числа мёртвых клеток к общему числу клеток. Клетка считалась погибшей на основании визуальной оценки состояния внутреннего содержимого, прежде всего хлоропластов (их цвета, расположения или полного отсутствия). Количество клеток подсчитывали в десяти полях зрения микроскопа Nib-100 (площадь поля зрения — 0,88 мм²) при увеличении объектива 20× и окуляра 10× в течение пяти дней: в первый второй и пятый дни эксперимента — для черноморских клонов, в первый, второй, четвёртый и пятый дни — для канарских. Для каждого клона вычисляли среднее значение смертности за все дни эксперимента.

Для нахождения оптимумов использовали уравнение второго порядка, аппроксимирующее полученные данные; его коэффициенты находили по методу наименьших квадратов [6]. Значение аргумента первой производной этого уравнения, равной нулю, определяло положение оптимума.

РЕЗУЛЬТАТЫ

И черноморская, и океаническая популяции *T. undulatum* продемонстрировали широкую толерантность в отношении солёности: диапазон охватывал как минимум 30 ‰ (рис. 2). Черноморские клоны жизнеспособны в диапазоне от 12 до 42 ‰ (возможно, в чуть более широком, с учётом заданного в экспериментах шага градации 6 ‰). Канарские клоны выдерживали солёность от 18 до 48 ‰. Наблюдавшийся у океанических клонов сдвиг в сторону больших солёностей, чем у черноморских, можно было бы связать с тем, что до опытов их содержали при разной солёности (30 и 20 ‰ соответственно), однако ряд авторов утверждает, что у диатомовых предварительная адаптация к крайним для видов уровням солёности не ведёт к заметному расширению пределов толерантности [8].

Для черноморских клонов отмечена зависимость количества погибших при переносе в новую среду клеток (в среднем для пяти дней роста при девяти опробованных уровнях солёности) от их размера (рис. 3). Клетки максимального размера, появившиеся в результате полового процесса и находившиеся в начале жизненного цикла, оказались наиболее чувствительными к изменению условий роста. У канарских клонов такая зависимость не прослеживалась. Следует обратить внимание на то, что их половое воспроизведение не изучено; самые крупные клетки, находящиеся в начале жизненного цикла, не получены.

Оптимум солёности для вегетативного роста клеток черноморской популяции *T. undulatum* составил 27,8 ‰, для канарских клонов — 32,4 ‰. Для полового воспроизведения, инициированного у черноморских клонов, оптимальными были 27,2 ‰ (рис. 4).

ОБСУЖДЕНИЕ

Морфология и образ жизни представителей четырёх родов — *Ardissonaea* De Notaris, *Climacosphenia* Ehrenberg, *Synedrosphenia* (H. Peragallo) Azpeitia Moros и *Toxarium* J. W. Bailey (порядок Toxariales Round), объединяемых общим названием токсарииды, — находятся в явном противоречии с данными геносистематики, которая размещает их среди полярных центрических диатомовых [19, 20, 21, 24, др.]. Обособленность и эволюционная уникальность этой группы недавно подтверждены результатами исследования репродуктивной биологии *Ardissonaea crystallina* (C. Agardh) Grunow: как оказалось, воспроизводится эта водоросль не оогамным путём, типичным для всех изученных до этого центрических, а способом, более характерным для пеннатных [13]. Судя по молекулярно-филогенетическим построениям [21], можно заключить, что эволюционная линия токсариид отделилась от своих предков на рубеже мелового и юрского периодов, около 150 млн лет назад; 35 млн лет спустя *Toxarium* разошёлся с *Ardissonaea* и *Climacosphenia*. Следует обратить

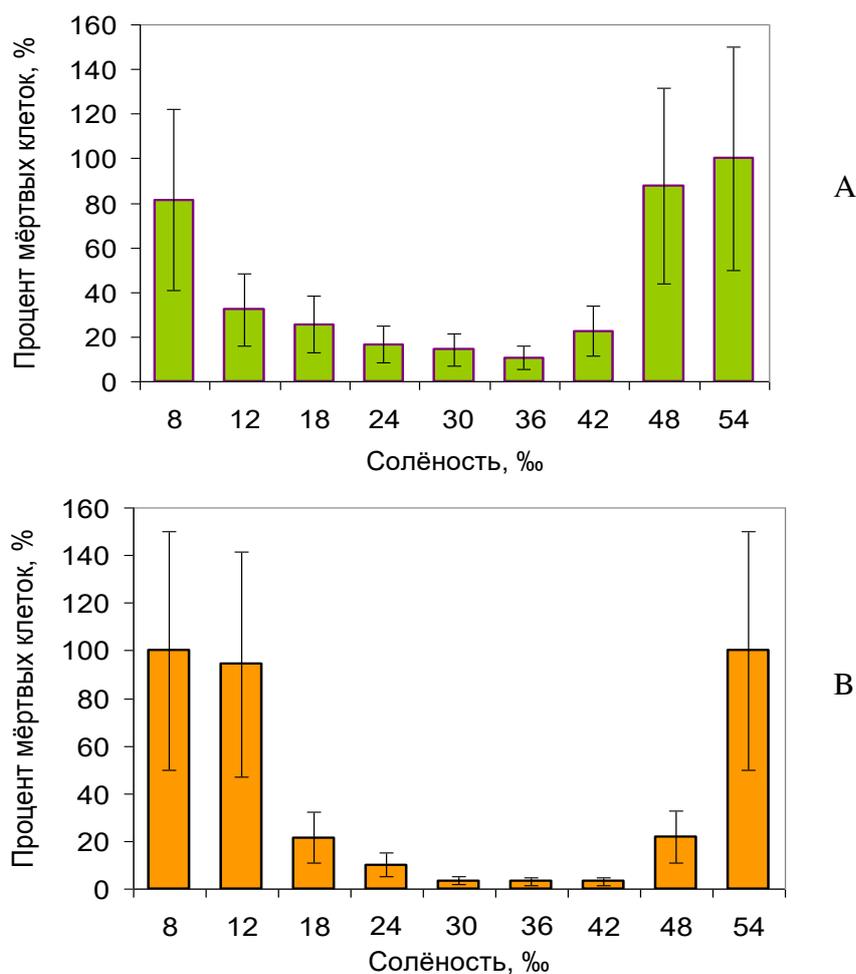


Рис. 2. Относительное количество погибших клеток *Toxarium undulatum* при переносе из среды с солёностью 20 ‰ (А, черноморская популяция) и 30 ‰ (В, канарская популяция) в новую среду с разной солёностью (в среднем для четырёх клонов за пять дней роста в новой среде)

Fig. 2. Relative number of dead *Toxarium undulatum* cells when transferred from medium with salinity of 20 ‰ (A, the Black Sea population) and 30 ‰ (B, the Canary population) to a new medium with different salinity levels (on average for four clones for five days of growth in the new medium)

внимание на то, что в роде *Toxarium* насчитывается всего два вида [22]. Это свидетельствует о значительной консервативности его генетической композиции: она мало менялась на протяжении более чем 100 млн лет. По крайней мере, произошедшие изменения не привели к появлению новых, морфологически различимых видов. С учётом этого обстоятельства можно предположить, что, заселяя новые места обитания, отличающиеся, в частности, уровнем солёности, *Toxarium* сохраняет свои особенности, выработанные миллионами лет эволюции, которые на физиологическом уровне проявляются в определённых физиологических оптимумах. При эволюционной адаптации к новой солёности сдвиг пределов толерантности и физиологических (экологических) оптимумов неизбежен; вопрос в скорости таких изменений.

Являются ли 7–8 тыс. лет достаточным периодом для эволюционных изменений, которые могут привести к появлению не только новых свойств, но и новых видов диатомовых? На этот вопрос можно ответить положительно, если в качестве примера взять комплекс криптических видов рода *Haslea* [17, 18]. Недавно описанный нами *Haslea karadagensis* [16] — эндемик Чёрного моря [18]. При этом вид имеет пределы толерантности и физиологические оптимумы, указывающие на океаническое происхождение: 25–30 ‰ были оптимальны для его роста, а половое воспроизведение не происходило в среде, солёность которой ниже 17 ‰ [14].

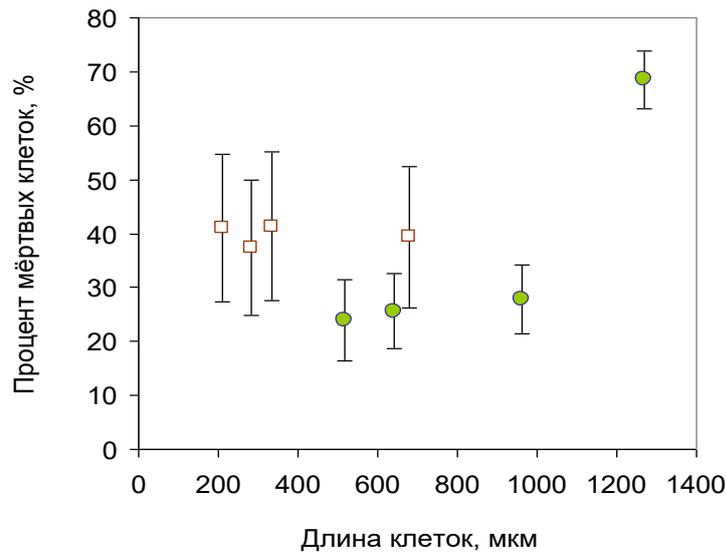


Рис. 3. Смертность клеток *Toxarium undulatum* в зависимости от их апикальной длины (при переносе в новую среду, в среднем для девяти уровней солёности); □ — канарские клоны; ● — черноморские клоны

Fig. 3. Mortality of *Toxarium undulatum* cells depending on their apical length (when transferred to a new culture medium, on average for nine salinity levels); □ are the Canary clones; ● are the Black Sea clones

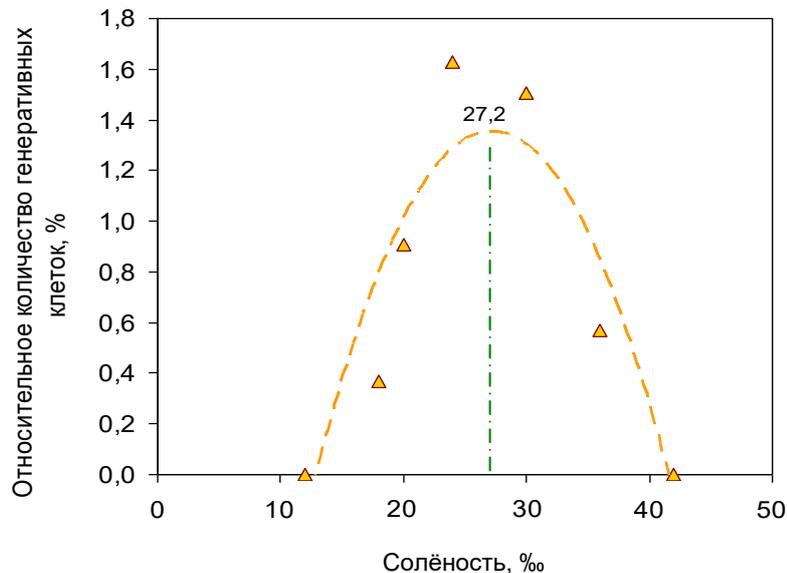


Рис. 4. Относительное количество генеративных клеток в смешанных посевах репродуктивно совместимых клонов *Toxarium undulatum* в зависимости от уровня солёности среды. Аппроксимация выполнена полиномом второй степени. Штрихпунктирная линия указывает на положение оптимума

Fig. 4. Relative number of generative cells in mixtures of reproductively compatible *Toxarium undulatum* clones depending on a salinity level of a medium. Approximation was performed by a second-degree polynomial. A dash-dotted line indicates an optimum position

Пределы толерантности *T. undulatum* по отношению к солёности достаточно широки. Клетки оставались жизнеспособными (в разной мере) при 12–42 ‰, половое воспроизведение происходило в немного более узком диапазоне. Столь широкий диапазон при оптимуме около 30 ‰ свидетельствует в пользу предположения о том, что именно относительная эвригалинность позволила виду освоить новое для него место обитания после возникновения проливов, соединяющих Чёрное и Средиземное моря. Маловероятно, что предковая средиземноморская (океаническая) популяция

была стеногалинной, а у черноморской популяции вследствие эволюционных изменений за относительно короткий период (7–8 тыс. лет) диапазон толерантности значительно расширился. Об этом также свидетельствуют результаты изучения положения физиологических оптимумов и пределов толерантности океанической популяции клонов, выделенных нами с побережья о-ва Гран-Канария, по морфологическим характеристикам определяемых как *T. undulatum*. В этом месте Мирового океана, в отличие от Чёрного моря, солёность оставалась неизменной на протяжении многих миллионов лет, однако выделенные клоны показали такую же широкую толерантность, как и черноморские, и их оптимумы для роста различались незначительно.

Какие-то выводы о возможных репродуктивных барьерах между черноморской популяцией *T. undulatum* и популяциями из других мест Мирового океана преждевременны до выполнения экспериментов по скрещиванию.

Как известно, размер клеток определяет их фазу жизненного цикла [22]. Априори, до установления положения верхней границы размерного диапазона аукоспорообразования, с высокой вероятностью можно утверждать, опираясь на общие принципы [12], что клетки клонов 8.0822-D и 8.0920-E находились в генеративной фазе, в то время как клетки клона 8.1227-A ещё не достигли размеров, позволяющих вступление в половой процесс. У четырёх изученных клонов из Чёрного моря прослеживалась корреляция между устойчивостью к изменению солёности среды и размером клеток: мелкие клетки оказались более устойчивыми к резким изменениям солёности (см. рис. 2). Между тем делать окончательный вывод о зависимости солетолерантности от фазы жизненного цикла пока преждевременно (ввиду небольшого количества полученных данных и возможного клоноспецифического ответа). С клоновой специфичностью мы сталкивались во многих экспериментах; это касалось широкого круга характеристик, начиная со способности синтезировать и накапливать определённые вещества (например, пигменты у представителей рода *Haslea*) и заканчивая способностью к вступлению в половой процесс и интенсивностью аукоспоруляции. Заметим, что у близкородственного вида *A. crystallina*, напротив, более крупные клетки быстрее адаптировались к переносу из среды с солёностью 20 ‰ в среду с солёностью 12 ‰ [15].

При указанных различиях важно отметить следующую общую закономерность: для всех изученных нами черноморских видов диатомовых оптимумы солёности для вегетативного роста и полового воспроизведения были выше типичной для Чёрного моря вблизи крымского побережья солёности 17–18 ‰ (табл. 1). Превышение достигало 8–12 ‰ и даже больших значений. Сведения о том, что диатомовые, живущие в Чёрном море, делятся быстрее при солёности выше черноморской, не новы (например, [4, 8, 10]). Такое несовпадение физиологических (экологических) оптимумов с условиями, характерными для мест обитания популяций изученных видов (см., однако, иное мнение [10]), на наш взгляд, недвусмысленно показывает, что для Чёрного моря эти виды являются пришлыми, а темпы их эволюции не позволили привести физиологические и экологические характеристики в полное соответствие с условиями окружающей среды.

Для того чтобы вид мог существовать в определённых условиях солёности, чрезвычайно важным является соответствие этим условиям диапазона толерантности, относящегося не только к вегетативному росту, но и к половому воспроизведению. Как известно, половое воспроизведение для подавляющего большинства диатомовых является обязательным этапом жизненного цикла [11, 22]. Следующее поколение может не появиться из-за неподходящих условий среды. *T. undulatum* продемонстрировал способность воспроизводиться половым путём в диапазоне солёностей, несколько более узком, чем для вегетативного роста, но всё же достаточно широком. Обращает на себя внимание положение оптимума: и в этом случае он гораздо выше значений солёности воды Чёрного моря и оз. Донузлав.

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о том, что *T. undulatum*, наряду со многими другими видами диатомовых водорослей, заселил Черноморский бассейн в постновоэвксинский период. В его физиологических реакциях по отношению к солёности среды прослеживается

океаническое происхождение. Задача последующих исследований будет состоять в изучении репродуктивных отношений черноморской и океанической популяций и в выяснении наличия или отсутствия между ними репродуктивных барьеров.

Таблица 1. Уровни солёности, благоприятные для вегетативного роста и полового воспроизведения некоторых черноморских видов диатомовых водорослей

Table 1. Salinity levels, favorable for vegetative growth and sexual reproduction of some Black Sea diatoms

Вид	Оптimum для вегетативного роста (пределы толерантности), ‰	Оптimum для полового воспроизведения, ‰	Источник данных
<i>Ardissonea crystallina</i>	29 (9–45)	30	[15]
<i>Climaconeis scalaris</i>	30 (8–48)	30	[3]
<i>Haslea karadagensis</i>	25–30 (8–45*)	25–30	[14]
<i>Nitzschia longissima</i>	27 (8–45)	30	[23]
<i>Tabularia tabulata</i>	30 (2,25–49*)	30	[2]
<i>Toxarium undulatum</i>	28 (8–48)	27	настоящая работа

Примечание: * — более высокие значения солёности в экспериментах не проверяли.

Note: * – higher salinity values were not checked in experiments.

Работа поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований «Изучение видоспецифичности эволюционного перехода от оогамии к неогамному половому воспроизведению у полярных центральных диатомей (*Mediophyceae*)» (№ 19-04-00070_a).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Давидович Н. А., Давидович О. И., Подунай Ю. А. Коллекция культур диатомовых водорослей Карадагской научной станции (Крым) // *Морской биологический журнал*. 2017. Т. 2, № 1. С. 18–28. [Davidovich N. A., Davidovich O. I., Podunai Yu. A. Diatom culture collection of the Karadag scientific station (Crimea). *Morskoy biologicheskij zhurnal*, 2017, vol. 2, no. 1, pp. 18–28. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.21072/mbj.2017.02.1.03>
2. Давидович О. И. Влияние солёности на вегетативный рост и половое воспроизведение диатомовой водоросли *Tabularia tabulata* (C. A. Agardh) Snoeijs // *Актуальные проблемы биоразнообразия и природопользования* : материалы Всероссийской научно-практической конференции, Керчь, 26 сентября – 1 октября 2017 г. Симферополь : ИТ «АРИАЛ», 2017. С. 38–43. [Davidovich O. I. Vliyanie solenosti na vegetativnyi rost i polovoe vosproizvedenie diatomovoi vodorosli *Tabularia tabulata* (C. A. Agardh) Snoeijs. In: *Aktual'nye problemy bioraznoobraziya i prirodopol'zovaniya* : materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Kerch, 26 Sept. – 1 Oct., 2017. Simferopol : IT "ARIAL", 2017, pp. 38–43. (in Russ.)]
3. Давидович О. И., Давидович Н. А. Влияние солёности среды на вегетативный рост и половое воспроизведение двух водорослей из рода *Climaconeis* (Bacillariophyta) // *Морские биологические исследования: достижения и перспективы* : в 3-х т. : сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, приуроченной к 145-летию Севастопольской биологической станции, Севастополь, 19–24 сентября 2016 г. / под общ. ред. А. В. Гаевской. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2016. Т. 1. С. 166–169. [Davidovich O. I., Davidovich N. A. Vliyanie solenosti sredy na vegetativnyi rost i polovoe vosproizvedenie dvukh vodoroslei iz roda *Climaconeis* (Bacillariophyta). In: *Morskie biologicheskie issledovaniya: dostizheniya i perspektivy* : v 3-kh t. : sbornik materialov Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, priurochennoi k 145-letiyu Sevastopol'skoi biologicheskoi stantsii, Sevastopol, 19–24 Sept., 2016 / A. V. Gaevskaya (Ed.). Sevastopol : EKOSI-Gidrofizika, 2016, vol. 1, pp. 166–169. (in Russ.)]
4. Джафарова С. К. Рост клоновых культур полиглобных диатомовых водорослей при изменении

- ионного состава среды // *Альгология*. 1992. Т. 2, № 2. С. 20–24. [Dzhafarova S. K. Growth of polygalobe diatoms clone cultures in case of ionic medium composition variation. *Al'gologiya*, 1992. vol. 2, no. 2, pp. 20–24. (in Russ.)]
5. Димитров П. С., Димитров Д. П., Солаков Д. П., Пейчев В. Д. Новейшая геологическая история Черного моря и проблема потопы // *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2005. Т. 1. С. 102–111. [Dimitrov P. S., Dimitrov D. P., Solakov D. P., Peichev V. D. Noveishaya geologicheskaya istoriya Chernogo morya i problema potopa. *Geologiya i poleznye iskopaemye Mirovogo okeana*, 2005, vol. 1, pp. 102–111. (in Russ.)]
 6. Зайцев Г. Н. *Математическая статистика в экспериментальной ботанике*. Москва : Наука, 1984. 424 с. [Zaitsev G. N. *Matematicheskaya statistika v eksperimental'noi botanike*. Moscow : Nauka, 1984, 424 p. (in Russ.)]
 7. Зайцев Ю. П. *Это удивительное море*. Одесса : Изд-во «Маяк», 1978. 159 с. [Zaitsev Yu. P. *Eto udivitel'noe more*. Odessa : Izd-vo "Mayak", 1978, 159 p. (in Russ.)]
 8. Караева Н. И., Джафарова С. К. Экспериментальные исследования полигалобных Bacillariophyta в связи с солёностью среды // *Альгология*. 1993. Т. 3, № 2. С. 97–105. [Karaeva N. I., Dzhafarova S. K. Experimental investigations of polygalobic Bacillariophyta in connection with medium salinity. *Al'gologiya*, 1993, vol. 3, no. 2, pp. 97–105. (in Russ.)]
 9. Полякова С. Л., Давидович О. И., Подунай Ю. А., Давидович Н. А. Модификация среды ESAW, используемой для культивирования морских диатомовых водорослей // *Морской биологический журнал*. 2018. Т. 3, № 2. С. 73–78. [Polyakova S. L., Davidovich O. I., Podunai Yu. A., Davidovich N. A. Modification of the ESAW culture medium used for cultivation of marine diatoms. *Morskoy biologicheskij zhurnal*, 2018, vol. 3, no. 2, pp. 73–78. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.21072/mbj.2018.03.2.06>
 10. Финенко З. З., Ланская Л. А. Рост и скорость деления водорослей в лимитированных объемах воды // *Экологическая физиология морских планктонных водорослей (в условиях культуры)* / под общ. ред. К. М. Хайлова. Киев : Наукова думка, 1971. С. 22–50. [Finenko Z. Z., Lanskaya L. A. Rost i skorost' deleniya vodoroslei v limitirovannykh ob'emakh vody. In: *Ekologicheskaya fiziologiya morskikh planktonnykh vodoroslei (v usloviyakh kul'tur)* / K. M. Khailov (Ed.). Kiev : Naukova dumka, 1971, pp. 22–50. (in Russ.)]
 11. Chepurnov V. A., Mann D. G., Sabbe K., Vyverman W. Experimental studies on sexual reproduction in diatoms. *International Review of Cytology*, 2004, vol. 237, pp. 91–154. [https://doi.org/10.1016/S0074-7696\(04\)37003-8](https://doi.org/10.1016/S0074-7696(04)37003-8)
 12. Davidovich N. A. Species-specific sizes and size range of sexual reproduction in diatoms. In: *Proceedings of the 16th International Diatom Symposium*, Athens & Aegean Islands, 25 Aug. – 1 Sept., 2000 / A. Economou-Amilli (Ed.), 601 p. Athens : University of Athens, Faculty of Biology, 2001, pp. 191–196.
 13. Davidovich N. A., Davidovich O. I., Podunay Y. A., Gastineau R., Kaczmarzka I., Pouličková A., Witkowski A. *Ardissonea crystallina* has a type of sexual reproduction that is unusual for centric diatoms. *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, no. 1467, pp. 1–16. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15301-z>
 14. Davidovich N. A., Gastineau R., Gaudin P., Davidovich O. I., Mouget J.-L. Sexual reproduction in the newly-described blue diatom, *Haslea karadagensis*. *Fottea*, 2012, vol. 12, iss. 2, pp. 219–229. <https://doi.org/10.5507/fot.2012.016>
 15. Davidovich O. I., Davidovich N. A., Podunay Yu. A., Shorenko K. I., Witkowski A. Effect of salinity on vegetative growth and sexual reproduction of algae from the genus *Ardissonea* de Notaris (Bacillariophyta). *Russian Journal of Plant Physiology*, 2016, vol. 63, no. 6, pp. 776–782. <https://doi.org/10.1134/S1021443716060030>
 16. Gastineau R., Davidovich N. A., Bardeau J.-F., Caruso A., Leignel V., Hardivillier Y., Jacqueline B., Davidovich O. I., Rincé Y., Gaudin P., Cox E. J., Mouget J.-L. *Haslea karadagensis* (Bacillariophyta): A second blue diatom, recorded from the Black Sea and producing a novel blue pigment. *European Journal of Phycology*, 2012, vol. 47, iss. 4, pp. 469–479. <https://doi.org/10.1080/09670262.2012.741713>
 17. Gastineau R., Davidovich N., Hansen G., Rines J., Wulff A., Kaczmarzka I., Ehrman J., Hermann D., Maumus F., Hardivillier Y., Leignel V., Jacqueline B., Meleder V., Hallegraef G., Yallop M., Perkins R., Cadoret J.-P., Saint-Jean B., Carrier G., Mouget J.-L. *Haslea ostrearia*-like diatoms: Biodiversity out of the blue. In: *Advances in Botanical Research: Sea Plants* / N. Bourgougnon (Ed.).

- United Kingdom : Academic Press, 2014, vol. 71, pp. 441–465. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-408062-1.00015-9>
18. Gastineau R., Prasetya F. S., Falaise C., Cogne B., Decottignies P., Morançais M., Méléder V., Davidovich N., Turcotte F., Tremblay R., Pasetto P., Dittmer J., Bardeau J.-F., Pouvreau J.-B., Mouget J.-L. Marennine-like pigments: Blue diatom or green oyster cult? In: *Blue Biotechnology: Production and Use of Marine Molecules*. Vol. 1 / S. La Barre, S. S. Bates (Eds). Weinheim : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2018, chap. 16, pp. 529–551. <https://doi.org/10.1002/9783527801718.ch16>
 19. Kooistra W. H. C. F., De Stefano M., Mann D. G., Salma N., Medlin L. K. Phylogenetic position of *Toxarium*, a pennate-like lineage within centric diatoms (Bacillariophyceae). *Journal of Phycology*, 2003, vol. 39, iss. 1, pp. 185–197. <https://doi.org/10.1046/J.1529-8817.2003.02083.X>
 20. Medlin L. K., Sato S., Mann D. G., Kooistra W. H. C. F. Molecular evidence confirms sister relationship of *Ardissonea*, *Climacosphe-*
nia, and *Toxarium* within the bipolar centric diatoms (Bacillariophyta, Mediophyceae), and cladistic analyses confirm that extremely elongated shape has arisen twice in the diatoms. *Journal of Phycology*, 2008, vol. 44, iss. 5, pp. 1340–1348. <https://doi.org/10.1111/J.1529-8817.2008.00560.X>
 21. Nakov T., Beaulieu J. M., Alverson A. J. Accelerated diversification is related to life history and locomotion in a hyperdiverse lineage of microbial eukaryotes. *New Phytologist*, 2018, vol. 219, iss. 1, pp. 462–473. <https://doi.org/10.1111/NPH.15137>
 22. Round F. E., Crawford R. M., Mann D. G. *The Diatoms. Biology and Morphology of the Genera*. Cambridge : Cambridge University Press, 1990, 747 p.
 23. Shorenko K. I., Davidovich O. I., Davidovich N. A. On the taxonomy, reproduction, and distribution of the diatom *Nitzschia longissima* (Brèb.) Grunow (Bacillariophyta). *International Journal on Algae*, 2014, vol. 16, no. 1, pp. 5–28. <https://doi.org/10.1615/INTERJALGAE.V16.I1.10>
 24. Theriot E. C., Ashworth M., Ruck E., Nakov T., Jansen R. K. A preliminary multigene phylogeny of the diatoms (Bacillariophyta): Challenges for future research. *Plant Ecology and Evolution*, 2010, vol. 143, no. 3, pp. 278–296. <https://doi.org/10.5091/plecevo.2010.418>

SALINITY OPTIMA FOR VEGETATIVE GROWTH AND SEXUAL REPRODUCTION OF THE DIATOM *TOXARIUM UNDULATUM*

N. A. Davidovich and O. I. Davidovich

T. I. Vyazemsky Karadag Scientific Station – Nature Reserve of RAS – Branch of IBSS RAS,
Feodosia, Russian Federation
E-mail: nickolaid@yandex.ru

Distribution of diatom algae is limited by their tolerance to environmental factors. Although a genus *Toxarium* has been evolving for more than 100 million years, it is represented by only two species. *Toxarium undulatum* is widely spread in tropical and subtropical seas, and it can be also found in the Black Sea, the salinity of which is twice lower than the oceanic one. Ecological and psychological characteristics research of this species is of great interest in terms of its relationship to salinity. *T. undulatum* clonal cultures were sampled in the Donuzlav Lake connected to the Black Sea (southwest of the Crimean Peninsula) and on Gran Canaria coast (Canary Islands archipelago). Experiments on the salinity tolerance limits showed, that the Black Sea clones were viable in a range of at least 30 ‰ (12 to 42 ‰). The same wide range of salinity tolerance with slightly higher values was observed among oceanic clones of this species. Optima of vegetative growth and sexual reproduction were determined. Optima of the Black Sea clones appeared to be 27.8 and 27.2 ‰, respectively, which was significantly higher than salinity observed in population habitat. Similar higher optima of vegetative growth and sexual reproduction, compared with those salinity values, at which natural population developed, were observed for a number of other Black Sea diatoms, which proved their oceanic (Mediterranean) origin. It was concluded that *T. undulatum*, along with other species, began to populate the Black Sea basin about seven thousand years ago after Mediterranean Sea water started to flow into the freshened Novoevksinsky Sea-Lake through the Bosphorus Strait. However, the evolution rate did not allow bringing physiological and ecological characteristics of the species studied into full agreement with environmental conditions. Oceanic origin is evidently seen in its physiological reactions to salinity. Possibility of speciation due to settlement of the Black Sea with oceanic species is discussed.

Keywords: diatom, *Toxarium undulatum*, evolution, salinity, tolerance limits

УДК 574.64:597.556.35(26)

**ХЛОРООРГАНИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ
В КАМБАЛАХ РОДА *HIPPOGLOSSOIDES* GOTTSCHЕ, 1835
ИЗ ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫХ МОРЕЙ РОССИИ**

© 2020 г. М. М. Донец¹, В. Ю. Цыганков^{1,2}, М. Д. Боярова¹,
А. Н. Гумовский¹, Ю. П. Гумовская¹, Н. К. Христофорова^{2,3}

¹Школа биомедицины, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Российская Федерация

²Школа естественных наук, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток,
Российская Федерация

³Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Российская Федерация
E-mail: maksim.donecz@mail.ru

Поступила в редакцию 30.09.2019; после доработки 20.11.2019;
принята к публикации 27.03.2020; опубликована онлайн 31.03.2020.

Хлорорганические пестициды (ХОП) и полихлорированные бифенилы (ПХБ) относятся к группе стойких органических загрязняющих веществ (СОЗ) и являются глобальными суперэкоксикантами. Рыба и морепродукты — важный источник полноценного белка и полиненасыщенных жирных кислот, особенно для жителей приморских районов. До 90 % всех поллютантов поступают в организм человека с пищей. Конечным депо СОЗ в окружающей среде являются морские экосистемы, а следовательно, эти вещества могут накапливаться в различных объектах морского промысла. В работе представлены сведения о концентрациях ХОП [изомеры ГХЦГ (α -, β -, γ -), ДДТ и его метаболиты (ДДД и ДДЕ)] и ПХБ в мышцах камбал рода *Hippoglossoides* Gottsche, 1835, обитающих в дальневосточных морях России (Охотское море, Татарский пролив, Японское море). Липиды экстрагировали из гомогенатов тканей рыб смесью гексана и ацетона с последующим разрушением жировых компонентов концентрированной серной кислотой. ХОП и ПХБ разделяли при помощи колоночной хроматографии полярным и неполярным растворителями. Ксенобиотики количественно определяли методом газовой хромато-масс-спектрометрии. Для оценки качества выбранной методики применяли метод стандартных добавок. Средняя воспроизводимость концентраций аналитов варьировала от 94,6 до 103,7 %, что говорит о надёжности полученных данных и об эффективности использованных методов. Средние концентрации Σ ДДТ, Σ ГХЦГ, Σ ХОП (Σ ДДТ + Σ ГХЦГ) и Σ ПХБ конгенов составили: в образцах, отобранных в восточной части Охотского моря, — (62 ± 89) , (50 ± 52) , (100 ± 125) и (92 ± 45) нг·г⁻¹ липидов; в южной части Охотского моря — (20 ± 17) , (36 ± 37) , (54 ± 41) и (99 ± 43) нг·г⁻¹ липидов; в Японском море — (40 ± 29) , (62 ± 36) , (102 ± 50) и (1616 ± 1177) нг·г⁻¹ липидов соответственно. В образцах из Татарского пролива средние уровни Σ ГХЦГ, Σ ХОП и Σ ПХБ составили (221 ± 182) , (224 ± 180) и (455 ± 317) нг·г⁻¹ липидов соответственно. ДДТ обнаружен в трёх исследованных образцах. В восточной части Охотского моря в камбалах зарегистрированы наибольшие концентрации ДДТ и умеренные — ГХЦГ, что может быть связано с расположением на полуострове Камчатка «могильника» ядохимикатов и пестицидов, в котором захоронены ХОП. Поступление ПХБ в воды южной части Охотского моря может объясняться как активным судоходством, так и наличием стоков с мусорных полигонов, несущих остаточные количества ПХБ в экосистему. Южная часть Охотского моря — самый чистый из исследованных районов, характеризующийся наименьшим содержанием ДДТ, ГХЦГ и ПХБ в организмах. В камбалах из залива Невельского (Татарский пролив) ДДТ практически отсутствовал. В то же время в них выявлен самый высокий уровень содержания ГХЦГ, представленного только

β -изомером, что говорит о длительной циркуляции токсиканта в экосистеме. Согласно постановлению Правительства Сахалинской области, на территории о-ва Сахалин есть полигоны размещения пришедших в негодность или запрещённых пестицидов, хранение которых (на момент вступления постановления в силу) осуществлялось с нарушениями, способными привести к серьёзному загрязнению окружающей среды. Скорее всего, источником загрязнения Татарского пролива стали именно они. Другим источником загрязнения ГХЦГ могут быть течения, выносящие воды Японского моря через пролив Невельского в Охотское море. Высокие уровни ПХБ в водах залива могут быть связаны с активным судоходством и, возможно, с влиянием свалок бытовых отходов на о-ве Сахалин. Камбалы из Японского моря характеризуются наибольшим загрязнением СОЗ. Поступление ХОП в акваторию моря может быть связано с поверхностными смывами, речными стоками, утечками из хранилищ запрещённых к применению пестицидов и атмосферным переносом из стран Азии, где до сих пор разрешено применение некоторых ХОП. Найденные уровни ПХБ на порядок величин превышают таковые в камбалах из Охотского моря и Татарского пролива, что может быть объяснено активным судоходством в водах Японского моря, влиянием действующих нефтеналивного и угольного портов в г. Находке, а также местным загрязнением прибрежной полосы (так называемых диких пляжей). Таким образом, исследована аккумуляция хлорорганических пестицидов (ГХЦГ и ДДТ) и полихлорированных бифенилов в мышцах камбал из дальневосточных морей России. При существующем глобальном фоне СОЗ, сформировавшемся на планете, уровни этих соединений в камбалах южной части Охотского моря могут быть приняты как фоновые. Наибольшему антропогенному прессу подвержено Японское море, где концентрации ПХБ значительно превышают таковые как в дальневосточных морях России, так и в сравниваемых регионах мира в целом.

Ключевые слова: ДДТ, ГХЦГ, ПХБ, камбалы, род *Hippoglossoides*, дальневосточные моря России

Хлорорганические пестициды (далее — ХОП) и полихлорированные бифенилы (далее — ПХБ) относятся к группе стойких органических загрязняющих веществ (далее — СОЗ) и являются глобальными суперэкоксикантами [1]. Распространение этих соединений обусловлено переносом воздушных и водных масс, биоаккумуляцией и биомагнификацией (увеличение концентрации токсикантов в организмах с переходом на более высокие уровни пищевой цепи) [10, 11, 22, 26]. ХОП поступают в окружающую среду путём атмосферного переноса из стран Азии, где до сих пор разрешено использование ДДТ (как средства борьбы с насекомыми — переносчиками заболеваний) и ГХЦГ (как лечебного средства от вшей и чесотки) [21]. Источниками ХОП являются также полигоны и захоронения ядохимикатов и пестицидов, из которых они вымываются атмосферными осадками и подземными водами и поступают в морские экосистемы путём речных стоков и поверхностных смывов. Известно, что ХОП могут попадать в пресные водоёмы, в том числе в нерестилища, посредством биотранспорта мигрирующими видами организмов [18]. Поступление ПХБ в экосистемы происходит в основном при сжигании бытовых и промышленных отходов, возгорании старых трансформаторов, испарении из пластификаторов, а также при утечках с другими промышленными отходами и утечках из ПХБ-содержащих масел [13, 19, 20].

Рыба и морепродукты — важный источник полноценного белка и полиненасыщенных жирных кислот, особенно для жителей приморских районов. До 90 % всех поллютантов поступают в организм человека с пищей. Конечным депо СОЗ в окружающей среде являются морские экосистемы, а значит, эти вещества могут накапливаться в различных объектах морского промысла [17, 22, 26].

Дальневосточные моря (Японское, Охотское и Берингово) являются основными промысловыми зонами Российской Федерации. Вылавливаемые на Дальнем Востоке камбалы относятся к наиболее важным для промысла объектам, составляя 9,5 % общего объёма вылова рыбы в регионе [2]. Объём вылова, разнообразие видов и невысокая цена на рынке определяют их особое значение в структуре питания местного населения. Один из важнейших видов камбал — палтусовидная камбала рода *Hippoglossoides* Gottsche, 1835, широко распространённая в Охотском и Японском морях, а также в Татарском проливе. Мы провели предварительный мониторинг содержания СОЗ в камбалах Охотского моря и сделали предположение о возможном использовании полученных концентраций СОЗ как фоновых для дальневосточных морей [17].

Цель работы — оценить уровни аккумуляции и биотрансформации ХОП и ПХБ в палтусовидной камбале из различных районов дальневосточных морей России (Охотское море, Татарский пролив, Японское море).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Палтусовидные камбалы (*Hippoglossoides* Gottsche, 1835) выловлены в восточной (у берегов Камчатки) и южной (у берегов Курильских о-вов) частях Охотского моря, в зал. Невельского у юго-западного побережья о-ва Сахалин (Татарский пролив) и в бух. Рифовая зал. Петра Великого (Японском море) летом в 2016–2018 гг. (табл. 1, рис. 1). Возраст рыб составлял от 0,6 до 1 года. На содержание ХОП и ПХБ анализировали мышцы (филе) рыб. Замороженные (–20 °С) образцы тканей доставляли в лабораторию и гомогенизировали перед химическим анализом.

Таблица 1. Характеристика объектов исследования

Table 1. Characteristics of samples studied

Район отбора проб	Год отбора	Количество образцов, шт.	Вес, г*	Липиды, %*
Южная часть Охотского моря	2016	10	<u>219–402</u> 294 ± 52	<u>0,03–2,07</u> 0,72 ± 0,64
Восточная часть Охотского моря	2016	10	<u>160–415</u> 230 ± 82	<u>0,06–0,47</u> 0,20 ± 0,13
Татарский пролив	2017	15	<u>289–510</u> 368 ± 72	<u>0,03–0,6</u> 0,17 ± 0,16
Японское море	2018	9	<u>122–250</u> 195 ± 45	<u>0,04–1,06</u> 0,62 ± 0,31

Примечание: * — диапазон, min–max (над чертой); среднее значение ± стандартное отклонение (под чертой).

Note: * – range, min–max (above the bar); mean ± standard deviation (under the bar).

Липиды экстрагировали из гомогенатов мышц индивидуальных особей (10–20 г), используя смесь *n*-гексана и ацетона, с последующим разрушением жировых компонентов концентрированной серной кислотой [23]. Далее разделяли полученный экстракт неполярными (для ПХБ) и полярными (для ХОП) растворителями на хроматографической колонке с сорбентом Florisil®.

Для приготовления стандартных растворов ХОП и ПХБ использовали стандартные образцы (Dr. Ehrenstorfer и AccuStandard) α-ГХЦГ, β-ГХЦГ, γ-ГХЦГ, *n,n'*-ДДТ, *o,n'*-ДДТ, *n,n'*-ДДД, *o,n'*-ДДД, *n,n'*-ДДЕ, *o,n'*-ДДЕ и смесь конгенеров ПХБ 28, 52, 155, 101, 118, 143, 153, 138, 180, 207 с установленными метрологическими характеристиками: содержание основного вещества — 99,4–99,6 %, погрешность определения — 0,4 %. Для калибровки хромато-масс-спектрометра применяли рабочие стандартные растворы ХОП и ПХБ с концентрацией 10 нг·мл⁻¹, приготовленные путём разбавления стандартных растворов соответствующим объёмом *n*-гексана. Также использовали библиотеку Pesticides. Основное определение массового содержания хлорорганических соединений в биоматериале проводили на газовом хромато-масс-спектрометре Shimadzu GC MS-QP 2010 Ultra, оснащённом автодозатором АОС-5000 (подробные характеристики указаны ранее [27]). Для исследования использовали капиллярную колонку SLB-5; газ-носитель — гелий (скорость потока — 1 мл·мин.⁻¹). Температуры инжектора и детектора составляли +250 °С и +150 °С соответственно. Программа нагрева: увеличение температуры до +100 °С в течение 4 минут, нагрев до +310 °С со скоростью 7 °С в минуту, удерживание конечной температуры в течение 6 минут. Исследуемую смесь в объёме 2 мкл вносили в режиме без разделения, с последующим открытием разделяющего порта через 1 мин. Ионизацию веществ в газовой фазе осуществляли в режиме электронной ионизации (EI mode). Мониторинг избранных ионов (selected ion monitoring, SIM) разработан согласно настройкам и пределам обнаружения прибора. Для каждого уровня хлорирования

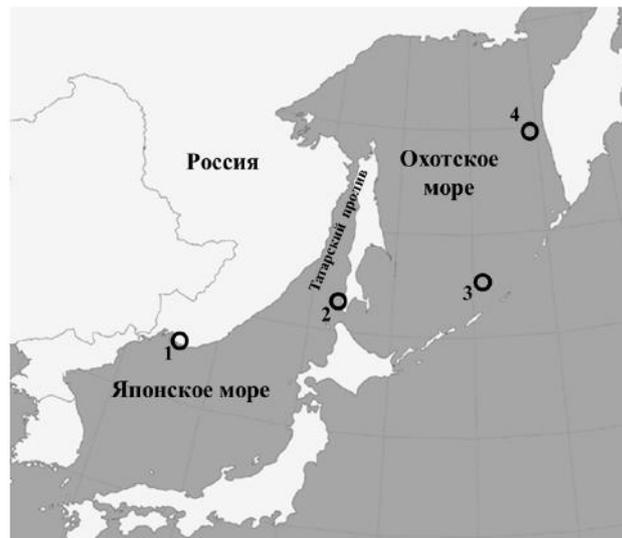


Рис. 1. Карта мест отбора образцов камбал: 1 — бухта Рифовая, залив Петра Великого, Японское море; 2 — залив Невельского, Татарский пролив; 3 — южная часть Охотского моря (прикурульские воды); 4 — восточная часть Охотского моря (прикамчатские воды)

Fig. 1. Map of sampling sites of flounders: 1 – the Rifovaya Bay, Peter the Great Bay, the Sea of Japan; 2 – the Nevelsky Bay, the Tatar Strait; 3 – southern part of the Sea of Okhotsk (off the coast of the Kuril Islands); 4 – eastern part of the Sea of Okhotsk (off the coast of Kamchatka)

отслеживали два иона ($M+$ и $[M+2]^+$). Для идентификации исследуемого соединения в качестве подтверждающих критериев использовали время выхода, массу и относительное содержание подтверждающего иона. Относительный процент неопределённости менее чем $\pm 20\%$ считали приемлемым. Площади пиков измеряли программой GCMS Postrun Analysis.

Для оценки качества использованной методики применяли метод стандартных добавок. К мышечным тканям 10 образцов камбал добавляли известные количества исследуемых соединений. Пробоподготовку и исследование смешанных образцов осуществляли по указанному выше методу. Результаты показали, что средняя воспроизводимость концентраций аналитов варьировала от 94,6 до 103,7 %, что говорит о надёжности полученных данных и об эффективности использованных методов. Пределы обнаружения рассчитывали как 3 стандартных отклонения 10 проб в смешанных со стандартами образцах. Для аналитов, которые не удавалось определить в смешанных пробах, пределы обнаружения находили как количество вещества в образце в соответствии с минимальной концентрацией калибровочного стандарта. Для исследованных ХОП пределы обнаружения составили: α -ГХЦГ — 0,2–0,3; β -ГХЦГ — 0,1–0,2; γ -ГХЦГ — 0,3–0,5; n,n' -ДДТ — 0,6–0,7; o,n' -ДДТ — 0,2–0,6; n,n' -ДДД — 0–0,1; o,n' -ДДД — 0,1–0,2; n,n' -ДДЕ — 0,1–0,2; o,n' -ДДЕ — 0,1–0,4 $нг \cdot г^{-1}$. Для конгенов ПХБ пределы обнаружения составили: 28 — 0,5–0,6; 52 — 0,4–0,7; 155 — 0,1–0,5; 101 — 0,6–0,8; 118 — 0,7–0,8; 143 — 0,2–0,7; 153 — 0–0,1; 138 — 0,2–0,3; 180 — 0,5–0,6; 207 — 0,7–0,8 $нг \cdot г^{-1}$.

Статистический анализ результатов осуществляли с использованием программного обеспечения IBM SPSS Statistics. Достоверность данных оценивали с помощью двустороннего критерия Краскала — Уоллиса с уровнем значимости $p \leq 0,05$. Результаты представлены в следующем виде: диапазон концентраций, среднее значение \pm стандартное отклонение.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Восточная и южная части Охотского моря. Диапазон концентраций ХОП (Σ ДДТ + Σ ГХЦГ) в камбале из восточной части Охотского моря варьировал в широких пределах от 14 до 434 $нг \cdot г^{-1}$ липидов со средней концентрацией (100 ± 125) $нг \cdot г^{-1}$ липидов. Суммарные уровни ГХЦГ и ДДТ составляли от 14 до 158 [среднее — (50 ± 52)] и от 0,6 до 276 [среднее — (62 ± 89)] $нг \cdot г^{-1}$

липидов соответственно. Диапазон концентраций ХОП в рыбе из южной части Охотского моря — 11–141 $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ липидов, средняя концентрация — (54 ± 41) $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ липидов (ниже, чем в прикамчатских водах). Суммарные уровни ГХЦГ и ДДТ в рыбе изменялись от 3 до 103 [среднее — (36 ± 37)] и от 1 до 45 [среднее — (20 ± 17)] $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ липидов соответственно (также ниже, чем у берегов Камчатки).

Из изомеров ГХЦГ в рыбах из восточной части Охотского моря наиболее часто определяемым был β -изомер с концентрацией 14–158 [среднее — (49 ± 51)] $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ липидов (рис. 2). При этом α -ГХЦГ выявлен только в одном образце в концентрации 8 $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ липидов. Концентрации γ -ГХЦГ были ниже пределов обнаружения во всех исследованных образцах.

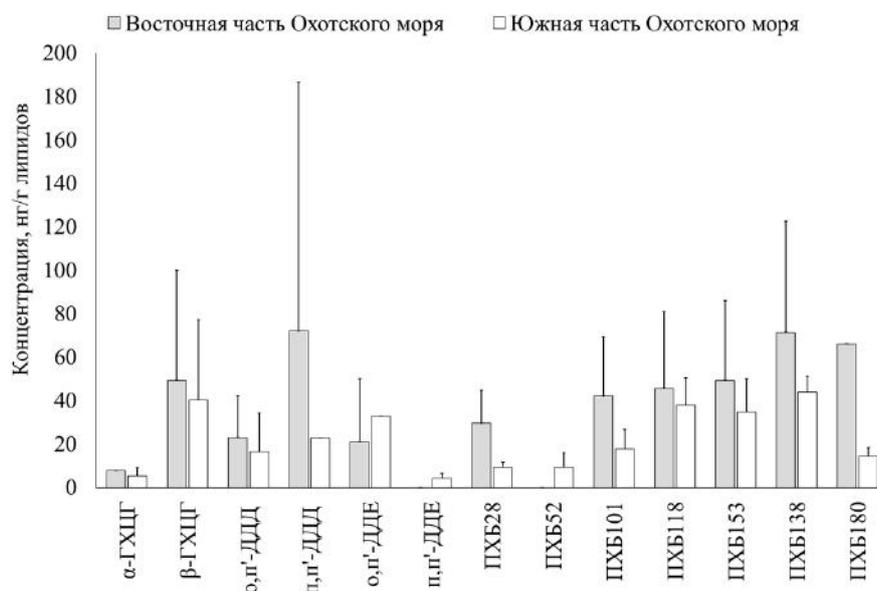


Рис. 2. Средние концентрации поллютантов в камбалах из восточной и южной частей Охотского моря (планки погрешности — величина стандартного отклонения)

Fig. 2. Average concentration of pollutants in the flounders from the eastern and southern parts of the Sea of Okhotsk (error bars represent standard deviation value)

В восточной части Охотского моря среди ДДТ и его метаболитов концентрации o,p' -ДДТ, n,n' -ДДТ и n,n' -ДДЕ ниже пределов обнаружения во всех пробах. Концентрации o,p' -ДДД и n,n' -ДДД варьировали в диапазоне 6–45 [среднее — (23 ± 19)] и 13–276 [среднее — (72 ± 114)] $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ липидов (рис. 2) соответственно. При этом o,p' -ДДЕ обнаружен в двух образцах в концентрациях 0,55 и 41,68 $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ липидов.

В рыбах из Южной части Охотского моря ГХЦГ представлен α - и β -изомерами с концентрациями 2–12 [среднее — (5 ± 4)] и 1–96 [среднее — (40 ± 37)] $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ липидов соответственно (рис. 2). Уровни содержания γ -ГХЦГ ниже пределов обнаружения во всех образцах. Среди ДДТ и его метаболитов концентрации o,p' -ДДТ ниже пределов обнаружения во всех исследованных рыбах. При этом n,n' -ДДТ, n,n' -ДДД и o,p' -ДДЕ определены единично в концентрациях 7, 23 и 33 $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ липидов соответственно. Уровни o,p' -ДДД варьировали в диапазоне от 2 до 45 [среднее — (17 ± 18)] $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ липидов. Концентрации n,n' -ДДЕ изменялись в диапазоне от 1 до 7 [среднее — (4 ± 2)] $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ липидов.

Сумма концентраций ПХБ в камбалах из восточной части Охотского моря варьировала от 24 до 279 [среднее — (125 ± 91)] $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ липидов. ПХБ представлены в основном 101 и 153 конгенерами; 28, 52, 155, 118, 138 и 180 конгенеры обнаружены фрагментарно (в одном-двух образцах) в следующих концентрациях: 28 — 41 и 19; 52 — 33; 155 — 71; 118 — 21 и 71; 138 — 108 и 35; 180 — 66 $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ липидов (рис. 2). Уровни ПХБ 207 ниже пределов обнаружения во всех исследованных пробах.

Диапазоны концентраций ПХБ 101 и ПХБ 153 варьировали от 11 до 81 [среднее — (42 ± 27)] и от 49 до 117 [среднее — (49 ± 37)] $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ липидов соответственно.

Суммарные уровни ПХБ в образцах обнаружены в диапазоне от 25 до 150 [среднее — (99 ± 43)] $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ липидов. ПХБ представлены 28, 101, 118, 153 и 138 конгенерами в концентрациях 6–12, 5–30, 15–50, 18–55 и 34–51 $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ липидов соответственно. Средние уровни составили (9 ± 2) , (18 ± 9) , (38 ± 13) , (35 ± 15) и (44 ± 7) $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ липидов (рис. 2). ПХБ 52, 155 и 180 обнаружены фрагментарно в концентрациях: 52 — 14 и 5; 155 — 17; 180 — 17 и 12 $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ липидов. Количество ПХБ 143 и ПХБ 207 было ниже пределов обнаружения во всех образцах.

Залив Невельского, Татарский пролив. В рыбах из Татарского пролива из ХОП регистрировали в основном β -ГХЦГ в широком диапазоне концентраций 37–555 [среднее — (224 ± 180)] $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ липидов. ДДТ и его метаболиты обнаружены в трёх образцах и представлены *n,n'*-ДДД (15 $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ липидов) и *n,n'*-ДДЕ (6 и 19 $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ липидов) (рис. 3). Сумма концентраций ПХБ в камбалах находилась в диапазоне 193–1384 $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ липидов (со средним значением (455 ± 317) $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ липидов). В камбалах из Татарского пролива зарегистрированы 28, 52, 155, 101, 118, 143, 153, 138 и 180 конгенеры ПХБ. Уровни ПХБ 207 были ниже пределов обнаружения во всех образцах. Диапазоны концентраций конгенов варьировали: для 28 — 4–61; 52 — 3–287; 155 — 3–78; 101 — 23–108; 118 — 20–326; 143 — 25–56; 153 — 38–291; 138 — 8–423; 180 — 28–106 $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ липидов. Средние уровни составили (29 ± 21) , (80 ± 83) , (30 ± 28) , (45 ± 23) , (85 ± 80) , (44 ± 13) , (118 ± 72) , (121 ± 109) и (59 ± 29) $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ липидов. ПХБ 101 обнаружен во всех исследованных образцах.

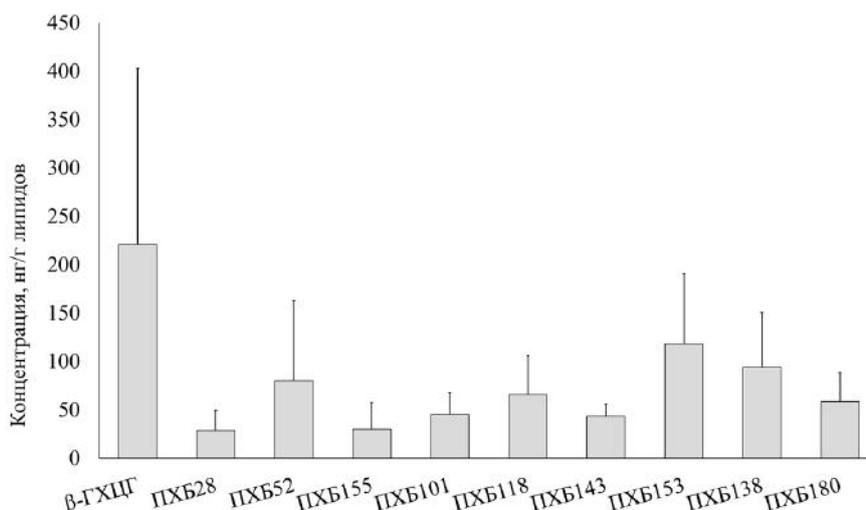


Рис. 3. Средние концентрации поллютантов в камбалах Татарского пролива (планки погрешности — величина стандартного отклонения)

Fig. 3. Average concentration of pollutants in the flounders from the Tatar Strait (error bars represent standard deviation value)

Бухта Рифовая, залив Петра Великого, Японское море. Концентрации ХОП (Σ ГХЦГ + Σ ДДТ) в камбалах из бух. Рифовая варьировали от 38 до 193 $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ липидов со средним значением (102 ± 50) $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ липидов. Изомеры ГХЦГ и ДДТ и его метаболиты обнаружены во всех исследованных пробах. Уровни содержания Σ ГХЦГ и Σ ДДТ изменялись от 29 до 134 и от 9 до 88 $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ липидов соответственно; средние концентрации составляли (62 ± 36) и (40 ± 29) $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ липидов соответственно. В камбалах из Японского моря обнаружены все определяемые изомеры ГХЦГ. Концентрации α -, β - и γ -изомеров находились в диапазонах 0,4–5, 27–127 и 0,9–6 $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ липидов соответственно. Средние концентрации составили: для α -ГХЦГ — (2 ± 1) , β -ГХЦГ — (59 ± 35) , γ -ГХЦГ — (2 ± 2) $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ липидов (рис. 4). При этом β -изомер найден во всех исследованных пробах.

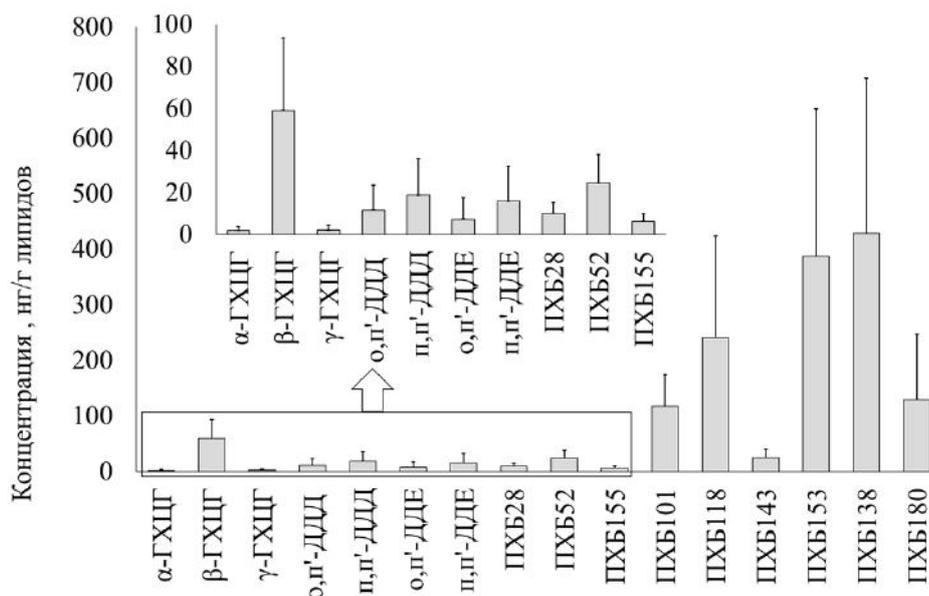


Рис. 4. Средние концентрации поллютантов в камбалах Японского моря (планки погрешности — величина стандартного отклонения)

Fig. 4. Average concentration of pollutants in the flounders from the Sea of Japan (error bars represent standard deviation value)

Из ДДТ и его метаболитов в камбалах не обнаружен *o,n'*-ДДТ, а *n,n'*-ДДТ выявлен только в одном образце (6 нг·г⁻¹ липидов). Диапазоны концентраций *o,n'*-ДДД, *n,n'*-ДДД, *o,n'*-ДДЕ и *n,n'*-ДДЕ составили 1–38, 6–52, 1–34 и 4–47 нг·г⁻¹ липидов соответственно. Средние уровни — (12 ± 12), (19 ± 18), (7 ± 10) и (16 ± 16) нг·г⁻¹ липидов (рис. 4). Концентрации ПХБ варьировали от 421 до 3716 нг·г⁻¹ липидов; среднее — (1616 ± 1177) нг·г⁻¹ липидов. ПХБ представлены 28, 52, 155, 101, 118, 143, 153, 138 и 180 конгенерами. Уровни ПХБ 207 были ниже пределов обнаружения во всех исследованных образцах. Концентрации конгенов варьировали следующим образом: 28 — 3–405; 52 — 7–287; 155 — 3–11; 101 — 40–207; 118 — 53–581; 143 — 11–46; 153 — 126–849; 138 — 126–936; 180 — 28–1835 нг·г⁻¹ липидов. Средние значения составили (54 ± 132), (54 ± 88), (6 ± 3), (117 ± 58), (241 ± 183), (26 ± 15), (387 ± 265), (429 ± 279), (318 ± 579) нг·г⁻¹ липидов соответственно.

ОБСУЖДЕНИЕ

На Дальнем Востоке мониторинговые исследования по наблюдению за содержанием СОЗ в морских и наземных объектах до 2012 г. выполнялись фрагментарно. В настоящее время регулярный мониторинг проводится по всей акватории дальневосточных морей. Накоплены данные о содержании ХОП и ПХБ в тихоокеанских лососях, птицах и млекопитающих [16, 17, 18, 22, 24, 25, 26, 27, 28].

Камбаловые (семейство Pleuronectidae) относятся к наиболее часто встречающимся представителям донной ихтиофауны, заселяющим весь шельф и материковый склон морей. Основной особенностью биологии камбал является их образ жизни: они лежат на грунте или плавают в придонном слое, оставаясь при этом в пределах своего ареала и совершая лишь сезонные миграции в более глубокие районы [8]. Таким образом, они могут выступать биоиндикаторами локального загрязнения.

Палтусовидные камбалы (род *Hippoglossoides*) относятся к группе камбал со смешанным типом питания: в составе пищи встречаются как типично бентосные животные (креветки, двустворчатые моллюски и др.), так и планктонные (гиперииды, сагитты и др.). Также пищей камбал нередко становится молодь сельди, корюшки и других видов мелких рыб. Состав пищи сильно связан с ареалом. В более тёплых частях дальневосточных морей (Японское море, южная часть Татарского

пролива) встречается в основном южная (япономорская) палтусовидная камбала (*Hippoglossoides dubius* Schmidt, 1904), в более холодных (Охотское и Берингово моря) — северная палтусовидная камбала (*Hippoglossoides robustus* Gill & Townsend, 1897). У юго-востока Сахалина и в Японском море в питании преобладают исключительно моллюски; в юго-восточной части Берингова моря палтусовидная камбала в нижних отделах шельфа и на свале потребляет в основном иглокожих и чилимов, а на мелководье — планктон [6, 8]. Оба вида относятся к одному роду, сходны по экологическим и биологическим характеристикам и могут быть использованы в качестве биоиндикаторов. Различия в накоплении СОЗ в камбалах из разных ареалов могут быть обусловлены антропогенной нагрузкой на район обитания или биоаккумуляцией организмов, входящих в рацион.

В восточной части Охотского моря в камбалах обнаружены наибольшие концентрации ДДТ и умеренные — ГХЦГ. Это может быть вызвано расположением на полуострове Камчатка «могильника» ядохимикатов и пестицидов, в котором захоронены альдрин, дильдрин, гексахлорбензол и другие ХОП [3, 5]. ДДД был наиболее встречаемым метаболитом ДДТ; ГХЦГ был представлен самым стойким β -изомером. Это говорит о длительной циркуляции обоих токсикантов в экосистеме и о распаде исходных соединений до более устойчивых форм. Нарушение герметичности захороненных резервуаров и испарение токсикантов с последующим атмосферным переносом являются, возможно, основными причинами загрязнения среды и биоты в этом районе, так как сельское хозяйство на западной стороне п-ова Камчатка развито слабо. В настоящее время на территории Камчатского края отсутствуют мусороперерабатывающие заводы; мусор захоранивают на специальных полигонах [3, 9], откуда возможны утечки. Известно, что ПХБ, благодаря своей химической стабильности, изоляционным свойствам и термоустойчивости, были востребованы в различных отраслях промышленности при производстве термоизоляции, резины, пластмассы, а также красителей, пигментов и безуглеродной копировальной бумаги [19]. Поступление полихлорированных бифенилов в прикамчатские воды Охотского моря может быть связано как с активным судоходством, так и со стоками с мусорных полигонов, несущими остаточные количества ПХБ в экосистему.

Южная часть Охотского моря является самым чистым из исследованных районов и характеризуется наименьшим содержанием ДДТ, ГХЦГ и ПХБ в организмах. Юг Охотского моря расположен далеко от всех наземных источников загрязнения. Кроме того, район характеризуется активной гидродинамикой и обменом вод с Тихим океаном через Курильские проливы, что может способствовать перераспределению СОЗ в водах. Концентрации всех СОЗ, обнаруженных в камбалах из южной части Охотского моря, — наименьшие в сравнении с таковыми из Японского моря, Татарского пролива и восточной части Охотского моря. Таким образом, гипотеза о том, что уровни поллютантов в мышцах камбал с юга Охотского моря являются фоновыми для дальневосточных морей России [17], доказана.

В мышцах камбал из залива Невельского практически отсутствовал ДДТ: n,n' -ДДД обнаружен лишь в одной пробе, а n,n' -ДДЕ — в двух. Это позволяет полагать, что район не подвергается серьёзному загрязнению данным пестицидом. В то же время в мышцах камбал из Татарского пролива выявлен самый высокий уровень содержания ГХЦГ (рис. 5), представленного только β -изомером, что говорит о длительной циркуляции этого токсиканта в экосистеме.

Залив Невельского находится вдали от крупных сельскохозяйственных предприятий как со стороны о-ва Сахалин, так и со стороны материка. В соответствии с постановлением Правительства Сахалинской области от 22.09.2008, на территории острова существуют полигоны размещения пришедших в негодность или запрещённых пестицидов, хранение которых осуществлялось (на момент вступления постановления в силу) с нарушениями, способными привести к серьёзному загрязнению окружающей среды [4, 7]. Скорее всего, источником загрязнения Татарского пролива стали именно они, что обусловило попадание ГХЦГ в экосистему пролива. На это указывает и обнаружение β -изомера ГХЦГ, считающегося наиболее устойчивым. Другим источником загрязнения ГХЦГ могут быть течения, выносящие воды Японского моря через пролив Невельского в Охотское море.

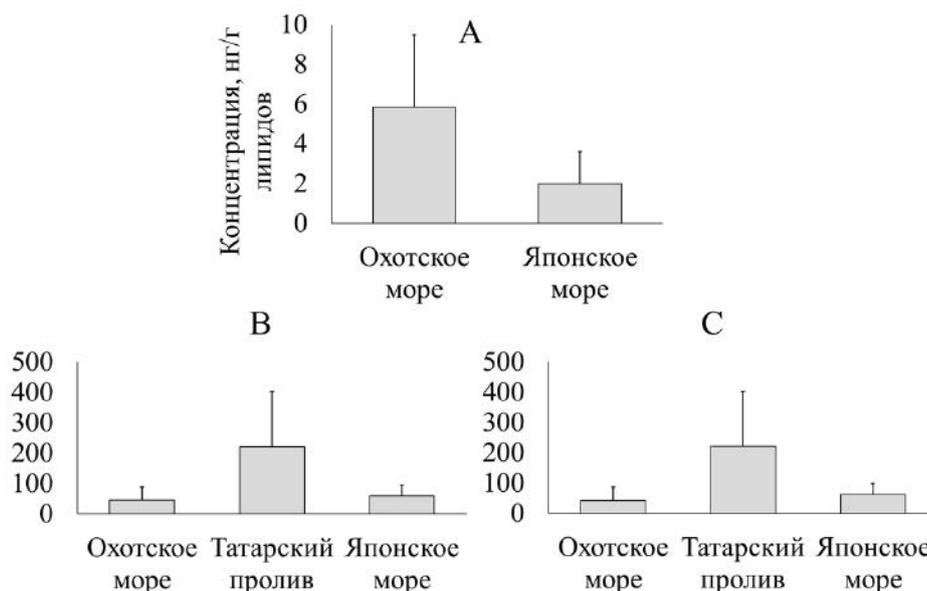


Рис. 5. Концентрации α -ГХЦГ (А), β -ГХЦГ (В) и Σ ГХЦГ (С) в мышцах камбал из исследованных районов (планки погрешности — величина стандартного отклонения)

Fig. 5. Concentrations of α -HCH (A), β -HCH (B), and Σ HCH (C) in the muscles of the flounders from the areas studied (error bars represent standard deviation value)

Уровни содержания ПХБ в рыбах из зал. Невельского в несколько раз выше, чем из Охотского моря, но заметно уступают показателям в япономорских камбалах (рис. 6). Высокие концентрации полихлорированных бифенилов могут быть связаны с активным судоходством и влиянием свалок бытовых отходов на о-ве Сахалин (по данным на 2007 г., на территории региона существовало 54 санкционированных свалки и 37 несанкционированных [4]). Татарский пролив — важный в экономическом отношении район, где ведётся активный промысел и осуществляются разнообразные грузоперевозки. Влияние тёплых течений Японского моря и холодных течений Охотского, а также ограниченность водообмена с открытым морем и тем более с океаном, обусловленная «зажатостью» водного тела пролива между материком и островом, способствуют накоплению поллютантов в этом районе. Таким образом, основным источником ПХБ в водах Татарского пролива может являться активная деятельность рыболовецких и транспортных судов.

В камбалах Японского моря из метаболитов ДДТ обнаружены ДДД и ДДЕ, из изомеров ГХЦГ — α -, β - и γ -изомеры. Приморский край является развитым в сельскохозяйственном отношении регионом, где в середине XX века широко использовались пестициды, в том числе хлорорганические. Устойчивые в химическом и микробиологическом отношении, эти соединения могли частично или полностью сохраниться в почвах, и сейчас их выносит в акваторию Японского моря посредством поверхностного смыва и речного стока. Кроме того, на территории края существуют места захоронения пестицидов, которые также могут быть источником поступления токсикантов в среду. Согласно Стокгольмской конвенции, развивающиеся страны Азии могут использовать ДДТ (как средство защиты населения от переносчиков малярии) и ГХЦГ (как лечебное средство от вшей и чесотки) [21]. Японское море омывает берега Северной и Южной Кореи; через Корейский пролив оно связано с Восточно-Китайским морем, омывающим берега Китая и западные берега Корейского полуострова. Пестициды могут попадать в морские экосистемы посредством атмосферного переноса, речных стоков и течений из Восточно-Китайского моря, несущих остатки пестицидов с сельскохозяйственных площадей, а также промышленных стоков. Наиболее существенным источником ДДТ и ГХЦГ может быть Китай — один из крупнейших производителей и потребителей пестицидов в мире [12]. В мышцах камбал ДДТ представлен в основном своими метаболитами — ДДД и ДДЕ, что говорит о давности загрязнения и о распаде исходного соединения.

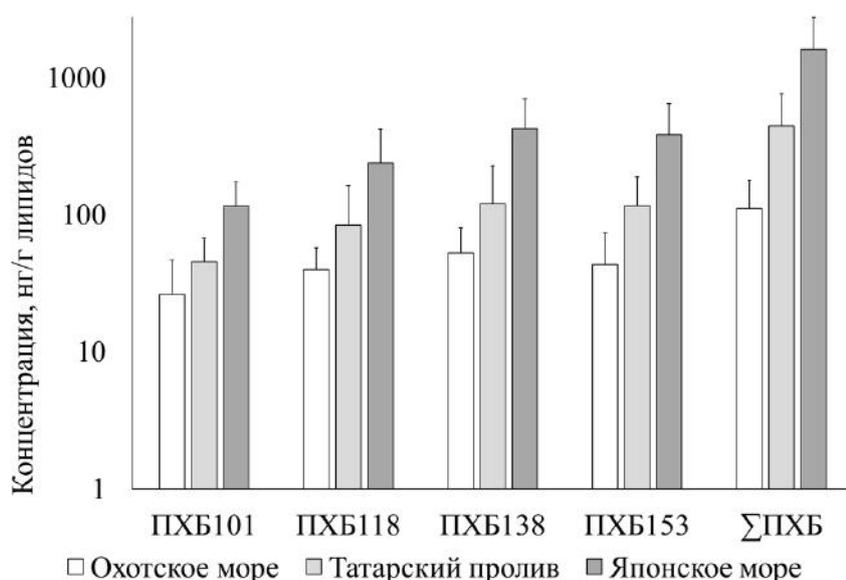


Рис. 6. Концентрации высокохлорированных конгенов ПХБ и Σ ПХБ в мышцах камбал из дальневосточных морей России (планки погрешности — величина стандартного отклонения)

Fig. 6. Concentrations of highly chlorinated PCBs and Σ PCB in the muscles of the flounders from the Far Eastern seas of Russia (error bars represent standard deviation value)

Весьма важными являются данные о концентрации ПХБ в мышцах рыб из Японского моря. Выявленные уровни содержания ПХБ на порядок величин превышают таковые в камбалах из Охотского моря и Татарского пролива (рис. 6). Бухта Рифовая находится в черте посёлка Ливадия, где расположено много баз отдыха и так называемых диких пляжей. Ежегодно на побережье бухты прибывает огромное количество туристов как с Дальнего Востока, так и с других регионов России. Многие люди останавливаются на диких пляжах, где не производится уборка и не осуществляется вывоз мусора и отходов жизнедеятельности. Кроме того, сравнительно недалеко от посёлка находится г. Находка, где функционируют нефтеналивной и угольный порты, воздействие которых может сказываться на прибрежных экосистемах. При этом Японское море — район активной навигации и промыслового рыболовства, что также может обуславливать поступление ПХБ в среду и организмы.

Сравнение средних концентраций ХОП в исследованных нами камбалах с данными для различных акваторий Мирового океана показало, что уровни ДДТ во всех районах Дальнего Востока России значительно ниже, чем в Атлантическом океане (141 $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ липидов), Балтийском (579 $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ липидов в Гданьской бухте; 732 $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ липидов в устье р. Висла) и Жёлтом (122 $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ липидов) морях [10, 15, 29], но на порядок выше, чем в Беринговом море (5 $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ липидов) [14]. Средние уровни α - и γ -ГХЦГ в рыбах сопоставимы с концентрациями, приводимыми в отмеченных публикациях (от 1 до 6 $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ липидов). Концентрации β -ГХЦГ в данных, с которыми проводили сравнение [10, 14], не указаны. В работе [29] количество β -изомера было ниже пределов обнаружения ($< 0,002$ $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ сырой массы); в исследовании [15] уровни токсиканта не указаны (так как он был выявлен в 24 % проб). Тем не менее β -ГХЦГ был доминирующим изомером в камбалах из всех районов дальневосточных морей; его содержание превышало сумму концентраций ГХЦГ в мышцах камбал из Жёлтого моря (13 $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ липидов) [10].

Уровни ПХБ в рыбах Охотского моря не превышали концентраций, обнаруженных в камбалах Атлантического океана (518 $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ липидов) и Балтийского моря (259 $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ липидов в Гданьской бухте; 373 $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ липидов в устье р. Висла) [15, 29], но значительно превосходили таковые в камбалах из Жёлтого (8 $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ липидов) и Берингова (15 $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ липидов) морей [10, 14]. Суммарный уровень ПХБ в камбалах Татарского пролива находился между показателями для рыб

из Гданьской бухты и из устья р. Висла (Балтийское море). В Японском море максимальные уровни ПХБ в рыбах были значительно выше, чем в Балтийском, Беринговом, Жёлтом морях и Атлантическом океане. Столь высокая разница средних концентраций СОЗ в камбалах между районами говорит о серьёзном антропогенном прессе на экосистему бух. Рифовая и региона в целом.

Выводы:

1. Исследована аккумуляция хлорорганических пестицидов и полихлорированных бифенилов в мышцах камбал из Татарского пролива, Японского и Охотского морей Дальнего Востока России. Средние концентрации Σ ДДТ, Σ ГХЦГ, Σ ХОП (Σ ДДТ+ Σ ГХЦГ) и Σ ПХБ в мышцах изученных камбал составили: в восточной части Охотского моря — (62 ± 89) , (50 ± 52) , (100 ± 125) и (92 ± 45) нг·г⁻¹ липидов; в южной части Охотского моря — (20 ± 17) , (36 ± 37) , (54 ± 41) и (99 ± 43) нг·г⁻¹ липидов; в Японском море — (40 ± 29) , (62 ± 36) , (102 ± 50) и (1616 ± 1177) нг·г⁻¹ липидов соответственно. В Татарском проливе средние уровни β -ГХЦГ, Σ ХОП (Σ ДДТ + β -ГХЦГ) и Σ ПХБ составили (221 ± 182) , (224 ± 180) и (455 ± 317) нг·г⁻¹ липидов соответственно.

2. Ксенобиотики не должны иметь фоновые концентрации в окружающей среде, однако при существующем глобальном фоне СОЗ уровни этих соединений в камбалах южной части Охотского моря (прикурильские воды), которая характеризуется отсутствием прямых источников загрязнения и активной гидродинамикой, могут быть приняты как фоновые.

3. Наибольшему антропогенному прессу подвержено Японское море, где концентрации ПХБ значительно превышают таковые как в дальневосточных морях России, так и в сравниваемых регионах мира в целом.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (соглашение № 18-14-00120).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Амирова З. К., Сперанская О. А. *Новые стойкие органические суперэкоотоксиканты и их влияние на здоровье человека* / под ред. О. Ю. Цитцер. Москва : Эко-Согласие, 2016. 170 с. [Amirova Z. K., Speranskaya O. A. *Novye stoikiye organicheskie superekotoksikanty i ikh vliyanie na zdorov'e cheloveka* / O. Yu. Tsittser (Ed.). Moscow : Eko-Soglasie, 2016, 170 p. (in Russ.)]
2. Ворожбит О. Ю., Даниловских И. А., Кузьмичева Н. Ю., Титова Н. Ю., Шашло Н. В. *Рыбная промышленность Дальнего Востока России: современное состояние, проблемы и перспективы конкурентоспособности* / под общ. науч. ред. О. Ю. Ворожбит. Владивосток : Изд-во ВГУЭС, 2016. 156 с. [Vorozhbit O. Yu., Danilovskikh I. A., Kuzmicheva N. Yu., Titova N. Yu., Shashlo N. V. *Rybnaya promyshlennost' Dal'nego Vostoka Rossii: sovremennoye sostoyaniye, problemy i perspektivy konkurentosposobnosti* / O. Yu. Vorozhbit (Ed.). Vladivostok : Izd-vo VGUES, 2016, 156 p. (in Russ.)]
3. *Доклад о состоянии окружающей среды в Камчатском крае в 2018 году*. Петропавловск-Камчатский : Министерство природных ресурсов и экологии Камчатского края, 2019. 395 с. [Doklad o sostoyanii okruzhayushchei sredy v Kamchatskom krae v 2018 godu. Petropavlovsk-Kamchatskii : Ministerstvo prirodnikh resursov i ekologii Kamchatskogo kraja, 2019, 395 p. (in Russ.)]
4. Зубцова И. Л. Размещение отходов на территории Сахалинской области // *Вологодские чтения*. 2008. № S. С. 109–118. [Zubtsova I. L. Razmeshchenie otkhodov na territorii Sakhalinskoi oblasti. *Vologdinskie chteniya*, 2008, no. S, pp. 109–118. (in Russ.)]
5. *Информационный отчет по объекту «Мониторинг Козельского полигона захоронения ядохимикатов и пестицидов»*. Елизово : ООО «Недра», 2018. 49 с. [Informatsionnyi otchet po ob'ektu "Monitoring Kozel'skogo poligona zakhoroneniya yadokhimikatov i pestitsidov". Elizovo : ООО "Nedra", 2018, 49 p. (in Russ.)]
6. Напазаков В. В., Чучукало В. И. Питание и пищевые отношения камбал в западной части Берингова моря в летне-осенний период // *Известия ТИНРО*. 2002. Т. 130. С. 595–617. [Napazakov V. V., Chuchukalo V. I. Pitaniye i pishhevyye otnosheniya kambal v zapadnoy chasti Beringova morya v letne-osenniy period // *Izvestiya TINRO*. 2002. T. 130. S. 595–617.]

- i pishchevye otnosheniya kambal v zapadnoi chasti Beringova morya v letne-osennii period. *Izvestiya TINRO*, 2002, vol. 130, pp. 595–617. (in Russ.)]
7. Постановление Правительства Сахалинской области. *О долгосрочной областной целевой программе «Отходы производства и потребления сахалинской области (2009–2015)»*. [Postanovlenie Pravitel'stva Sakhalinskoi oblasti. *O dolgosrochnoi oblastnoi tselevoi programme "Otkhody proizvodstva i potrebleniya Sakhalinskoi oblasti (2009–2015)"*. [Electronic resource]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/819065590> (accessed: 20.07.2019). (in Russ.)]
 8. Фадеев Н. С. *Справочник по биологии и промыслу рыб северной части Тихого океана*. Владивосток : ТИНРО-центр, 2005. 366 с. [Fadeev N. S. *Spravochnik po biologii i promyslu ryb severnoi chasti Tikhogo okeana*. Vladivostok : TINRO-tsentr, 2005, 366 p. (in Russ.)]
 9. Христофорова Н. К. *Дальний Восток России: природные условия, ресурсы, экологические проблемы*. Москва : Магистр, 2018. 830 с. [Khrstoforova N. K. *Dal'nii Vostok Rossii: prirodnye usloviya, resursy, ekologicheskie problemy*. Moscow : Magistr, 2018, 830 p. (in Russ.)]
 10. Byun G. H., Moon H. B., Choi J. H., Hwang J., Kang C. K. Biomagnification of persistent chlorinated and brominated contaminants in food web components of the Yellow Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, vol. 73, iss. 1, pp. 210–219. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.05.017>
 11. Drouillard K. G. Biomagnification. In: *Encyclopedia of Ecology* : 2nd edition. Vol. 1 / B. Fath (Ed.). [London] : Elsevier, 2008, pp. 353–358. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63768-0.00377-2>
 12. Grung M., Lin Y., Zhang H., Steen A. O., Huang J., Zhang G., Larssen T. Pesticide levels and environmental risk in aquatic environments in China – A review. *Environment International*, 2015, vol. 81, pp. 87–97. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.04.013>
 13. Guerra R., Pasteris A., Righi S., Ok G. Historical record of polychlorinated biphenyls (PCBs) in the continental shelf of the Korea Strait. *Chemosphere*, 2019, vol. 237, pp. 124438. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124438>
 14. Hartwell S. I., Apeti A. D., Pait A. S., Radenbaugh T., Britton R. Benthic habitat contaminant status and sediment toxicity in Bristol Bay, Alaska. *Regional Studies in Marine Science*, 2018, vol. 24, pp. 343–354. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2018.09.009>
 15. Kopko O., Dabrowska H. Variability of biological indices, biomarkers, and organochlorine contaminants in flounder (*Platichthys flesus*) in the Gulf of Gdańsk, southern Baltic Sea. *Chemosphere*, 2018, vol. 194, pp. 701–713. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.12.039>
 16. Lukyanova O. N., Tsygankov V. Yu., Boyarova M. D., Khrstoforova N. K. Bioaccumulation of HCHs and DDTs in organs of Pacific salmon (genus *Oncorhynchus*) from the Sea of Okhotsk and the Bering Sea. *Chemosphere*, 2016, vol. 157, pp. 174–180. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.05.039>
 17. Lukyanova O. N., Tsygankov V. Yu., Boyarova M. D. Organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in the Bering flounder (*Hippoglossoides robustus*) from the Sea of Okhotsk. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, vol. 137, pp. 152–156. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.10.017>
 18. Lukyanova O. N., Tsygankov V. Yu., Boyarova M. D., Khrstoforova N. K. Pacific salmon as a vector in the transfer of persistent organic pollutants in the Ocean. *Journal of Ichthyology*, 2015, vol. 55, no. 3, pp. 425–429. <https://doi.org/10.1134/s0032945215030078>
 19. Reddy A. V. B., Moniruzzaman M., Aminabhavi T. M. Polychlorinated biphenyls (PCBs) in the environment: Recent updates on sampling, pretreatment, cleanup technologies and their analysis. *Chemical Engineering Journal*, 2019, vol. 358, pp. 1186–1207. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.09.205>
 20. Trinh M. M., Kuo C. H., Chang M. B. Characterization of PCDD/Fs and dl-PCBs emission from combustion of PCB-containing oil in a fluidized-bed incinerator. *Chemosphere*, 2019, vol. 225, pp. 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.013>
 21. Tripathi V., Edrisi S. A., Chaurasia R., Pandey K. K., Dinesh D., Srivastava R., Srivastava P., Abhilash P. C. Restoring HCHs polluted land as one of the priority activities during the UN-International Decade on Ecosystem Restoration (2021–2030): A call for global action. *Science Total Environment*, 2019, vol. 689, pp. 1304–1315. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.444>
 22. Tsygankov V. Yu. Organochlorine pesticides in marine ecosystems of the Far Eastern seas of Russia (2000–2017). *Water Research*, 2019, vol. 161, pp. 43–53. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.05.103>

23. Tsygankov V. Yu., Boyarova M. D. Sample preparation method for the determination of organochlorine pesticides in aquatic organisms by gas chromatography. *Achievements in the Life Sciences*, 2015, vol. 9, no. 1, pp. 65–68. <https://doi.org/10.1016/j.als.2015.05.010>
24. Tsygankov V. Yu., Boyarova M. D., Lukyanova O. N. Bioaccumulation of organochlorine pesticides (OCPs) in the northern fulmar (*Fulmarus glacialis*) from the Sea of Okhotsk. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, vol. 110, iss. 1, pp. 82–85. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.06.084>
25. Tsygankov V. Yu., Boyarova M. D., Lukyanova O. N. Bioaccumulation of persistent organochlorine pesticides (OCPs) by gray whale and Pacific walrus from the western part of the Bering Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, vol. 99, iss. 1–2, pp. 235–239. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.07.020>
26. Tsygankov V. Yu., Boyarova M. D., Lukyanova O. N., Khristoforova N. K. Bioindicators of organochlorine pesticides in the Sea of Okhotsk and the western Bering Sea. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2017, vol. 73, no. 2, pp. 176–184. <https://doi.org/10.1007/s00244-017-0380-2>
27. Tsygankov V. Yu., Lukyanova O. N., Boyarova M. D. Organochlorine pesticide accumulation in seabirds and marine mammals from the Northwest Pacific. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, vol. 128, pp. 208–213. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.01.027>
28. Tsygankov V. Yu., Lukyanova O. N., Khristoforova N. K. The Sea of Okhotsk and the Bering Sea as the region of natural aquaculture: Organochlorine pesticides in Pacific salmon. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, vol. 113, iss. 1–2, pp. 69–74. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.08.060>
29. Waszak I., Dabrowska H., Komar-Szymczak K. Comparison of common persistent organic pollutants (POPs) in flounder (*Platichthys flesus*) from the Vistula (Poland) and Douro (Portugal) River estuaries. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, vol. 81, iss. 1, pp. 225–233. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.01.044>

**ORGANOCHLORINE COMPOUNDS
IN FLOUNDERS OF GENUS *HIPPOGLOSSOIDES* GOTTSCHÉ, 1835
FROM THE FAR EASTERN SEAS OF RUSSIA**

**M. M. Donets¹, V. Yu. Tsygankov^{1,2}, M. D. Boyarova¹,
A. N. Gumovsky¹, Yu. P. Gumovskaya¹, and N. K. Khristoforova^{2,3}**

¹School of Biomedicine, Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

²School of Natural Sciences, Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

³Pacific Institute of Geography FEB RAS, Vladivostok, Russian Federation

E-mail: maksim.donecz@mail.ru

Organochlorine pesticides (OCPs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) are global superecotoxicants belonging to a group of persistent organic pollutants (POPs). Fish and seafood are an important source of high-grade protein and polyunsaturated fatty acids, especially for residents of coastal areas. Up to 90% of all pollutants enter the human body through food. Final depot of POPs in environment is marine ecosystems; therefore, POPs can accumulate in various objects of marine fisheries. The paper presents information on the concentrations of OCPs [HCH isomers (α -, β -, γ -), as well as DDT and its metabolites (DDD and DDE)], and polychlorinated biphenyls (PCBs) in muscles of flounders of genus *Hippoglossoides* Gottsche, 1835 from the Far Eastern seas of Russia (the Sea of Okhotsk, the Tatar Strait, and the Sea of Japan). Lipids were extracted from fish tissue samples with a mixture of hexane and acetone, followed by destruction of fatty components by concentrated sulfuric acid. OCPs and PCBs were separated by column chromatography with polar and non-polar solvents. Xenobiotics were quantified by gas chromatography – mass spectrometry. To assess quality of this methodology, a standard addition method was used. The average reproducibility of analyte concentrations varied 94.6 to 103.7 %, and it indicates reliability of the data obtained as well as effectiveness of methods applied. Average concentrations of Σ DDT, Σ HCH, Σ OCP (Σ DDT + Σ HCH), and Σ PCB were: (62 \pm 89), (50 \pm 52), (100 \pm 125), and (92 \pm 45) ng·g⁻¹ of lipids in the samples from the eastern part of the Sea of Okhotsk; (20 \pm 17), (36 \pm 37), (54 \pm 41), and (99 \pm 43) ng·g⁻¹ of lipids from the southern part of the Sea of Okhotsk; (40 \pm 29), (62 \pm 36), (102 \pm 50), and (1616 \pm 1177) ng·g⁻¹ of lipids from the Sea of Japan, respectively. In the samples from the Tatar Strait, the average levels of Σ HCH, Σ OCP, and Σ PCB were (221 \pm 182), (224 \pm 180),

and (455 ± 317) ng·g⁻¹ of lipids, respectively. DDT was detected in three samples. In the flounders from the eastern part of the Sea of Okhotsk, the highest concentrations of DDT and average concentrations of HCH were recorded, which may be due to the location of a “repository” of pesticides on the Kamchatka Peninsula, where OCPs are buried. The entrance of PCBs into the waters of the southern part of the Sea of Okhotsk can be associated both with intensive shipping and effluents from landfills that carry residual amounts of PCBs into the ecosystem. The southern part of the Sea of Okhotsk is the cleanest of the areas studied and is characterized by the lowest content of DDT, HCH, and PCB in organisms. DDT was practically absent in the flounders from the Nevelsky Bay (the Tatar Strait). At the same time, they showed the highest level of HCH, represented only by β -isomer, which indicates a prolonged circulation of the toxicant in the ecosystem. According to the decree of the Government of the Sakhalin Region, on the territory of Sakhalin there are landfills for out-of-use or banned pesticides; storage of them was performed (at the time of the decree entering the force) with violations that could lead to serious environmental pollution. Most likely, they became the source of pollution of the Tatar Strait. Another source of HCH pollution is currents that carry the waters of the Sea of Japan through the Nevelsky Bay into the Sea of Okhotsk. High levels of PCBs in the waters of the bay may result from intensive shipping and possible impact of household waste dumps on the Sakhalin Island. Flounders from the Sea of Japan are characterized by the highest POPs pollution. The entrance of OCPs into the sea may be due to surface runoffs, river flows, storage leaks of pesticides banned for use, and atmospheric transport from Asian countries where the use of some OCPs is still permitted. The determined levels of PCBs are an order of magnitude higher than those in the flounders from the Sea of Okhotsk and the Tatar Strait, which may be due to active shipping in Sea of Japan waters, influence of operating oil and coal ports in the city of Nakhodka, as well as local pollution of the coastal zone (so called wild beaches). Thus, we have studied the accumulation of organochlorine pesticides (HCH and DDT) and polychlorinated biphenyls in the muscles of flounders from the Far Eastern seas of Russia. With the existing global background of POPs formed on the planet, the levels of these compounds in the flounders of the southern part of the Sea of Okhotsk can be taken as background ones. The Sea of Japan is subject to the greatest anthropogenic pressure, and PCB concentrations are significantly higher in this area than in the Far Eastern seas of Russia and in the compared regions of the world as a whole.

Keywords: DDT, HCH, PCB, flounder, genus *Hippoglossoides*, Far Eastern seas of Russia

УДК 581.526.325.3:577.34(262.5)

**КОЛИЧЕСТВЕННАЯ СВЯЗЬ
ИНТЕНСИВНОСТИ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ
И СРЕДНЕСУТОЧНОЙ ВЕЛИЧИНЫ НАСЫЩЕНИЯ
ФОТОСИНТЕЗА ФИТОПЛАНКТОНА ПО СВЕТУ
ДЛЯ ГЛУБОКОВОДНОЙ ЧАСТИ ЧЁРНОГО МОРЯ**

© 2020 г. **И. В. Ковалёва**

Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»,
Севастополь, Российская Федерация
E-mail: ila.82@mail.ru

Поступила в редакцию 29.08.2019; после доработки 26.12.2019;
принята к публикации 27.03.2020; опубликована онлайн 31.03.2020.

По данным экспедиционных исследований, проведённых в Чёрном море в 1987–1993 гг., установлена линейная зависимость между плотностью светового потока, достигающего поверхности моря (E_0), и началом светового насыщения фотосинтеза фитопланктона ($E_{n\text{opt}}$). Для расчётов использованы измерения скорости фотосинтеза фитопланктона, полученные радиоуглеродным методом. Уравнение связи между указанными величинами представлено впервые для Чёрного моря. $E_{n\text{opt}}$ — среднесуточная, оптимальная величина насыщения фотосинтеза по свету. Параметры кривой фотосинтез — свет, определяемые в короткопериодных экспозициях при постоянном освещении, отличаются от параметров, полученных в длительных опытах в условиях переменного освещения. Это обусловлено разным действием интенсивности и дозы облучения на скорость фотосинтеза фитопланктона. Величины фотосинтетических параметров за определённое время интегрируются в единственное значение, которое является оптимумом за весь наблюдаемый период. В работе проведена аппроксимация интегрированных суточных данных отдельно за сезоны и в целом за 1987–1993 гг. С помощью статистической обработки данных среднесуточных значений интенсивности солнечной радиации, падающей на поверхность моря, тангенса угла наклона кривой фотосинтез — свет и величины максимальной скорости фотосинтеза определена аппроксимация для функциональной зависимости $E_{n\text{opt}}$ от E_0 . Уравнение с высокой достоверностью описывает изменение среднесуточной величины светового насыщения фотосинтеза в Чёрном море в различные сезоны года, оно применимо в диапазоне освещённостей от 3 до 75 моль квантов·м⁻²·сут⁻¹. Эта зависимость включает легко доступный для измерения параметр и может использоваться при анализе физиологических характеристик фитопланктона и расчёте интегральной продуктивности фитопланктона в эвфотическом слое как по спутниковым наблюдениям, так и по экспедиционным данным.

Ключевые слова: фитопланктон, световое насыщение фотосинтеза, скорость фотосинтеза, фотосинтетически активная радиация, глубоководная часть Чёрного моря

Известно, что с увеличением интенсивности падающего света возрастает скорость фотосинтеза фитопланктона. До некоторых величин фотосинтетически активной радиации она растёт линейно; затем наступает насыщение, и скорость фотосинтеза становится постоянной. Дальнейшее повышение плотности светового потока на единицу поверхности приводит к ингибированию фотосинтеза, которое может быть обратимым, а при экстремально высокой освещённости — необратимым.

При моделировании зависимости фотосинтез — свет важной физиологической характеристикой, показывающей величину освещённости, при которой наблюдается максимальная скорость фотосинтеза, является величина насыщения фотосинтеза по свету (E_n). В исследованиях [9, 14, 18] продемонстрировано, что параметры фотосинтез — свет в короткопериодных экспозициях при постоянном освещении не будут эквивалентны параметрам в случаях, если данные получены в длительных опытах в условиях переменного солнечного освещения. Эти различия часто возникают из-за разного действия интенсивности и дозы облучения на скорость фотосинтеза фитопланктона. Динамика фотосинтеза в течение суток или дня интегрируется в единственное значение, являющееся оптимумом за весь наблюдаемый период.

В модели для расчёта первичной продукции фитопланктона, как правило, входят уравнения, в которые включены фотосинтетические параметры: максимальная скорость фотосинтеза, эффективность фотосинтеза, величина светового насыщения. В зависимости от типа модели для расчёта интегральной первичной продукции используют разные типы параметров [в частности, величины светового насыщения фотосинтеза при постоянном (E_n) и при переменном освещении ($E_{n\text{opt}}$)]. Особого внимания заслуживает среднесуточная, или оптимальная, величина насыщения фотосинтеза по свету. Обычно её значения не определяют путём прямых измерений в экспедиционных исследованиях или при дистанционных наблюдениях, однако именно её удобно применять при расчёте интегральной первичной продукции за длительный период или при оценке профилей фотосинтеза в столбе воды.

Цель исследований — определить связь между оптимальной величиной насыщения фотосинтеза фитопланктона по свету и светом, падающим на поверхность Чёрного моря.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В сформированную для исследования базу данных вошли материалы четырёх экспедиций, проведённых с 1987 по 1993 г. в Чёрном море (табл. 1). Сведения получены преимущественно д. б. н. З. З. Финенко (ФИЦ ИнБЮМ) [6, 7] и дополнены данными из литературы [1].

Таблица 1. Годы проведения экспедиций и количество измерений, включённых в базу данных
Table 1. Years of the expeditions and number of measurements included in the database

Год	Месяц	Количество измерений	Год	Месяц	Количество измерений
1987	12	12	1989	4, 5, 6	52
1988	1	10	1993	4	14
1988	3	48			

База данных содержит информацию о времени (год, месяц, день) и месте (долгота, широта, глубина) отбора проб. Измерения проводили в акватории от 41° до 46° с. ш. и от 28° до 35° в. д. для глубин эвфотической зоны (12–100 м в различные месяцы на отдельных станциях). Также в базе представлены измеренные параметры:

- интенсивность солнечной радиации, падающая на поверхность моря, E_0 (моль квантов·м⁻²·сут⁻¹);
- величина максимальной скорости фотосинтеза, P_{opt}^B (мгС·мгХл⁻¹·сут⁻¹);
- тангенс угла наклона кривой фотосинтез — свет, отражающий эффективность фотосинтеза, α (мгС·мгХл⁻¹·(моль квантов·м⁻²)⁻¹).

Оптимальная величина насыщения фотосинтеза по свету, $E_{n\text{opt}}$ (моль квантов·м⁻²·сут⁻¹), рассчитана как отношение: $E_{n\text{opt}} = P_{\text{opt}}^B / \alpha$.

Измерения скорости фотосинтеза фитопланктона проводили радиоуглеродным методом в течение первой или второй половины светового дня [6]. Для получения суточной продукции значения увеличивали в два раза, поскольку скорость фотосинтеза фитопланктона является функцией света, а поток суммарной солнечной радиации в ясные дни примерно одинаков в течение первой и второй половины дня. Слянки заполняли водой с глубин, куда проникает от 0,5 до 100 % поверхностного света. Затем в них добавляли радиоактивный углерод и экспонировали их на палубе судна при естественном освещении, ослабленном нейтральными светофильтрами до световых условий, зарегистрированных на глубинах отбора проб. Освещённость измеряли люксметром Ю116 от рассвета до заката солнца с интервалом один час. Величины в люксах были переведены в энергетические единицы ($1 \text{ клк} = 20 \text{ мкЭ} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$; $1 \text{ моль квантов} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} = 10^6 \text{ мкЭ} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) [5].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для всех исследуемых параметров выборка за каждый месяц 1987–1993 гг. была осреднена. Измеренные значения E_0 имеют высокую вариабельность, особенно летом и весной (рис. 1), поэтому для расчётов использовали интегральные среднесуточные величины, определённые для каждого конкретного месяца в рассматриваемый период.

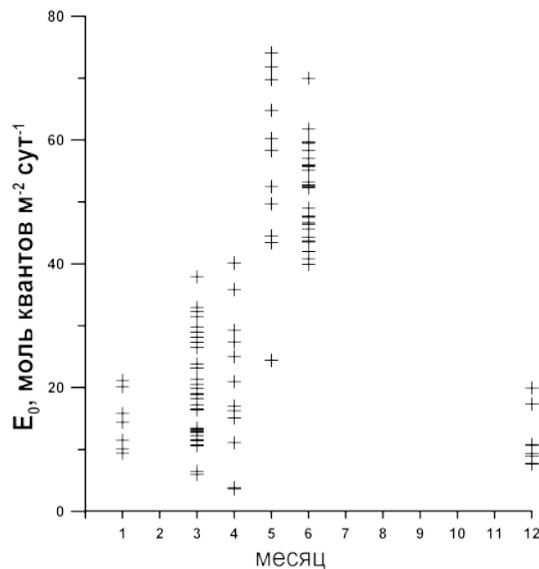


Рис. 1. Изменение интенсивности солнечной радиации, падающей на поверхность моря (E_0), в различные месяцы 1987–1993 гг. в Чёрном море

Fig. 1. Variability of solar radiation intensity incident on the sea surface (E_0) in different months of 1987–1993 in the Black Sea

Аппроксимацию суточных данных проводили по сезонам и в целом за 1987–1993 гг. Интегрирование среднесуточных значений интенсивности солнечной радиации, падающей на поверхность моря, тангенса угла наклона кривой фотосинтез — свет и величины максимальной скорости фотосинтеза за каждый месяц в отдельный год позволило выявить наилучшую аппроксимацию для функциональной зависимости величины $E_{n \text{ opt}}$ от E_0 (рис. 2).

В результате анализа получено линейное уравнение для оптимальной величины насыщения фотосинтеза по свету при отсутствии ингибирования для глубоководной части Чёрного моря. Общее уравнение, связывающее среднесуточные значения $E_{n \text{ opt}}$ и E_0 , имеет вид:

$$E_{n \text{ opt}} = a \times E_0 + b, \quad (1)$$

где $E_{n \text{ opt}}$ измеряется в моль квантов $\cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$;

a и b — постоянные коэффициенты ($a = 0,12$; $b = 1,92$).

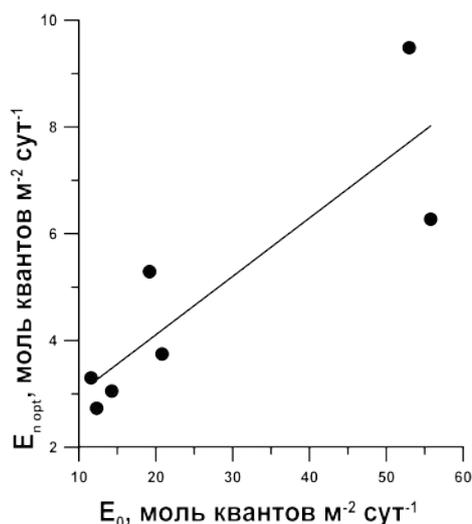


Рис. 2. Изменение оптимальной величины насыщения фотосинтеза по свету ($E_{n \text{opt}}$) в зависимости от интенсивности солнечной радиации, падающей на поверхность моря (E_0), в 1987–1993 гг. в Чёрном море

Fig. 2. Variability of optimal value of photosynthesis light saturation ($E_{n \text{opt}}$) depending on intensity of the solar radiation incident on the sea surface (E_0) in 1987–1993 in the Black Sea

Уравнение (1) достоверно при уровне значимости $p < 0,0001$, $r^2 = 0,76$. Величина $E_{n \text{opt}}$ определена для эвфотической зоны. Найденная зависимость применима в диапазоне освещённостей от 3 до 75 моль квантов $\cdot m^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$. Уравнение (1), полученное по эмпирическим данным, носит региональный характер; оно рассчитано впервые для глубоководной части Чёрного моря.

ОБСУЖДЕНИЕ

В наших исследованиях использованы эмпирические данные величин оптимальной максимальной скорости фотосинтеза и интегрированного за сутки тангенса угла наклона кривой фотосинтез — свет за 1987–1993 гг. [1, 6, 7]. Регулярных измерений указанных параметров, которые можно было бы применять в моделировании в Чёрном море для других лет, к сожалению, не проводили. Во многих работах приведена оценка величины насыщения фотосинтеза по свету. Эту характеристику использовали при моделировании скорости фотосинтеза и интегральной первичной продукции фитопланктона [2, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17]. Параметры E_n или $E_{n \text{opt}}$ определяли обычно эмпирически для различных районов Мирового океана. Подробный анализ отличия этих двух параметров был сделан М. Беренфельдом и П. Фальковским [9]. Эмпирическим путём ими определена связь между E_0 и оптимальной величиной насыщения фотосинтеза по свету E_n^* при отсутствии ингибирования; получена линейная зависимость. Эту функцию использовали при моделировании интегральной первичной продукции для анализа оптических глубин и вертикальных профилей скорости фотосинтеза [3], так как в результате получались данные, сходные с черноморскими [7]. Между тем для Чёрного моря не было получено математической зависимости, позволяющей определять $E_{n \text{opt}}$, используя один легко доступный для измерения параметр, такой как E_0 . Ранее нами рассмотрена величина максимального значения светонасыщения фотосинтеза; по модельным расчётам проведена оценка наибольшего влияния факторов на E_n [4]. В итоге получена множественная регрессия для E_n и определено, что максимальные значения E_n наблюдаются при низких концентрациях хлорофилла и высоких значениях R_m^B , а минимальные — при высокой концентрации хлорофилла и низкой фотосинтетической активности. Указано, что значения E_n в большей степени зависят от максимальной интенсивности фотосинтеза, чем от концентрации хлорофилла. E_n отличается от $E_{n \text{opt}}$, но такое влияние факторов качественно отражает и изменение $E_{n \text{opt}}$,

особенно если учтена вертикальная неоднородность распределения фитопланктона в столбе воды. Нами найдена линейная зависимость $E_{n\text{opt}}$ от E_0 . Для полученного эмпирически уравнения (1) допускается вертикальная однородность распределения фитопланктона. Соответственно, профиль фотосинтеза в столбе воды без фотоингибирования представлен на поверхности областью светового насыщения, а на глубине — областью светового ограничения. Такое изменение профиля фотосинтеза обычно наблюдается в глубоководной части Чёрного моря [7, 8].

Заключение. По результатам анализа данных экспедиционных исследований, проведённых в Чёрном море в 1987–1993 гг., получена количественная зависимость между оптимальной величиной светового насыщения фотосинтеза фитопланктона и величиной среднесуточного света, падающего на поверхность моря. Это соотношение важно для ряда современных исследований: оптимальная величина насыщения фотосинтеза по свету является одной из фундаментальных характеристик, применяемых при моделировании продуктивности фитопланктона. Впервые для Чёрного моря получено уравнение, по которому можно определять $E_{n\text{opt}}$ в поверхностном слое, имея данные измерений E_0 . Это особенно удобно при использовании большого массива данных спутниковых наблюдений.

Работа выполнена частично в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Функциональные, метаболические и токсикологические аспекты существования гидробионтов и их популяций в биотопах с различным физико-химическим режимом» (№ гос. регистрации АААА-А18-118021490093-4) и частично — по проекту президиума РАН «Влияние физико-химических процессов на смену видового состава и продуктивность морского фитопланктона» (№ гос. регистрации АААА-А18-118020790209-9).

Благодарность. Автор благодарит д. б. н. З. З. Финенко за предоставленные экспериментальные данные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ведерников В. И. Особенности распределения первичной продукции и хлорофилла в Чёрном море в весенний и летний периоды // *Изменчивость экосистемы Чёрного моря: естественные и антропогенные факторы*. Москва : Наука, 1991. С. 128–147. [Vedernikov V. I. Osobennosti raspredeleniya pervichnoi produktsii i khlorofilla v Chernom more v vesennii i letnii periody. *Izmenchivost' ekosistemy Chernogo morya: estestvennye i antropogennye faktory*. Moscow : Nauka, 1991, pp. 128–147. (in Russ.)]
2. Демидов А. Б., Шеберстов С. В., Гагарин В. И. Межгодовая изменчивость ледового покрова и первичной продукции Карского моря // *Океанология*. 2018. Т. 58, № 4. С. 578–592. [Demidov A. B., Sheberstov S. V., Gagarin V. I. Interannual variability of the ice cover and primary production of the Kara Sea. *Okeanologiya*, 2018, vol. 58, no. 4, pp. 578–592. (in Russ.)]. <http://doi.org/10.1134/S0030157418040019>
3. Ковалева И. В. *Моделирование сезонной и многолетней изменчивости первичной продукции фитопланктона в Чёрном море* : дис. ... канд. биол. наук : 03.02.10. Севастополь, 2017. 147 с. [Kovalyova I. V. *Modelirovanie sezonnoi i mnogoletnei izmenchivosti pervichnoi produktsii fitoplanktona v Chernom more*. [dissertation]. Sevastopol, 2017, 147 p. (in Russ.)]
4. Ковалёва И. В. Связь первичной продукции с интенсивностью солнечной радиации // *Экология моря*. 2006. Вып. 72. С. 77–86. [Kovalyova I. V. Relationship of primary production with intensity of sun irradiance. *Ekologiya morya*, 2006, iss. 72, pp. 77–86. (in Russ.)]
5. Парсонс Т. Р., Такахашаи М., Харгрейв Б. *Биологическая океанография* : пер. с англ. Москва : Лёгкая и пищевая промышленность, 1982. 432 с. [Parsons T. R., Takahashi M., Hargrave B. *Biological Oceanography*. Moscow : Legkaya i pishchevaya promyshlennost', 1982, 432 p. (in Russ.)]
6. Финенко З. З., Крупаткина Д. К. Первичная продукция в Чёрном море в зимне-весенний период // *Океанология*. 1993. Т. 33, № 1. С. 97–104. [Finenko Z. Z., Krupatkina D. K. Primary production in the Black Sea in the winter-spring period. *Okeanologiya*, 1993, vol. 33, no. 1, pp. 97–104. (in Russ.)]
7. Финенко З. З., Чурилова Т. Я., Сосик Х. М. Вертикальное распределение фотосинтетических характеристик фитопланктона в Чёрном море

- // *Океанология*. 2004. Т. 44, № 2. С. 222–237. [Finenko Z. Z., Churilova T. Ya., Sosik H. M. Vertical distribution of phytoplankton photosynthetic characteristics in the Black Sea. *Okeanologiya*, 2004, vol. 44, no. 2, pp. 222–237. (in Russ.)]
8. Финенко З. З., Чурилова Т. Я., Сосик Х. М., Бастюрк О. Изменчивость фотосинтетических параметров фитопланктона в поверхностном слое Чёрного моря // *Океанология*. 2002. Т. 42, № 1. С. 60–75. [Finenko Z. Z., Churilova T. Ya., Sosik H. M., Basturk O. Variability of photosynthetic parameters of the surface phytoplankton in the Black Sea. *Okeanologiya*, 2002, vol. 42, no. 1, pp. 60–75. (in Russ.)]
 9. Behrenfeld M., Falkowski P. A consumer's guide to phytoplankton primary productivity models. *Limnology and Oceanography*, 1997, vol. 42, no. 7, pp. 1479–1491. <https://doi.org/10.4319/lo.1997.42.7.1479>
 10. Blackman F. F. Optimal and limiting factors. *Annals of Botany*, 1905, vol. 19, pp. 281–293.
 11. Parker R. A. Empirical functions relating metabolic processes in aquatic systems to environmental variables. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 1974, vol. 31, no. 9, pp. 1550–1552. <https://doi.org/10.1139/f74-192>
 12. Platt T., Sathyendranath S. Estimators of primary production for interpretation of remotely sensed data on ocean color. *Journal Geophysical Research*, 1993, vol. 98, iss. C8, pp. 14561–14576. <https://doi.org/10.1029/93JC01001>
 13. Regaudie-de-Gioux A., Huete-Ortega M., Sobrinoc C., Lopez-Sandoval D. C., Gonzaleze N., Fernandez-Carrerac A., Vidalf M., Maranonc E., Cermenog P., Latasah M., Agustid S., Duarte C. M. Multi-model remote sensing assessment of primary production in the subtropical gyres. *Journal of Marine Systems*, 2019, vol. 196, pp. 97–106. <http://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2019.03.007>
 14. Rodhe W., Vollenweider R. A., Nauwerk A. The primary production and standing crop of phytoplankton. In: *Perspectives in Marine Biology / A. A. Buzzati-Travenso (Ed.)*. Berkeley : University of California Press, 1958, pp. 299–322.
 15. Smith E. M. Photosynthesis in relation to light and carbon dioxide. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1936, vol. 22, no. 8, pp. 504–511. <http://doi.org/10.1073/pnas.22.8.504>
 16. Smith R. C., Baker K. S. The bio-optical state of ocean waters and remote sensing. *Limnology and Oceanography*, 1978, vol. 23, iss. 2, pp. 247–259. <https://doi.org/10.4319/lo.1978.23.2.0247>
 17. Talling J. E. The phytoplankton population as a compound photosynthetic system. *New Phytologist*, 1957, vol. 56, iss. 2, pp. 133–149. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1957.tb06962.x>
 18. Vollenweider R. A. Models for calculating integral photosynthesis and some implications regarding structural properties of the community metabolism of aquatic systems. In: *Prediction and Measurement of Photosynthetic Productivity* : proceedings of the IBP/PP technical meeting, Třeboň, 14–21 Sept., 1969. Wageningen : Pudoc, 1970, pp. 455–472.

**QUANTITATIVE RELATIONSHIP
BETWEEN SOLAR RADIATION INTENSITY
AND AVERAGE DAILY VALUE OF PHOTOSYNTHESIS LIGHT SATURATION
FOR PHYTOPLANKTON
IN THE DEEP-WATER AREA OF THE BLACK SEA**

I. V. Kovalyova

A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation
E-mail: ila.82@mail.ru

According to data obtained during expeditions in the Black Sea (1987–1993), linear relationship between the light flux density incident on the sea surface (E_0) and the starting point of photosynthesis light saturation ($E_{n\text{opt}}$) is revealed. For calculations, measurements of phytoplankton photosynthesis rate obtained by the radiocarbon method were used. The equation of the relationship between the values reported is presented for the first time for the Black Sea. $E_{n\text{opt}}$ is the average daily, optimal value of photosynthesis light saturation. The parameters of photosynthesis – light curve, determined in short-period exposures under

constant illumination, differ from the parameters obtained in long-term experiments under conditions of variable illumination. This is due to different effects of the intensity and dose on the phytoplankton photosynthesis rate. The values of photosynthetic parameters for a certain time are integrated into a single value which is the optimum for the entire period observed. The approximation of daily data integrated is carried out both separately for seasons and in general for the period of 1987–1993. Using statistical processing of data of average daily values of the intensity of solar radiation incident on the sea surface, slope of the photosynthesis – light curve, and maximum photosynthesis rate, the approximation is determined for the functional dependence of $E_{n_{opt}}$ on E_0 . The equation is applicable in the range of light intensity 3 to 75 mol quanta·m⁻²·day⁻¹. It describes with high reliability a change of average daily value of photosynthesis light saturation in the Black Sea during different seasons of the year. The equation includes a parameter easily accessible for measurement. It can be used in analysis of physiological characteristics of phytoplankton and calculation of integrated phytoplankton productivity in euphotic layer with using both satellite and expedition data.

Keywords: phytoplankton, photosynthesis light saturation, photosynthesis rate, photosynthetically active radiation, deep-water area of the Black Sea

УДК 576.895.121:597.2/.5(262.5)

ЦЕСТОДЫ РЫБ АКВАТОРИИ КАРАДАГСКОГО ПРИРОДНОГО ЗАПОВЕДНИКА И ПРИЛЕГАЮЩИХ РАЙОНОВ ЧЁРНОГО МОРЯ

© 2020 г. Т. А. Полякова

Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»,
Севастополь, Российская Федерация
E-mail: polyakova-acant@yandex.ru

Поступила в редакцию 08.07.2019; после доработки 04.10.2019;
принята к публикации 27.03.2020; опубликована онлайн 31.03.2020.

Данные о паразитах морских рыб акватории Карадага появились в первой половине XX века. К началу XXI столетия сведения о фауне цестод этого района Чёрного моря включали информацию о 19 видах, зарегистрированных у 24 видов рыб. Между тем за последнее десятилетие таксономия этого класса гельминтов претерпела существенные изменения, в свете чего региональные фауны нуждаются в ревизии. Цель работы — провести ревизию видового состава цестод рыб акватории Карадагского природного заповедника и прилегающих районов на основе новых сборов и в соответствии с современной систематикой класса Cestoda. Материалом для исследования послужили как коллекции цестод, собранные сотрудниками отдела экологической паразитологии ФИЦ ИмБЮМ в районе Карадагского заповедника в разные годы, так и собственные сборы от 1754 экз. скатов и костистых рыб 53 видов (2005–2018). Район исследования — прибрежная акватория Чёрного моря от м. Меганом до пос. Орджоникидзе (Юго-Восточный Крым), в том числе различные морские биотопы Карадагского заповедника. Ваучерные препараты всех видов цестод, использованных в данном исследовании, депонированы в подколлекции морских паразитов коллекции гидробионтов Мирового океана ФИЦ ИмБЮМ. У 17 видов рыб обнаружено 20 видов цестод. Впервые в районе исследования у ската *Dasyatis pastinaca* зарегистрированы цестоды 9 видов: *Progrillotia dasyatidis*, *Parachristianella trygonis*, *Dolfusiella aculeata*, *Rhinebothrium walga*, *Caulobothrium* sp., *Rhabdotobothrium* sp., *Acanthobothrium* sp. 5, 7 и Anthocephaliidae gen. sp. 2. У другого вида ската, *Raja clavata*, найдены цестоды, относящиеся, очевидно, к новым видам *Acanthobothrium* sp. 1, 2, 4. Из 19 ранее известных в районе Карадага видов подтверждены находки только 8 половозрелых цестод: «*Bothriocephalus scorpii*», «*B. gregarius*», *Echinobothrium typus*, *Grillotia erinaceus*, *Prochristianella papillifer*, *Echeneibothrium variabile*, *Cairaeanthus ruhnei* и *C. healyae*. Кроме того, у костистых рыб обнаружены личинки сборного вида «*Scolex pleuronectis*». Личинки цестоды *Progrillotia dasyatidis* найдены впервые в акватории заповедника у 8 видов костистых рыб, что расширяет сведения об участниках жизненного цикла этого гельминта. У рыб Карадага не обнаружены ранее регистрировавшиеся в районе 4 вида цестод: *Hepatoxylon trichiurid* larvae, *Nybelinia lingualis* larvae, *Tetrarhynchobothrium tenuicolle* и *Anthobothrium cornucopia*. Кроме того, недавно проведённый анализ встречаемости и синонимии видов отрядов Трупанорхунча и Ончоротеоцефалидея выявил, что ранее выполненное определение *Grillotia (Christianella) minuta* и *Acanthobothrium coronatum* у эласмобранхий и *Tentacularia* sp. larvae — у костистых рыб Чёрного моря ошибочно ввиду отсутствия в этом водоёме их специфических окончательных хозяев. С другой стороны, среди найденных *Acanthobothrium* spp. у скатов *D. pastinaca* и *R. clavata* в районе Карадага мы идентифицировали 7 морфологически различных новых таксонов видового уровня. Обнаруженные цестоды относились к 6 отрядам: Bothriocephaliidea, Diphyllidea, Трупанорхунча, «Tetraphyllidea» relics, Rhinebothriidea и Onchoproteocephaliidea. Наибольшее видовое богатство цестод у обоих видов скатов отмечено среди представителей отрядов Трупанорхунча и Ончоротеоцефалидея (по 5 видов), наименьшее — среди Diphyllidea

и «Tetraphyllidea» relics (по 1 виду в каждом). Таким образом, фауна цестод, паразитирующих у рыб в районе Карадага, дополнена 12 видами, 8 из которых являются, очевидно, представителями новых таксонов.

Ключевые слова: цестоды, рыбы, фауна, систематика, заповедник, Крым, Чёрное море

На территории Крыма расположено большое количество охраняемых природных объектов — от памятников природы местного значения до заповедников общегосударственного и международного значения. Фауну паразитов рыб акватории Карадагского заповедника исследуют с начала XX века, и на сегодня она является наиболее изученной среди фаун заповедных акваторий Крыма [5].

Первые данные о фауне цестод рыб акватории Карадага опубликованы в 1931 г. [4]. В работе отмечено 3 вида цестод, из них 2 — личинки, определённые только до рода. После почти 30-летнего перерыва изучение цестод рыб акватории возобновилось [8, 9, 10, 11, 12, 13, 18]. В большинстве работ, посвящённых цестодам рыб Карадага, указан лишь факт регистрации того или иного вида гельминта у определённого хозяина. Только в одной публикации [13] приведены краткое описание и схематичные рисунки найденных половозрелых видов цестод от ската-хвостокола *Dasyatis pastinaca* (L., 1758) и колючего ската *Raja clavata* L., 1758, а также костистых рыб — камбалы калкан *Scophthalmus maeoticus* (Pallas, 1814) и морского ерша *Scorpaena porcus* L., 1758.

В начале XXI века в аннотированный список паразитов рыб Карадага вошли 19 видов цестод, зарегистрированных у 24 видов рыб до 2002 г. [10]. Этот перечень видов цестод в свете существенных изменений их таксономии [31, 35, 36, 37, 38] в настоящее время является неточным и не отражает их современный видовой состав.

Цель данной работы — установить современный видовой состав цестод рыб акватории Карадагского природного заповедника и прилегающих районов.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материалом для исследования послужили как коллекции цестод, собранные сотрудниками отдела экологической паразитологии ФИЦ ИнБЮМ в районе Карадагского заповедника в 1994 и 2006 гг., так и собственные сборы 2005–2018 гг. от скатов и костистых рыб (табл. 1), выловленных из биотопов Карадагского заповедника (Биостанция, Кузьмичёвы камни, бухты Малая Пуццолановая и Сердоликовая) и из районов, прилегающих к нему (м. Меганом, м. Толстый, бух. Лисья, пос. Коктебель, пос. Орджоникидзе).

Методом неполного паразитологического вскрытия в акватории Карадага и прилегающих районов обследовано 1754 экз. рыб 53 видов.

Рыб определяли по [3]. Цестод перед фиксацией в 70-градусном этиловом спирте и приготовлением тотальных препаратов выдерживали в пресной воде 10–20 минут для расслабления мускулатуры и эвагинации хоботков и цирруса [2]. Цестод окрашивали ацето- и квасцовым кармином по стандартной методике [19] и после дегидратации спиртом (70–100°) и просветления в гвоздичном масле заключали в канадский бальзам. Заражённость рыб цестодами оценивали по ряду показателей — экстенсивности (ЭИ, %) и интенсивности инвазии (ИИ, экз.·особь⁻¹), индексу обилия (ИО, экз.) [1]. Вычисления соответствующих показателей выполнены в программах Statistica 6 и PAST 3 [30]. Все виды цестод, использованных в данном исследовании, депонированы в подколлекции морских паразитов коллекции гидробионтов Мирового океана ФИЦ ИнБЮМ [27].

РЕЗУЛЬТАТЫ

По итогам обследования 53 видов рыб в исследуемом районе у 17 из них обнаружено 20 видов цестод (табл. 1). Наибольшее видовое богатство цестод отмечено у ската *Dasyatis pastinaca* — 12 видов. У ската *Raja clavata* найдено 7 видов, а у 2 видов костистых рыб

(*Scophthalmus maeoticus* и *Scorpaena porcus*) — по 1 виду половозрелых цестод. Личинки двух видов цестод (*Progrillotia dasyatidis* и сборного вида «*Scolex pleuronectis*») найдены у 14 видов костистых рыб.

Таблица 1. Показатели заражённости рыб цестодами акватории Карадагского природного заповедника и прилегающих районов (1994–2018)

Table 1. Cestode infestation parameters in fish of the water area of the Karadag nature reserve and adjacent areas (1994–2018)

Вид цестод	Вид хозяина (количество экз.)	ИИ, экз.·особь ⁻¹ , min – max / mean ± SE	ЭИ, % ¹	ИО, экз., mean ± SE
<i>Parachristianella trygonis</i> Dollfus, 1946	<i>Dasyatis pastinaca</i> (L., 1758) (11)	1 – 6 / 4	2 из 11	0,6
<i>Progrillotia dasyatidis</i> Beveridge, Neifar & Euzet, 2004		10 – 73 / 42	2 из 11	8
<i>Dollfusiella aculeata</i> Beveridge, Neifar & Euzet, 2004		1 – 14 / 7	3 из 11	2
<i>Prochristianella papillifer</i> (Poyarkoff, 1909) Dollfus, 1957 (syn. <i>P. trigonicola</i> Dollfus, 1946)		2 – 11 / 7	2 из 11	1,2
<i>Acanthobothrium</i> sp. 5		1 – 4 / 3	2 из 11	1
<i>Acanthobothrium</i> sp. 7		2 – 5 / 4	2 из 11	1
<i>Caulobothrium</i> sp.		1 – 1508 / 472	6 из 11	257
<i>Cairaeanthus ruhnei</i> Kornyushin & Polyakova, 2012		1	1 из 11	0,1
<i>C. healyae</i> Kornyushin & Polyakova, 2012		1 – 3 / 2	3 из 11	0,6
Anthocephaliidae gen. sp. 2		5 – 6 / 5,5	2 из 11	1
<i>Rhinebothrium walga</i> (Shiplely & Hornell, 1906)		1 – 12 / 5	3 из 11	1,3
<i>Rhabdotobothrium</i> sp.		1 – 35 / 13	4 из 11	5
<i>Echinobothrium typus</i> Van Beneden, 1849		<i>Raja clavata</i> L., 1758 (11)	1	1 из 11
<i>Progrillotia</i> sp.	3 – 103 / 28		5 из 11	13
<i>Grillotia erinaceus</i> (Van Beneden, 1858)	1 – 13 / 7		5 из 11	3,1
<i>Echeneibothrium variabile</i> Van Beneden, 1850	1 – 11 / 4		4 из 11	1,3
<i>Acanthobothrium</i> sp. 1	2 – 12 / 6,3		4 из 11	2,3
<i>Acanthobothrium</i> sp. 2	3 – 46 / 18		6 из 11	10
<i>Acanthobothrium</i> sp. 4	1 – 4 / 3		4 из 11	1
« <i>Bothriocephalus gregarius</i> » Renaud, Gabrion & Romestand, 1984	<i>Scophthalmus maeoticus</i> (Pallas, 1814) (3)	42 – 54	2 из 3	–
« <i>B. scorpii</i> » (Müller, 1779)	<i>Scorpaena porcus</i> L., 1758 (107)	1 – 3 / 2 ± 0,3	6	0,1 ± 0,04
<i>Progrillotia dasyatidis</i> larvae	<i>Gobius niger</i> L., 1758 (6)	1 – 32	2 из 6	–
	<i>Gobius bucchichi</i> Steindachner, 1870 (5)	1 – 8	2 из 5	–
	<i>Mullus barbatus</i> L., 1758 (53)	1 – 86 / 23 ± 12	13	3,4 ± 2

Продолжение на следующей странице...

Вид цестод	Вид хозяина (количество экз.)	ИИ, экз.·особь ⁻¹ , min – max / mean ± SE	ЭИ, % ¹	ИО, экз., mean ± SE
<i>Progrillotia dasyatidis</i> larvae	<i>Trachurus mediterraneus</i> (Steindachner, 1868) (129)	1	0,8	0,01 ± 0,01
	<i>Gaidropsarus mediterraneus</i> (L., 1758) (42)	1 – 4 / 2,5 ± 1,5	5	0,12 ± 0,1
	<i>S. porcus</i>	1 – 9 / 3,4 ± 0,6	16	0,5 ± 0,2
	<i>Atherina boyeri</i> Risso, 1810 (119)	1 – 4 / 2 ± 0,3	12	0,2 ± 0,06
	<i>Salaria pavo</i> (Risso, 1810) (59)	1	2	0,02 ± 0,02
« <i>Scolex pleuronectis</i> » Müller, 1788 larvae	<i>S. porcus</i>	1 – 8 / 5 ± 1,3	5	0,2 ± 0,1
	<i>M. barbatus</i>	1 – 4 / 2,5 ± 1,5	4	0,1 ± 0,08
	<i>T. mediterraneus</i>	2	0,8	0,02 ± 0,02
	<i>Symphodus ocellatus</i> Forsskål, 1775 (55)	1 – 38 / 20 ± 9	4	0,7 ± 0,7
	<i>G. mediterraneus</i>	1 – 7 / 4 ± 3	5	0,21 ± 0,18
	<i>Atherina hepsetus</i> L., 1758 (52)	1	2	0,02 ± 0,02
	<i>Gobius niger</i>	1	2 из 6	–
	<i>Gobius bucchichi</i>	3 – 38	3 из 5	–
	<i>Neogobius melanostomus</i> (Pallas, 1814) (14)	1	1 из 14	0,07
	<i>Ponticola euryccephalus</i> (Kessler, 1874) (44)	1	2,3	0,02 ± 0,02
	<i>Aidablennius sphyinx</i> (Valenciennes, 1836) (301)	1 – 2 / 1,7 ± 0,3	1	0,02 ± 0,01
	<i>Spicara smaris</i> (L., 1758) (36)	14	3	0,4 ± 0,4

Примечание: ¹ — если вскрыто менее 15 рыб, то приведено количество заражённых рыб из общего числа исследованных.

Note: ¹ – if less than 15 fishes were dissected, then the number of fish infested from the total number of fish studied is given.

Впервые в районе исследования у ската *D. pastinaca* обнаружено 9 видов цестод: *Progrillotia dasyatidis*, *Parachristianella trygonis*, *Dollfusiella aculeata*, *Caulobothrium* sp., *Rhinebothrium walga*, *Rhabdotobothrium* sp., *Acanthobothrium* sp. 5, 7, Anthoccephaliidae gen. sp. 2 (табл. 1). У другого вида ската, *R. clavata*, впервые в данной акватории найдены цестоды *Acanthobothrium* sp. 1, 2, 4. Нами не обнаружены ранее регистрировавшиеся в этом районе у костистых рыб два вида личинок цестод [*Hepatoxylon trichiuri* (Holten, 1802) и *Nybelinia lingualis* (Cuivier, 1817)], а у скатов — 2 вида половозрелых цестод [*Tetrarhynchobothrium tenuicolle* Diesing, 1854 и *Anthobothrium cornucopia* (Rud., 1819)].

У 8 видов костистых рыб в районе Карадага впервые обнаружены личинки *Progrillotia dasyatidis*. Ранее личинки данной цестоды найдены нами у этих же видов рыб в районе Севастополя. Личинки были без бластоцисты и локализовались в жёлчном пузыре, иногда — в просвете кишечника рыб. Эти костистые рыбы являются вторыми промежуточными хозяевами для *P. dasyatidis*, которая заканчивает своё развитие в окончательном хозяине *D. pastinaca*. Личинки цестоды *P. dasyatidis* найдены у донных (*Gobius* spp., *Scorpaena porcus*, *Gaidropsarus mediterraneus*, *Salaria pavo*) и пелагических (*Mullus barbatus*, *Trachurus mediterraneus*, *Atherina boyeri*) рыб. Наибольшие показатели численности личинок *P. dasyatidis* отмечены у *M. barbatus*, *S. porcus* и *A. boyeri* (табл. 1).

Сведений о видовом составе первых промежуточных хозяев *P. dasyatidis* в литературе нет. Недавно описаны свободные, без бластоцисты личинки этой цестоды от семи видов донных костистых рыб трёх семейств (Soleidae Bonaparte, 1833; Scophthalmidae Chabanaud, 1933; Batrachoididae Jordan, 1896), выловленных у побережья Португалии [36]. Наши данные об обнаружении личинок *P. dasyatidis* у костистых рыб Чёрного моря расширяют сведения об участниках жизненного цикла этого гельминта.

Проведённый анализ заражённости цестодами двух видов скатов в исследуемом районе выявил, что массовым видом, встречающимся у большинства изученных *D. pastinaca*, был *Caulobothrium* sp.; максимальная численность составила 1508 экз.·особь⁻¹ (табл. 1). Следующими по численности и встречаемости у этого ската были цестоды *Dollfusiella aculeata*, *Progrillotia dasyatidis* и *Rhabdotobothrium* sp. У другого вида ската, *Raja clavata*, наиболее массовой была цестода *Progrillotia* sp., численность которой достигала в одном скате 103 экз. Вторым по численности и встречаемости был *Acanthobothrium* sp. 2.

Половозрелые формы цестод рода *Bothriocephalus* Rud., 1808, «*B. gregarius*» и «*B. scorpii*», обнаружены в своих окончательных хозяевах — камбале калкане и морском ерше. Интенсивность инвазии «*B. gregarius*» (42–54 экз.·особь⁻¹) у камбалы в акватории Карадага сопоставима с таковой из других районов вдоль побережья Крыма. Окончательным хозяином «*B. scorpii*» в Чёрном море является морской ёрш *Scorpaena porcus*. По данным [13], «*B. scorpii*» в районе Карадага находили у 28 % ершей при ИИ 1–2 экз.·особь⁻¹. Согласно [9], до 30 % ершей заражено этой цестодой при ИИ 1–3 экз.·особь⁻¹ и ИО 0,5 экз. В работе [11, стр. 10] нет количественных данных о заражённости ерша этой цестодой; указано только, что встречаемость у рыб высокая. В период нашего исследования «*B. scorpii*» обнаружен в среднем у 6 % ершей; встречаемость по сравнению с таковой в 1960-е [13] и 2000-е гг. [9] уменьшилась практически в 5 раз. В настоящее время этот вид является довольно редким не только в исследуемом районе, но и вдоль всего побережья Крыма.

ОБСУЖДЕНИЕ

В результате ревизии видового состава цестод у рыб акватории Карадага и прилегающих районов обнаружены представители 6 отрядов: Bothriocephalidea, Diphyllidea, Трупаноринча, «Tetraphyllidea» relics, Rhinebothriidea и Onchoproteocephalidea (табл. 2).

Ранее у морского ерша и камбалы калкана в районе Карадага отмечали паразитирование только одного представителя цестод отряда Bothriocephalidea — «*Bothriocephalus scorpii*» [11, 13]. Единственное, неполное описание со схематическими рисунками этого вида в Чёрном море основано на цестодах от морского ерша и камбалы [13]. В настоящее время вид является сборным и регистрируется у более чем 50 родов морских рыб из семейств и отрядов, не связанных филогенетически.

Таблица 2. Фауна цестод рыб Карадагского природного заповедника и прилегающих акваторий Чёрного моря (по собственным и литературным данным)

Table 2. Fauna of fish cestodes of the Karadag nature reserve and adjacent water areas of the Black Sea (according to own and literary data)

Таксоны цестод	Виды рыб
Bothriocephalidea Kuchta, Scholz, Brabec & Bray, 2008¹	
Bothriocephalidae Blanchard, 1849	
« <i>Bothriocephalus scorpii</i> »	<i>Scorpaena porcus</i>
« <i>B. gregarius</i> »	<i>Scophthalmus maeoticus</i>
Diphyllidea Van Beneden in Carus, 1863	
Echinobothriidae Perrier, 1897	
<i>Echinobothrium typus</i>	<i>Raja clavata</i>

Продолжение на следующей странице...

Таксоны цестод	Виды рыб
Trypanorhyncha Diesing, 1863	
Eutetrarhynchidae Guiart, 1927	
<i>Parachristianella trygonis</i>	<i>Dasyatis pastinaca</i>
<i>Prochristianella papillifer</i>	
<i>Dollfusiella aculeata</i>	
<i>Dollfusiella aculeata</i> larvae	<i>Chelidonichthys lucernus</i> , <i>Scomber scombrus</i> , <i>Mullus barbatus</i> , <i>Belone belone</i> , <i>Trachinus draco</i> , <i>Pegusa nasuta</i>
<i>Tetrarhynchobothrium tenuicolle</i> ²	<i>Raja clavata</i>
Proglottiidae Palm, 2004	
<i>Progrillotia dasyatidis</i>	<i>Dasyatis pastinaca</i>
<i>Progrillotia dasyatidis</i> larvae	<i>Gobius niger</i> , <i>G. buccichi</i> , <i>Mullus barbatus</i> , <i>Trachurus mediterraneus</i> , <i>Gaidropsarus mediterraneus</i> , <i>Scorpaena porcus</i> , <i>Atherina boyeri</i> , <i>Salaria pavo</i>
Lacistorhynchidae Guiart, 1927	
<i>Grillotia erinaceus</i>	<i>Raja clavata</i>
Tentaculariidae Poche, 1926	
<i>Nybelina lingualis</i> ² larvae	<i>Sarda sarda</i>
Sphyriocephalidae Pintner, 1913	
<i>Hepatoxylon trichiuri</i> ² larvae	<i>Trachinus draco</i>
«Tetrphyllidea» Van Beneden, 1850 relics: Family incertae sedis	
<i>Anthobothrium cornucopia</i> ²	<i>Dasyatis pastinaca</i>
<i>Caulobothrium</i> sp.	
<i>Scolex pleuronectis</i> larvae	<i>Scorpaena porcus</i> , <i>Neogobius syrman</i> , <i>Gobius niger</i> , <i>G. buccichi</i> , <i>Pomatoschistus minutus</i> , <i>Crenilabrus ocellatus</i> , <i>C. scina</i> , <i>C. tinca</i> , <i>Trachurus mediterraneus</i> , <i>Merlangius merlangus</i> , <i>Mullus barbatus</i> , <i>Platichthys flesus</i> , <i>Sciaena umbra</i> , <i>Uranoscopus scaber</i> , <i>Ophidium rochei</i> , <i>Pegusa nasuta</i> , <i>Spicara flexuosa</i> , <i>Syngnatus abaster</i> , <i>Chelon auratus</i> , <i>C. saliens</i> , <i>Mugil cephalus</i> , <i>Arnoglossus kessleri</i> , <i>Gymnamodytes cicerellus</i> , <i>Atherina hepsetus</i>
Onchoproteocephalidea Caira, Jensen, Waeschenbach, Olson & Littlewood, 2014	
Onchobothriidae Braun, 1900	
<i>Acanthobothrium</i> sp. 1	<i>Raja clavata</i>
<i>Acanthobothrium</i> sp. 2	
<i>Acanthobothrium</i> sp. 4	
<i>Acanthobothrium</i> sp. 5	<i>Dasyatis pastinaca</i>
<i>Acanthobothrium</i> sp. 7	
Rhinebothriidea Healy, Caira, Jensen, Webster & Littlewood, 2009	
Rhinebothriidae Euzet, 1953	
<i>Rhinebothrium walga</i>	<i>Dasyatis pastinaca</i>
<i>Rhabdotobothrium</i> sp.	
Anthocephaliidae Ruhnke, Caira & Cox, 2015	
<i>Cairaanthus ruhnkei</i>	<i>Dasyatis pastinaca</i>
<i>C. healyae</i>	
Anthocephaliidae gen. sp. 2	
Echeneibothriidae de Beauchamp, 1871	
<i>Echeneibothrium variabile</i>	<i>Raja clavata</i>

Примечание: ¹ — классификация отрядов и семейств по [25, 34, 37]; ² — виды цестод, не найденные нами у рыб Карадага.

Note: ¹ – classification of orders and families according to [25, 34, 37]; ² – cestode species, not found by us in fish in Karadag water area.

Типовой вид рода — *Bothriocephalus scorpii* sensu stricto — паразитирует только у морского скорпиона *Myoxocephalus scorpius* (L., 1758) (Scorpaeniformes: Cottidae), обитающего в северных частях Тихого и Атлантического океанов [34]. На основании результатов электрофореза белкового состава цестод под названием «*B. scorpii*» от камбалы калкана в Чёрном море их переопределили как «*B. gregarius*», но без описания морфологических признаков [20]. По данным [33, 34], «*B. gregarius*» является *nomen nudum*, поскольку его описание от типового хозяина из нативного ареала до сих пор не опубликовано. В результате изучения особенностей морфологии цестод под названиями «*B. scorpii*» (от морского ерша) и «*B. gregarius*» (от камбалы калкана) в Чёрном море (Крым, Кавказ), а также проведённых исследований рибосомальных генов 18S и 28S этих цестод [16] выявлены как морфологические, так и генетические признаки, доказывающие самостоятельность данных видов и несоответствие типовому виду *B. scorpii* sensu stricto. Пока в этом исследовании мы оставляем названия цестод «*B. scorpii*» и «*B. gregarius*» (табл. 2).

Другой вид данного рода — *B. atherinae* Chernyschenko, 1949 — впервые был отмечен у атерины *Atherina boyeri* в районе Одессы [21], а затем — в акватории Карадага [11]. Таксономический статус этого вида до сих пор не ясен. Он был переведён в род *Ptychobothrium* Lönnberg, 1889 как *P. atherinae* (Chernyschenko, 1949) [7], однако одни исследователи рассматривают старое название как валидное [33], а другие отмечают его как вид с неопределённым родовым статусом [34]. Стоит заметить, что регистрация этого вида в водах Карадага вызывает сомнения, так как он предпочитает солоноватоводные биотопы. Так, в Чёрном море *B. atherinae* отмечали у атерины только в трёх районах северо-западной части моря — в акватории Одессы (солёность 3–14 ‰), в Березанском (4–12 ‰) и Тилигульском (4–12 ‰) лиманах [21, 22]. Наши данные также подтверждают приуроченность этого вида к биотопам с низкой солёностью. За всё время исследований обнаружено всего 2 экз. *B. atherinae* и только у 2 из 280 изученных атерин в солоноватоводном биотопе Каркинитского залива. В полигалинных акваториях вдоль побережья Крыма — у Севастополя (17–18 ‰, вскрыто 545 экз. атерин), Карадага (17–18 ‰, 119 экз.) и Керченского пролива (12–15 ‰, 65 экз.) — эта цестода не найдена. Именно поэтому регистрация *B. atherinae* в полигалинном районе Карадага (16–18 ‰) вызывает сомнения. Таким образом, из трёх видов цестод отряда Bothriocephalidea у рыб Карадага достоверно паразитируют только два — «*B. scorpii*» и «*B. gregarius*» (табл. 2).

У ската *Raja clavata* в акватории Карадага впервые в начале 1960-х гг. обнаружены две особи *Echinobothrium typus* — единственного представителя отряда Diphyllidea в Чёрном море [13]. Повторно этот вид цестод найден у данного ската в районе Карадага в конце 1980-х гг. [12]. По мнению авторов, *E. typus* обычен для этого хозяина (без указания ими количественных параметров заражения). Между тем нами *E. typus* обнаружен только в районе Севастополя (обследовано 124 экз. скатов, ЭИ 15 %, ИО 19 экз.). В других районах скаты (166 экз.) оказались свободными от этой цестоды. Впервые в 2018 г. найден один неполовозрелый экземпляр *E. typus* у ската *R. clavata* (табл. 1).

По данным [5, 9, 10, 11, 13], у рыб в этом районе встречается 13 видов цестод из отряда Трупаноринча. Из них 8 представлены половозрелыми формами (*Christianella minuta* (Van Beneden, 1849); *Tetrarhynchobothrium minutus* Van Beneden, 1850; *T. erinaceus* Van Beneden, 1861; *T. tenuicolle*; *Tetrarhynchus tenuicolle* Diesing, 1854; *Progrillotia louiseuzeti* Dollfus, 1969; *Grillotia erinaceus*; *Prochristianella trigonicola*), паразитирующими у двух видов скатов и акулы катрана *Squalus acanthias* L., 1758, и 5 — личинками (*Hepatoxylon trichiuri*, *Nybelinia lingualis*, *Tetrarhynchobothrium* sp., *Tentacularia* sp. и *Eutetrarhynchus* sp.), регистрируемыми у костистых рыб.

У скатов *Raja clavata* и *Dasyatis pastinaca* нами обнаружено 5 видов цестод этого отряда: *Dollfusiella aculeata*, *Grillotia erinaceus*, *Prochristianella papillifer*, *Parachristianella trygonis* и *P. dasyatidis* (*P. louiseuzeti* sensu [6, 11]) (табл. 1, 2). У костистых рыб впервые определены личинки цестоды *P. dasyatidis*, при этом не найдены ранее отмеченные у этих рыб личинки *N. lingualis* и *H. trichiuri*. Из рыб, обитающих в Чёрном море, вторыми промежуточными хозяевами двух последних видов являются, согласно [36], пелагида *Sarda sarda* (Bloch, 1793) и морской дракон

Trachinus draco L., 1758, а окончательными — *Raja clavata* и акула *Squalus acanthias*. Пеламиду, дракона и акулу в районе Карадага мы не изучали, а обследованное количество *R. clavata* было невелико (11 экз.), что, возможно, объясняет отсутствие в наших сборах этих видов цестод.

В результате ранее проведённого анализа [15] встречаемости и синонимии видов отряда Трупаногунча доказано, что определение *Grillotia (Christianella) minuta* у эласмобранхий и *Tentacularia* sp. larvae — у костистых рыб в Чёрном море ошибочно ввиду отсутствия их специфичных окончательных хозяев в этом водоёме. Названия *Tetrarhynchobothrium erinaceus*, *T. minutus* и *Tetrarhynchus tenuicolle* являются невалидными [36]. Представителей рода *Eutetrarhynchus* Pintner, 1913 в Чёрном море регистрировали только у костистых рыб на стадии личинок [5, 9, 10]. Впервые половозрелые особи этих цестод обнаружены у ската *D. pastinaca* в районе Севастополя и определены как *Eutetrarhynchus spinifer* Dollfus, 1969 [6], но без описания. Анализ морфологии черноморских цестод, ранее определённых как *E. spinifer*, показал несоответствие переописанию *Dollfusiella spinifer* (syn. *E. spinifer*); эти цестоды переопределены как *D. aculeata* [15].

Ещё один вид трипаноринх — *Tetrarhynchobothrium tenuicolle* — у ската *R. clavata* в Чёрном море (побережье Румынии) определён как *Rhynchobothrium tenuicolle* [23]. В районе Карадага он однажды обнаружен Т. П. Погорельцевой [13]. Повторно этот вид в море не находили. Таким образом, из 13 видов отряда Трупаногунча, ранее отмеченных у рыб в районе Карадага [10], фактически паразитируют у обоих видов скатов только 5 половозрелых видов; у костистых рыб найдены личинки двух видов цестод (табл. 2).

До наших исследований у рыб Карадага отмечали 7 видов цестод из 4 родов отряда «Tetraphyllidea» relics: *Echeneibothrium* Van Beneden, 1850; *Anthobothrium* Van Beneden, 1850; *Phyllobothrium* Van Beneden, 1849; *Acanthobothrium* Van Beneden, 1849 [9, 11, 13, 18]. Из состава отряда «Tetraphyllidea» выделены три новых отряда: Rhinebothriidea, Phyllobothriidea и Onchorhynchoccephalidea [25]. Следовательно, из «Tetraphyllidea» у *D. pastinaca* в акватории Карадага паразитирует только один представитель *Anthobothrium* — *A. cornucopia* [13]. Ранее у скатов Чёрного моря обнаруживали *A. auriculatum* (Rud., 1819) и *A. cornucopia*, однако мы не нашли этих цестод в своих сборах тетрафилид от обоих видов скатов у побережья Крыма.

Другие представители отряда «Tetraphyllidea» relics — цестоды рода *Caulobothrium* Baer, 1948 — впервые обнаружены нами в Чёрном море у ската *D. pastinaca* в акватории Севастополя (бух. Казачья); повторно они найдены в районе Карадага и Керченского пролива [14]. Исследованные особи отличаются от 7 валидных видов этого рода [37], и в данной работе они пока определены как *Caulobothrium* sp. В настоящее время не ясно, к какому семейству относятся цестоды этого рода; пока они выделены в отдельную группу, обозначенную как Clade 4 [37, стр. 378]. Авторы утверждают, что *Caulobothrium* spp. встречаются только у скатов семейства Myliobatidae Bonaparte, 1838 [*Myliobatis* L., 1758], а находки цестод этого рода у скатов семейств Dasyatidae Jordan, 1888 [*Himantura* (Bleeker, 1852)] и Urolophidae Müller & Henle, 1841 [*Urolophus* Müller & Henle, 1837] в Карибском море и в Тихом и Атлантическом океанах требуют дополнительных подтверждений. Таким образом, у скатов в районе исследования доказано паразитирование только одного вида из рода *Caulobothrium* (табл. 2).

По данным [9, 10, 11, 13, 23] и по результатам анализа собственных сборов, у скатов Карадага встречаются цестоды трёх семейств отряда Rhinebothriidea — Echeneibothriidae (*Echeneibothrium*); Anthocephaliidae (*Cairaeanthus* Korniyushin & Polyakova, 2012, Anthocephaliidae gen. sp. 2); Rhinebothriidae (*Rhinebothrium* Linton, 1890, *Rhabdotobothrium* Euzet, 1953) [14, 15].

Единственный представитель семейства Echeneibothriidae, отмеченный у ската *Raja clavata* в Чёрном море (*Echeneibothrium variable*), описан только на основе неполовозрелых особей [13, 23]. По данным [39], «*E. variable*» является сборным видом, а *E. variable* sensu stricto узкоспецифичен *R. clavata*; находки этого вида цестод у разных видов скатов и в других районах требуют подтверждения. В сборах цестод от *R. clavata* из акватории Карадага и Севастополя обнаружены зрелые особи,

морфологически идентичные этому виду цестод от типового хозяина из нативного ареала [39]. Отметим, что *E. variabile* находили в акватории Карадага у обоих видов скатов [9, 10, 11]. Нами ни разу не зарегистрировано паразитирование *E. variabile* у ската *D. pastinaca*. Учитывая специфичность *E. variabile* к скату *R. clavata*, считаем его определение у *D. pastinaca* в Чёрном море ошибочным.

Видовой состав цестод ската *D. pastinaca* акватории Карадага пополнился новыми представителями Anthocephaliidae gen. sp. 2, *Rhinebothrium walga* и *Rhabdotobothrium* sp. [14, 15]. В сборах цестод от этого ската, выловленного вдоль побережья Крыма, нами определены цестоды рода *Cairaeanthus* (*Phyllobothrium* sensu [13, 23]) с двумя видами — *C. ruhnei* (syn. *P. lactuca* sensu [13, 23]) и *C. healyae* (syn. *P. gracilis* sensu [13, 23]) [32]. В районе Карадага впервые *C. healyae* найден в конце 1980-х гг. у 45 % скатов *D. pastinaca* и *R. clavata* при ИИ 1–17 экз.·особь⁻¹ [12]. В аннотированном списке указано на обнаружение ещё одного вида этого рода — *C. ruhnei* [10]. Согласно [10, стр. 476], 35 % скатов *R. clavata* и морских ершей *S. porcus* заражены *C. ruhnei* при ИИ 1–5 экз.·особь⁻¹; отмечено, что впервые в районе Карадага оба вида *Cairaeanthus* найдены Т. П. Погорельцевой. Между тем, согласно [13, стр. 148–150], оба вида цестод обнаружены только у ската *D. pastinaca* и в других районах: *C. ruhnei* — в Керченском проливе, а *C. healyae* — в акватории Керчи и Новороссийска. Цестоды рода *Cairaeanthus* spp. — узкоспецифичные паразиты ската *D. pastinaca* [32]. Именно поэтому находки половозрелых *Cairaeanthus* spp. не только у другого ската, *R. clavata* [11], но и у морского ерша [10] явно ошибочны: костистые рыбы являются для цестод эласмобранхий вторыми, или паратеническими, хозяевами. Оба вида *Cairaeanthus* встречаются в Чёрном море и только *C. ruhnei* — в Азовском. Согласно [24, стр. 17], ареал распространения этой группы цестод (*Cairaeanthus* spp.) ограничен, вероятно, более прохладными водами, поскольку, исследуя цестод от скатов рода *Dasyatis* Rafinesque, 1810 из тропических и субтропических регионов, цестод рода *Cairaeanthus* не находили. Таким образом, у скатов акватории Карадага паразитируют 6 видов цестод из отряда Rhinebothriidea: *Echenebothrium variabile*, *Cairaeanthus healyae*, *C. ruhnei*, *Rhinebothrium walga*, *Rhabdotobothrium* sp. и Anthocephaliidae gen. sp. 2 (табл. 2).

По данным [10, 11, 13], в составе отряда Onchoproteocephalidea у двух видов скатов акватории Карадага паразитируют только два вида цестод рода *Acanthobothrium* — *A. coronatum* (Rud., 1819) и *A. dujardinii* Van Beneden, 1849. До наших исследований в Чёрном море некоторые авторы отмечали три вида этого рода: кроме вышеуказанных видов, определяли единственного черноморского эндемика — *A. ponticum* Ворсеа, 1934 [10, 11, 13, 23]. Необходимо подчеркнуть, что в собственных сборах цестод этого рода от скатов обоих видов у побережья Крыма и Кавказа мы не обнаружили цестод, которые по своим морфологическим признакам соответствовали бы ранее отмеченным *A. coronatum*, *A. dujardinii* и *A. ponticum*. С другой стороны, среди найденных *Acanthobothrium* spp. у скатов *D. pastinaca* и *R. clavata* мы идентифицировали 7 морфологически разных таксонов видового уровня. В районе Карадага у ската *R. clavata* обнаружены *Acanthobothrium* sp. 1, 2, 4, а у ската *D. pastinaca* — *Acanthobothrium* sp. 5, 7 (табл. 1, 2) [14, 17].

В результате анализа морфологии, специфичности и синонимии *A. coronatum*, *A. dujardinii* и *A. ponticum* у скатов Чёрного моря [15] установлено, что определение у данных рыб узкоспецифичного *A. coronatum* [40] ввиду отсутствия окончательного хозяина этого вида цестод — акул рода *Scyliorhinus* (Blainville, 1816) — в данном водоёме ошибочно. Описания цестод, определённых как *A. dujardinii* [13, 23], от скатов в Чёрном море не соответствуют типовым описаниям этого вида из Ла-Манша [28, 29, 40]. Систематическое положение *A. ponticum* до сих пор не выяснено. Одни указывали его как возможный младший синоним *A. crassicolle* Wedl, 1855 [29], другие — как вид с неясным систематическим положением [40], третьи — как валидный вид [26], без переисследования типового материала, место хранения которого неизвестно.

В наших сборах *Acanthobothrium* spp. от *D. pastinaca* у побережья Крыма (Каркинитский залив, Севастополь, Карадаг, Керченский пролив) и Кавказа обнаружены особи, которые первоначально мы определили как *A. crassicolle* [5]. Между тем, изучив дополнительный материал по морфологии

этих цестод и последовательности их рибосомальных генов 18S и 28S, мы выявили морфологические и генетические признаки [17], позволяющие идентифицировать их как новый вид. В этой работе мы пока оставляем его как *Acanthobothrium* sp. 7. Таким образом, в составе отряда Onchoproteocephalidea у скатов Карадага паразитируют 5 видов цестод (табл. 2).

Заключение. В результате ревизии фауны цестод рыб Карадагского природного заповедника и прилегающих районов установлено, что современный видовой состав этих гельминтов насчитывает 20 видов из 19 родов и 6 отрядов. Впервые у скатов Карадага обнаружено 12 видов: *Progrillotia dasyatidis*, *Parachristianella trygonis*, *Dollfusiella aculeata*, *Rhinebothrium walga*, *Acanthobothrium* sp. 1, 2, 4, 5, 7, *Rhabdotobothrium* sp., *Caulobothrium* sp. и Anthocephaliidae gen. sp. 2. Впервые у костистых рыб Карадага обнаружены личинки *Progrillotia dasyatidis*; эти новые сведения дополняют знания об особенностях жизненных циклов цестод данного рода. У рыб исследованной акватории из ранее регистрируемых 19 видов цестод подтверждены находки только восьми: «*Bothriocephalus scorpii*», «*B. gregarius*», *Echinobothrium typus*, *Grillotia erinaceus*, *Prochristianella papillifer*, *Echeneibothrium variabile*, *Cairaeanthus ruhnekei* и *C. healyae*. У костистых рыб не найдены личинки цестод *Hepatoxylon trichiuri* и *Nybelinia lingualis*, а у скатов — *Tetrarhynchobothrium tenuicolle* и *Anthobothrium cornucopia*. В результате анализа современной таксономии, синонимии и специфичности к окончательным хозяевам цестод отрядов Трупаногунча и Onchoproteocephalidea установлено, что первоначальное определение и описание трёх видов — *Tentacularia* sp. larvae, *Grillotia (Christianella) minuta* и *Acanthobothrium coronatum* — от рыб Чёрного моря ошибочно. Наибольшее видовое богатство отмечено среди представителей отрядов Трупаногунча и Onchoproteocephalidea (по 5 видов), а наименьшее — среди отрядов Diphyllidea и «Tetraphyllidea» relics (по 1 виду). Увеличение видового состава цестод эласмобранхий Карадага может произойти за счёт изучения этих гельминтов у акулы катрана *Squalus acanthias*, которая в данном районе оказалась фактически не исследованной.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Закономерности формирования и антропогенная трансформация биоразнообразия и биоресурсов Азово-Черноморского бассейна и других районов Мирового океана» (№ гос. регистрации АААА-А18-118020890074-2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Аниканова В. С., Бугмырин С. В., Иешко Е. П. Методы сбора и изучения гельминтов мелких млекопитающих. Петрозаводск : КарНЦ РАН, 2007. 145 с. [Anikanova V. S., Bugmyrin S. V., Ieshko E. P. *Methods for Collection and Study of Helminths in Small Mammals*. Petrozavodsk : KarNTs RAN, 2007, 145 p. (in Russ.)]
2. Быховская-Павловская И. Е. Паразитологическое исследование рыб. Ленинград : Наука, 1985. 120 с. [Bykhovskaya-Pavlovskaya I. E. *Parazitologicheskoe issledovanie ryb*. Leningrad : Nauka, 1985, 120 p. (in Russ.)]
3. Васильева Е. Д. Рыбы Черного моря. Определитель морских, солоноватоводных, эвригаллиных и проходных видов с цветными иллюстрациями, собранными С. В. Богородским. Москва : Изд-во ВНИРО, 2007. 238 с. [Vasil'eva E. D. *Fish of the Black Sea. Key to Marine, Brackish-water, Euryhaline, and Anadromous Species With Color Illustrations Collected by S. V. Bogorodsky*. Moscow : VNIRO Publ., 2007, 238 p. (in Russ.)]
4. Власенко П. В. К фауне паразитических червей рыб Черного моря // Труды Карадагской биологической станции. 1931. Вып. 4. С. 88–136. [Vlasenko P. V. К faune paraziticheskikh chervei ryb Chernogo morya. *Trudy Karadagskoi biologicheskoi stantsii*, 1931, iss. 4, pp. 88–136. (in Russ.)]
5. Дмитриева Е. В., Белофастова И. П., Корнийчук Ю. М., Мачкевский В. К., Пронькина Н. В., Полякова Т. А. Гельминтофауна рыб Карадагского природного заповедника // Карадаг-2009 : сборник научных трудов, посвящ. 95-летию Карадагской биологической станции и 30-летию Карадагского природного заповедника НАН Украины. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. С. 150–157. [Dmitrieva E. V., Belofastova I. P., Korniiichuk Yu. M., Machkevskii V. K., Pron'kina N. V., Polyakova T. A. Gel'mintofauna

- ryb Karadagskogo prirodnogo zapovednika. In: *Karadag-2009* : sbornik nauchnykh trudov, posvyashch. 95-letiyu Karadagskoi biologicheskoi stantsii i 30-letiyu Karadagskogo prirodnogo zapovednika NAN Ukrainy. Sevastopol : EKOSI-Gidrofizika, 2009, pp. 150–157. (in Russ.)]
6. Корнюшин В. В. Некоторые итоги изучения фауны цестод позвоночных Украины // *IX конференция украинского республиканского общества паразитологов* : тез. докл., Львов, сентябрь 1980 г. Киев : Наукова думка, 1980. С. 156–158. [Korniyushin V. V. Nekotorye itogi izucheniya fauny tsestod pozvonochnykh Ukrainy. In: *IX konferentsiya ukrainskogo respublikanskogo obshchestva parazitologov* : tez. dokl., Lvov, Sept. 1980. Kiev : Naukova dumka, 1980, pp. 156–158. (in Russ.)]
 7. Корнюшин В. В., Кулаковская О. П. О гетерогенности рода *Bothriocephalus* (Cestoda, Pseudophyllidea) // *Вестник зоологии*. 1984. № 3. С. 11–15. [Korniyushin V. V., Kulakovskaya O. P. O geterogennosti roda *Bothriocephalus* (Cestoda, Pseudophyllidea). *Vestnik zoologii*, 1984, no. 3, pp. 11–15. (in Russ.)]
 8. Корнюшин В. В., Солонченко А. И. Переописание цестод *Grillotia erinaceus* (Beneden, 1858) и *Christianella minuta* (Beneden, 1849) от черноморских хрящевых рыб // *Биология моря*. 1978. Вып. 45. С. 26–34. [Korniyushin V. V., Solonchenko A. I. Redescription of cestodes *Grillotia erinaceus* (Beneden, 1858) and *Christianella minuta* (Beneden, 1849) from the Black Sea cartilaginous fishes. *Biologiya morya*, 1978, iss. 45, pp. 26–34. (in Russ.)]
 9. Мирошниченко А. И. Паразиты морских рыб Карадагского природного заповедника // *Карадаг. Гидробиологические исследования* : сб. науч. тр., посвящ. 90-летию Карадагской научной станции им. Т. И. Вяземского и 25-летию Карадагского природного заповедника НАН Украины. Симферополь : СОНАТ, 2004. Кн. 2. С. 86–101. [Miroshnichenko A. I. Parazity morskikh ryb Karadagskogo prirodnogo zapovednika. In: *Karadag. Gidrobiologicheskie issledovaniya* : sb. nauch. tr., posvyashch. 90-letiyu Karadagskoi nauchnoi stantsii im. T. I. Vyazemskogo i 25-letiyu Karadagskogo prirodnogo zapovednika NAN Ukrainy. Simferopol : SONAT, 2004, book 2, pp. 86–101. (in Russ.)]
 10. Мирошниченко А. И. Паразиты морских рыб и беспозвоночных // *Карадаг. Гидробиологические исследования* : сб. науч. тр., посвящ. 90-летию Карадагской научной станции им. Т. И. Вяземского и 25-летию Карадагского природного заповедника НАН Украины. Симферополь : СОНАТ, 2004. Кн. 2. С. 468–495. [Miroshnichenko A. I. Parazity morskikh ryb i bespozvonochnykh. In: *Karadag. Gidrobiologicheskie issledovaniya* : sb. nauch. tr., posvyashch. 90-letiyu Karadagskoi nauchnoi stantsii im. T. I. Vyazemskogo i 25-letiyu Karadagskogo prirodnogo zapovednika NAN Ukrainy. Simferopol : SONAT, 2004, book 2, pp. 468–495. (in Russ.)]
 11. Найденова Н. Н., Солонченко А. И. Паразитофауна рыб // *Флора и фауна заповедников СССР. Фауна Карадагского заповедника* : оперативно-информационный материал. Люберцы : ВИНТИ, 1989. С. 6–19. [Naidenova N. N., Solonchenko A. I. Parazitofauna ryb. In: *Flora i fauna zapovednikov SSSR. Fauna Karadagskogo zapovednika* : operativno-informatsionnyi material. Lyubertsy : VINITI, 1989, pp. 6–19. (in Russ.)]
 12. *Определитель паразитов позвоночных животных Черного и Азовского морей: паразитические беспозвоночные рыб, рыбоядных птиц и морских млекопитающих*. Киев : Наукова думка, 1975. 552 с. [*Opredelitel' parazitov pozvonochnykh zhivotnykh Chernogo i Azovskogo morei: paraziticheskie bespozvonochnye ryb, ryboadnykh ptits i morskikh mlekopitayushchikh*. Kiev : Naukova dumka, 1975, 552 p. (in Russ.)]
 13. Погорельцева Т. П. Материалы к изучению ленточных червей – паразитов рыб Черного моря // *Труды Карадагской биологической станции*. 1960. Вып. 16. С. 143–159. [Pogorel'tseva T. P. Materialy k izucheniyu lentochnykh chervei – parazitov ryb Chernogo morya. *Trudy Karadagskoi biologicheskoi stantsii*, 1960, iss. 16, pp. 143–159. (in Russ.)]
 14. Полякова Т. А. *Цестоды скатов (Elasmobranchii: Batoidea) крымского побережья Черного моря (систематика, фауна, экология)* : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.02.11. Севастополь, 2014. 24 с. [Polyakova T. A. *Tsestody skatov (Elasmobranchii: Batoidea) krymskogo poberezh'ya Chernogo morya (sistematika, fauna, ekologiya)* : avtoref. dis. ... kand. biol. nauk : 03.02.11. Sevastopol, 2014, 24 p. (in Russ.)]
 15. Полякова Т. А., Гаевская А. В., Корнюшин В. В., Бисерова Н. М. Фауна цестод хрящевых рыб (Chondrichthyes: Elasmobranchii) Черного моря: состояние изученности и перспективы исследования // *Паразитология*. 2017. Т. 51, № 3.

- C. 189–205. [Polyakova T. A., Gaevskaya A. V., Korniyushin V. V., Biserova N. M. Cestodes of elasmobranchs (Chondrichthyes: Elasmobranchii) in the Black Sea: The state and perspectives of study. *Parazitologiya*, 2017, vol. 51, no. 3, pp. 189–205. (in Russ.)]
16. Полякова Т. А., Слынько Ю. В., Слынько Е. Е. Молекулярно-генетическая идентификация и таксономическое положение цестод рода *Bothriocephalus* Rud., 1808 (Cestoda: Bothriocephalidea) рыб Черного моря // *Современная паразитология – основные тренды и вызовы* : материалы VI съезда Паразитологического общества : междунар. конф., Санкт-Петербург, 15–19 октября 2018 г., Зоологический институт РАН, Санкт-Петербург / ред.: К. В. Галактионов, С. Г. Медведев, А. Ю. Рысс, Ф. О. Фролов. Санкт-Петербург : Изд-во «Лема», 2018. С. 189. [Polyakova T. A., Slynko Yu. V., Slynko E. E. Molecular-genetic identification and taxonomic position of *Bothriocephalus* Rud., 1808 (Cestoda: Bothriocephalidea) of the fish in the Black Sea. In: *Contemporary Parasitology – Major Trends and Challenge* : Proceeding of the VI Congress of the Society of Parasitologists, Russia : International Conference, Saint Petersburg, 15–19 Oct., 2018 / K. V. Galaktionov, S. G. Medvedev, A. Yu. Ryss, A. O. Frolov (Eds). Saint Petersburg : Izd-vo “Lema”, 2018, p. 189. (in Russ.)]
17. Полякова Т. А., Слынько Ю. В., Слынько Е. Е., Саркисов Д. Г. Таксономический статус и молекулярная характеристика цестод рода *Acanthobothrium* Balanchard, 1848 (Cestoda: Onchoproteocephalidea) от ската *Dasyatis pastinaca* (L., 1758) в Черном море, Крым // *Биоразнообразие паразитов*. Москва : Тов-во науч. изд. КМК, 2018. С. 199–200. (Труды / Центр паразитологии Ин-та проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН ; т. 50). [Polyakova T. A., Slynko Yu. V., Slynko E. E., Sarkisov D. G. Taxonomic status and molecular characteristic of *Acanthobothrium* Balanchard, 1848 (Cestoda: Onchoproteocephalidea) from *Dasyatis pastinaca* (L., 1758) in the Black Sea, Crimea. In: *Biodiversity of Parasites*. Moscow : Tov-vo nauch. izd. KMK, 2018, pp. 199–200. (Proceedings / Center for Parasitology, A. N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution of RAS ; vol. 50). (in Russ.)]
18. Решетникова А. В. К изучению паразитофауны рыб Черного моря // *Труды Карадагской биологической станции*. 1955. Вып. 13. С. 105–124. [Reshetnikova A. V. K izucheniyu parazitofauny ryb Chernogo morya. *Trudy Karadagskoi biologicheskoi stantsii*, 1955, no. 13, pp. 105–124. (in Russ.)]
19. Роскин Г. И., Левинсон Л. Б. *Микроскопическая техника* : учеб. пособие для вузов / под общ. ред. Г. И. Роскина. 3-е изд. Москва : Советская наука, 1957. 466 с. [Roskin G. I., Levinson L. B. *Mikroskopicheskaya tekhnika* : ucheb. posobie dlya vuzov / G. I. Roskin (Ed.). 3rd ed. Moscow : Sovetskaya nauka, 1957, 466 p. (in Russ.)]
20. Солонченко А. И., Руднева И. И. Систематическое положение цестоды «*Bothriocephalus scorpii*» от камбал Черного и Азовского морей и ее генетические вариации // *Экология моря*. 1997. Вып. 46. С. 75–77. [Solonchenko A. I., Rudneva I. I. Sistematischeskoe polozhenie tsestody “*Bothriocephalus scorpii*” ot kambal Chernogo i Azovskogo morei i ee geneticheskie variatsii. *Ekologiya morya*, 1997, iss. 46, pp. 75–77. (in Russ.)]
21. Чернышенко А. С. Новые гельминты рыб Черного моря // *Праці Одеського державного університету*. 1949. Т. 4, вып. 57. С. 79–91. [Chernyshenko A. S. Novye gel'minty ryb Chernogo morya. *Pratsi Odeskoho derzhavnoho universytetu*, 1949, vol. 4, no. 57, pp. 79–91. (in Russ.)]
22. Чернышенко А. С. Материалы по паразитофауне рыб Одесского залива // *Труды Одесского государственного университета*. 1955. Т. 14, вып. 7. С. 214–222. [Chernyshenko A. S. Materialy po parazitofaune ryb Odesskogo zaliva. *Trudy Odesskogo gosudarstvennogo universiteta*, 1955, vol. 14, no. 7, pp. 214–222. (in Russ.)]
23. Borc ea L. Note preliminaire sur les cestodes des elasmobranches ou sélaciens de la Mer Noire. *Annales Scientifiques de l'Université de Jassy*, 1934, vol. 19, pp. 345–369.
24. Caira J. N., Healy C. J., Marques F. P. L., Jensen K. Three new genera of rhinebothriidean cestodes from stingrays in Southeast Asia. *Folia Parasitologica*, 2017, vol. 64, article 008 (18 p.). <https://doi.org/10.14411/fp.2017.008>
25. Caira J. N., Jensen K., Waeschenbach A., Olson P. D., Littlewood D. T. J. Orders out of chaos – Molecular phylogenetics reveals the complexity of shark and stingray tapeworm relationships. *International Journal for Parasitology*, 2014, vol. 44, iss. 1, pp. 55–73. <https://doi.org/10.1016/j.ijpara.2013.10.004>
26. Campbell R. A., Beveridge I. The genus *Acanthobothrium* (Cestoda: Tetraphyllidea: Onchobothriidae)

- parasitic in Australian elasmobranch fishes. *Invertebrate Systematics*, 2002, vol. 16, no. 2, pp. 237–344. <https://doi.org/10.1071/IT01004>
27. Dmitrieva E. V., Lyakh A. M., Kornychuk Yu. M., Polyakova T. A., Popyuk M. P. *IBSS Collection of Marine Parasites: The Collection of Marine Parasites Maintained by the Institute of Biology of the Southern Seas*. 2020 : [site]. URL: <http://marineparasites.org/> (accessed 03.10.2019).
 28. Euzet L. *Recherches sur les cestodes tétraphyllides des sélaciens des côtes de France* / Université de Montpellier. [PhD dissertation]. Montpellier : Causse, Graille & Castelneau, 1959, 263 p.
 29. Goldstein R. J. The genus *Acanthobothrium* van Beneden, 1849 (Cestoda: Tetrphyllidea). *Journal of Parasitology*, 1967, vol. 53, no. 3, pp. 455–483. <https://doi.org/10.2307/3276705>
 30. Hammer Ø., Harper D. A. T., Ryan P. D. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*, 2001, vol. 4, iss. 1, article 4 (9 p.).
 31. Healy C. J., Caira J. N., Jensen K., Webster B. L., Littlewood D. T. J. Proposal for a new tapeworm order, Rhinebothriidea. *Journal of Parasitology*, 2009, vol. 39, no. 4, pp. 497–511. <https://doi.org/10.1016/j.ijpara.2008.09.002>
 32. Kornychuk V. V., Polyakova T. A. *Cairaeanthus* gen. n. (Cestoda, Rhinebothriidea), with the description of two new species from *Dasyatis pastinaca* in the Black Sea and the Sea of Azov. *Vestnik zoologii*, 2012, vol. 46, no. 4, pp. 291–308.
 33. Kuchta R., Scholz T. Diversity and distribution of fish tapeworms of the “Bothriocephalidea” (Eucestoda). *Parassitologia*, 2007, vol. 49, no. 3, pp. 129–146.
 34. Kuchta R., Scholz T., Bray R. A. Revision of the order Bothriocephalidea Kuchta, Scholz, Brabec & Bray, 2008 (Eucestoda) with amended generic diagnoses and key to families and genera. *Systematic Parasitology*, 2008, vol. 71, pp. 81–136. <https://doi.org/10.1007/s11230-008-9153-7>
 35. Olson P. D., Caira J. N., Jensen K., Overstreet R. M., Palm H. W., Beveridge I. Evolution of the trypanorhyncha tapeworms: Parasite phylogeny supports independent lineages of sharks and rays. *International Journal for Parasitology*, 2010, vol. 40, iss. 2, pp. 223–242. <https://doi.org/10.1016/j.ijpara.2009.07.012>
 36. Palm H. W. *The Trypanorhyncha Diesing, 1863*. Bogor : PKSPL-IPB Press, 2004, 710 p.
 37. *Planetary Biodiversity Inventory (2008–2017): Tapeworms from Vertebrate Bowels of the Earth* / Caira J. N., Jensen K. (Eds). Lawrence, KS, USA : University of Kansas, Natural History Museum, 2017, 463 p. (Special Publication ; no. 25).
 38. Ruhnke T. R., Caira J. N., Cox A. The cestode order Rhinebothriidea no longer family-less: A molecular phylogenetic investigation with erection of two new families and description of eight new species of *Anthocephalum*. *Zootaxa*, 2015, vol. 3904, no. 1, pp. 51–81. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.3904.1.3>
 39. Williams H. H. The ecology, functional morphology and taxonomy of *Echeneibothrium* Beneden, 1849 (Cestoda: Tetrphyllidea), a revision of the genus and comments on *Discobothrium* Beneden, 1870, *Pseudanthobothrium* Baer, 1956, and *Phormobothrium* Alexander, 1963. *Parasitology*, 1966, vol. 56, iss. 2, pp. 227–285. <https://doi.org/10.1017/S0031182000070864>
 40. Williams H. H. The genus *Acanthobothrium* Beneden, 1849 (Cestoda: Tetrphyllidea). *Nytt Magasin for Zoologi*, 1969, vol. 17, no. 1, pp. 1–56.

FISH CESTODES OF THE KARADAG NATURE RESERVE AND ADJACENT WATER AREAS OF THE BLACK SEA

Т. А. Polyakova

A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation
E-mail: polyakova-acant@yandex.ru

The first data on marine fish parasites in Karadag nature reserve water area were published at the beginning of the 20th century. By the beginning of the 21st century, information on the fauna of cestodes in this area of the Black Sea included data on 19 species recorded in 24 fish species. However, taxonomy of this class of helminths has changed significantly over the last decade, and regional fauna needs to be revised. The aim of this work is to revise the species composition of fish cestodes in the water area of the Karadag

nature reserve and adjacent areas on the basis of new data obtained and in accordance with current systematics of Cestoda. The material for this study was the collections of cestodes gathered by the staff of IBSS RAS Environmental Parasitology Department in the area of the Karadag nature reserve in different years, as well as our own collections of 1754 specimens of rays and teleosts of 53 species (2005–2018). The area studied is Black Sea coastal area from Meganom Cape to Ordzhonikidze village (southeastern part of Crimea), including various marine biotopes of the Karadag nature reserve. Voucher preparations of all types of cestodes used in this study were deposited in a subcollection of marine parasites of the World Ocean hydrobionts collection of IBSS RAS. Totally 20 cestode species were found in 17 fish species. Nine species, namely *Progrillotia dasyatidis*, *Parachristianella trygonis*, *Dollfusiella aculeata*, *Rhinebothrium walga*, *Caulobothrium* sp., *Rhabdotobothrium* sp., *Acanthobothrium* sp. 5, 7, and Anthocephaliidae gen. sp. 2., were reported for the common stingray *Dasyatis pastinaca* in the area under study for the first time. Cestodes belonging to the new species *Acanthobothrium* sp. 1, 2, 4 were found in the thornback ray *Raja clavata*. Of 19 species previously known in Karadag area, only 8 adult mature cestodes were recorded: “*Bothriocephalus scorpii*”, “*B. gregarius*”, *Echinobothrium typus*, *Grillotia erinaceus*, *Prochristianella papillifer*, *Echeneibothrium variabile*, *Cairaeanthus ruhnekei*, and *C. healyae*. In addition, larvae of the complex species “*Scolex pleuronectis*” were found in teleost fish. Larvae of cestode *Progrillotia dasyatidis* were found for the first time in the water area studied in 8 teleost fish species; this data contribute to the information on the participants in the life cycle of this helminth. Four cestode species, namely *Hepatoxylon trichiuri* larvae, *Nybelinia lingualis* larvae, *Tetrarhynchobothrium tenuicolle*, and *Anthobothrium cornucopia*, which were previously reported from this area, were not found in the present survey. Moreover, recent analysis of the occurrence and synonymy of species of orders Trypanorhyncha and Onchoproteocephalidea revealed that the previous identification of the cestodes in elasmobranchs as *Grillotia (Christianella) minuta* and *Acanthobothrium coronatum*, as well as identification of the cestodes in teleosts as *Tentacularia* sp. larvae, is incorrect due to the absence of their specific definitive hosts in the Black Sea. On the other hand, among representatives of *Acanthobothrium* spp. registered in *D. pastinaca* and *R. clavata* in Karadag water area, we found 7 morphologically different new taxa identified to the species level. The cestodes found belong to 6 orders: Bothriocephalidea, Diphyllidea, Trypanorhyncha, “Tetraphyllidea” relics, Rhinebothriidea, and Onchoproteocephalidea. The most species diversity of cestodes in both species of rays is registered among representatives of the orders Trypanorhyncha and Onchoproteocephalidea (5 species each), the least – in the orders Diphyllidea and “Tetraphyllidea” relics (1 species each). Thus, 12 species were added to the fauna of the cestodes parasitizing fish in Karadag area, and 8 of them are obviously representatives of new taxa.

Keywords: cestodes, fish, fauna, systematics, reserve, Crimea, Black Sea

УДК 582.26/.27(477.75)

МИКРОВОДОРОСЛИ ГРЯЗЕВОГО ВУЛКАНА БУЛГАНАКСКОГО СОПОЧНОГО ПОЛЯ КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА

© 2020 г. Л. И. Рябушко, А. В. Бондаренко

Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»,
Севастополь, Российская Федерация
E-mail: larisa.ryabushko@yandex.ua

Поступила в редакцию 03.09.2019; после доработки 03.09.2019;
принята к публикации 27.03.2020; опубликована онлайн 31.03.2020.

Грязевые вулканы — одно из уникальных явлений природы. Они широко распространены по всему миру. Грязевые вулканы встречаются и на территории Крыма, в том числе на Булганакском сопочном поле — крупнейшем скоплении действующих вулканов на полуострове (45°25'29.04" с. ш., 36°27'51.64" в. д.). Изучение одноклеточных водорослей грязевых вулканов в Крыму, как и в других регионах России, до настоящего времени не проводили. Необходимость и актуальность исследований продиктована отсутствием сведений о видовом составе микроводорослей грязевых вулканов. Пробы собраны О. Ю. Ерёминым 03.08.2012 и 13.04.2013 в верхнем 2–3-сантиметровом слое суспензии вместе с приповерхностной водой, вытекающей из него. Диапазон солёности и температуры воды составлял 27–32 г·л⁻¹ и +28...+31 °С. Видовой состав микроводорослей определяли в водных препаратах в прижизненном состоянии водорослей с помощью светового микроскопа Axioskop 40 (Carl Zeiss) при увеличении 10×40, используя программное обеспечение AxioVision Rel. 4.6. Обнаружено 16 видов, принадлежащих к высшим таксономическим группам: Cyanobacteria (1 вид), Dinophyta (2), Bacillariophyta (6) и Euglenophyta (7). Из них цианобактерия *Chamaecalyx swirenkoi* (Schirshov) Komárek et Anagnostidis, 1986 найдена нами в августе 2012 г. В пробах отмечены пеннатные диатомовые водоросли — как одиночно живущие (родов *Cylindrotheca* (Ehrenberg) Reimann & J. C. Lewin, *Lyrella* Karajeva и *Nitzschia* Hassall), так и колониальные (родов *Berkeleya* Greville и *Pseudo-nitzschia* H. Peragallo). Солоноватоводный, бентосный, бореально-тропический вид *Nitzschia thermaloides* Hustedt впервые отмечен для альгофлоры Крыма, Чёрного и Азовского морей. Также обнаружены эвгленовые водоросли — 5 видов рода *Trachelomonas* Ehrenberg и 2 вида *Strombomonas* Deflandre. Из всех видов, найденных в экотопе грязевого вулкана, 7 являются общими с Чёрным морем, а 9, включая 3 вида эвгленовых водорослей, — с Азовским. Показано, что по характеру галобности в грязевых вулканах преобладают виды, типичные для пресноводного комплекса (53 %), при существенной доле морских (27 %) и солоноватоводных видов (20 %). Из фитогеографических элементов флоры бореальные виды составляют 33 %, бореально-тропические — 47 %, космополиты — 20 %. Отмечено три вида потенциально токсичных водорослей — диатомея *Pseudo-nitzschia prolongatoides* (Hasle) Hasle, 1993 и динофитовые *Prorocentrum lima* (Ehrenberg) Dodge, 1975 и *Alexandrium tamiyavanichii* Balech, 1994. Последний вид является морским, бореально-тропическим и новым для альгофлоры Крыма и Чёрного моря. В статье также представлены собственные и литературные данные по морфологии, экологии, фитогеографии видов и их общему распространению в разных водоёмах мира. Некоторые виды микроводорослей относятся к индикаторам сапробности; они способны участвовать в очищении вод от избытка растворённых органических веществ. Приведены фотоснимки грязевых вулканов и микрорфотоснимки некоторых видов.

Ключевые слова: микроводоросли, эвгленовые, диатомовые, динофитовые, грязевой вулкан, Крымский полуостров

Грязевые вулканы — одно из уникальных явлений природы. Они широко распространены по всему миру. Грязевые вулканы встречаются в том числе на Керченском полуострове и входят в Булганакское сопочное поле — крупнейшее скопление действующих грязевых вулканов в Крыму [25]. Термин «грязевой вулкан» (нем. *Mudevulkan*) введён Г. П. Гельмерсенем, участвовавшим в течение 60 лет в изучении, в частности, грязевых вулканов Алтая и нефтяных месторождений Таманского и Керченского полуостровов. По мнению академика И. М. Губкина, одного из основоположников и создателей геологии нефти в России, газонефтяные проявления и грязевой вулканизм — суть функции одних и тех же причин, особых форм тектоники — диапировых структур (складок и куполов, возникающих за счёт выдавливания из нижних горизонтов высокопластичных пород — соли и глины). Он впервые установил их единое генетическое целое, что в дальнейшем было использовано в программе исследования грязевых вулканов Крымско-Кавказской геологической провинции Джерело [25].

Крымский полуостров является одним из районов проявления грязевого вулканизма; здесь 33 вулкана [8]. Грязь изливается через кратеры и растекается по склонам в виде потоков. Сопочные поля вулканов Булганакского типа относятся к грязевулканическим образованиям, для которых бурные извержения не характерны. Эти грязевые вулканы являются памятниками природы регионального значения и объектами туризма.

До настоящего времени изучение микроводорослей грязевых вулканов в Крыму не проводили. Нет таких сведений и для других регионов России. Предварительные исследования показали наличие микроводорослей в поверхностном слое выбросов грязевого вулкана. Актуальность работы продиктована полным отсутствием данных по изучению сообществ микроводорослей грязевых вулканов Крыма, которые представляют существенный научный интерес.

Цель работы — описать видовой состав микроводорослей биотопов грязевого вулкана, расположенного в восточной части Крымского полуострова.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материалом для исследования послужили качественные пробы (серо-глинисто-илистый субстрат и вода), отобранные сотрудником Института биологии южных морей имени А. О. Ковалевского [О. Ю. Ерёминым] на Крымском полуострове в районе группы действующих вулканов Булганакского сопочного поля. Здесь на обширной территории разбросаны вулканы, конусы которых располагаются почти вровень с землёй или отличаются относительно крупными размерами (рис. 1).

Пробы собрали 3 августа 2012 г. и 13 апреля 2013 г. в верхнем 2–3-сантиметровом слое илистой суспензии с приповерхностной водой, вытекающей из грязевого вулкана. Солёность (27–32 г·л⁻¹) и температуру воды (+28...+31 °С) измерили с помощью рефрактометра и электронного термометра соответственно [22].

Видовой состав микроводорослей определяли в водных препаратах, используя световой микроскоп Axioskop 40 (Carl Zeiss) при увеличении 10×40, с помощью программного обеспечения AxioVision Rel. 4.6. Для идентификации видов использовали современные определители и атласы [4, 12, 14, 15, 16, 20, 24, 36, 39, 40, 41].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Предварительное изучение двух проб илистой суспензии сопочных грязевых вулканов показало наличие в этих местообитаниях микроскопических водорослей, принадлежащих к различным таксономическим группам высокого ранга. Обнаружено 16 видов разных родов: цианобактерия (*Chamaecalyx swirenkoi* (Shirshov) Komárek et Anagnostidis), 2 вида динофитовых (*Alexandrium Halim* и *Prorocentrum Ehrenberg*), 6 видов пеннатных диатомовых водорослей (по 1 виду *Lyrella Karajeva*, *Nitzschia Hassall*, *Cylindrotheca* (Ehrenberg) Reimann et J. C. Lewin и *Pseudo-nitzschia*



Рис. 1. Общий вид на грязевой вулкан Крымского полуострова и жерла его кратера (фотоснимки из личного архива О. Ю. Ерёмина)

Fig. 1. General view of the mud volcano of the Crimean Peninsula and its crater vents (photos from O. Yu. Eremin personal archive)

Н. Peragallo; 2 колониальных вида *Berkeleya* Greville). В пробах часто встречались домики эвгленовых водорослей — 5 видов *Trachelomonas* Ehrenberg и 2 видов *Strombomonas* Deflandre.

Ниже приведены классификация найденных видов, их размеры, экология, фитогеография и общее распространение.

Отдел Cyanobacteria (Cyanoprokaryota), класс Cyanophyceae, порядок Pleurocapsales, семейство Hyellaceae, род *Chamaecalyx* J. Komárek et K. Anagnostidis, 1986. ***Chamaecalyx swirenkoi* (Schirshov*) Komárek et Anagnostidis, 1986** (базионим: *Dermocarpa swirenkoi* Shirshov, 1929; синонимы: *Dermocarpa clavata* Geitler, 1932; *D. clavata* var. *aquaedulcis* Geitler, 1932; *Dermocarpella clavata* (Geitler) J. Feldmann et Feldmann, 1953; *Cyanocystis swirenkoi* (Sirsov*) G. Hällfors et R. Munsterhjelm, 1982) [32]. Вид найден в грязевом вулкане 03.08.2012 (рис. 2). Встречался часто, единично.

* Уточнено авторское написание фамилии Schirshov (Ширшов) [5, 47] в отличие от указанного Širšov у Komárek et Anagnostidis, 1986 [32, 38].

Размеры: 41,8 мкм длина, 13,4 мкм ширина. Размеры клеток [по: 5, 48]: 20–30 мкм (реже — до 40 мкм) длина, 6,0–10,5 мкм ширина. Вид впервые описан П. П. Ширшовым из р. Кодими, притока р. Буг (Украина) [47]. Экология, фитогеография и общее распространение. Пресноводный и солоноватоводный, встречающийся в стоячих пресных водоёмах, а также в морях; бореально-тропический вид. Указан в супралиторали [23] и микрофитобентосе Казантипского заповедника Азовского моря [21], эпифитоне цистозире, на других субстратах Чёрного и Эгейского морей [17], а также на водорослях и высших водных растениях в устье р. Днестр и Днестровском лимане Одесской обл. [7], эпифитоне зелёных водорослей и высших водных растений у уреза воды в водоёмах Ленинградской обл., в заливе Чихачёва Японского моря [1], в лагуне Финского залива Балтийского моря [34], а также в Австрии, Японии, Мексике, Западной Словакии и на о-ве Ява [38].

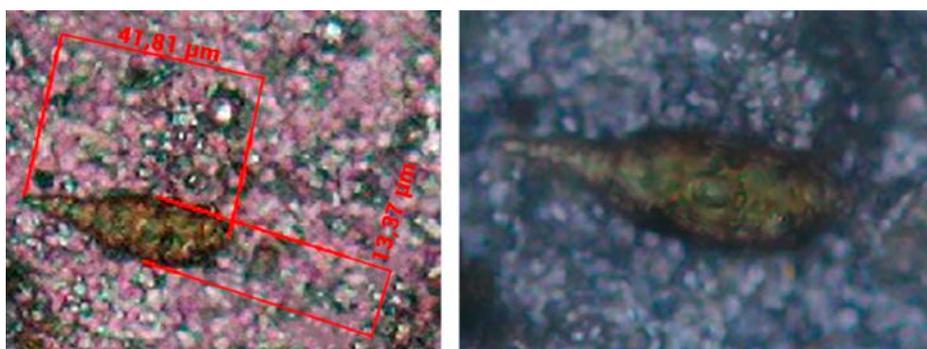


Рис. 2. Цианобактерия *Chamaecalyx swirenkoi* в грязевом вулкане в восточной части Крымского полуострова

Fig. 2. Cyanobacteria *Chamaecalyx swirenkoi* in the mud volcano in the eastern part of the Crimean Peninsula

Отдел Bacillariophyta, порядок Naviculales Bessey, семейство Berkeleyaceae D. G. Mann, 1990, род *Berkeleya* Greville, 1827. ***Berkeleya micans* (Lyngbye) Grunow, 1868** (базионим: *Bangia micans* Lyngbye, 1819; синоним: *Amphipleura micans* (Lyngbye) P. Cleve, 1894). Бентосный вид диатомовой водоросли найден в грязевом вулкане 03.08.2012. Размеры: 35 мкм длина, 3,5 мкм ширина. Размеры створки: 39–81 мкм длина, 4–5 мкм ширина [17]. Экология, фитогеография и общее распространение. Морской и солоноватоводный, бореальный и нотальный вид, обитающий преимущественно в южных европейских морях, в том числе на мелководье у Южного Крыма и кавказского побережья Чёрного моря на камнях, скалах, раковинах беспозвоночных [17, 21]. Вид впервые описан из фитопланктона и микрофитобентоса Азовского моря [3, 13].

***Berkeleya rutilans* (Trentepohl) Grunow, 1880** (базионим: *Conferva rutilans* Trentepohl ex Roth, 1806; синоним: *Amphipleura rutilans* (Trentepohl) Cleve, 1894). Бентосный вид диатомовой водоросли впервые найден в грязевом вулкане 03.08.2012. Размеры створки: 35,1 мкм длина, 3,5 мкм ширина. Размеры [по: 9, 21]: 6–38 мкм длина, 2,5–5,0 мкм ширина; 26–30 штрихов и 16–20 ободков в 10 мкм. Экология, фитогеография и общее распространение. Морской и солоноватоводный, литоральный и сублиторальный, эвритермный вид, космополит. Известен в Северном, Белом, Балтийском, Баренцевом, Карском, Средиземном, Чёрном, Азовском, Каспийском, Японском и Восточно-Китайском морях, а также у берегов Румынии, Англии, Северной Америки, Гренландии, Исландии, Швеции, Китая, Кувейта, Японии, Новой Зеландии и антарктической Австралии [20].

Отдел Bacillariophyta, порядок Bacillariales Hendeу, семейство Bacillariaceae Ehrenb., род *Cylindrotheca* L. Rabenhorst, 1859. ***Cylindrotheca closterium* (Ehrenberg) Reimann et J. Lewin, 1964** [45] (базионим: *Ceratoneis closterium* Ehrenb. 1839; синонимы: *Nitzschia closterium* (Ehrenb.) W. Smith, 1853; *N. reversa* W. Smith, 1853; *N. closterium* var. *reversa* (W. Smith) Hauck, 1872; *Nitzschiella closterium* Rabenhorst, 1864; *Nitzschia rostratum* Grunow, 1880;

N. longissima var. *closterium* (Ehrenb.) Van Heurck, 1885; *N. curvirostris* var. *closterium* (Ehrenb.) De Toni, 1892; *Nitzschiella longissima* var. *closterium* (Ehrenb.) Peragallo et Peragallo, 1897; *Homoeocladia closterium* (Ehrenb.) Kuntze, 1898; *Nitzschiella tenuirostris* Mereschk., 1901; *Nitzschia longissima* Gran, 1930; *N. closterium* var. *recta* Gran, 1931). Вид найден в грязевом вулкане 03.08.2012 (рис. 3). Размеры: 25–260 мкм длина, 1,5–8,0 мкм ширина, 12–16 фибул в 10 мкм [46]. Экология, фитогеография и общее распространение. Эвритермный, эвригалинный, морской и солоноватоводный, бенто-планктонный вид. Встречается в планктоне неритических вод, литорали и sublиторали морей; космополит; обнаружен во всех географических зонах Мирового океана [20, 35].

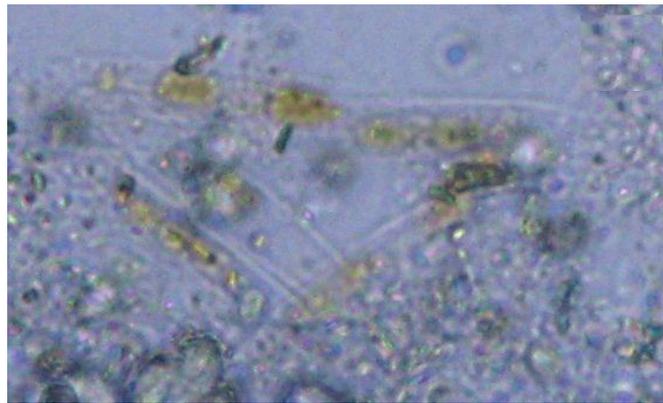


Рис. 3. Клетки *Cylindrotheca closterium* с хлоропластами в грязевом вулкане
Fig. 3. *Cylindrotheca closterium* cells with chloroplasts in the mud volcano

Отдел Bacillariophyta, порядок Lyrellales D. G. Mann, 1990, семейство Lyrellaceae D. G. Mann, 1990, род *Lyrella* N. I. Karajeva, 1978. ***Lyrella atlantica* (Gregory) D. G. Mann, 1990** (базионим: *Navicula atlantica* A. W. F. Schmidt, 1874; синонимы: *Navicula lyra* var. *atlantica* A. Schmidt, 1874; *Lyrella lyra* var. *atlantica* (Schmidt) Karajeva, 1988). Вид найден в грязевом вулкане 03.08.2012 (рис. 4). Размеры: створки 60–100 мкм длина, 26–32 мкм ширина, 9–11 штрихов в 10 мкм [4]; 59–65 мкм длина, 29–35 мкм ширина, 10 штрихов в 10 мкм [16]. Экология, фитогеография и общее распространение. Морской, sublиторальный, бо-реальный и нотальный вид. Известен у берегов Британии [36] и Австралии, а также в Чёрном и Северном морях [16].



Рис. 4. Бентосная диатомовая водоросль *Lyrella atlantica* из грязевого вулкана
Fig. 4. Benthic diatom *Lyrella atlantica* from the mud volcano

Отдел Bacillariophyta, порядок Bacillariales Hendeу, семейство Bacillariaceae Ehrenb., род *Nitzschia* Hassall, 1845. *Nitzschia thermaloides* Hustedt, 1955 (= *Nitzschia translucida* Hustedt, 1959) (Fig. 44: 1–7 [39]). Вид найден в грязевом вулкане 03.08.2012 (рис. 5). Размеры: 34,7–49,7 мкм длина, 3–7 мкм ширина, 1 фибула, 14–16 килевых точек в 10 мкм. Размеры: 20–73 мкм длина, 4–6 мкм ширина, 16–20 фибул в 10 мкм [39]; 43,2–59,5 мкм длина, 3,8–5,9 мкм ширина (световой микроскоп); 52 мкм длина, 6 мкм ширина, 1 фибула, 21 штрих в 10 мкм (световой электронный микроскоп) [41]. Экология, фитогеография и общее распространение. Солонатоводный, бентосный, бореально-тропический вид. Для Крыма, Чёрного и Азовского морей отмечен впервые. Указан в термальных водах Курильских островов как галофильный, обнаруженный при температуре воды +50...+60 °С [11]. Обычен в эстуариях рек и в северных фьордах побережья Швеции зимой, весной и осенью в супралиторали до 1,5 м в разных экотопах (илистый песок, ил, песок), а также на *Phormidium* и *Mytilus* [40].

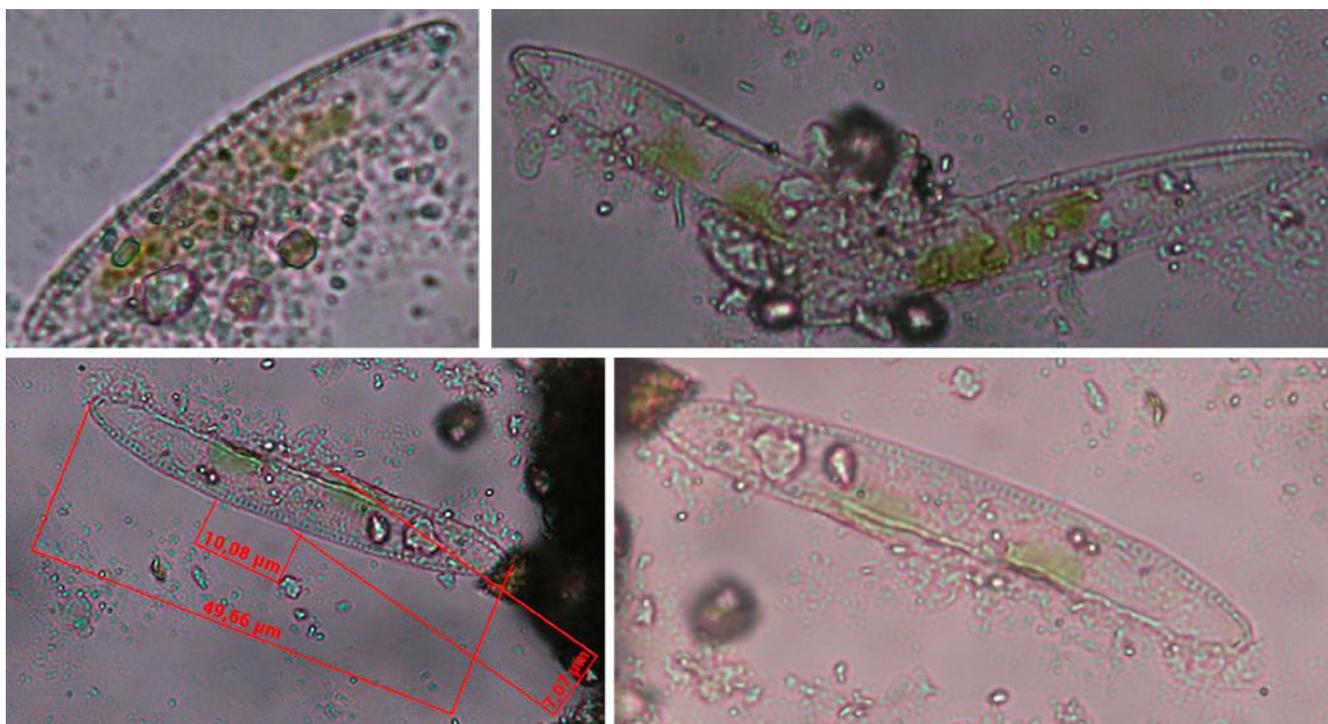


Рис. 5. Бентосная диатомовая водоросль *Nitzschia thermaloides* с хлоропластами из грязевого вулкана

Fig. 5. Benthic diatom *Nitzschia thermaloides* with chloroplasts from the mud volcano

Отдел Bacillariophyta, порядок Bacillariales Hendeу, семейство Bacillariaceae Ehrenb., род *Pseudo-nitzschia* H. Peragallo, 1900. *Pseudo-nitzschia prolongatoides* (Hasle) Hasle, 1993 (базионим: *Nitzschia prolongatoides* Hasle, 1965; синоним: *Nitzschia prolongata* Manguin, 1957). Вид найден в грязевом вулкане 03.08.2012. Размеры: 18,5 мкм длина, 3,3 мкм ширина. Размеры [по: 35]: 60 мкм длина, 16 килевых точек и 28 штрихов в 10 мкм. Обнаружен сравнительно недавно в Азовском и Чёрном морях [2, 17]. В прибрежье Казантипского природного заповедника (глубина до 1 м) Азовского моря вид встречался: 09.04.2006 (в эпифитоне *Enteromorpha* sp., колония из 2 клеток, 123,2 мкм длина, 2,8 мкм ширина); 28.10.2011 (в песчаном грунте, колония из 2 клеток, длина колонии 117,7 мкм, ширина 2,2 мкм, а также отдельные клетки, 55 мкм длина, 2,5 мкм ширина); 07.08.2014 (в эпифитоне красной водоросли *Ceramium rubrum*). Экология, фитогеография и общее распространение. Морской, планктонный, потенциально токсичный вид. В силу слабой изученности его пока можно отнести к бореальным и нотальным. Указан в антарктических водах [19].

Отдел Dinophyta, класс Dinophyceae, порядок Prorocentrales Lemmermann, семейство Prorocentraceae F. Stein, род *Prorocentrum* Ehrenberg, 1834. ***Prorocentrum lima* (Ehrenberg) Dodge, 1975** (базионим: *Cryptomonas lima* Ehrenberg, 1860; синонимы: *Exuviaella marina* Cienkowski, 1881; *Dinopyxis laevis* Stein, 1883; *E. lima* (Ehrenberg) Bütschli, 1885; *E. laevis* (Stein) Schröder, 1900; *E. chathamensis* Lemmermann, 1907; *E. cincta* Schiller, 1918; *E. caspica* I. Kisselev, 1927; *E. marina* var. *lima* (Ehrenberg) Schiller, 1931; *E. ostenfeldii* Schiller, 1933; *Prorocentrum marinum* Dodge et Bibby, 1973; *P. marinum* (Cienkowski) Abé in Bodeanu, 1987–1988; *P. marinum* var. *lima* (Schiller) Krachmalny, 1994). Вид обнаружен в грязевом вулкане 13.04.2013 (рис. 6). Размеры: 25 мкм длина, 14,7 мкм ширина. Размеры [по: 18]: 30–50 мкм длина, 18–45 ширина; черноморские экземпляры: 36–44 мкм длина, 21–30 мкм ширина. Экология, фитогеография и общее распространение. Морской, бентосный вид, космополит. Встречается в Средиземном, Адриатическом, Чёрном, Азовском, Каспийском морях и в Индийском океане. Вид является токсичным, продуцирует окадаевую кислоту [18, 40, 47].

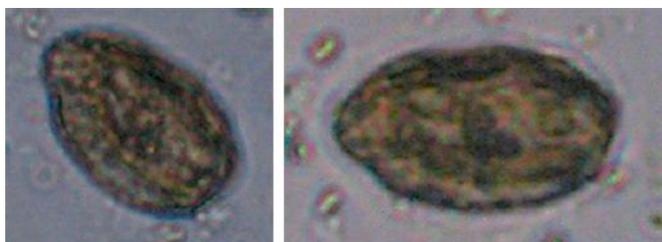


Рис. 6. Разные ракурсы панцирей динофлагелляты *Prorocentrum lima* (Ehrenberg) Dodge из грязевого вулкана

Fig. 6. Different views of dinoflagellate *Prorocentrum lima* (Ehrenberg) Dodge shells from the mud volcano

Отдел Dinophyta, класс Dinophyceae, порядок Gonyaulacales F. J. R. Taylor, семейство Ostreopsidaceae Lindemann, род *Alexandrium* Halim, 1960. ***Alexandrium tamiyavanichii* Balech, 1994.** Вид обнаружен в грязевом вулкане 13.04.2013 (рис. 7). Размеры: 32,3 мкм длина, 29,5 мкм ширина. Размеры [по: 29]: 40,8–41,7 мкм длина, 37,5–43,8 мкм ширина. Экология, фитогеография и общее распространение. Морской, планктонный, бореально-тропический, потенциально токсичный вид [47]. Указан для водоёмов Таиланда и Филиппинских островов [29]. Вид, новый для альгофлоры Крыма и Чёрного моря.

Ниже приведены виды эвгленовых водорослей, впервые обнаруженных в грязевом вулкане в восточной части Крымского п-ова, их экология, фитогеография и общее распространение [22].

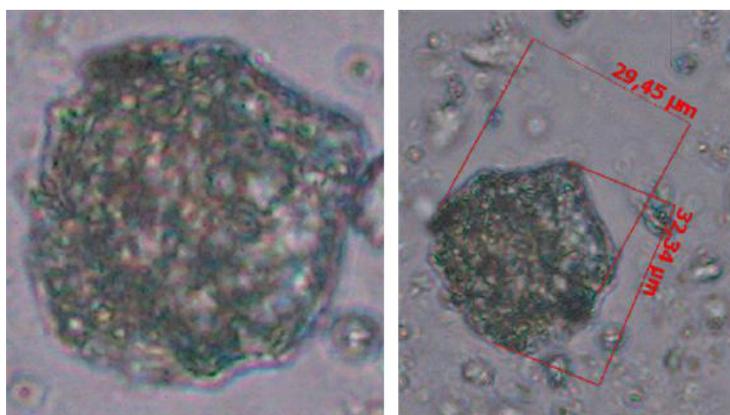


Рис. 7. Динофлагеллята *Alexandrium tamiyavanichii* Balech из грязевого вулкана

Fig. 7. Dinoflagellate *Alexandrium tamiyavanichii* Balech from the mud volcano

Отдел Euglenophyta, класс Euglenophyceae, порядок Euglenales, семейство Euglenaceae, род *Trachelomonas* Ehrenberg, 1838. ***T. armata* (Ehrenberg) Stein, 1878** (базионим: *Pantotrichum armatum* Ehrenberg; синоним: *Chaetotrypha armata* Ehrenberg, 1833). Вид обнаружен в грязевом вулкане 13.04.2013. Размеры домика: 32,4 мкм длина, 22,3 мкм ширина. Размеры домиков [по: 14]: 30–39 мкм длина, 25–28,5 мкм ширина. Экология, фитогеография и общее распространение. Пресноводный, бореально-тропический, нотальный вид. Указан в России [14, 15], Румынии [31], Китае [37], Сингапуре [43], Северной и Южной Америке [49], Австралии и Новой Зеландии [33], Турции [27], Нидерландах, Словакии, Швеции, Бразилии, на Карибских островах, в Британии, Германии, Испании, Бангладеш, в Африке [32], а также в Балтийском море [34].

***T. hexangulata* Svirenko, 1914** [48]. Вид обнаружен 13.04.2013 в поверхностной воде грязевого вулкана. Размеры домиков: 32,2–34 мкм длина, 12,6–14 мкм ширина; горлышко: 4,2 мкм высота, 2,8 мкм ширина. Размеры домиков [по: 14]: 27–34 мкм длина, 12–16 мкм ширина. Экология, фитогеография и общее распространение. Пресноводный, бореальный вид. Встречается среди скоплений цианобактерий в планктоне озёр, в заболоченном осоковом кочкарнике, в лесных канавах, лужах по руслам пересохших лесных ручьёв, по окраинам осоковых болот, в сфагновых мочажинах в лесотундре [14]. Указан в болотных водах европейской части России, Западной Сибири [14, 15], Дальнего Востока [10] и Челябинской области [26], в акватории Великих озёр США [42], в водоёмах Румынии [30], Турции [27], Нидерландов, Польши, Румынии, Словакии, Швеции, Британии, Испании, Индии, Бразилии, Аргентины, Северной Америки, Кубы, Таджикистана, Таиланда, Тайваня, Бангладеш, Мексики, Ирака [32], а также в Азовском [6] и Балтийском [34] морях.

***T. planctonica* Svirenko, 1914.** Обнаружен в грязевом вулкане 13.04.2013. Размеры домика: 23–27 мкм длина, 18–21 мкм ширина. Размеры [по: 14]: 21–31 мкм длина, 17–22 мкм ширина. Экология, фитогеография и общее распространение. Пресноводный, бореально-тропический вид. Обнаружен в малых водоёмах с пресной стоячей водой, изредка в реках, преимущественно в планктоне рек Томской и Челябинской областей, Западной Сибири [14, 26], Дальнего Востока России [10], в водоёмах Нидерландов, Польши, Румынии, Словакии, Швеции, Британии, Испании, Индии, Бразилии, Аргентины, Северной Америки, Кубы, Таджикистана, Таиланда, Тайваня, Бангладеш [32], а также в Балтийском [34] и Азовском морях [6].

***T. scabra* Playfair, 1915** (= *Trachelomonas scabra* var. *latior* Skwartzow, 1925). Вид обнаружен в грязевом вулкане 03.08.2012. Размеры домика: 23–27 мкм длина, 18–21 мкм ширина. Размеры [по: 14]: 18–33 мкм длина, 15–20 мкм ширина. Экология, фитогеография и общее распространение. Пресноводный, бореально-тропический и нотальный вид. Обнаружен в водоёмах Грузии и Челябинской области [26], в Британии, Северной Америке [50], Румынии [31], Испании [27], Турции [28], Китае [37], а также в южном полушарии — в Австралии и Новой Зеландии [32]. Указан в Азовском море [6].

***T. volvocina* (Ehrenberg) Ehrenberg, 1834** (= *Microglena volvocina* Ehrenb.). Вид найден в грязевом вулкане 13.04.2013, диаметр клетки 8–9 мкм (рис. 8). Домики шаровидные, в диаметре (4)–8–23–(32) мкм [14]. Экология, фитогеография и общее распространение. Вид пресноводный, преимущественно обитает в стоячей воде, реже встречается в слабосоленовой воде при pH (4,4)–5,5–8,4. Характеризуется как β -мезосапроб-олигосапроб, имеет миксотрофное питание. Бореальный. Указан в Одесской области и в Крыму [14].

Отдел Euglenophyta, класс Euglenophyceae, порядок Euglenales, семейство Euglenaceae, род *Strombomonas* Deflandre, 1930 (= *Trachelomonas* Ehrenberg). У видов этого рода домики более крупные и более изменчивые в очертании, чем у видов рода *Trachelomonas* [14]. Стромбомонасы обнаружены в прижизненном состоянии в грязевом вулкане. Представители этого рода часто встречались в пробах, но идентифицировать их до вида было затруднительно. Ниже представлены микрофотографии некоторых из них.

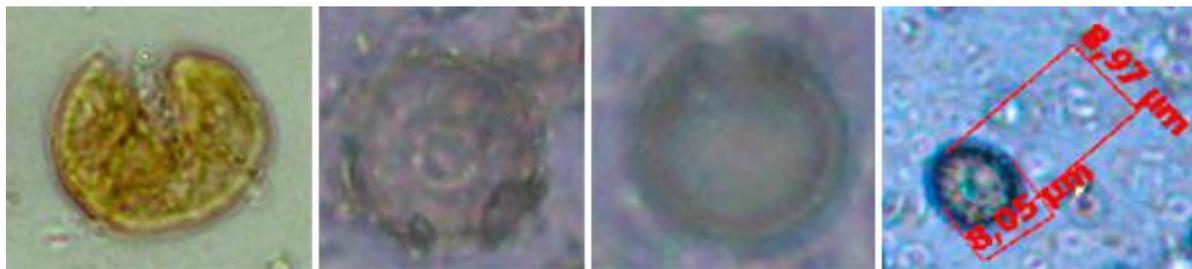


Рис. 8. *Trachelomonas volvocina* из грязевого вулкана, вид с разных ракурсов

Fig. 8. *Trachelomonas volvocina* from the mud volcano, view from different angles

***Strombomonas acuminata* (Schmarda) Deflandre, 1930** (базионим: *Lagenella acuminata* Schmarda; синоним: *Strombomonas acuminata* var. *verricosa* Teodoresco). Обнаружен в грязевом вулкане 13.04.2013 (рис. 9). Размеры: 21,5–27,6 мкм длина, 20,7–32 мкм ширина; горлышко: 14×9,8 мкм. Размеры [по: 14]: 38,0–55,5 мкм длина, 28–33 мкм ширина. Экология, фитогеография и общее распространение. Вид пресноводный, бореальный. Указан в водоёмах Румынии [31], Крыма, Кавказа, Средней Азии, Западной Сибири [14].

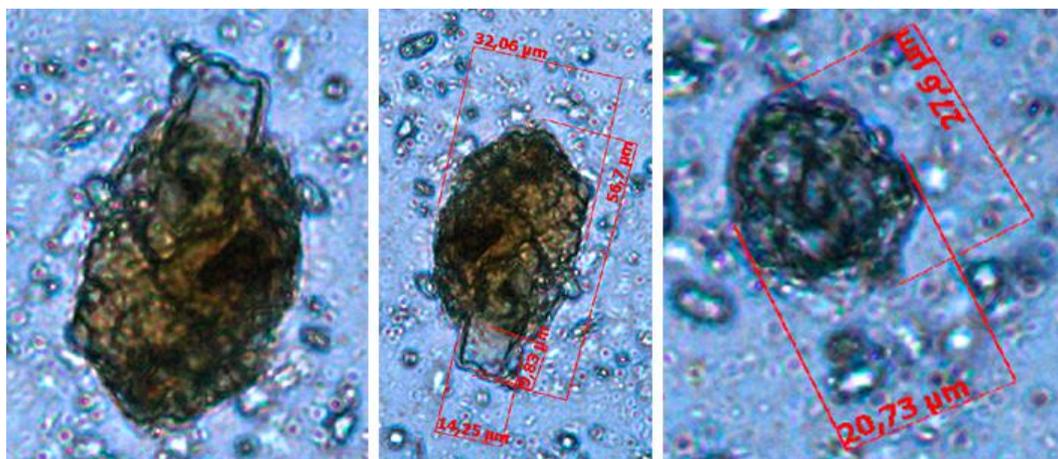


Рис. 9. Вид домиков *Strombomonas acuminata* из грязевого вулкана

Fig. 9. View of lodges of *Strombomonas acuminata* from the mud volcano

***St. tambowica* (Swirenko) Deflandre, 1930** (синонимы: *Trachelomonas zmiewica* Swirenko; *Tr. tambowica* var. *granulata* Skvortzov; *Strombomonas verrucosa* var. *zmiewica* (Swirenko) Deflandre, 1930). Обнаружен в грязевом вулкане 13.04.2013 (рис. 10). Размеры домиков: 38–55,5 мкм длина, 28–34 мкм ширина. Размеры [по: 14]: 47,5–56 мкм длина, 26,6–32 мкм ширина. Экология, фитогеография и общее распространение. Вид пресноводный, бореальный. Указан в планктоне пресных водоёмов Украины, а также Тамбовской, Ростовской и Томской областей России [14].

Эвгленовые, объединяющие одноклеточные, реже колониальные микроскопические водоросли, обитают в пресных водоёмах по всему миру. Небольшое их число приурочено к солоноватым и морским водам. Это представители родов *Eutreptia* Perty, *Eutreptiella* da Cunha, *Klebsina* P. C. Silva, *Trachelomonas* Ehrenberg и *Strombomonas* Deflandre. Они встречаются в планктоне, зарослях прибрежных водорослей и интерстициали песчаных пляжей, в реках, озёрах и у берегов морей с низкой солёностью. Для Чёрного моря указаны виды *Trachelomonas caudata* (Ehrenberg) F. Stein, *T. volvocina* (Ehrenberg) Ehrenberg и *T. volvocina* var. *papillata* Lemmermann [17]. В Азовском море обнаружено 24 вида, 7 из них (*Trachelomonas borodiniana* Swirenko, *T. globularis* (Averintsev) Lemmermann, *T. hispida* (Perty) F. Stein, *T. planctonica* Svirenko, *T. scabra* Playfair, *T. verrucosa* A. C. Stokes

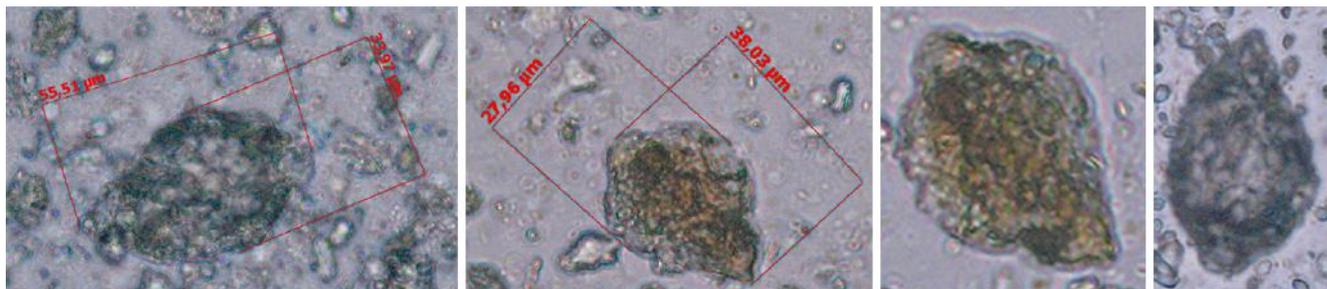


Рис. 10. Домики *Strombomonas tambowica* из грязевого вулкана, вид с разных ракурсов

Fig. 10. Lodges of *Strombomonas tambowica* from the mud volcano, view from different angles

и *T. volvocina* (Ehrenberg) Ehrenberg) отмечены в основном летом и осенью [6, 21]. Большинство видов микроводорослей из грязевого вулкана, имеющих миксотрофный или полностью сапрофитный тип питания, активно участвуют в самоочищении местообитаний.

Заключение. Изучение микроводорослей грязевого вулкана в районе Булганакского сопочного поля на Крымском полуострове показало разнообразие их видового состава в обводнённых местообитаниях.

Нами обнаружены цианобактерия *Chamaecalyx swirenkoi* и 15 видов эукариотических микроводорослей: 2 вида динофлагеллят (из родов *Prorocentrum* и *Alexandrium*), 6 видов диатомовых (по 1 из родов *Lyrella*, *Pseudo-nitzschia*, *Nitzschia* и *Cylindrotheca*; 2 из рода *Berkeleya*), 7 видов эвгленовых водорослей (5 из рода *Trachelomonas*; 2 из рода *Strombomonas*). Некоторые из них широко распространены в микрофитобентосе Азовского и Чёрного морей. Из всех типов водорослей, обнаруженных в грязевом вулкане, 7 видов являются общими с Чёрным морем, а 9, включая 3 вида эвгленовых, — с Азовским морем.

Отмечено три вида потенциально токсичных водорослей — диатомея *P. prolongatoides* и динофитовые *Pr. lima* и *A. tamiyavanichii*. Последний вид является морским, бореально-тропическим и новым для флоры Крыма. По характеристикам галобности отмеченные на вулкане виды относятся к пресноводному комплексу (53 %), при существенной доле морских (27 %) и солоноватоводных видов (20 %). С учётом фитогеографических особенностей можно заключить, что бореальные виды составляют 33 %, бореально-тропические — 47 %, космополиты — 20 %.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Исследование механизмов управления производственными процессами в биотехнологических комплексах с целью разработки научных основ получения биологически активных веществ и технических продуктов морского генезиса» (№ гос. регистрации АААА-А18-118021350003-6).

Благодарность. Статья посвящена неутомимому участнику многих сухопутных экспедиций по изучению гиперсолёных озёр Крыма, всегда оказывавшему помощь коллегам в отборе гидробиологических проб, — сотруднику Института биологии южных морей имени А. О. Ковалевского [Олегу Юрьевичу Ерёмину], трагически погибшему в 2014 г. во время возвращения из очередной экспедиции. Инициатива изучения микроводорослей на поверхности илистых субстратов в грязевом вулкане близ гиперсолёных водоёмов Крыма принадлежит ему. Именно О. Ю. Ерёмин собрал пробы из грязевого вулкана и настоял на их анализе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Белякова Р. Н. Конспект флоры Cyanophyta бентоса дальневосточных морей России. I. Chroococcales (Microcystaceae, Chroococcaceae) // *Ботанический журнал*. 2000. Т. 85, № 2. С. 106–118. [Beljakova R. N. Synopsis of the benthic cyanophyta flora of the Russian

- Far-Eastern Seas. 1. Chroococcales (Microcystaceae, Chroococcaceae). *Botanicheskii zhurnal*, 2000, vol. 85, no. 2, pp. 106–118. (in Russ.)]
2. Бондаренко А. В., Рябушко Л. И. Диатомовые водоросли бентоса Крымского побережья Азовского моря // *Современные проблемы альгологии* : материалы Междунар. науч. конф. и VII Школы по морской биологии, Ростов-на-Дону, 9–13 июня 2008 г. Ростов-на-Дону : ЮНЦ РАН, 2008. С. 61–63. [Bondarenko A. V., Ryabushko L. I. Diatomovye vodorosli bentosa Krymskogo poberezh'ya Azovskogo morya. In: *Sovremennyye problemy al'gologii* : materialy Mezhdunar. nauch. konf. i VII Shkoly po morskoi biologii, Rostov-on-Don, 9–13 June, 2008. Rostov-on-Don : YuNTs RAN, 2008, pp. 61–63. (in Russ.)]
 3. Бондаренко А. В. Видовое и эколого-географическое разнообразие бентосных диатомовых водорослей крымского побережья Азовского моря // *Биоразнообразие и устойчивое развитие* : материалы науч.-практ. конф., Симферополь, 20–22 мая 2010 г. Симферополь : КНЦ, 2010. С. 19–21. [Bondarenko A. V. Vidovoe i ekologo-geograficheskoe raznoobrazie bentosnykh diatomovykh vodoroslei krymskogo poberezh'ya Azovskogo morya. In: *Bioraznoobrazie i ustoichivoe razvitie* : materialy nauch.-praktich. konf., Simferopol, 20–22 May, 2010. Simferopol : KNTs, 2010, pp. 19–21. (in Russ.)]
 4. *Диатомовый анализ. Книга 3. Определитель ископаемых и современных диатомовых водорослей* / ред. А. Н. Криштофович, А. И. Прошкина-Лавренко. Ленинград : Госиздат, 1950. 398 с. [*Diatomovyi analiz. Kniga 3. Opredelitel' iskopayemykh i sovremennykh diatomovykh vodoroslei* / A. N. Krishtofovich, A. I. Proshkina-Lavrenko (Eds). Leningrad : Gosizdat, 1950, 398 p. (in Russ.)]
 5. Еленкин А. А. *Синезелёные водоросли СССР*. Москва ; Ленинград : АН СССР, 1938. Вып. 1. 984 с. [Elenkin A. A. *Sinezelenye vodorosli SSSR*. Moscow ; Leningrad : AN SSSR, 1938, iss. 1, 984 p. (in Russ.)]
 6. Ковалёва Г. В. Систематический список микроводорослей бентоса и планктона прибрежной части Азовского моря и прилегающих водоёмов // *Современные проблемы альгологии* : материалы Междунар. науч. конф. и VII Школы по морской биологии, Ростов-на-Дону, 9–13 июня 2008 г. Ростов-на-Дону : ЮНЦ РАН, 2008. С. 174–192. [Kovaleva G. V. Sistemati-cheskii spisok mikrovodoroslei bentosa i planktona pribrezhnoi chasti Azovskogo morya i pilegayushchikh vodoemov. In: *Sovremennyye problemy al'gologii* : materialy Mezhdunar. nauch. konf. i VII Shkoly po morskoi biologii, Rostov-on-Don, 9–13 June, 2008. Rostov-on-Don : YuNTs RAN, 2008, pp. 174–192. (in Russ.)]
 7. Кондратьева Н. В., Коваленко О. В., Приходькова Л. П. *Визначник прісноводних водоростей Української РСР. Вип. I. Синьозелені водорості – Cyanophyta. Ч. I. Загальна характеристика синьозелених водоростей. Клас хроококові водорості – Chroococcophyceae. Клас хамесифонові водорості – Chamaesiphonophyceae* / под общ. ред. Н. В. Кондратьевой. Киев : Наукова думка, 1984. 388 с. [Kondrat'yeva N. V., Kovalenko O. V., Prykhod'kova L. P. *Vyznachnyk prysnovodnykh vodorostei Ukrainskoi RSR. Iss. I. Synozeleni vodorosti – Cyanophyta. Pt. I. Zahalna kharakterystyka synozelenykh vodorostei. Klas khrookokovi vodorosti – Chroococcophyceae. Klas khamesyfonovi vodorosti – Chamaesiphonophyceae* / N. V. Kondratyeva (Ed.). Kyev : Naukova dumka, 1984, 388 p. (in Ukr.)]
 8. Корженевский В. В., Корженевская Ю. В. Синэкология сообществ сопки Одельнбурга. Булганакское грязевулканическое поле // *Актуальные проблемы биоразнообразия и природопользования* : материалы II Нац. науч.-практ. конф., посвящ. 20-летию кафедры экологии моря ФГБОУ ВО «КГМТУ», г. Керчь, 15–17 мая 2019 г. Симферополь, 2019. С. 584–587. [Korzhenevsky V. V., Korzhenevskaya Yu. V. Sinecology of communities of the Hill of Odelnburg. Bulganaksky mud-volcanic field. In: *Actual Problems of Biodiversity and Nature Management* : materials of the II National scientific-practical conference, dedicated to the 20th anniversary of the Marine Ecology Department of FGBOU VO “KGMTU”, Kerch, 15–17 May, 2019. Simferopol, 2019, pp. 584–587. (in Russ.)]
 9. Короткевич О. С. Диатомовая флора литорали Баренцева моря // *Труды Мурманского морского биологического института*. 1960. Вып. 1. С. 68–338. [Korotkevich O. S. Diatomovaya flora litorali Barentseva morya. *Trudy Murmanskogo morskogo biologicheskogo instituta*, 1960, iss. 1, pp. 68–338. (in Russ.)]
 10. Медведева Л. А., Никулина Т. В. *Каталог пресноводных водорослей юга Дальнего Востока России*. Владивосток : Дальнаука, 2014. 271 с.

- [Medvedeva L. A., Nikulina T. V. *Catalogue of Freshwater Algae of the Southern Part of the Russian Far East*. Vladivostok : Dal'nauka, 2014, 271 p. (in Russ.)]
11. Никулина Т. В. Водоросли горячих источников Курильских островов (Россия) // *Альгология*. 2010. Т. 20, № 3. С. 334–356. [Nikulina T. V. Biodiversity of algae of hot springs from Kuril Islands (Russia). *Al'gologia*, 2010, vol. 20, no. 3, pp. 334–356. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.1615/InterJAlgae.v12.i4.10>
 12. *Определитель пресноводных водорослей. Вып. 4. Диатомовые водоросли* / ред. А. И. Прошкина-Лавренко. Москва : Советская наука, 1951. 619 с. [*Opredelitel' presnovodnykh vodoroslei. Iss. 4. Diatomovye vodorosli* / A. I. Proshkina-Lavrenko (Ed.). Moscow : Sovetskaya nauka, 1951, 619 p. (in Russ.)]
 13. Пицык Л. К. О качественном составе фитопланктона Азовского моря // *Труды Севастопольской биологической станции*. 1963. Т. 14. С. 71–89. [Pitsyk L. K. O kachestvennom sostave fitoplanktona Azovskogo morya. *Trudy Sevastopol'skoi biologicheskoi stantsii*, 1963, vol. 14, pp. 71–89. (in Russ.)]
 14. Попова Т. Г. *Определитель пресноводных водорослей СССР. Вып. 7. Эвгленовые водоросли*. Москва : Советская наука, 1955. 282 с. [Popova T. G. *Opredelitel' presnovodnykh vodoroslei SSSR. Iss. 7. Evglenovye vodorosli*. Moscow : Sovetskaya nauka, 1955, 282 p. (in Russ.)]
 15. Попова Т. Г. *Флора планктонных криптогамных водорослей СССР. Euglenophyta*. Т. 8, № 1. Москва ; Ленинград : Наука, 1966. 412 с. [Popova T. G. *Flora planktonnykh kriptogamnykh vodoroslei SSSR. Euglenophyta*. Vol. 8, no. 1. Moscow ; Leningrad : Nauka, 1966, 412 p. (in Russ.)]
 16. Прошкина-Лавренко А. И. *Диатомовые водоросли бентоса Чёрного моря*. Москва ; Ленинград : Наука, 1963. 243 с. [Proshkina-Lavrenko A. I. *Diatomovye vodorosli bentosa Chernogo morya*. Moscow ; Leningrad : Nauka, 1963, 243 p. (in Russ.)]
 17. Рябушко Л. И. *Микрофитобентос Чёрного моря*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. 416 с. [Ryabushko L. I. *Microphytobenthos of the Black Sea*. Sevastopol : EKOSI-Gidrofizika, 2013, 416 p. (in Russ.)]
 18. Рябушко Л. И. *Потенциально опасные микроводоросли Азово-Черноморского бассейна*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. 288 с. [Ryabushko L. I. *Potentially harmful microalgae of the Azov and Black Sea basin* / V. I. Ryabushko (Ed.). Sevastopol : EKOSI-Gidrofizika, 2003, 288 p. (in Russ.)]
 19. Рябушко Л. И. Состояние изученности микрофитобентоса Аргентинских островов Антарктики // *Труды Белорусского государственного университета*, 2016. Т. 11, ч. 1. С. 337–350. [Ryabushko L. I. The state of knowledge microphytobenthos Argentine Islands of Antarctica. *Trudy Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2016, vol. 11, pt. 1, pp. 337–350. (in Russ.)]
 20. Рябушко Л. И., Бегун А. А. *Диатомовые водоросли микрофитобентоса Японского моря (сводный список и атлас)* : в 2-х т. Т. 2. Севастополь : ПК «КИА», 2016. 324 с. [Ryabushko L. I., Begun A. A. *Diatoms of Microphytobenthos of the Sea of Japan (Synopsis and Atlas)* : in 2 vols. Vol. 2. Sevastopol : PK "KIA", 2016, 324 p. (in Russ.)]
 21. Рябушко Л. И., Бондаренко А. В. *Микроводоросли планктона и бентоса Азовского моря (чек-лист, синонимика, комментарий)*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 211 с. [Ryabushko L. I., Bondarenko A. V. *Microalgae of the Plankton and Benthos of the Sea of Azov (Check-list, Synonymics, and Comment)*. Sevastopol : EKOSI-Gidrofizika, 2011, 211 p. (in Russ.)]
 22. Рябушко Л. И., Шадрин Н. В. Первая находка микроводорослей рода *Trachelomonas* Ehrenberg, 1834 (Euglenophyta) в кратере активного грязевого вулкана (Керченский п-ов, Крым) // *Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии* : сб. науч. ст. по материалам XVII междунар. конф., Барнаул, 24–27 мая 2018 г. Барнаул : Изд-во Алтайского государственного университета, 2018. С. 124–127. [Ryabushko L. I., Shadrin N. V. The first discovery of microalgae of the genus *Trachelomonas* Ehrenberg, 1834 (Euglenophyta) in the crater of an active mud volcano (Kerch Peninsula, Crimea). In: *Problemy botaniki Yuzhnoi Sibiri i Mongolii* : sb. nauch. statei po materialam XVII mezhdunar. konf. (Barnaul, 24–27 May, 2018). Barnaul : Izd-vo Altaiskogo gos. universiteta, 2018, pp. 124–127. (in Russ.)]
 23. Садогурская С. А. Флора Cyanophyta супралиторали Казантипского природного заповедника (Азовское море) // *Труды Никитского ботанического сада*. 2001. Т. 120. С. 124–131. [Sadogurskaya S. A. Flora Cyanophyta supralitorali Kazantipskogo prirodnogo zapovednika (Azovskoe more). *Trudy Nikitskogo botanicheskogo sada*, 2001, vol. 120, pp. 124–131. (in Russ.)]

24. Сафонова Т. А. *Эвгленовые водоросли Западной Сибири*. Новосибирск : Наука, 1987. 192 с. [Safonova T. A. *Evglenovye vodorosli Zapadnoi Sibiri*. Novosibirsk : Nauka, 1987, 192 p. (in Russ.)]
25. Шнюков Е. Ф., Соболевский Ю. В., Гнатенко Г. И., Науменко П. И., Кутний В. А. *Грязевые вулканы Керченско-Таманской области. Атлас*. Киев : Наукова думка, 1986. 152 с. [Shnyukov E. F., Sobolevskii Yu. V., Gnatenko G. I., Naumenko P. I., Kutnii V. A. *Gryazevye vulkany Kerchensko-Tamanskoi oblasti. Atlas*. Kiev : Naukova dumka, 1986, 152 p. (in Russ.)]
26. Ярушина М. И., Танаева Г. В., Еремкина Т. В. *Флора водорослей водоёмов Челябинской области*. Екатеринбург : УрО РАН, 2004. 308 с. [Yarushina M. I., Tanaeva G. B., Eremkina T. V. *Flora vodoroslei vodoetov Chelyabinskoi oblasti*. Ekaterinburg : UrO RAN, 2004, 308 p. (in Russ.)]
27. Álvarez C. M. Catálogo de las algas continentales españolas. II. Craspedophyceae, Cryptophyceae, Chrysophyceae, Dinophyceae, Euglenophyceae, Haptophyceae, Phaeophyceae, Rhodophyceae, Xanthophyceae. *Acta Botanica Malacitana*, 1984, vol. 9, pp. 27–40.
28. Ayceel V. Check-list of the freshwater algae of Turkey. *Journal of the Black Sea / Mediterranean Environment*, 2005, vol. 11, pp. 1–124.
29. Balech E. Three new species of the genus *Alexandrium* (Dinoflagellata). *Transactions of the American Microscopical Society*, 1994, vol. 113, no. 2, pp. 216–220. <https://doi.org/10.2307/3226651>
30. Brosnan S., Brown J. P., Farmer M. A., Triemer R. E. Morphological separation of the euglenoid genera *Trachelomonas* and *Strombomonas* (Euglenophyta) based on lorica development and posterior strip reduction. *Journal of Phycology*, 2005, vol. 41, iss. 3, pp. 590–605. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2005.00068.x>
31. Caraus I. *The algae of Romania. A Distributional Checklist of Actual Algae*. Version 2.3. Bacău: Universitatea Bacău, 2012, 809 p. <http://www.vliz.be/imisdocs/publications/270678.pdf>
32. Guiry M. D., Guiry G. M. *AlgaeBase*. World-wide electronic publication. Galway: National University of Ireland, 2018. URL: <https://www.algaebase.org> (accessed 30.08.2019).
33. Day S. A., Wickham R. P., Entwisle T. J., Tyler P. A. *Bibliographic Check-list of Non-marine Algae in Australia*. Canberra : Australian Biological Resources Study, 1995, 276 p. (Flora of Australia Supplementary Series ; 4).
34. Hällfors G. *Checklist of Baltic Sea Phytoplankton Species (Including Some Heterotrophic Protistan Groups)*. Helsinki : Baltic Marine Environment Protection Commission, 2004, 210 p. (Baltic Sea Environment Proceedings ; no. 95).
35. Hasle G. R. *Nitzschia pungiformis* (Bacillariophyceae), a new species of the *Nitzschia seriata* group. *Norwegian Journal of Botany*, 1971, vol. 18, pp. 139–144.
36. Hendey N. I. *An Introductory Account of the Smaller Algae of British Coastal Waters. Part 5. Bacillariophyceae (Diatoms)*. Koenigstein : Otto Koeltz Science Publishers, 1976, 317 p. (Fishery Investigations ; Series 4).
37. Hu H., Wei Y. *The Freshwater Algae of China. Systematics, Taxonomy, and Ecology*. Beijing : Science Press, 2006, 1023 p. (in Chinese).
38. Komárek J., Anagnostidis K. *Cyanoprokaryota. Teil 1 / Part 1. Chroococcales. Süßwasserflora von Mitteleuropa*. [Berlin] : SpringerSpektrum, 2008, 548 p. (Süßwasserflora von Mitteleuropa ; Bd. 19/1).
39. Krammer K., Lange-Bertalot H. *Bacillariophyceae. Teil 2 / Part 2. Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae*. [Stuttgart] : SpringerSpektrum, 1988, 610 p. (Süßwasserflora von Mitteleuropa ; vol. 2/2).
40. Kuylenstierna M. *Benthic Algal Vegetation in the Nor-dre Älv Estuary (Swedish West Coast)*. [Dissertation]. Göteborg, Sweden : Department of Mar. Bot. University of Göteborg, 1989, vol. 1, 244 p.
41. Kuylenstierna M. *Benthic Algal Vegetation in the Nor-dre Älv Estuary (Swedish West Coast)*. [Dissertation]. Göteborg, Sweden : Department of Mar. Bot. University of Göteborg, 1990, vol. 2 [plates], 76 p.
42. Murakami Y., Oshima Y., Yasumoto T. Identification of okadaic acid as a toxic component of a marine dinoflagellate *Prorocentrum lima*. *Bulletin of the Japanese Society for the Science of Fish*, 1982, vol. 48, iss. 1, pp. 69–72. <https://doi.org/10.2331/suisan.48.69>
43. Pham M. N., Tan H. T. W., Mitrovic S., Yeo H. H. T. *A checklist of the algae of Singapore*. 2nd edition. Singapore : Raffles Museum of Biodiversity Research, National University of Singapore, 2011, 100 p.
44. Prescott G. W. *Algae of the Western Great Lakes Area*. With an illustrated key to the genera of desmids and freshwater diatoms. Revised [second] edition. Dubuque, Iowa : Wm. C. Brown Company Publishers, 1962, 977 p.

45. Reimann B. E. F., Lewin J. C. The diatom genus *Cylindrotheca* Rabenhorst (with a reconsideration of *Nitzschia closterium*). *Journal of the Royal Microscopical Society*, 1964, vol. 83, iss. 3, pp. 283–296. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2818.1964.tb00542.x>
46. Ryabushko L. I., Balycheva D. S., Bondarenko A. V., Zheleznova S. N., Begun A. A., Stonik I. V. Different aspects of studying a diatom *Cylindrotheca closterium* (Ehrenberg) Reimann et Lewin 1964 in natural and laboratory conditions. *Morskij biologicheskij zhurnal*, 2019, vol. 4, no. 2, pp. 52–63. <http://doi.org/10.21072/mbj.2019.04.2.06>
47. Schirshov P. P. Über zwei interessante Algen aus dem fluss Kodyma (Nebenfluss des Süd-Bug). *Die Nachrichten der Hydrobiologischen Station zu Dnjeppropetrowsk*, 1930, I, pp. 195, fig. 2.
48. Svirenko D. Zur Kenntnis der russischen Algenflora, I. Die Euglenaceen Gattung *Trachelomonas*. *Archiv für Hydrobiologie und Planktonkunde*, 1914, vol. 9, pp. 630–647.
49. Taylor F. J. R., Fukuyo Y., Larsen J. Taxonomy of Harmful Dinoflagellates. In: G. M. Hallegraeff, D. M. Anderson, A. D. Cembella (Eds). *Manual on Harmful Microalgae*. 2nd revised edition. Paris : UNESCO Publ., 2003, pp. 389–433. (Monographs on Oceanographic Methodology ; 11).
50. Wolowski K., Walne P. L. *Strombomonas* and *Trachelomonas* species (Euglenophyta) from south-eastern USA. *European Journal of Phycology*, 2007, vol. 42, iss. 4, pp. 409–431. <https://doi.org/10.1080/09670260701702508>

MICROALGAE OF MUD VOLCANO OF THE BULGANAK SOPOCHNOE FIELD ON THE CRIMEAN PENINSULA

L. I. Ryabushko and A. V. Bondarenko

A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation
E-mail: larisa.ryabushko@yandex.ua

Mud volcanoes are one of unique natural phenomena widely spread around the world. They can be found in Crimea, including the Bulganak sopochnoe field – the largest cluster of active mud volcanoes on the peninsula (45°25'29.04"N, 36°27'51.64"E). Study of mud volcano microalgae in Crimea, as well as in other regions of Russia, has not been conducted so far. Therefore, scientific interest is caused by need and urgency of the study of these volcanoes. First data on microalgae species composition of active mud volcanoes are presented in this article. Samples collected by O. Yu. Eremin (03.08.2012 and 13.04.2013) in the upper 2–3-cm layer of suspension and in surface water were investigated. The ranges of salinity and water temperature were 27–32 g per L and +28...+31 °C, respectively. Microalgae species composition was determined in water preparations using Axioskop 40 (Carl Zeiss) light microscope at magnification of 10×40 with software AxioVision Rel. 4.6. Totally 16 taxa were found: Cyanobacteria (1), Dinophyta (2), Bacillariophyta (6), and Euglenophyta (7). Of these, cyanobacteria *Chamaecalyx swirenkoi* (Schirshov) Komárek et Anagnostidis, 1986 was found by us in the mud volcano in August 2012. Pennate species of diatoms were also identified – single living (of genera *Cylindrotheca* (Ehrenberg) Reimann & J. C. Lewin, *Lyrella* Karajeva, and *Nitzschia* Hassall) and colonial species (of genera *Berkeleya* Greville and *Pseudo-nitzschia* H. Peragallo). The brackish-water, benthic, boreal-tropical species *Nitzschia thermaloides* Hustedt was recorded for the algal flora of Crimea, the Black Sea, and the Sea of Azov for the first time. Euglenophytes were also found in the samples – 5 species of the genus *Trachelomonas* Ehrenberg and 2 species of the genus *Strombomonas* Deflandre. Of all the species found in the mud volcano ecotope, 7 species are common for the Black Sea, and 9 species, including 3 euglenophytes, are common for the Sea of Azov. It is shown that by characteristics of halobility, species found in the mud volcano belong to fresh-water complex (53 %), with a significant share of marine (27 %) and brackish-water (20 %) species. Of the phytogeographic flora elements, boreal species make up 33 %, boreal-tropical – 47 %, and cosmopolites – 20 %. Three species of potentially toxic algae are recorded: diatom *Pseudo-nitzschia prolongatoides* (Hasle) Hasle, 1993, as well as dinophytes *Prorocentrum lima* (Ehrenberg) Dodge, 1975 and *Alexandrium tamiyavanichii* Balech, 1994. The last species is marine, boreal-tropical, and new to the algology of Crimea, the Black Sea, and the Sea of Azov. In the article, own and literary data on morphology, ecology, and phytogeography of species, as well as on their general distribution in different waterbodies of the world, are also presented. Some microalgae species are indicators of saprobity; they are able to participate in purification of water from organic substances. Photos of mud volcanoes and micrographs of some species are presented.

Keywords: microalgae, euglenophytes, diatoms, dinophytes, mud volcano, Crimean Peninsula

УДК 581.526.323(262.5)

К ИЗУЧЕНИЮ МАКРОФИТОБЕНТОСА ПРИБРЕЖНОЙ АКВАТОРИИ КАРАДЖИНСКОГО УЧАСТКА ПОЛУОСТРОВА ТАРХАНКУТ (КРЫМ, ЧЁРНОЕ МОРЕ)

© 2020 г. С. Е. Садогурский

Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН, Ялта, Российская Федерация
E-mail: ssadogurski@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.05.2019; после доработки 27.12.2019;
принята к публикации 27.03.2020; опубликована онлайн 31.03.2020.

Приведены сведения о составе и распределении макроводорослей в прибрежной акватории Караджинской бухты, примыкающей к южному кластеру особо охраняемой природной территории Национальный природный парк «Тарханкутский» (Крым, п-ов Тарханкут, Чёрное море). Специфика геоморфологического строения береговой зоны обуславливает структурные особенности макрофитобентоса и его промежуточное положение по отношению к макрофитобентосу прилегающих абразионных и аккумулятивных участков берега. Всего зарегистрировано 57 видов макроводорослей (Chlorophyta — 12, Ochrophyta (кл. Phaeophyceae) — 12, Rhodophyta — 33), из них 21 — в псевдолиторали и 56 — в сублиторали. Биомасса колеблется от 0,5 кг·м⁻² в псевдолиторали до 4,5 кг·м⁻² в сублиторали. Характер и количественные показатели бентосной растительности, состав флоры и соотношение эколого-флористических группировок макрофитобентоса в целом характерны для Тарханкутско-Севастопольского гидробиотанического района Чёрного моря. Раритетная фракция включает 14 таксонов, занесённых в природоохранные списки различного ранга. Биотоп подлежит особой охране согласно Директиве ЕС о местообитаниях (Directive 92/43/ЕЕС). Территориально-аквальный комплекс имеет созологическую и рекреационную ценность, его сохранение необходимо для обеспечения структурно-функциональной целостности экосистемы береговой зоны моря.

Ключевые слова: Чёрное море, Крым, полуостров Тарханкут, макрофитобентос, видовой состав, биомасса, распределение

Тарханкутский полуостров Крыма имеет динамичное геологическое прошлое и характеризуется многообразием геоморфологических структур, что на фоне относительно слабой антропогенной трансформации определяет высокий уровень ландшафтного и биологического разнообразия [17]. Здесь в составе особо охраняемых природных территорий (далее — ООПТ) сохраняются уникальные фрагменты настоящих дерново-злаковых (бедноразнотравных) и пустынных (поляннотравных) степей [12]. Биологическим и ландшафтным разнообразием отличаются и прибрежные воды Чёрного моря, омывающие берега Тарханкута. Это определяет созологическое значение района и его потенциал для оптимизации ООПТ и экосетей различных рангов. С другой стороны, это также обуславливает рекреационно-туристическую привлекательность, особенно среди приверженцев неорганизованного и экстремального отдыха. За ними обычно следуют «традиционные» рекреанты, а значит, неизбежно формируется инфраструктура. Уже сейчас в береговой зоне моря трансформированные (рекреационные) и приоритетные для сохранения биоразнообразия участки (включая существующие и проектируемые заповедные объекты) тесно соседствуют и чередуются.

С учётом динамики освоения побережья, в том числе планов сооружения масштабных рекреационных комплексов, яхтенной марины и пр., можно заключить, что биологическое разнообразие района находится под угрозой. Выделение участков для заповедания или предназначенных для лимитированного экологического туризма определяет необходимость проведения специальных всесторонних исследований. Наибольшую эволюционную ценность (в том числе на Тарханкуте) представляют целостные территориально-аквальные комплексы береговой зоны моря с сохранившимся природным или квазиприродным растительным покровом, который определяет границы, структуру и само существование большинства биотопов [15]. При этом аквальные участки у берегов Тарханкутского п-ова в составе ООПТ представлены крайне слабо, а макрофитобентос, формирующий фундамент прибрежно-морских биотопов, изучен фрагментарно. Последовательно заполняя этот пробел, ранее мы охарактеризовали донный растительный покров у абразионных и аккумулятивных берегов в границах обширного Караджинского участка, расположенного на крайнем западе Тарханкута [13, 28, 29]. Цель на данном этапе — представить в рамках комплексного гидробиотанического обследования Караджинского участка детальную характеристику морского фитобентоса у абразионно-аккумулятивных берегов и дать рекомендации по их рациональному использованию.

Район исследований. Тарханкутский п-ов имеет тектоническое происхождение и представляет собой пологий вал, сформированный третичными известняками понтического яруса [4]. Бухта Караджинская расположена в центральной части одноимённого участка, характеризующегося разнообразием геоморфологического строения берега, и ограничена мысами Карамрун и Тарханкут (рис. 1).

Вглубь суши депрессию бухты продолжают лагунное солёное оз. Караджа (Тарханкутская группа озёр), отделённое песчано-ракушечной пересыпью, и широкая одноимённая балка [5]. Северный и южный берега бухты — абразионные, они сложены плотными верхнесарматскими известняками, их отступление не превышает $0,1\text{--}0,2\text{ м}\cdot\text{год}^{-1}$, а основным источником поступления наносов является донная абразия [2, 3, 17]. Известняки у м. Карамрун образуют высокие обрывы, а у м. Тарханкут имеют лишь небольшой уступ размыва. Соответственно, у северного мелкобухтового берега дно приглубое, покрытое глыбовым и глыбово-валунным навалом; южный берег окаймлён полосой плоского известнякового бенча, образующего под водой ряд широких ступеней. На мелководье валунный навал практически отсутствует, фрагментарно он регистрируется с глубин 4–7 м. На расстоянии около 1,5–2 км от берега на глубинах 15–20 м расположена боковая грань скальной плиты, у подножия которой на глубинах 35–40 м лежит шельфовая равнина, покрытая рыхлыми отложениями [5].



Рис. 1. Картосхема Караджинского участка на Тарханкутском п-ове: 1 — район отбора проб обозначен окружностью, в центре которой расположен гидробиотанический профиль

Fig. 1. Map of the Karadzhinsky Plot on the Tarkhankut Peninsula: 1 – sampling area is marked with a circle; hydrobotanical profile is in the circle center

В местах примыкания пересыпи известняки перекрываются глинами; здесь можно наблюдать отмерший клиф — показатель того, что ранее тело пересыпи располагалось мористее. В обследованном пункте высота клифа не превышает 1–1,5 м. Сама пересыпь, сейчас имеющая длину около 1 км, ширину до 400 м и высоту до 1,5 м, сложена оолитовыми известняковыми песками с примесью битой ракуши. Эти же отложения покрывают отмелое дно бухты.

Гидродинамика у берегов Тарханкутского п-ова высока из-за активной волновой деятельности и вдольбереговых течений со скоростями до $0,25\text{--}0,30\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ [11]. При этом, по нашим наблюдениям, у южного берега бухты деформация волн и забурунивание их гребней над пологим дном начинаются на значительном удалении от береговой полосы. В летний период в данном районе моря преобладают ветра западных, северных и северо-западных румбов. В июле средняя многолетняя температура воды составляет $+19,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, минерализация — $17,47\text{ г}\cdot\text{л}^{-1}$ (колебания в среднем в течение года — в пределах $+4,8\text{...}+21,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $17,21\text{--}17,55\text{ г}\cdot\text{л}^{-1}$ соответственно) [1]. Невысокий береговой уступ, примыкание аккумулятивного пляжа пересыпи и наличие подъездных путей привлекают на данный участок стихийных рекреантов. В то же время он примыкает к южному кластеру ООПТ (с 2009 г. — национальный природный парк «Чарівна гавань»; с 2015 г. — природный парк регионального значения «Тарханкутский»).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Обследование участка береговой зоны общей протяжённостью по урезу воды около 1 км (рис. 1) выполнено в летний период 2012 г. по общепринятым гидробиотическим методикам [7, 8]. Месторасположение основания гидробиотического профиля (в точке пересечения линии прибоа), вдоль которого непосредственно отбирали пробы макрофитобентоса, — $45^{\circ}21'33,2''\text{ с. ш.}, 32^{\circ}30'35''\text{ в. д.}$ Материал собран во время погружений с использованием легководолазного снаряжения: в псевдолиторали — вдоль уреза воды (станция № 1: расстояние от берега $l \approx 0$, высота над уровнем моря — глубина $h \approx \pm (0,05\text{...}0,15)\text{ м}$) и в сублиторали — вдоль трёх изобат (ст. № 2: $l \approx 25\text{...}30\text{ м}$, $h \approx 1\text{ м}$; ст. № 3: $l \approx 100\text{...}120\text{ м}$, $h \approx 3\text{ м}$; ст. № 4: $l \approx 250\text{...}300\text{ м}$, $h \approx 5\text{ м}$). Визуальное обследование дна выполнено вплоть до глубины 10 м. Таким образом, профиль охватывает все зоны бентали, где регистрируется растительный покров. Псевдолиторальные пробы отобраны в количестве десяти с использованием рамки площадью $0,01\text{ м}^2$, сублиторальные — в количестве пяти на каждой станции с использованием рамки площадью $0,04\text{ м}^2$. В период проведения работ на расстоянии 5 м от берега в поверхностном слое воды минерализация составляла $17,5\text{ г}\cdot\text{л}^{-1}$, температура — $+22,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Объект исследования — бентосные макрофиты. Номенклатура макроводорослей отделов Chlorophyta, Ochrophyta (кл. Phaeophyceae) и Rhodophyta дана по AlgaeBase [22], имена авторов таксонов — в стандартном сокращении в соответствии с рекомендациями IPNI [23]; при необходимости дополнительно приведены номенклатурные комбинации по определителю А. Д. Зиновой [6], который использован в качестве базового руководства при идентификации таксонов. Эколого-флористические характеристики водорослей даны по А. А. Калугиной-Гутник [8]; сапробиологическая и галобная характеристика — по неопубликованным данным А. А. Калугиной-Гутник и Т. И. Ерёмченко (сведения любезно предоставлены авторами сотрудникам НБС-ННЦ). Проективное покрытие (далее — ПП) устанавливали глазомерно. При статистической обработке определяли средние значения биомассы (влажный вес) макрофитов (\bar{x}) и ошибку среднего ($\pm S_{\bar{x}}$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В зависимости от интенсивности сгонно-нагонных явлений псевдолиторальная растительность в Азово-Черноморском регионе проявляет различные структурные особенности [27]. В псевдолиторали обследованного пункта на твёрдом субстрате, представленном фрагментированной волноприбойной нишей и отдельными скоплениями валунного навала, в виде недифференцированного на подзоны узкого пояса шириной $0,1\text{--}0,3\text{ м}$, развивается сообщество

Cladophora sericea + *Ulva linza* (ст. № 1). В нём при биомассе чуть более 490 г·м⁻² и ПП до 75 % отмечен 21 вид макрофитов (табл. 1, рис. 2). В целом растительный покров псевдолиторали напоминает таковой на м. Тарханкут [29], однако в обследованном пункте зона шире и несколько менее фрагментирована, поэтому количественные показатели выше (хотя они существенно меньше, чем в районе м. Карамрун [28], в то время как в вершине бухты на рыхлых отложениях псевдолитораль вообще не выражена [16]).

Таблица 1. Список и биомасса видов макрофитобентоса в обследованной акватории

Table 1. List and biomass of macrophytobenthos species in the water area surveyed

Таксон	Биомасса, г·м ⁻² (станции № 1–4)			
	ПСЛ (± 0,15 м)	СБЛ (–0,5...5 м)		
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Chlorophyta				
<i>Bolbocoleon piliferum</i> Pringsh.		м	м	
<i>Chaetomorpha aërea</i> (Dillwyn) Kütz. [<i>Chaetomorpha chlorotica</i> (Mont.) Kütz., <i>Chaetomorpha crassa</i> (C. Agardh) Kütz.]		м	м	м
<i>Chaetophora pisiformis</i> (Roth) C. Agardh		м	м	
<i>Cladophora albida</i> (Nees) Kütz. [<i>C. albida</i> (Huds.) Kütz.]	33,33 ± 25,17	0,42	м	1,22 ± 1,01
<i>Cladophora sericea</i> (Huds.) Kütz.	300,00 ± 55,68	4,50	2,92 ± 1,91	16,51 ± 3,15
<i>Cladophora vagabunda</i> (L.) C. Hoek	5,00	0,67	м	
<i>Ulva intestinalis</i> L. [<i>Enteromorpha intestinalis</i> (L.) Link nom. illeg. ?]	2,33 ± 1,89	2,50		
<i>Ulva linza</i> L. [<i>Enteromorpha linza</i> (L.) J. Agardh, <i>Enteromorpha ahlnieriana</i> Bliding nom. illeg.]	111,67 ± 41,93	97,08 ± 42,74	12,46	39,87 ± 3,02
<i>Ulva prolifera</i> O. F. Müll. [<i>Enteromorpha prolifera</i> (O. F. Müll.) J. Agardh]	м	12,50 ± 9,92		
<i>Ulvella lens</i> P. Crouan et H. Crouan	м			м
<i>Ulvella leptochaete</i> (Huber) R. Nielsen, O'Kelly & B. Wysor [<i>Ectochaete leptochaete</i> (Huber) Wille]	м	м	м	
<i>Ulvella viridis</i> (Reinke) R. Nielsen, O'Kelly & B. Wysor [<i>Entocladia viridis</i> Reinke] ☼		м	м	
Ochrophyta (кл. Phaeophyceae)				
<i>Cladostephus spongiosum</i> f. <i>verticillatum</i> (Lightf.) Prud'homme [<i>Cladostephus verticillatus</i> (Lightf.) C. Agardh nom. illeg. ?] *		32,92 ± 18,93	850,00 ± 143,16	
<i>Corynophlaea umbellata</i> (C. Agardh) Kütz.		м	м	
<i>Cystoseira crinita</i> Duby [<i>C. crinita</i> (Desf.) Bory] ★☼▲○		1683,33 ± 95,93	3042,50 ± 415,02	
<i>Dictyota fasciola</i> (Roth) J. V. Lamour. [<i>Dilophus fasciola</i> (Roth) M. Howe]	1,35	31,25 ± 28,26		
<i>Ectocarpus siliculosus</i> (Dillwyn) Lyngbye [<i>E. confervoides</i> (Roth) Le Jolis]	м	м	м	
<i>Feldmannia irregularis</i> (Kütz.) Hamel [<i>Ectocarpus arabicus</i> Fig. et De Not.]				м
<i>Myriactula rivulariae</i> (Suhr ex Aresch.) Feldmann		м	м	
<i>Myrionema seriatum</i> (Reinke) Kylin		м	м	
<i>Padina pavonica</i> (L.) Thivy [<i>Padina pavonia</i> (L.) Gaill. nom. illeg. ?] □		3,75		

Продолжение на следующей странице...

<i>Spermatochnus paradoxus</i> (Roth) Kütz. *		4,58		
<i>Sphacelaria cirrosa</i> [cirrhosa] (Roth) C. Agardh	М	М	М	М
<i>Stilophora tenella</i> (Esper) P. C. Silva [<i>Stilophora rhizodes</i> (Ehrh.) J. Agardh nom. illeg.?] *+▲		5,00		
Rhodophyta				
<i>Acrochaetium parvulum</i> (Kyllin) Hoyt [<i>Kyllinia parvula</i> (Kyllin) Kyllin]			М	М
<i>Acrochaetium secundatum</i> (Lyngb.) Nägeli [<i>Kyllinia virgatula</i> (Harv.) Papenf., <i>K. secundata</i> (Lyngb.) Papenf.]	М	М	М	
<i>Apoglossum rusCIFolium</i> (Turner) J. Agardh			1,00	
<i>Callithamnion granulatum</i> (Ducluz.) C. Agardh *	28,33 ± 10,41	4,67		
<i>Choreonema thuretii</i> (Bornet) F. Schmitz			М	
<i>Ceramium ciliatum</i> (J. Ellis) Ducluz.	6,43 ± 4,97	0,83	0,92	М
<i>Ceramium diaphanum</i> (Lightf.) Roth. [<i>Ceramium tenuissimum</i> (Lyngbye) J. Agardh]		9,82 ± 3,15	М	М
<i>Ceramium virgatum</i> Roth [<i>Ceramium pedicellatum</i> (Duby) J. Agardh nom. illeg.?.; <i>Ceramium rubrum</i> (Huds.) C. Agardh nom. illeg.?]]		12,92 ± 3,15	1,42 ± 1,01	
<i>Chondria capillaris</i> (Huds.) M. J. Wynne [<i>Ch. tenuissima</i> (Gooden. et Woodw.) C. Agardh]		10,83 ± 4,39	6,08	0,42
<i>Chroodactylon ornatum</i> (C. Agardh) Basson [<i>Asterocytis ramosa</i> (Thwaites) Gobi ex F. Schmitz]	М	М	М	
<i>Colaconema savianum</i> (Menegh.) R. Nielsen [<i>Acrochaetium savianum</i> (Menegh.) Nägeli]	М	М	М	
<i>Gelidium crinale</i> (Hare ex Turner) Gaillon [<i>G. crinale</i> (Turner) J. V. Lamour.]		М	М	
<i>Gelidium spinosum</i> (S. G. Gmel.) P. C. Silva [<i>G. latifolium</i> (Grev.) Bornet et Thur.] ⊕	М			
<i>Hydrolithon farinosum</i> (J. V. Lamour.) Penrose & Y. M. Chamb. [<i>Melobesia farinosa</i> J. V. Lamour.]			М	
<i>Jania rubens</i> (L.) J. V. Lamour.		М	13,75 ± 11,92	
<i>Jania virgata</i> (Zanardini) Mont. [<i>Corallina granifera</i> J. Ellis et Soland.]			8,33 ± 0,72	
<i>Laurencia coronopus</i> J. Agardh *▲		4,17		
<i>Laurencia obtusa</i> (Huds.) J. V. Lamour. ⊕		47,08 ± 18,30	200,83 ± 61,71	
<i>Lomentaria firma</i> (J. Agardh) Falkenb. [<i>L. firma</i> (J. Agardh) Kyllin nom. illeg.?]]		0,17		
<i>Lophosiphonia obscura</i> (C. Agardh) Falkenb.			М	М
<i>Peyssonnelia rubra</i> (Grev.) J. Agardh			М	
<i>Phyllophora crispa</i> (Huds.) P. S. Dixon [<i>Ph. nervosa</i> (DC.) Grev.] *⊕+▲	4,25			
<i>Pneophyllum confervicola</i> (Kütz.) Y. M. Chamb. [<i>Melobesia minutula</i> Foslie]	М	М	М	
<i>Polysiphonia denudata</i> (Dillwyn) Grev. ex Harv. [<i>P. denudata</i> (Dillwyn) Kütz. nom. illeg.?]]	1,67	11,67 ± 8,78	0,50	1,34
<i>Polysiphonia elongata</i> (Huds.) Spreng. [<i>P. elongata</i> (Huds.) Harv. nom. illeg.?]]				1,58

Продолжение на следующей странице...

<i>Vertebrata fucoides</i> (Huds.) Kuntze [<i>Polysiphonia fucoides</i> (Huds.) Grev., <i>Polysiphonia nigrescens</i> (Dillwyn) Grev. nom. illeg. ?]	0,67	7,50 ± 2,50		
<i>Polysiphonia opaca</i> (C. Agardh) Moris et De Not. [<i>P. opaca</i> (C. Agardh) Zanardini nom. illeg. ?]				0,20
<i>Polysiphonia subulata</i> (Ducluz.) Kütz. [<i>Polysiphonia violacea</i> var. <i>subulata</i> (Ducluz.) L. Batten] ☼	м	82,50 ± 47,70	0,83	
<i>Vertebrata subulifera</i> (C. Agardh) Kuntze [<i>Polysiphonia subulifera</i> (C. Agardh) Harvey]		500,83 ± 77,51	310,83 ± 146,49	
<i>Rhodochorton purpureum</i> (Lightf.) Rosenv. *			0,08	0,02
<i>Sahlingia subintegra</i> (Rosenv.) Kornmann [<i>Erythrocladia subintegra</i> Rosenv.]			м	
<i>Stylonema alsidii</i> (Zanardini) K. M. Drew [<i>Goniotrichum elegans</i> (Chauv.) Zanardini] *☼		м	м	
<i>Titanoderma pustulatum</i> (J. V. Lamour.) Nägeli [<i>Dermatolithon pustulatum</i> (J. V. Lamour.) Foslie]			м	

Примечание: ПСЛ — псевдолитораль; СБЛ — сублитораль. Пустые ячейки означают отсутствие вида в пробах; м — мало (менее 0,01 г в пробе). Ошибка среднего ($\pm S_{\bar{x}}$) приведена для случаев, когда $v < 100\%$ (v — коэффициент вариации). Существует мнение, что *Cystoseira crinita* является средиземноморским эндемиком и в Чёрном море не встречается, а экземпляры, идентифицируемые как *C. crinita* f. *crinita* и *C. crinita* f. *bosphorica*, на самом деле относятся к *Cystoseira bosphorica* Sauv. [19]. Этот вопрос требует специального исследования, в том числе у берегов Крыма. Природоохранный статус таксонов в Азово-Черноморском регионе: ☼ — Красная книга Российской Федерации [10]; □ — Red Data Book of the Republic of Bulgaria [26]; * — Красная книга Украины [18]; ★ — Black Sea Red Data Book [20]; ☼ — Black Sea Red Data List [21]; ○ — Convention for the Protection of the Mediterranean Sea Against Pollution (Barcelona Convention, 1976) [25]; ▲ — Красная книга Республики Крым [9].

Note: ПСЛ – pseudolittoral; СБЛ – sublittoral. Empty cells indicate absence of the species in the samples; м – little (less than 0.01 g in the sample). Standard error of the mean ($\pm S_{\bar{x}}$) is indicated for cases where $v < 100\%$ (v is coefficient of variation). There is an opinion that *Cystoseira crinita* is Mediterranean endemic and does not occur in the Black Sea, and specimens identified as *C. crinita* f. *crinita* and *C. crinita* f. *bosphorica* actually refer to *Cystoseira bosphorica* Sauv. [19]. This issue requires a special study, with Crimean coast including. The conservation status of taxa in the Sea of Azov – Black Sea region: ☼ – Red Book of the Russian Federation [10]; □ – Red Data Book of the Republic of Bulgaria [26]; * – Red Data Book of Ukraine [18]; ★ – Black Sea Red Data Book [20]; ☼ – Black Sea Red Data List [21]; ○ – Convention for the Protection of the Mediterranean Sea Against Pollution (Barcelona Convention, 1976) [25]; ▲ – Red Book of the Republic of Crimea [9].

На мелководье сублиторали прибойные волны, взаимодействуя с пологим дном, трансформируются, их кинетическая энергия возрастает. В результате на твёрдой плоской поверхности скального бенча макроскопическая растительность повреждается, а во время штормов фактически истирается галькой, гравием и пр., поэтому бенч вплоть до глубины 0,3–0,4 (0,5) м почти лишён макроскопической растительности. При этом здесь и ниже (даже под пологом растительности) он в большей или меньшей мере покрыт тонким слоем песка, приносимого из бухты, чего не наблюдалось южнее, на м. Тарханкут. На некотором удалении от берега на твёрдом ровном дне зарегистрированы многоярусные (ПП 90–100 %), хорошо развитые, не имеющие признаков механического повреждения сообщества «пояса цистозирь». На небольших глубинах (ст. № 2) развивается сообщество *Cystoseira crinita* + *Vertebrata subulifera*, где при биомассе чуть более 2,5 кг·м⁻² зарегистрировано 42 таксона макроводорослей (табл. 1, рис. 2). *V. subulifera* практически на всём спектре глубин обильно развивается и доминирует в эпифитоне на дистальных концах ветвей наиболее крупных экземпляров цистозирь. Глубже (ст. № 3), вплоть до нижней границы распространения твёрдых грунтов, которая в данном пункте расположена на глубине около 4 м на расстоянии 190–200 м от берега, ровное дно покрывает сообщество *Cystoseira crinita* + *Vertebrata subulifera* – *Cladostephus spongiosum* с биомассой около 4,5 кг·м⁻² и ПП 90–95 %, в котором отмечен 41 таксон. До этого момента картина

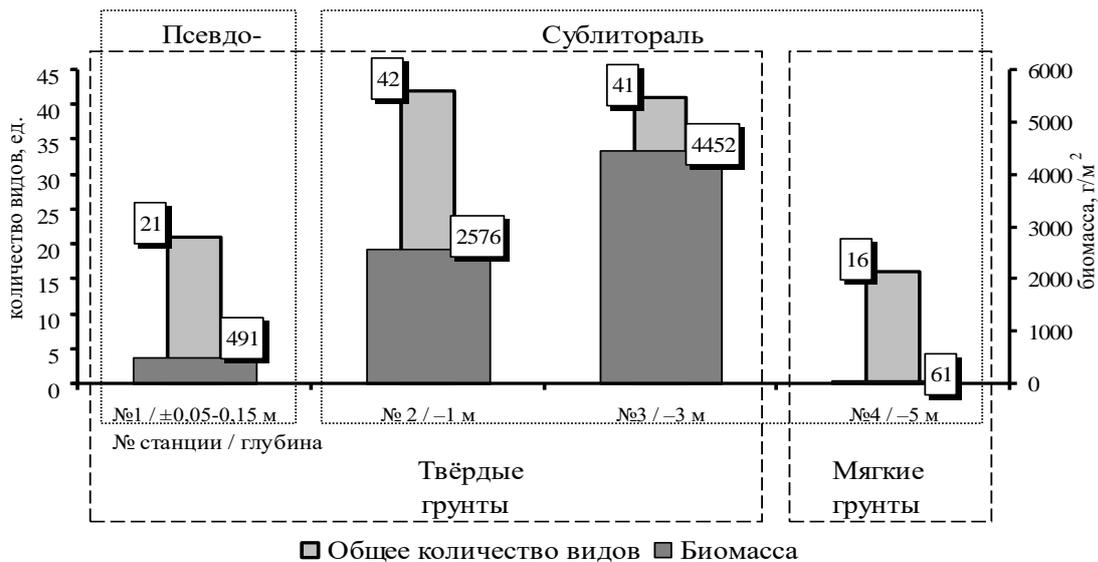


Рис. 2. Изменение общего количества видов и средней биомассы макрофитобентоса с глубиной в обследованной акватории

Fig. 2. Changes in total number of species and average biomass of macrophytobenthos with depth change in the water area surveyed

в общих чертах была сходна с зарегистрированной на м. Тарханкут [29], однако если у м. Тарханкут глубже плоский бенч покрыт глыбовым навалом с цистозировыми зарослями, то в обследованном пункте он постепенно погружается в рыхлые отложения (чёткой грани между скалами и песком нет).

В бухтах в летний, относительно безветренный период на раковинах моллюсков и на других твёрдых предметах, располагающихся на поверхности рыхлых грунтов, на глубинах не менее 3 м развивается эфемерный растительный покров преимущественно из зелёных водорослей и в меньшей мере — красных [14]. Ранее нами показано, что в центральной части бух. Караджинская в условиях пониженной гидродинамики на некотором удалении от прибойной зоны с её повышенной гидродинамикой (и обилием рекреантов, которые также оказывают механическое воздействие на грунт и растительность) развивается сообщество *Ulva linza* + *Cladophora sericea* [16]. Оно зарегистрировано в обследованном пункте в аналогичных условиях (ст. № 4). При биомассе более 60 г·м⁻² и ПП 10–15 % в нём отмечено 16 видов макрофитов (табл. 1, рис. 2), то есть в период проведения исследований по всей бухте (визуально — до глубины не менее 8 м) на рыхлых грунтах развился достаточно равномерный эфемерный растительный покров одинакового состава и структуры. Эмпирически можно заключить, что его плотность (и биомасса) зависит от количества ракушки на поверхности грунта и от продолжительности относительного безветрия, поскольку повреждения наблюдаются даже после недолгих штормов.

В общей сложности в границах обследованного пункта отмечено 57 видов макроводорослей (табл. 1): Chlorophyta — 12 (21,05 %), Ochrophyta (Phaeophyceae) — 12 (21,05 %), Rhodophyta — 33 (57,9 %). При этом в сублиторали зарегистрировано 56 таксонов, что сопоставимо со значениями, полученными для прочих пунктов Караджинского участка, а в псевдолиторали — 21 таксон, что не намного больше, чем на м. Тарханкут (где строение берега сходно с таковым обсуждаемого пункта), но в полтора раза меньше, чем в районе м. Карамрун (где берег приглубый и бенч не выражен) [13, 28, 29].

В интервале глубин 1–3 м в сублиторальных сообществах цистозиреры значения видового разнообразия и биомассы фитобентоса являются наиболее высокими (табл. 2). По биомассе доля Phaeophyceae в них колеблется в пределах 68–87 %, при этом с глубиной на фоне увеличения общих значений показателя снижается доля эпифитона в её формировании. Вклад Chlorophyta в образование биомассы этих сообществ минимален, в то время как в псевдолиторали и на рыхлых грунтах

в сублиторали они формируют более 90 % биомассы. На всём спектре обследованных глубин в соотношении систематических группировок по количеству видов половина и более приходится на Rhodophyta.

В целом по пункту доминируют олигосапробные макроводоросли (табл. 2). Их доля по числу видов (61–64 %) и по биомассе (94–99 %) максимальна в цистозировых сообществах. Между тем в псевдолиторали и на рыхлых грунтах в сублиторали почти вся биомасса сформирована мезосапробионтами; их доля по числу видов здесь также наиболее высока (33–43 %).

По числу видов в обследованном пункте доминируют коротковегетирующие водоросли, но с ростом глубины доля многолетних таксонов возрастает (табл. 2). Они же формируют от 69 до 92 % биомассы в цистозировых сообществах, в то время как в псевдолиторали и на рыхлых грунтах в сублиторали до 100 % образуют коротковегетирующие таксоны.

Анализ соотношения галобных группировок показывает, что по числу видов доминируют морские макроводоросли, при этом с ростом глубины проявляется тенденция к увеличению их доли (табл. 2). Представители этой группировки образуют 94–99 % биомассы цистозировых сообществ, но в псевдолиторали и на рыхлых грунтах в сублиторали такой результат показывают солоноватоводно-морские таксоны. Отметим, что состав морской группировки от станции к станции сильно изменяется, а набор солоноватоводно-морских и солоноватоводных таксонов фактически одинаков на всех станциях (табл. 1).

В целом по участку и на отдельных станциях доминируют представители тепловодного комплекса, в особенности по биомассе. С ростом глубины доля тепловодных макроводорослей в общем количестве видов возрастает, но их вклад в формирование биомассы снижается (последнее справедливо для сублиторали) (табл. 2). Картина в целом напоминает зарегистрированную ранее у м. Тарханкут [29].

Макрофитобентос обследованного участка насчитывает 14 раритетных таксонов (принимая во внимание относительно небольшие размеры водоёма и международное сотрудничество причерноморских государств в области защиты Чёрного моря, мы учли все опубликованные национальные и международные фитосозологические перечни, а также региональную Красную книгу) (табл. 1). Биотоп, основу которого формируют сообщества макрофитов, попадает под действие Директивы ЕС о сохранении естественной среды обитания и дикой фауны и флоры (Directive 92/43/ЕЕС; код 1170 — Рифы) [24].

Сравнение результатов настоящего исследования с данными, полученными ранее для других пунктов Караджинского участка, показывает, что растительный покров этого пункта занимает своего рода промежуточное положение. Он обнаруживает черты, характерные для прилегающего с юга м. Тарханкут: в псевдолиторальной зоне — относительно слабое развитие и некоторую фрагментированность растительного покрова; в сублиторальной зоне — его отсутствие в наиболее мелководной части и развитие монотонных цистозировых зарослей с пониженной биомассой и относительно упрощённой вертикальной структурой (два яруса) вплоть до нижней границы твёрдых грунтов (например, у м. Карамрун при больших длине талломов и биомассе цистозире в сообществах формируются три яруса). Как мы указывали ранее, это обусловлено особенностями геоморфологического строения береговой зоны: если у м. Карамрун покрытая глыбово-валунным и (глубже) глыбовым навалом узкая прибрежная полоса дна имеет значительный угол уклона, то для обследованного участка и для м. Тарханкут характерен обширный отмельный скальный бенч, практически лишённый глыбовых скоплений. Над его поверхностью происходит ранняя трансформация прибойных волн, когда колебательное движение водной массы преобразуется в поступательное. Это усиливает механическое воздействие на прибрежные заросли цистозире, что не только уменьшает значение продукционных показателей, но и нивелирует количественные различия между отдельными станциями [29]. В то же время глубже на рыхлом субстрате развивается эфемерный растительный покров, который по составу и структуре аналогичен таковому в центральной части бух. Караджинская [13, 16].

Таблица 2. Распределение количества видов и биомассы макрофитов по эколого-флористическим группировкам в обследованной акватории**Table 2.** Distribution of the species number and biomass of macrophytes in ecological-floristic groups in the water area surveyed

ГР	Количество видов, ед. / % (станции № 1–4)					Биомасса, г·м ⁻² / % (станции № 1–4)						
	ПСЛ	СБЛ				общее	ПСЛ	СБЛ				средняя
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4			№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	
Chl	$\frac{8}{38,10}$	$\frac{11}{26,19}$	$\frac{9}{21,95}$	$\frac{5}{31,25}$	$\frac{12}{21,05}$	$\frac{452,33}{92,17}$	$\frac{117,67}{4,57}$	$\frac{15,38}{0,35}$	$\frac{57,60}{94,18}$	$\frac{160,74}{8,48}$		
Oh	$\frac{3}{14,29}$	$\frac{11}{26,19}$	$\frac{7}{17,07}$	$\frac{2}{12,25}$	$\frac{12}{21,05}$	$\frac{1,35}{0,28}$	$\frac{1760,83}{68,36}$	$\frac{3892,50}{87,42}$	$\frac{м}{0}$	$\frac{1413,67}{74,60}$		
Rh	$\frac{10}{47,62}$	$\frac{20}{47,62}$	$\frac{25}{60,98}$	$\frac{9}{56,25}$	$\frac{33}{57,89}$	$\frac{37,10}{7,56}$	$\frac{697,24}{27,10}$	$\frac{544,57}{12,23}$	$\frac{3,56}{5,82}$	$\frac{320,62}{16,92}$		
Oc	$\frac{10}{47,62}$	$\frac{27}{64,29}$	$\frac{25}{60,98}$	$\frac{8}{50,00}$	$\frac{37}{64,91}$	$\frac{36,78}{7,49}$	$\frac{2423,66}{94,10}$	$\frac{4435,15}{99,61}$	$\frac{2,02}{3,30}$	$\frac{1724,40}{91,00}$		
Mc	$\frac{7}{33,33}$	$\frac{8}{19,05}$	$\frac{11}{26,83}$	$\frac{7}{43,75}$	$\frac{13}{22,81}$	$\frac{446,67}{91,01}$	$\frac{113,67}{4,41}$	$\frac{15,88}{0,36}$	$\frac{59,14}{96,70}$	$\frac{158,84}{8,38}$		
Pc	$\frac{4}{19,05}$	$\frac{7}{16,67}$	$\frac{5}{12,20}$	$\frac{1}{6,25}$	$\frac{7}{12,28}$	$\frac{7,33}{1,50}$	$\frac{38,41}{1,49}$	$\frac{1,42}{0,03}$	$\frac{м}{0}$	$\frac{11,79}{0,62}$		
Mh	$\frac{2}{9,52}$	$\frac{8}{19,05}$	$\frac{11}{26,83}$	$\frac{4}{25,00}$	$\frac{16}{28,07}$	$\frac{м}{0}$	$\frac{1770,74}{68,75}$	$\frac{4116,49}{92,45}$	$\frac{1,80}{2,94}$	$\frac{1472,25}{77,70}$		
Kb	$\frac{19}{90,48}$	$\frac{33}{78,57}$	$\frac{28}{68,29}$	$\frac{12}{75,00}$	$\frac{39}{68,42}$	$\frac{490,78}{100}$	$\frac{805,00}{31,25}$	$\frac{335,96}{7,55}$	$\frac{59,36}{97,06}$	$\frac{422,78}{22,31}$		
?	$\frac{0}{0}$	$\frac{1}{2,38}$	$\frac{2}{4,88}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{2}{3,51}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{м}{0}$	$\frac{м}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{м}{0}$		
Xb	$\frac{8}{38,10}$	$\frac{15}{35,71}$	$\frac{15}{36,59}$	$\frac{6}{37,50}$	$\frac{19}{33,33}$	$\frac{339,00}{69,07}$	$\frac{138,09}{5,36}$	$\frac{854,83}{19,20}$	$\frac{19,33}{31,61}$	$\frac{337,81}{17,83}$		
Tb	$\frac{10}{47,62}$	$\frac{21}{50,00}$	$\frac{23}{56,10}$	$\frac{10}{62,50}$	$\frac{32}{56,14}$	$\frac{149,45}{39,45}$	$\frac{2405,56}{93,39}$	$\frac{3596,20}{80,77}$	$\frac{41,83}{68,39}$	$\frac{1548,26}{81,70}$		
Kc	$\frac{3}{14,29}$	$\frac{5}{11,90}$	$\frac{3}{7,32}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{5}{8,77}$	$\frac{2,33}{0,47}$	$\frac{27,92}{1,08}$	$\frac{1,42}{0,03}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{7,92}{0,42}$		
Эн	$\frac{0}{0}$	$\frac{1}{2,38}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{1}{1,75}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{4,17}{0,16}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{1,04}{0,05}$		
Mr	$\frac{11}{52,38}$	$\frac{28}{66,67}$	$\frac{29}{70,73}$	$\frac{10}{62,50}$	$\frac{43}{75,44}$	$\frac{36,78}{7,49}$	$\frac{2423,66}{94,10}$	$\frac{4435,15}{99,61}$	$\frac{2,22}{3,63}$	$\frac{1724,45}{91,00}$		
См	$\frac{6}{28,57}$	$\frac{10}{23,81}$	$\frac{10}{24,39}$	$\frac{6}{37,50}$	$\frac{10}{17,54}$	$\frac{446,67}{91,01}$	$\frac{136,41}{5,30}$	$\frac{17,30}{0,40}$	$\frac{58,94}{96,37}$	$\frac{164,83}{8,70}$		
Св	$\frac{4}{19,05}$	$\frac{4}{9,52}$	$\frac{2}{4,88}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{4}{7,02}$	$\frac{7,33}{1,49}$	$\frac{15,67}{0,61}$	$\frac{м}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{5,75}{0,30}$		
Σ	$\frac{1}{100}$	$\frac{2}{100}$	$\frac{1}{100}$	$\frac{6}{100}$	$\frac{7}{100}$	$\frac{90,78}{100}$	$\frac{575,74}{100}$	$\frac{452,45}{100}$	$\frac{1,16}{100}$	$\frac{1895,03}{100}$		

Примечание: ГР — группировки. Систематические: Ch — Chlorophyta; Oh — Ochrophyta (кл. Phaeophyceae); Rh — Rhodophyta. Сапробиологические: Oc — олигосапробы; Mc — мезосапробы; Pc — полисапробы. По продолжительности вегетации: Mh — многолетние; Kb — коротковегетирующие; ? — нет данных. Фитогеографические: Xb — холодноводные; Tb — тепловодные; Kc — космополиты; Эн — эндемики. Галобные: Mr — морские; См — солоноватоводно-морские; Св — солоноватоводные.

Note: ГР — groups. Systematical: Ch — Chlorophyta; Oh — Ochrophyta (cl. Phaeophyceae); Rh — Rhodophyta. Saprobiological: Oc — oligosaprobies; Mc — mesosaprobies; Pc — polysaprobies. By the duration of the vegetation period: Mh — perennial; Kb — short-vegetating; ? — no data. Phytogeographical: Xb — cold-water; Tb — warm-water; Kc — cosmopolitans; Эн — endemics. In relation to halobility: Mr — marine; См — brackish-marine; Св — brackish.

Заключение. В результате гидробиотического обследования, выполненного в прибрежной морской акватории у м. Тарханкут, выявлено, что макрофитобентос развивается на твёрдом субстрате (класс формаций сообщества твёрдых грунтов — *Thalassophycion sclerochthonophytia*) и рыхлом субстрате (класс формаций сообщества мягких грунтов — *Thalassophycion malacochthonophytia*), что определяет общий характер растительного покрова. При этом А. А. Калугина-Гутник, классифицируя бентосную растительность Чёрного моря, к последнему классу формаций относила лишь сообщества харовых водорослей, развивающиеся на илистых отложениях. Вместе с тем наши наблюдения свидетельствуют о том, что развитие в летний период эфемерных сообществ зелёных водорослей (часто при существенной роли красных водорослей) характерно для мягких (песчаных с примесью ракушки) грунтов, локализованных в обширных бухтах у берегов Чёрного и Азовского морей. Характер и количественные показатели бентосной растительности, состав флоры и соотношение эколого-флористических группировок в основном свойственны Тарханкутско-Севастопольскому гидробиотическому району Чёрного моря. Специфика геоморфологического строения береговой зоны обследованного участка обуславливает определённые структурные особенности макрофитобентоса и его промежуточное положение по отношению к растительному покрову прилегающих абразионных и аккумулятивных участков берега. При этом растительный покров демонстрирует достаточно высокую степень сохранности; в его границах зарегистрированы таксоны и биотопы, представляющие особую ценность в рамках регионального и международного законодательства. Ранее для прилегающих акваторий у м. Тарханкут и м. Карамун мы рекомендовали абсолютно заповедный статус, однако, с учётом рекреационного использования обследованного участка, в перспективе его можно включить в состав в зоны регулируемой рекреации природного парка с охватом режимной морской акватории как минимум по контуру распространения твёрдых грунтов, занятых зарослевыми сообществами цистозиры. Подчеркнём, что в итоге речь идёт не об отдельных охраняемых аквальных участках, а о целостном по площади и управлению территориально-аквальном комплексе м. Тарханкут. Такой подход позволит контролировать и регулировать антропогенную нагрузку от полного заповедания до лимитированной рекреации и экотуризма в определённых пунктах, что должно замедлить (в идеале — предотвратить) структурную и функциональную трансформацию одного из немногих сохранившихся территориально-аквальных комплексов Степного Крыма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. IV. Чёрное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия* / под ред. А. И. Симонина, Э. Н. Альтмана. Санкт-Петербург : Гидрометеоздат, 1991. 426 с. [*Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morei SSSR. Vol. IV. Chernoe more. Iss. 1. Gidrometeorologicheskie usloviya* / A. I. Simonov, E. N. Altman (Eds). Saint Petersburg : Gidrometeoizdat, 1991, 426 p. (in Russ.)]
2. Горячкин Ю. Н., Иванов В. А. Современное состояние черноморских берегов Крыма // *Доповіди НАН України*. 2010. № 10. С. 87–92. [Goryachkin Yu. N., Ivanov V. A. Modern conditions of the Black Sea coast of the Crimea. *Dopovidi NAN Ukrainy*, 2010, no. 10, pp. 87–92. (in Russ.)]
3. Дзенс-Литовский А. И. Морская абразия, ее типы и формы // *Труды Лаборатории гидро-геологических проблем*. 1955. Т. 12. С. 64–87. [Dzens-Litovskii A. I. Morskaya abraziya, ee tipy i formy. *Trudy Laboratorii gidrogeologicheskikh problem*, 1955, vol. 12, pp. 64–87. (in Russ.)]
4. Зенкович В. П. *Берега Чёрного и Азовского морей*. Москва : Географгиз, 1958. 373 с. [Zenkovich V. P. *Berega Chernogo i Azovskogo morei*. Moscow : Geografiz, 1958, 373 p. (in Russ.)]
5. Зенкович В. П. *Морфология и динамика советских берегов Чёрного моря. Т. 2: Северо-западная часть*. Москва : АН СССР, 1960. 216 с. [Zenkovich V. P. *Morfologiya i dinamika sovetskikh beregov Chernogo morya. Vol. 2: Severo-zapadnaya chast'*. Moscow : AN SSSR, 1960, 216 p. (in Russ.)]
6. Зинова А. Д. *Определитель зелёных, бурых и красных водорослей южных морей СССР*. Москва ; Ленинград : Наука, 1967. 400 с.

- [Zinova A. D. *Opredelitel' zelenykh, burykh i krasnykh vodoroslei yuzhnykh morei SSSR*. Moscow ; Leningrad : Nauka, 1967, 400 p. (in Russ.)]
7. Калугина-Гутник А. А. Исследование донной растительности Чёрного моря с применением легководолазной техники // *Морские подводные исследования*. Москва : Наука, 1969. С. 105–113. [Kalugina-Gutnik A. A. Issledovanie donnoi rastitel'nosti Chernogo morya s primeneniem legkovodolaznoi tekhniki. In: *Morskie podvodnye issledovaniya*. Moscow : Nauka, 1969, pp. 105–113. (in Russ.)]
 8. Калугина-Гутник А. А. *Фитобентос Чёрного моря*. Киев : Наукова думка, 1975. 248 с. [Kalugina-Gutnik A. A. *Phytobenthos of the Black Sea*. Kiev : Naukova dumka, 1975, 248 p. (in Russ.)]
 9. *Красная книга Республики Крым. Растения, водоросли и грибы* / отв. ред. А. В. Ена, А. В. Фатерьга. Симферополь : ООО «ИТ «АРИАЛ», 2015. 480 с. [*Red Book of the Republic of Crimea. Plants, Algae, and Fungi* / A. V. Yena, A. V. Fateryga (Eds). Simferopol : "PP "ARIAL" LCC, 2015, 480 p. (in Russ.)]
 10. *Красная книга Российской Федерации (растения и грибы)* / гл. ред. Ю. П. Трутнев и др. ; сост. Р. В. Камелин и др. Москва : Тов-во науч. изд. КМК, 2008. 885 с. [*Red Book of the Russian Federation (Plants and Fungi)* / Yu. P. Trutnev et al. (Eds) ; R. V. Kamelin et al. (Comps). Moscow : Tov-vo nauch. izd. KMK, 2008, 885 p. (in Russ.)]
 11. Маркова Н. В. Реконструкция и анализ поля течений северо-западного шельфа Черного моря // *Литодинамика донной контактной зоны океанов* : материалы Междунар. конф., посвящ. 100-летию со дня рожд. проф. В. В. Лонгинова. Москва : ГЕОС, 2009. С. 29–31. [Markova N. V. Rekonstruktsiya i analiz polya techenii severo-zapadnogo shel'fa Chernogo morya. In: *Litodinamika donnoi kontaktnoi zony okeanov* : materialy Mezhdunar. konf., posvyashch. 100-letiyu so dnya rozhd. prof. V. V. Longinova. Moscow : GEOS, 2009, pp. 29–31. (in Russ.)]
 12. Мильчакова Н. А., Вахрушева Л. П., Єпіхін Д. В. НПП «Чарівна гавань» // *Фіторізноманіття заповідників і національних природних парків України. Ч. 2: Національні природні парки* / під ред. В. А. Онищенко, Т. Л. Андрієнко. Київ : Фітосоціоцентр, 2012. С. 519–529. [Milchakova N. A., Vakhrusheva L. P., Yepikhin D. V. NPP "Charivna havan". In: *Phytodiversity of Nature Reserves and National Nature Parks of Ukraine. Pt. 2. National Nature Parks* / V. A. Onyshchenko, T. L. Andrienko (Eds). Kyiv : Fitosotsiotsentr, 2012, pp. 519–529. (in Ukr.)]
 13. Садогурский С. Е. Предварительные сведения о макрофитобентосе оз. Караджа и прилегающей акватории Караджинской бухты (Чёрное море, Украина) // *Альгология*. 2014. Т. 24. № 3. С. 334–339. [Sadogurskiy S. Ye. Preliminary data about macrophytobenthos of Lake Karadzha and adjoining water area of Karadzhinskaya Bay (Black Sea). *Algologia*, 2014, vol. 24, no. 3, pp. 334–339. (in Russ.)]
 14. Садогурский С. Е., Белич Т. В. К описанию макрофитобентоса южных берегов Азовского моря (Крым) // *Труды Никитского ботанического сада*. 2004. Т. 123. С. 76–84. [Sadogurskiy S. Ye., Belich T. V. To description of macrophytobenthos of south coast of Azov Sea (Crimea). *Trudy Nikitskogo botanicheskogo sada*, 2004, vol. 123, pp. 76–84. (in Russ.)]
 15. Садогурский С. Е., Белич Т. В., Садогурская С. А. Некоторые аспекты формирования региональной и локальных экологических сетей в Крыму // *Природа Восточного Крыма. Оценка биоразнообразия и разработка проекта локальной экологической сети* / отв. ред. С. П. Иванов. Киев : [б. и.], 2013. С. 79–85. [Sadogurskiy S. Ye., Belich T. V., Sadogurskaya S. A. Nekotorye aspekty formirovaniya regionalnoi i lokalnykh ekologicheskikh setei v Krymu. In: *Priroda Vostochnogo Kryma. Otsenka bioraznoobraziya i razrabotka proekta lokalnoi ekologicheskoi seti* / S. P. Ivanov (Ed.). Kiev : [s. n.], 2013, pp. 79–85. (in Russ.)]
 16. Садогурский С. Е., Садогурская С. С., Белич Т. В. Биомасса и распределение макрофитобентоса Караджинской бухты и оз. Караджа (Крым, Чёрное море) // *Труды Никитского ботанического сада*. 2016. Вып. 143. С. 197–208. [Sadogurskiy S. Ye., Sadogurskaya S. A., Belich T. V. Biomass and distribution of macrophytobenthos of Karadzinskaya Bay and laguna lake Karadza (Crimea, Black Sea). *Trudy Nikitskogo botanicheskogo sada*, 2016, vol. 143, pp. 197–208. (in Russ.)]
 17. *Современное состояние береговой зоны Крыма* / под ред. Ю. Н. Горячкина. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2015. 252 с. [*The current state of the coastal zone of Crimea* / Yu. N. Goryachkin (Ed.). Sevastopol : ECOSI-Gidrofisika, 2015, 252 p. (in Russ.)]
 18. *Червона книга України. Рослинний світ* / за ред.

- Я. П. Дідуха. Київ : Глобалконсалтінг, 2009. 912 с. [Red Data Book of Ukraine. Flora / Ya. P. Didukh (Ed.). Kyiv : Globalkonsalting, 2009, 912 p. (in Ukr.)]
19. Berov D., Ballesteros E., Sales M., Verlaque M. Reinstatement of species rank for *Cystoseira bosphorica* Sauvageau (Sargassaceae, Phaeophyceae). *Cryptogamie, Algologie*, 2015, vol. 36, iss. 1, pp. 65–80.
 20. *Black Sea Red Data Book* / H. J. Dumont (Ed.). New York : United Nations Office for Project Services, 1999, 413 p.
 21. *Black Sea Red Data List*. 1997. URL: <http://www.grid.unep.ch/bsein/redbook/about/datalist.htm> (accessed 20.05.2019).
 22. Guiry M. D., Guiry G. M. *AlgaeBase*. Worldwide electronic publication. Galway : Nat. Univ. Ireland, 2019. URL: <http://www.algaebase.org> (accessed 20.05.2019).
 23. *International Plant Names Index* (IPNI). 2019. URL: <http://www.ipni.org> (accessed 20.05.2019).
 24. *Interpretation Manual of European Union Habitats. EUR 27*. European Commission, DG Environment, Brussels, 2007, 144 p.
 25. *Proposal for a Council Decision Establishing the Position to be Adopted on Behalf of the European Community With Regard to Proposals for Amending Annexes II and III to the Protocol Concerning Specially Protected Areas and Biological Diversity in the Mediterranean (SPA/BD Protocol) of the Convention for the Protection of the Marine Environment and the Coastal Region of the Mediterranean (Barcelona Convention) at the Sixteenth Meeting of the Contracting Parties*. COM (2009) 585 final. Brussels, 26.10.2009. 13 p. URL: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52009PC0585&from=EN> (accessed 20.05.2019).
 26. *Red Data Book of the Republic of Bulgaria. Vol. 1. Plants and Fungi* / D. Peev et al. (Eds). Sofia : BAS & MOEW, 2015, 881 p.
 27. Sadogurskiy S. Ye. Macrophytobenthos of the Black Sea coast of the Kerch peninsular (Crimea, Ukraine). *International Journal on Algae*, 2007, vol. 9, no. 4, pp. 365–383.
 28. Sadogurskiy S. Ye. Macrophytobenthos of the Coastal Water Area at the Cape Karamrun (Crimean Peninsula, the Black Sea). *International Journal on Algae*, 2017, vol. 19, no. 2, pp. 51–58. <https://doi.org/10.1615/InterJAlgae.v19.i2.30>
 29. Sadogurskiy S. Ye. Macrophytobenthos in the coastal waters near Cape Tarkhankut (Crimean Peninsula, the Black Sea). *International Journal on Algae*, 2018, vol. 20, no. 1, pp. 69–84. <https://doi.org/10.1615/InterJAlgae.v20.i1.70>

TO THE STUDY OF MACROPHYTOBENTHOS OF COASTAL WATERS OF KARADZHINSKY PLOT ON TARKHANKUT PENINSULA (CRIMEA, BLACK SEA)

S. Ye. Sadogurskiy

Nikitsky Botanical Gardens – National Scientific Center of RAS, Yalta, Russian Federation

E-mail: ssadogurskiy@yandex.ru

Composition and distribution of seaweeds in coastal waters of the Karadzhinskaya Bay, adjacent to the southern cluster of a specially protected natural area “Tarkhankut” Nature Park (Crimea, Tarkhankut Peninsula, Black Sea), are described and discussed. Peculiarities of the coastal zone geomorphology determine structural features of macrophytobenthos and its intermediate position in relation to macrophytobenthos of adjacent abrasive and accumulative coasts. Totally 57 species of seaweeds were identified (Chlorophyta – 12, Ochrophyta (cl. Phaeophyceae) – 12, Rhodophyta – 33); 21 of them occur in pseudolittoral, and 56 – in sublittoral. Biomass ranges from 0.5 kg per m² in pseudolittoral to 4.5 kg per m² in sublittoral. Nature and quantity of benthic vegetation, flora composition, and ratio of main ecological-floristic groups of macrophytobenthos are generally characteristic for the Tarkhankut-Sevastopol hydrobotanical region of the Black Sea. A rare fraction of flora includes 14 taxa listed in nature conservation lists of various ranks. The biotope subjects to special protection according to the EU Habitats Directive (Directive 92/43/EEC). The territorial-aquatic complex is important both from nature protection and recreation points of view. Its conservation will contribute to structural and functional integrity of Black Sea coastal zone ecosystem.

Keywords: Black Sea, Crimea, Tarkhankut Peninsula, macrophytobenthos, species composition, biomass, distribution

УДК 582.232(066)

**ХРАНИЛИЩЕ АНГИДРОБИОЗНЫХ КУЛЬТУР
МИКРОВОДОРОСЛЕЙ И ЦИАНОБАКТЕРИЙ
ИНСТИТУТА БИОЛОГИИ ЮЖНЫХ МОРЕЙ ИМЕНИ А. О. КОВАЛЕВСКОГО РАН**

© 2020 г. **И. А. Харчук**

Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»,
Севастополь, Российская Федерация
E-mail: seaferm@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.07.2019; после доработки 17.09.2019;
принята к публикации 27.03.2020; опубликована онлайн 31.03.2020.

Надёжное сохранение культур микроводорослей и создание генетических банков штаммов — одна из важных задач современной биологии. В каталоге Всемирной федерации культур в базе WDCM CCINFO на сегодняшний день зарегистрировано 792 коллекции различных культивируемых организмов из 76 стран. Это самая обширная сводная база данных, включающая как известные крупные коллекции, так и небольшие хранилища исследовательских и образовательных учреждений со всего мира. В базе представлено 47 альгологических коллекций и 80 коллекций микроорганизмов, которые также включают культуры микроводорослей и цианобактерий. В России зарегистрировано всего 30 биологических коллекций; фонды только 13 из них включают штаммы водорослей. Самый распространённый способ хранения культур микроводорослей — метод их периодических пересевов на жидкие среды или агар. Его используют в 127 коллекциях (99 % от общего количества в каталоге). Также применяют криоконсервацию — в 33 коллекциях (27 %), лиофилизацию — в 13 (11 %), L-высушивание — в 5 (4 %), замораживание — в 19 (16 %), иммобилизацию в альгинатных бусинках — в 1 (0,8 %). Между тем при использовании этих методов изменяются морфологические и функциональные свойства клеток сохраняемых культур и происходит их измельчение. Кроме того, поддержание культур в жизнеспособном состоянии трудоёмко и требует дорогостоящего оборудования. При этом хранение микроводорослей, переведённых в состояние ангидроброза путём их обезвоживания, просто и экономически выгодно. Ангидроброз — глубокое и длительное торможение метаболизма, обратимое при благоприятных условиях; это достаточно распространённое явление в природе. Единственная коллекция из базы WDCM CCINFO, для которой применяют способ перевода клеток в покоящееся состояние путём ангидроброза (для почвенных водорослей) — коллекция культур водорослей Киевского национального университета (АСКУ WDCM 994). Многолетние опыты по переводу микроводорослей в состояние ангидроброза позволили разработать метод их длительного хранения без использования питательных сред, включающий перевод клеток в состояние ангидроброза, их сохранение в дегидратированном состоянии и последующее выведение в активную культуру. С целью поддержания альгологического биоразнообразия на базе ФИЦ ИнБЮМ создано хранилище микроводорослей, переведённых в состояние ангидроброза; их при необходимости можно вывести в активные культуры. Объектами стали морские одноклеточные водоросли, а также пресноводные и галобные виды низших фототрофов, перспективные для аквакультуры и биотехнологии. Культуры получены в виде инокулята из коллекции живых культур планктонных микроводорослей ФИЦ ИнБЮМ. Водоросли выращивали в накопительном режиме при постоянном освещении. Биомассу собирали во время культивирования альгологически чистых культур микроводорослей на стадии замедления роста или на стационарной стадии. Клетки отделяли от культуральной среды центрифугированием

или путём их фильтрации на планктонном сите. Затем водоросли обезвоживали и хранили в герметичных зиплок-пакетах, помещённых в пластиковые ёмкости объёмом от 100 до 500 мл, при температуре +18...+21 °С в темноте в специально оборудованном помещении. Основная часть коллекции представлена штаммами из отделов Chlorophyta, Cyanophyta, Bacillariophyta, Rodophyta. В статье приведены список видов и количество сохраняемых изолятов, представлена информация о формах хранения, описан технологический регламент обслуживания и пополнения хранилища ангидробиозных культур. Хранилище находится на стадии формирования. Его будущее связано с расширением фонда за счёт морских, пресноводных и галобных видов. Оптимизация способа обезвоживания позволит перевести в состояние ангидробиоза микроводоросли, относящиеся к разным систематическим отделам.

Ключевые слова: микроводоросли, ангидробиоз, жизнеспособность, дегидратация, хранение микроводорослей и цианобактерий

Одной из важных задач современной биологии является надёжное сохранение культур микроводорослей и создание генетических банков штаммов. Согласно каталогу Всемирной федерации культур (World Federation for Culture Collections), в базе WDCM CCINFO [27] на сегодняшний день зарегистрировано 792 коллекции различных культивируемых организмов из 76 стран. Самым распространённым способом хранения культур микроводорослей является метод их периодических пересевов на жидкие среды [1, 2, 4, 15, 17, 23] или агар [3, 4, 15]. В каталоге представлено 47 альгологических коллекций и 80 коллекций разнообразных микроорганизмов, которые также включают культуры микроводорослей и цианобактерий. Метод периодических пересевов культур на жидкие среды или агар применяют в 127 коллекциях (99 % от их общего количества в каталоге). Также используют криоконсервацию — в 33 коллекциях (27 %) [5, 10, 13, 14, 16, 18, 19, 22, 24, 25, 28], лиофилизацию — в 13 (11 %) [26], L-высушивание — в 5 (4 %) [21], замораживание — в 19 (16 %), иммобилизацию в альгинатных бусинках — в 1 (0,8 %) [11, 12]. При применении этих методов происходят изменение морфологических и функциональных свойств и измельчение клеток сохраняемых культур. Кроме того, поддержание культур в жизнеспособном состоянии трудоёмко и требует дорогостоящего оборудования.

Хранение микроводорослей, переведённых в состояние ангидробиоза путём их обезвоживания, — простой и экономически выгодный способ. Ангидробиоз — глубокое и длительное торможение метаболизма, обратимое при благоприятных условиях. Данное явление, достаточно распространённое в природе, легло в основу способа перевода клеток в покоящееся состояние. Единственная коллекция из базы WDCM CCINFO, для которой применяют этот метод для почвенных водорослей, — коллекция культур водорослей Киевского национального университета (АСКУ WDCM 994) [3].

Многолетние опыты позволили разработать способ длительного хранения микроводорослей без применения питательных сред, включающий перевод клеток в состояние ангидробиоза, их сохранение в дегидратированном состоянии и последующее выведение в активную культуру [6].

Метод апробирован на про- и эукариотических микроводорослях — морских, галобных и пресноводных видах; его успешно используют в ФИЦ ИнБЮМ. По инициативе к. б. н. Р. П. Тренкеншу в отделе биотехнологий и фиторесурсов в 2005 г. создана коллекция ангидробиозных культур низших фототрофов, обратимых в жизнеспособное состояние и сохранивших способность к делению.

Цель создания коллекции — надёжное сохранение культур низших фототрофов, пригодных также для создания генетического банка штаммов. Практическое значение хранилища связано с возможностью постоянно иметь в своём распоряжении жизнеспособные культуры для обеспечения экспериментальных научно-исследовательских работ. В дальнейшем планируется использовать коллекцию в качестве банка микроводорослей и цианобактерий для сохранения редких и эндемичных видов, водорослей, богатых биологически активными веществами и перспективных для прикладного использования в биотестировании, биомониторинге, биоремедиации и научно-образовательном процессе.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Культуры были получены в виде инокулята из коллекции живых культур планктонных микроводорослей ФИЦ ИнБЮМ [9]. Водоросли выращивали в накопительном режиме при постоянном освещении. Биомассу собирали во время культивирования альгологически чистых культур микроводорослей на стадии замедления роста или на стационарной стадии. Клетки отделяли от культуральной среды с помощью центрифугирования при 3000 об·мин.⁻¹ на центрифуге ОПН-3-УХЛ 42 или путём их фильтрации на планктонном сите 100 ПЭ [20]. Выбор способа фильтрации зависел от размера клеток и трихом низших фототрофов.

Подготовку к закладке осуществляли тремя способами:

- 1) для удаления солей клетки промывали от культуральной среды раствором углекислого аммония, а затем — дистиллированной водой, далее клетки обезвоживали;
- 2) водоросли, подлежащие закладке на длительное хранение, дегидратировали вместе с культуральной средой;
- 3) клетки низших фототрофов суспензировали с протекторами.

Для каждой микроводоросли закладку осуществляли разными способами, чтобы иметь возможность провести сравнительный анализ по критерию жизнеспособности клеток низших фототрофов, сохраняемых длительное время, и выявить оптимальный метод.

На начальном этапе микроводоросли дегидратировали при температуре +20...+70 °С с шагом 10 °С. После серии экспериментов был выбран температурный диапазон +30...+40 °С [8]. Контроль уровня остаточной влажности осуществляли во время сушки; значения показателя находились в пределах 10–17 % для большинства дегидратированных клеток [7]. Сухие водоросли хранили в герметичных зиплок-пакетах, помещённых в пластиковые ёмкости объёмом 100–500 мл, при температуре +18...+21 °С в темноте в специально оборудованном помещении.

Хранилище состоит из бокса и помещения, выполняющего функцию инкубационно-стабилизирующего пространства перед входом в камеру хранения, а также предназначенного для проведения манипуляций с образцами. В боксе установлен кондиционер для осушения воздуха и поддержания заданной температуры.

Каждый образец снабжён этикеткой, на которой приведена информация о названии культуры, условиях обезвоживания (температуре и длительности), дате перевода в состояние ангидробиоза.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Первыми коллекционными образцами были таблетки спирулины, переданные от производителей (ООО «Агро-Виктория») и приобретённые в аптеках города. Таблетки цианопрокариотов реактивировали, адаптировали к условиям культивирования и переводили в интенсивную культуру. Затем культуры подлежали повторному переводу в анабиоз. Метод апробировали на микроводорослях разных отделов.

На сегодняшний день на длительное хранение заложено 366 образцов обезвоженных культур микроводорослей из четырёх отделов: цианобактерии Cyanophyta (Cyanobacteria), зелёные микроводоросли Chlorophyta, красные водоросли Rodophyta и диатомовые водоросли Bacillariophyta (рис. 1).

Основная часть коллекции представлена штаммами из отдела Chlorophyta и содержит виды *Dunaliella salina* (Dunal) Teodorescu, 1905; *Tetraselmis viridis* Rouchijajnen, 1966; *Chlorella vulgaris* f. *suboblonga* V. M. Andreeva, 1975; *Chlorella* sp.; *Scenedesmus* sp. Отдел Cyanophyta представлен четырьмя видами (*Arthrospira* (*Spirulina*) *platensis* (Nordstedt) Gomont, 1892; *Synechococcus elongates* (Nägeli) Nägeli, 1849; *Oscillatoria amoena* (Kützinger) Gomont, 1892; *Nostoc commune* var. *flagelliforme* Bornet & Flahault, 1886); отдел Bacillariophyta — двумя (*Phaeodactylum tricorutum* Bohlin, 1897; *Cylindrotheca closterium* (Ehrenb.) Reimann et Lewin, 1964); отдел Rodophyta — одним (*Porphyridium purpurum* (Bory de Saint-Vincent) Drew and Ross, 1965) (табл. 1).

Таблица 1. Таксономическое разнообразие цианобактерий и водорослей в коллекции ангидробиозных культур ФИЦ ИнБЮМ**Table 1.** Taxonomic diversity of cyanobacteria and algae in IBSS RAS collection of anhydrobiotic cultures

Отдел	Порядок	Род	Вид	Когда и откуда получен/выделен	Число сохраняемых образцов
CHLOROPHYTA	Chlamydomonadales	<i>Dunaliella</i>	<i>Dunaliella salina</i>	Солёные озёра Сиваша (Крым)	126
	Sphaeropleales	<i>Scenedesmus</i>	<i>Scenedesmus</i> sp.	Сопутствующий при выращивании хлореллы	3
	Chlorodendrales	<i>Tetraselmis</i>	<i>Tetraselmis viridis</i>	Чёрное море	37
	Chlorellales	<i>Chlorella</i>	<i>Chlorella vulgaris</i>	Институт ботаники (Киев, Украина)	12
			<i>Chlorella</i> sp.	ООО «Ихляс-агроэнергия»	20
CYANOBACTERIA	Oscillatoriales	<i>Oscillatoria</i>	<i>Oscillatoria amoena</i>	Обнаружен при выращивании <i>Spirulina platensis</i>	2
			<i>Spirulina (Arthrospira) platensis</i>	МГУ (Сочи)	94
	Synechococcales	<i>Synechococcus</i>	<i>Synechococcus elongates</i>	Сопутствующий при выращивании спирулины	3
	Nostocales	<i>Nostoc</i>	<i>Nostoc commune</i>	Институт ботаники (Киев, Украина)	3
BACILLARIOPHYTA	Bacillariales	<i>Phaeodactylum</i>	<i>Phaeodactylum tricorutum</i>	Чёрное море	23
		<i>Cylindrotheca</i>	<i>Cylindrotheca closterium</i>	Альгобанк (Кан, Франция), Средиземное море	3
RHODOPHYTA	Porphyridiales	<i>Porphyridium</i>	<i>Porphyridium purpureum</i>	БНИИ (Санкт-Петербург)	74

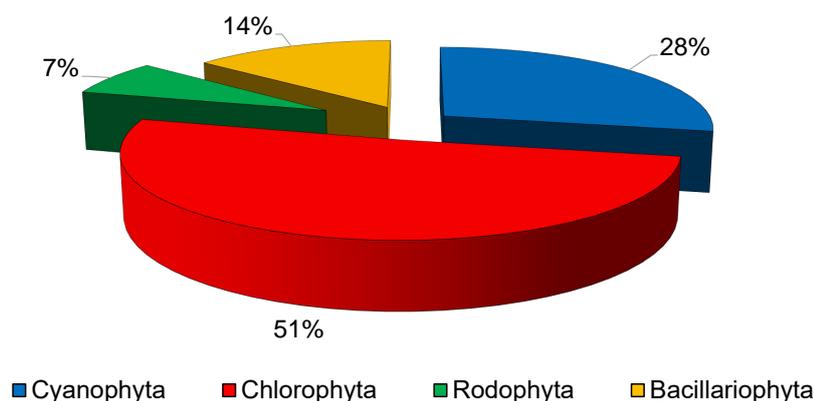


Рис. 1. Соотношение численности штаммов водорослей из разных отделов в коллекции ангидробиозных культур ФИЦ ИнБЮМ

Fig. 1. Ratio of the number of algae strains from different phyla in IBSS RAS collection of anhydrobiotic cultures

Сохраняемые микроводоросли и цианобактерии переведены в состояние ангидробиоза при разных режимах обезвоживания, в том числе при различной температуре и длительности дегидратации. Образцы одних и тех же водорослей и цианобактерий были обезвожены в разные годы, подвергались дегидратации с различными протекторами и без них. Это связано с тем, что предельные сроки их хранения ещё не установлены. Формы хранения низших фототрофов представлены на рис. 2 и 3. С целью определения физико-химических изменений микроводорослей в зависимости от сроков хранения из коллекции периодически изымали аликвоты культур и проводили их биохимический контроль и реактивацию.

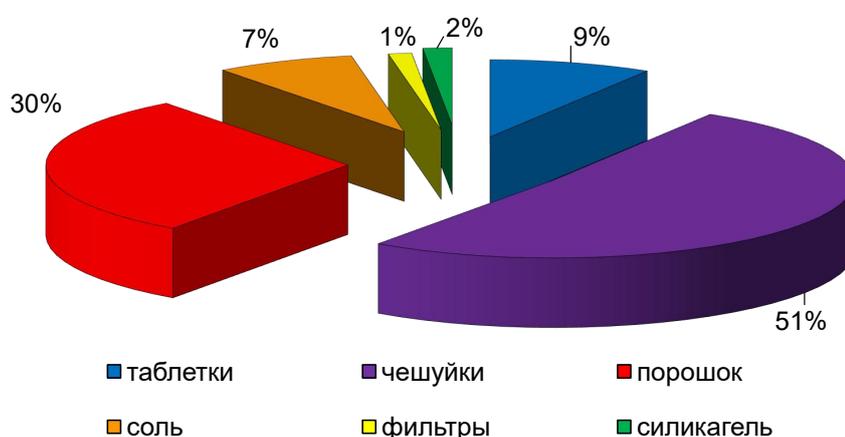


Рис. 2. Формы закладки микроводорослей и цианобактерий на длительное хранение

Fig. 2. Forms of microalgae and cyanobacteria preservation for long-term storage

С целью сохранения культур низших фототрофов применён технологический регламент обслуживания и пополнения коллекции ангидробиозных культур, описанный в табл. 2.

Оптимизация метода даёт возможность перевести в состояние ангидробиоза микроводоросли, относящиеся к разным систематическим отделам. Метод может быть рекомендован для применения в научных и учебных учреждениях. Его можно использовать в биотехнологиях, где требуется длительное сохранение штаммов музейных культур. Хранилище ФИЦ ИнБЮМ на современном этапе является уникальным и не имеет аналогов. Пополнение коллекции ангидробиозных культур новыми видами низших фототрофов продолжается постоянно.

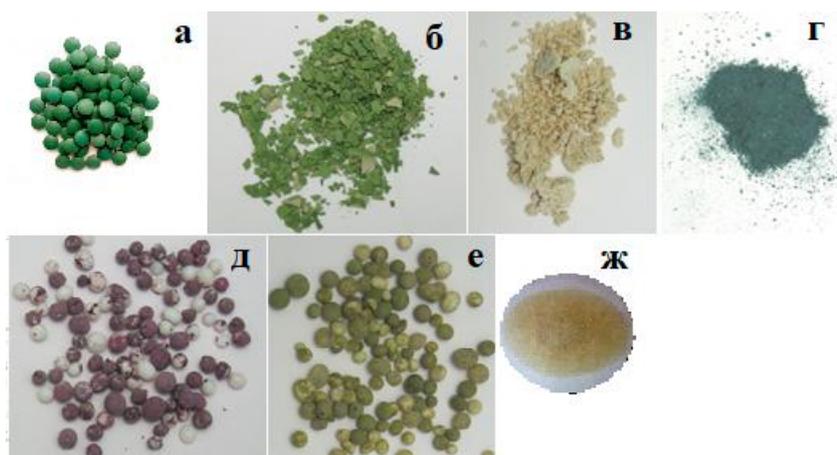


Рис. 3. Внешний вид обезвоженных проб микроводорослей и цианобактерий, заложенных на хранение:

а — таблетки; б — чешуйки; в — соль; г — порошок; д, е — силикагель; ж — фильтры

Fig. 3. Appearance of dehydrated samples of microalgae and cyanobacteria stored:

а – tablets; б – flakes; в – salt; г – powder; д, е – silica gel; ж – filters

Таблица 2. Технологический регламент обслуживания и пополнения коллекции ангидробиозных культур микроводорослей и цианобактерий

Table 2. Technological regulations for servicing and replenishing the collection of anhydrobiotic cultures of microalgae and cyanobacteria

Номер этапа	Название этапа	Проводимые манипуляции
I	Получение ангидробиозной культуры	<ul style="list-style-type: none"> • Получение альгологически чистой культуры из природной популяции; • паспортизация культуры; • адаптация культуры к искусственным условиям выращивания; • интенсивное культивирование; • перевод культуры в состояние ангидробиоза; • подготовка к длительному хранению.
II	Биохимический контроль сохраняемых видов микроводорослей и цианобактерий	Комплексный биохимический анализ низших фототрофов, подлежащих закладке на длительное хранение (определение содержания хлорофиллов, суммарных каротиноидов, общих белков, углеводов, липидов и нуклеиновых кислот).
III	Хранение и контроль жизнеспособности сохраняемых культур	<ul style="list-style-type: none"> • Определение живых и мёртвых клеток низших фототрофов; • биохимический контроль сохраняемых образцов; • реактивация и оценка способности к росту на жидких средах.
IV	Ведение каталога ангидробиозных культур	Разработка электронного каталога. Он включает информацию о наименовании штамма, номер, форму хранения, дату перевода в состояние ангидробиоза и условия обезвоживания, данные о культивировании (в том числе ростовые характеристики), результаты биохимического анализа перед закладкой и в течение хранения, сведения о предшествовавшей реактивации, морфологические и биохимические характеристики водорослей после реактивации.

Заключение. Коллекция ангидробиозных культур ФИЦ ИнБЮМ находится на стадии формирования. Её будущее связано с расширением фонда за счёт морских, пресноводных и галобных видов. Разработка индивидуальных протоколов обезвоживания и реактивации позволит перевести в состояние ангидробиоза микроводоросли, относящиеся к разным систематическим отделам.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Исследование механизмов управления продукционными процессами в биотехнологических комплексах с целью разработки научных основ получения биологически активных веществ и технических продуктов морского генезиса» (№ гос. регистрации АААА-А18-118021350003-6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Айздайчер Н. А. Коллекция культур морских микроводорослей Института биологии моря им. А. В. Жирмунского ДВО РАН // *Биология моря*. 2008. Т. 34, № 2. С. 152–155. [Aizdaicher N. A. Collection of marine microalgae at the A. V. Zhirmunsky Institute of Marine Biology. *Biologiya morya*, 2008, vol. 34, no. 2, pp. 152–155. (in Russ.)]
2. Владимировна М. Г., Игнатъевская М. И. Изучение влияния условий хранения культур *Chlorella* в коллекции на последующую их продуктивность // *Микробиология*. 1966. Т. 35, № 3. С. 539–548. [Vladimirova M. G., Ignat'evskaya M. I. Izucheniye vliyaniya uslovii khraneniya kul'tur *Chlorella* v kollektzii na posleduyushchuyu ikh produktivnost'. *Mikrobiologiya*, 1966, vol. 35, no. 3, pp. 539–548. (in Russ.)]
3. Костиков И. Ю., Демченко Э. Н., Березовская М. А. Коллекция культур водорослей Киевского национального университета имени Тараса Шевченко. Каталог штаммов (2008 г.) // *Чорноморський ботанічний журнал*. 2009. Т. 5, № 1. С. 37–79. [Kostikov I. Yu., Demchenko E. N., Berezovskaya M. A. Microalgae culture collection at the Taras Shevchenko National University, Kyiv. Catalogue of strains (2008). *Chornomorskyi botanichnyi zhurnal*, 2009, vol. 5, no. 1, pp. 37–79. (in Russ.)]
4. Новаковская И. В., Патова Е. Н. Коллекция живых штаммов микроводорослей Института биологии Коми НЦ УрО РАН и перспективы ее использования // *Известия Коми научного центра УрО РАН*. 2012. Вып. 2, № 10. С. 36–41. [Novakovskaya I. V., Patova E. N. Collection of living microalgae strains of the Institute of Biology, Komi Science Centre, Ural Branch, RAS, and its perspective using. *Izvestiya Komi nauchnogo tsentra UrO RAN*, 2012, iss. 2, no. 10, pp. 36–41. (in Russ.)]
5. Одинцова Н. А., Борода А. В. Криосохранение клеток и личинок морских гидробионтов // *Биология моря*. 2012. Т. 38, № 2. С. 93–103. [Odintsova N. A., Boroda A. V. Cryopreservation of the cells and larvae of marine organisms. *Biologiya morya*, 2012, vol. 38, no. 2, pp. 93–103. (in Russ.)]
6. Пат. 2541452 Российская Федерация. МПК6 С 12 N 1/04. *Способ длительного хранения микроводорослей* / Харчук И. А. ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт морских биологических исследований имени А. О. Ковалевского РАН». № 2014149881/93 ; заявл. 26.09.2014 ; приор. 17.03.2008 ; опубл. 10.02.2015 , Бюл. № 4. [Pat. 2541452 Rossiiskaya Federatsiya. МПК6 S 12 N 1/04. *Sposob dlitel'nogo khraneniya mikrovodoroslei* / Kharchuk I. A. ; zayavitel' i patentoobladatel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe uchrezhdenie nauki "Institut morskikh biologicheskikh issledovaniy imeni A. O. Kovalevskogo RAN". No. 2014149881/93; zayavl. 26.09.2014; prior. 17.03.2008; opubl. 10.02.2015, Byul. no. 4. (in Russ.)]
7. Харчук И. А. Хранение микроводорослей в состоянии ангидробиоза // *Микроводоросли Чёрного моря: проблемы сохранения биоразнообразия и биотехнологического использования* / под ред. Ю. Н. Токарева, З. З. Финенко, Н. В. Шадрина Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. Гл. 9. С. 237–267. [Kharchuk I. A. Khraneniye mikrovodoroslei v sostoyanii angidrobioza. In: *Mikrovodorosli Chernogo morya: problemy sokhraneniya bioraznoobraziya i biotekhnologicheskogo ispol'zovaniya* / Yu. N. Tokarev, Z. Z. Finenko, N. V. Shadrin (Eds). Sevastopol : EKOSI-Gidrofizika, 2008, chap. 9, pp. 237–267. (in Russ.)]
8. Харчук И. А. Динамика жизнеспособности и компонентов биохимического состава *Arthrospira (Spirulina) platensis* (Nords) Gomont в зависимости от температуры дегидратации при переводе в состояние ангидробиоза // *Вопросы современной альгологии*. 2018. № 1 (16). [Kharchuk I. A. Dynamics of viability and components of biochemical composition *Arthrospira (Spirulina) platensis* (Nords) Gomont depending on the dehydration temperature transferring at anhydrobiosis state. *Voprosy sovremennoi al'gologii*, 2018, no. 1 (16). URL: <http://algology.ru/1258> (accessed 23.07.2019). (in Russ.)]
9. Коллекция микроводорослей отдела экологической физиологии водорослей ФИЦ ИнБЮМ [Электронный ресурс]. : сайт. [Kollektsiya mikrovodoroslei otdela ekologicheskoi fiziologii vodoroslei FITs InBYuM [Electronic resource] : site. URL: http://ibss-ras.ru/?page_id=2828 (accessed 24.07.2019). (in Russ.)]

10. Cañavate J. P., Lubian L. M. Relationship between cooling rates, cryoprotectant concentrations and salinities in the cryopreservation of marine microalgae. *Marine Biology*, 1995, vol. 124, iss. 2, pp. 325–334. <https://doi.org/10.1007/BF00347136>
11. Chen Y. C. Immobilized microalgae *Scenedesmus quadricauda* (Chlorophyta, Chlorococcales) for long-term storage and for application for water quality control in fish culture. *Aquaculture*, 2001, vol. 195, no. 1–2, pp. 71–80. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(00\)00540-8](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(00)00540-8)
12. Chen Y. C. Immobilized *Isochrysis galbana* (Haptophyta) for long-term storage and applications for feed and water quality control in clam (*Meretrix lusoria*) cultures. *Journal of Applied Phycology*, 2003, vol. 15, no. 5, pp. 439–444. <https://doi.org/10.1023/A:1026071714199>
13. Crutchfield A., Diller K., Brand J. Cryopreservation of *Chlamydomonas reinhardtii* (Chlorophyta). *European Journal of Phycology*, 1999, vol. 34, iss. 1, pp. 43–52. <https://doi.org/10.1080/09670269910001736072>
14. Day J. G., Watanabe M. M., Morris G. H., Fleck R. A., McLellan M. R. Long-term viability of preserved eukaryotic algae. *Journal of Applied Phycology*, 1997, vol. 9, no. 2, pp. 121–127. <https://doi.org/10.1023/A:1007991507314>
15. Hur S. B., Bae J. H., Youn J., Jo M. J. KMMCC – Korea Marine Microalgae Culture Center: List of strains, 2nd edition. *Algae*, 2015, vol. 30, suppl., pp. S1–S188. <http://dx.doi.org/10.4490/algae.2015.30.S.S1>
16. Kumari N., Gupta M., Singh R. Open encapsulation-vitrification for cryopreservation of algae. *Cryobiology*, 2016, vol. 73, iss. 2, pp. 232–239. <https://doi.org/10.1016/j.cryobiol.2016.07.005>
17. Marsalek B., Rojickova-Padrtova R. Long-term maintenance of alga strains for use in biomass assays and biotechnology. *Archiv für Hydrobiologie. Supplementband: Algological Studies*, 1988, vol. 124, pp. 121–136.
18. Meyer M. A. *Cryopreservation of a Marine Diatom*. PhD Thesis. Texas A & M University, College Station, 1985, 112 p.
19. Poncet J.-M., Véron B. Cryopreservation of the unicellular marine alga, *Nannochloropsis oculata*. *Biotechnology Letters*, 2003, vol. 25, no. 23, pp. 2017–2022. <https://doi.org/10.1023/B:BILE.0000004395.04116.45>
20. Richmond A., Lichtenberg E., Stahl B., Vonshak A. Quantitative assessment of the major limitations on productivity of *Spirulina platensis* in open raceways. *Journal of Applied Phycology*, 1990, vol. 2, no. 3, pp. 195–206. <https://doi.org/10.1007/BF02179776>
21. Sakane T. Preservation of microorganisms by L-drying. *International Journal of Reefing*, 1982, vol. 57, no. 6, pp. 767–775.
22. Scarbrough C., Wirschell M. Comparative analysis of cryopreservation methods in *Chlamydomonas reinhardtii*. *Cryobiology*, 2016, vol. 73, iss. 2, pp. 291–295. <https://doi.org/10.1016/j.cryobiol.2016.07.011>
23. von Schwartzberg K., Bornfleth S., Lindner A., Hanelt D. The Microalgae and Zygnematophyceae Collection Hamburg (MZCH) – living cultures for research on rare streptophytic algae. *Algological Studies*, 2013, vol. 142, pp. 77–108. <http://doi.org/10.1127/1864-1318/2013/0131>
24. Surek B. Meeting report: International Symposium on the Cryopreservation of Algae (Austin, Texas, USA, 16–17 April, 1988). *Protist*, 1998, vol. 149, iss. 3, pp. 201–205. [https://doi.org/10.1016/S1434-4610\(98\)70026-4](https://doi.org/10.1016/S1434-4610(98)70026-4)
25. Tessarolli L. P., Day J. G., Vieira A. H. Establishment of a cryopreserved biobank for the Culture Collection of Freshwater Microalgae (CCMA-UFSCar), São Paulo, Brazil. *Biota Neotropica*, 2017, vol. 17, no. 2, e20160299. <http://dx.doi.org/10.1590/1676-0611-bn-2016-0299>
26. Tsuru S. Preservation of marine and fresh water algae by means of freezing and freeze-drying. *Cryobiology*, 1973, vol. 10, iss. 5, pp. 445–452. [https://doi.org/10.1016/0011-2240\(73\)90074-6](https://doi.org/10.1016/0011-2240(73)90074-6)
27. WDCM CCINFO. *World Data Centre for Microorganisms, Culture Collections Information Worldwide*. 2014. [Electronic resource.] URL: <http://www.wfcc.info/ccinfo/home> (accessed 23.07.2019).
28. Zheng L., Lu Z., Zhang Q., Li T., Song L. A fluorescence ratio-based method to determine microalgal viability and its application to rapid optimization of cryopreservation. *Cryobiology*, 2018, vol. 81, pp. 27–33. <https://doi.org/10.1016/j.cryobiol.2018.02.014>

**THE STORAGE OF ANHYDROBIOTIC CULTURES
OF MICROALGAE AND CYANOBACTERIA
OF A. O. KOVALEVSKY INSTITUTE OF BIOLOGY OF THE SOUTHERN SEAS OF RAS**

I. A. Kharchuk

A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation
E-mail: seaferm@yandex.ru

Reliable preservation of microalgae cultures and creation of genetic banks of strains is one of the important tasks of modern biology. To date, 792 collections of various cultivated organisms from 76 countries are registered in the catalog of the World Federation for Culture Collections in the WDCM CCINFO database. This is the most extensive consolidated database of culture collections, which includes both well-known large collections and small repositories of research and educational institutions from all over the world. The database contains 47 algological collections and 80 collections of various microorganisms, which also include microalgae and cyanobacteria cultures. Only 30 biological collections are registered in Russia, from which only 13 contain algae strains. The most common technique of microalgae cultures storage is the method of their periodic re-sowing onto liquid media or agar. It is used in 127 collections (99 % of the total number in the catalog). Other methods used are: cryopreservation – in 33 collections (27 %), lyophilization – in 13 (11 %), L-drying – in 5 (4 %), freezing – in 19 (16 %), and immobilization in alginate beads – in 1 (0.8 %). However, when using these methods, there is a change in morphological and functional features of cells of the cultures stored, as well as their shredding. In addition, cultures maintaining in a viable state is time-consuming and requires expensive equipment. Preservation of microalgae, transferred to the state of anhydrobiosis by dehydration, is simple and cost-effective. Anhydrobiosis is a deep and long-term inhibition of metabolism, reversible under favorable conditions; it is a quite common phenomenon in nature. The only collection in the WDCM CCINFO database that applies the method of transferring cells to a resting state (for soil algae) is the collection of algae cultures of the National University of Kyiv (ACKU WDCM 994). Many years of experiments on the transfer of microalgae to the state of anhydrobiosis allowed us to develop a method of long-term preservation of microalgae without the use of nutrient media. This technique includes cells transfer to the state of anhydrobiosis, their preservation in a dehydrated state, and subsequent removal to an active culture. In order to preserve algological biodiversity, IBSS RAS created a repository of microalgae transferred to the state of anhydrobiosis, which can be converted to active cultures if necessary. The objects of the repository were marine unicellular algae, as well as freshwater and halobic species of lower phototrophs which are perspective for biotechnology and aquaculture. The cultures were obtained as an inoculum from IBSS RAS collection of live cultures of planktonic microalgae. The algae were grown in an accumulative mode under constant lighting. The biomass was collected during cultivation of algologically pure microalgae cultures at the growth retardation or at the stationary stage. Cells were separated from the culture medium by centrifugation or by filtering them on a plankton sieve. Then the algae were dehydrated and maintained in hermetic zipper bags placed in plastic containers of 100 to 500 ml, at a temperature of +18...+21 °C in the dark in a specially equipped room. The main part of the collection is represented by strains from the phyla Chlorophyta, Cyanophyta, Bacillariophyta, and Rodophyta. The list of species, the number of isolates stored, and the information on preservation forms are provided in this article. The technological regulations for maintenance and replenishment of the storage of anhydrobiotic cultures are described. The repository is at the stage of formation. Its future lies in the fund expansion to include marine, freshwater, and halobic species. Optimization of the dehydration method will allow the transfer of microalgae belonging to different systematic phyla to the state of anhydrobiosis.

Keywords: microalgae, anhydrobiosis, viability, dehydration, storage of microalgae and cyanobacteria

UDC 576.893.1:597.2/.5(262.5+262.54+262.81)

HISTORY OF FORMATION AND PECULIARITIES OF PONTO-CASPIAN FISH MYXOSPOREAN FAUNA

© 2020 V. M. Yurakhno¹ and A. N. Özer²

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

²Sinop University, Sinop, Turkey

E-mail: viola_taurica@mail.ru

Received by the Editor 18.07.2019; after revision 20.09.2019;
accepted for publication 27.03.2020; published online 31.03.2020.

History of formation of Ponto-Caspian basin fish myxosporean fauna is examined. This work is based on our own material on myxosporean parasites of fish from the Black Sea (collected in 1987–2018) and the Sea of Azov (1997–2016). Totally, we have investigated 15 368 specimens of 87 species of fish (14 297 specimens of 80 species of fish in the Black Sea and 1071 specimens of 19 species of fish in the Sea of Azov). The material was collected by the method of incomplete parasitological dissections and treated by generally accepted methods. Also, all available literary sources on the myxosporean parasites of fish from the Black Sea, the Sea of Azov, and the Caspian Sea are analyzed (references list contains the most significant publications). A comparative analysis of fish myxosporean fauna in the Black Sea, the Sea of Azov, and the Caspian Sea is performed. It is stated that 108 parasite species are known in the Black Sea, 42 – in the Sea of Azov, and 68 – in the Caspian Sea. Number of myxosporean parasite species common for the Sea of Azov and the Black Sea is 32, for the Caspian and Black seas – 32, and for the Sea of Azov and the Caspian Sea – 20. Totally 16 species of myxosporean parasites are registered in all the mentioned seas. To date, of 108 myxosporean species of Black Sea region, 29 are registered only in freshwater fish in the estuaries with considerable brackish water. For 79 myxosporean species, marine fish species serve as hosts; they are registered mainly in full-salt sea part, and 17 of them are of freshwater origin: 7 species are registered in freshwater fish and in euryhaline mullets; 1 parasitizes on freshwater and marine salmon fishes; the only hosts for 9 species are mullets or other marine fish species. Marine forms are represented by Pontic (22 species), Ponto-Azov (3), and Ponto-Caspian (2) endemics, as well as by Mediterranean invaders (35). Among freshwater myxosporeans, only 1 species is Black Sea endemic; 1 species is Ponto-Azov endemic, and most other species are widely represented in freshwater reservoirs. Among Mediterranean invaders, 23 species found in the Mediterranean Sea should be noted; 12 species still have not been registered in the Mediterranean Sea, mainly due to very few studies on this group of parasites. The fauna of Sea of Azov fish parasites includes 42 myxosporean species; 32 of them are found in the Black Sea, 20 – in the Caspian Sea. Totally 19 species belong to freshwater ones, and they are parasitic only in freshwater fish species. Ten species are of freshwater origin but can be registered in marine fish species (mostly in mullets, and one – in gobies). Of the freshwater species, one is Ponto-Azov endemic. Totally 13 myxosporean species are marine ones: 2 species are Sea of Azov endemics; 3 species are Ponto-Azov endemics; 8 species are Mediterranean invaders. Caspian Sea fauna includes 68 species of myxosporeans: 8 are marine ones (1 is ancient marine species; 1 is Ponto-Caspian endemic; 6 are brackish-water myxosporeans), and 60 are freshwater species. Five endemics of the Caspian Sea are known (2 of marine origin and 3 of freshwater origin). When moving from west to east (from the Black Sea to the Caspian Sea), a gradual impoverishment of marine myxosporean fauna and its replacement by freshwater myxosporean species are observed. Impoverishment of Myxosporea species composition of the Sea of Azov and the Caspian Sea in comparison with the Black Sea one is also found.

Keywords: fauna, Myxosporea, fish, Black Sea, Sea of Azov, Caspian Sea

History of formation of the Ponto-Caspian basin fish myxosporean fauna is connected with a complex geological past of the southern seas. At the Paleogene at the site of the Mediterranean, Black, and Caspian seas, as well as the Sea of Azov, there laid a full-salt sea Tethys, connected openly with the ocean [2, 32, 33, 42, 43]. At Miocene, it gradually isolated, becoming Sarmat basin; it was accompanied by strong desalination. Sharp stratification of waters appeared, leading to development of hydrogen sulfide zone at depth. Under new conditions, rapid extinction of almost the entire fauna in the Sarmat basin and wide development of peculiar mactric fauna took place. Between Sarmat and Pliocene periods, the Meotic basin also connected with the ocean was formed. In its turn, this led to changes in the fauna: Sarmat species began to vanish, and typical Mediterranean species appeared. In the eastern part of the Meotic basin, hydrological conditions were very similar with those of modern Black Sea, and there was a deep-water part contaminated with hydrogen sulfide [1]. The Meotic basin eastern part has separated during Pliocene period. Vast inner brackish-water Pontic Lake was a sea with brackish-water fauna. By the end of Tertiary and the beginning of Quaternary period, this sea split, forming now existing the Black Sea, the Sea of Azov, the Caspian Sea, and the Aral Sea. The last two of them preserved brackish-water character with appropriate fauna, while the Black Sea underwent one more transformation. Being connected with the Mediterranean Sea, it underwent great salinization. As a result, brackish-water fauna partially died out, and its remnants remained in the estuaries and in the Sea of Azov. All the other parts of the sea were inhabited by Mediterranean fauna. Due to low water salinity and uninhabited Black Sea depth resulting from hydrogen sulfide presence, many Mediterranean species and their parasites could not settle there; nevertheless, of fish, only Gobiidae, Atherinidae, Clupeidae, Syngnathidae, and Acipenseridae originate from the brackish water basin mentioned above and are common for the Caspian Sea [17]. All other fish resettled in the Black Sea from the Mediterranean Sea [37].

Absence of many Mediterranean parasite species in Black Sea fish parasite fauna was noted by V. A. Dogel [5]; he based on the results of his own research and data of S. U. Osmanov [22], A. V. Reshetnikova [30], and Z. S. Donets [7, 8] who wrote about impoverishment of Black Sea fish myxosporeans compared to Atlantic and Mediterranean basins fish myxosporeans. A. Reshetnikova relying on myxosporeans origin proposed to divide Black Sea species into following zoogeographic groups: global, arctic-boreal, boreal-Atlantic, Mediterranean, freshwater, and Black Sea endemics. N. N. Naidenova [21] studying parasites of gobies from the Black Sea and the Sea of Azov isolated some other zoogeographic groupings. So, freshwater species are divided into paleo-arctic, Ponto-Caspian-Aral, Black Sea endemics, characteristic for the area and common with Amur species, and Mediterranean with not clear areal. Marine parasites are divided into arctic-boreal, boreal (boreal-Atlantic, amphiboreal), Mediterranean, Ponto-Azov endemics, tropic-boreal, global, and with not clear areal. In general, according to N. Naidenova, the fauna of gobies parasites unites the following zoogeographic groupings of species: 1 – Mediterranean; 2 – widely spread geographically (arctic and boreal); 3 – freshwater; 4 – characteristic only for the Black Sea and the Sea of Azov. N. Naidenova attributed *Sphaeromyxa sevastopoli*, *Fabespora nana*, and neoendemic *Myxidium melanostomi* to the last paleo-endemics.

Faunistic complexes and groups of the freshwater myxosporeans have another history and, therefore, adhere to different laws. For the southern water basins of the former USSR, they are given in detail by Z. Donets [6], and that is why we will limit ourselves to a brief presentation. In Black Sea area of Ponto-Caspian-Aral province, this problem was studied by Z. Donets mostly for myxosporean fauna of big rivers coming into the Black Sea and the Sea of Azov, as well as Crimean water reservoirs. Z. Donets emphasizes that Ponto-Caspian-Aral province is the richest region with freshwater myxosporeans within the Euro-Asian part of Golarctics, but in this province, when moving from west to east, gradual impoverishment of parasites species composition is observed, especially pronounced in the Aral Sea.

Formation of myxosporean fauna in southern seas of the former USSR is also analyzed by Z. Donets [7, 8]. It is proposed to consider the Black Sea fauna to be impoverished marine with not considerable admixtures of freshwater elements. In the Black Sea, 32 species were divided by Z. Donets

into the following groups: ancient-marine (1 species), Ponto-Caspian endemics of marine origin (6), Mediterranean invaders (19), parasites of Gasterosteidae (1), freshwater species (4), and Ponto-Caspian endemics of freshwater origin (1). Analysis of the Caspian and Aral seas myxosporeans has been given [7].

All the authors named above marked that zoogeographical characteristic of parasites is in good accordance with zoogeography of Black Sea free-living organisms. In 1987, a bit different idea on the richness of Black Sea fish myxosporean fauna appeared. M. G. Kolesnikova and Z. S. Donets [18] presented their belief that the idea of fauna's extreme impoverishment is a bit out reality. They supposed that a great number of new species found in the Black Sea can be also found in the Mediterranean Sea. Based on their data (description of 4 new myxosporean species), we continued and made description of 15 new species increasing considerably the list of fish myxosporeans in the Ponto-Azov basin. *Myxidium pulchrum* described in 1991 for the Black Sea was later found in the Adriatic Sea [19]. *Alataspora solomoni* – Black Sea species new for science described by V. Yurakhno in 1988 – was later found in the Ionian Sea [4]. *Zschokkella admiranda* considered previously as Black Sea species was found in the Mediterranean Sea near coast of Spain [39]. The data on species richness of Black Sea fish myxosporean fauna became fuller due to Pacific and Atlantic oceans species, as well as Mediterranean, Red, and Adriatic seas species found in the Pontic basin. Myxosporean species known for the Atlantic Ocean (*Chloromyxum schulmani*, *Sinuolinea rebae*), for the Atlantic and Pacific oceans (*Ch. ovatum*, *Ortholinea orientalis*) [25, 26, 34], and for the Mediterranean and Red seas and for the Pacific Ocean (*Enteromyxum leei*) [28] were later found in the Black Sea. *Ceratomyxa beloneae* – a species described earlier in the Adriatic Sea – was later found by us in the Black Sea [29, 34]. Myxosporean parasites *Sphaerospora dicentrarchi*, *Sphaerospora mugilis*, *Myxobolus spinacurvatura*, *M. ichkeulensis* [23, 39], and *Myxobolus episquamalis* [3, 31] found earlier in Mediterranean Sea mullet were later registered in the Black Sea and in the Sea of Azov. Many myxosporean species were found in new hosts and geographical areas, and their lists of hosts and areas were widened.

In this regard, it is of interest to give modern comparative characteristics of the Ponto-Caspian basin fish parasite fauna, since myxosporeans constitute one of the most interesting groups in it.

MATERIAL AND METHODS

This work is based on our own material on the myxosporeans of fish from the Black Sea collected in 1987–2018 and from the Sea of Azov collected in 1997–2016. Totally, we have investigated 15 368 specimens of 87 species of fish (14 297 specimens of 80 species of fish in the Black Sea and 1071 specimens of 19 species of fish in the Sea of Azov).

The material was collected by the method of incomplete parasitological dissections and treated by generally accepted methods. Also, all available literary sources on the myxosporean parasites of fish from the Black Sea, the Sea of Azov, and the Caspian Sea were analyzed (references list contains only the most significant publications).

RESULTS AND DISCUSSION

Comparison of species composition of Black Sea, Sea of Azov, and Caspian Sea fish myxosporean parasites has shown that 108 species are known in the Black Sea, 42 – in the Sea of Azov, and 68 – in the Caspian Sea (Table 1) [41, modern data]. Number of myxosporean parasite species common for the Sea of Azov and the Black Sea is 32, for the Caspian and the Black seas – 32, and for the Sea of Azov and the Caspian Sea – 20. Totally 16 myxosporean species are registered in all three seas.

Table 1. Myxosporean species of Black Sea, Sea of Azov, and Caspian Sea fishes (according to literary and own data)**Таблица 1.** Виды микоспориций рыб Чёрного, Азовского и Каспийского морей (по литературным и собственным данным)

Myxosporean species	The Black Sea	The Sea of Azov	The Caspian Sea
<i>Alataspora solomoni</i>	+		
<i>Ceratomyxa agilis</i>	+		
<i>C. arcuata</i>	+		
<i>C. beloneae</i>	+		
<i>C. caspia</i>			+
<i>C. elegans</i>	+		
<i>C. globulifera</i>	+		
<i>C. hepseti</i>	+	+	
<i>C. inaequalis</i>	+		
<i>C. informis</i>	+		
<i>C. markewichi</i>	+		
<i>C. merlangi</i>	+		
<i>C. parva</i>	+		
<i>C. peculiaria</i>	+		
<i>C. reticularis</i>	+		
<i>Chloromyxum cristatum</i>	+		+
<i>Ch. esocinum</i>	+		
<i>Ch. fluviatile</i>	+		+
<i>Ch. legeri</i>	+		+
<i>Ch. osmanovi</i>	+		
<i>Ch. ovatum</i>	+		
<i>Ch. partistriatus</i>	+		
<i>Ch. psetti</i>	+		
<i>Ch. schulmani</i>	+		
<i>Ch. trachuri</i>	+		
<i>Ch. truttae</i>			+
<i>Ch. varicorhini</i>			+
<i>Enteromyxum leei</i>	+		
<i>Fabespora nana</i>	+		
<i>Henneguya chaibulaevi</i>			+
<i>H. creplini</i>	+		
<i>H. gigantea</i>	+		
<i>H. lobosa</i>	+		+
<i>H. oviperda</i>	+		
<i>H. psorospermica</i>	+		+
<i>H. schizura</i>		+	
<i>H. sinova</i>	+		
<i>Hoferellus conifer</i>		+	
<i>H. jurachni</i>	+		
<i>Gadimyxa ovale</i>	+		
<i>Kudoa anatolica</i>	+		
<i>K. niluferi</i>	+		

Continue on next page...

Myxosporean species	The Black Sea	The Sea of Azov	The Caspian Sea
<i>K. nova</i>	+	+	
<i>K. quadratum</i>	+		
<i>K. stellula</i>	+		
<i>Myxidium cochleatum</i>	+		
<i>M. benthophili</i>		+	
<i>M. gadi</i>	+	+	
<i>M. incurvatum</i>	+		
<i>M. lieberkühni</i>	+	+	+
<i>M. macrocapsulare</i>	+		+
<i>M. melanostomi</i>	+	+	
<i>M. parvum</i>	+		
<i>M. pfeifferi</i>	+	+	+
<i>M. pulchrum</i>	+		
<i>M. rhodei</i>	+		+
<i>M. salmonis</i>	+		
<i>M. schulmani</i>			+
<i>Myxobilatus convexum</i>	+		
<i>M. gasterostei</i>	+		+
<i>M. medius</i>	+	+	+
<i>M. platessae</i>	+		
<i>M. varicorhini</i>			+
<i>Myxobolus adeli</i>	+	+	
<i>M. albovae</i>	+		+
<i>M. alburni</i>			+
<i>M. alievi</i>			+
<i>M. anurus</i>	+		
<i>M. asymmetricus</i>	+		
<i>M. bliccae</i>		+	+
<i>M. bramae</i>	+	+	+
<i>M. branchialis</i>	+		+
<i>M. carassii</i>			+
<i>M. chondrostomi</i>			+
<i>M. circulus</i>	+		+
<i>M. cycloides</i>			+
<i>M. cyprini</i>	+	+	+
<i>M. cyprinicola</i>			+
<i>M. dispar</i>	+	+	+
<i>M. diversicapsularis</i>			+
<i>M. dogieli</i>		+	+
<i>M. donecae</i>			+
<i>M. dujardini</i>			+
<i>M. elegans</i>	+		
<i>M. ellipsoides</i>	+	+	+
<i>M. episquamalis</i>	+	+	
<i>M. exiguus</i>	+	+	+
<i>M. gigas</i>			+
<i>M. ichkeulensis</i>	+	+	
<i>M. infundibulatus</i>			+

Continue on next page...

Myxosporean species	The Black Sea	The Sea of Azov	The Caspian Sea
<i>M. karelicus</i>	+		+
<i>M. kubanicus</i>		+	
<i>M. kuleminae</i>			+
<i>M. lobatus</i>			+
<i>M. macrocapsularis</i>	+	+	+
<i>M. magnus</i>		+	
<i>M. minutus</i>			+
<i>M. muelleri</i>	+	+	+
<i>M. musajevi</i>			+
<i>M. musculi</i>	+	+	+
<i>M. najdenovae</i>	+	+	
<i>M. nemachili</i>			+
<i>M. obesus</i>	+		+
<i>M. oviformis</i>	+	+	+
<i>M. parvus</i>	+	+	
<i>M. percarinae</i>	+		
<i>M. pfeifferi</i>			+
<i>M. pseudodispar</i>	+	+	+
<i>M. rotundus</i>	+		+
<i>M. rutili</i>	+	+	+
<i>M. saidovi</i>			+
<i>M. samgoricus</i>			+
<i>M. sandrae</i>	+	+	+
<i>M. schulmani</i>			+
<i>M. squamae</i>			+
<i>M. sphaericus</i>	+		
<i>M. spinacurvatura</i>	+	+	
<i>M. truttae</i>			+
<i>Myxodavisia cornuta</i>		+	
<i>M. ophidioni</i>	+		
<i>Ortholinea antipae</i>	+		
<i>O. divergens</i>	+		
<i>O. gobiusi</i>	+	+	
<i>O. mullusi</i>	+		
<i>O. orientalis</i>	+		
<i>Pseudalataspora pontica</i>	+		
<i>Sigmomyxa sphaerica</i>	+		
<i>Sinuolinea rebae</i>	+		
<i>S. sakinachanumae</i>	+		+
<i>Sphaeromyxa atherinae</i>	+		
<i>S. balbiani</i>	+		
<i>S. incurvata</i>	+		
<i>S. sabrazezi</i>	+		
<i>S. sevastopoli</i>	+	+	
<i>Sphaerospora bergi</i>	+		
<i>S. carassii</i>			+
<i>S. caspialosae</i>	+		+
<i>S. caudata</i>	+	+	

Continue on next page...

Myxosporean species	The Black Sea	The Sea of Azov	The Caspian Sea
<i>S. dicentrarchi</i>	+	+	
<i>S. donecae</i>			+
<i>S. elegans</i>	+		+
<i>S. mugilis</i>	+	+	
<i>Thelohanellus misgurni</i>			+
<i>T. pyriformis</i>		+	+
<i>Zschokkella admiranda</i>	+		
<i>Z. dogieli</i>	+		
<i>Z. iskovi</i>	+		
<i>Z. nova</i>	+	+	+
<i>Z. striata</i>		+	
<i>Z. sturionis</i>		+	+

Black Sea fish myxosporean fauna was depicted earlier in key manuals [9, 16]. Origin and composition of Black Sea fish myxosporean fauna were considered later by V. M. Yurakhno in Russian, Georgian, Abkhazian, and Ukrainian waters [35, 37]. New data on Black Sea fauna were obtained near Turkish shores [12, 24, 27, 28, etc.], as well as in Ukrainian and Moldavian waters of Lower Danube and Dniester basins (for Clupeidae fishes) [20]. New data on Sea of Azov fauna were obtained for the Taganrog Gulf [36, 38]. New information was received for myxosporeans of Mugilidae in the Black Sea and the Sea of Azov [39, 40]. Comparison of the myxosporean fauna in the Black Sea and adjacent seas using Czekanowski – Sørensen index [35] has shown that fish myxosporean fauna in the Black Sea, the Sea of Azov, and the Caspian Sea forms one cluster. It is not quite homogenous by hydrological conditions and hosts species composition. Water salinity in the main part of the Black Sea is of 17–18.5 ‰. The Sea of Azov and the Caspian Sea have highly brackish waters with salinities of 10–14 ‰ and 12.7–12.8 ‰ (less often of 13.2 ‰), respectively. In the Sea of Azov near estuary areas, salinity is of 2–4 ‰ and even lower, and in the Caspian Sea – of 1–2 ‰ (in the north-west).

To date, of 108 myxosporean species of the Black Sea region, 29 are registered only in freshwater fish in the estuaries with considerable brackish water (*Myxidium lieberkühni*, *M. macrocapsulare*, *M. pfeifferi*, *M. rhodei*, *Chloromyxum cristatum*, *Ch. esocinum*, *Ch. fluviatile*, *Ch. legeri*, *Myxobolus albovae*, *M. anurus*, *M. cyprini*, *M. dispar*, *M. elegans*, *M. ellipsoids*, *M. karelicus*, *M. macrocapsularis*, *M. musculi*, *M. obesus*, *M. oviformis*, *M. percarinae*, *M. pseudodispar*, *M. rutili*, *M. sandrae*, *M. sphaericus*, *Henneguya creplini*, *H. gigantea*, *H. lobosa*, *H. oviperda*, and *H. psorospermica*). For 79 myxosporean species, marine fish species serve as hosts; they are registered mainly in full-salt sea part. Totally 17 of them are of freshwater origin: 7 species (*Zschokkella nova*, *Myxobolus branchialis*, *M. bramae*, *M. circulus*, *M. exiguus*, *M. muelleri*, and *M. rotundus*) are registered in freshwater fish and in euryhaline mullets; 1 (*Myxidium salmonis*) parasitizes on freshwater and marine salmon fishes; the only hosts for 9 species are mullets (for *Myxobolus adeli*, *M. episquamalis*, *M. ichkeulensis*, *M. parvus*, and *M. spinacurvatura*) or other marine fish species (for *Myxobolus asymmetricus*, *M. najdenovae*, *Hoferellus jurachni*, and *Henneguya sinova*).

Marine forms are represented by Pontic (22 species), Ponto-Azov (3), and Ponto-Caspian (2) endemics, as well as by Mediterranean invaders (35). Among freshwater myxosporeans, only 1 species (*M. percarinae*) is Black Sea endemic; 1 species (*Myxobolus najdenovae*) is Ponto-Azov endemic, and most other species are widely represented in freshwater reservoirs. Of the marine forms, Pontic endemics are: *Sphaeromyxa atherinae*, *Myxidium cochleatum*, *M. parvum*, *Fabespora nana*, *Gadimyxa ovale*, *Myxodavisia ophidioni*, *Ceratomyxa merlangi*, *C. markewichi*, *C. peculiaris*, *Myxobilatus convexum*, *Chloromyxum osmanovi*, *Ch. partistriatus*, *Ch. psetti*, *Ch. trachuri*, *Ortholinea antipae*, *Ortholinea mullusi*, *Sphaerospora bergi*, *Zschokkella dogieli*, *Pseudalataspora pontica*, *Kudoa anatolica*, *K. niluferi*, and *K. stellula*. Ponto-Azov endemics are: *Sphaeromyxa sevastopoli*, *Myxidium melanostomi*, and *Ortholinea gobiusi*. Ponto-Caspian

endemics are *Sphaerospora caspialosae* and *Sinuolinea sakinachanumae*. Among Mediterranean invaders, 23 species were found in the Mediterranean Sea (*Sphaeromyxa balbiani*, *S. incurvata*, *S. sabrazesi*, *Myxidium gadi*, *M. incurvatum*, *M. pulchrum*, *Sigmomyxa sphaerica*, *Enteromyxum leei*, *Zschokkella admiranda*, *Ortholinea divergens*, *Ceratomyxa arcuata*, *C. beloneae*, *C. globulifera*, *C. inaequalis*, *C. parva*, *C. reticularis*, *C. agilis*, *C. hepseti*, *Sphaerospora dicentrarchi*, *S. mugilis*, *Alataspora solomoni*, *Kudoa nova*, and *K. quadratum*). The rest 12 species (*Sinuolinea rebae*, *Ortholinea orientalis*, *Zschokkella iskovi*, *Ceratomyxa elegans*, *C. informis*, *Sphaerospora caudata*, *S. elegans*, *Myxobilatus medius*, *M. gasterostei*, *M. platesae*, *Chloromyxum ovatum*, and *Ch. schulmani*) still have not been found in the Mediterranean Sea, mainly due to very few studies on this group of parasites. Meanwhile, identification of most of the species mentioned above in close regions of the World Ocean allows suggesting that they penetrated the Black Sea only through the Mediterranean Sea. As for *Ceratomyxa elegans* from *Scorpaena porcus*, as well as for *Myxobolus parvus*, *M. episquamalis*, *M. exiguus*, and *M. spinacurvatura* from mullets, they can also become parasites for Pacific Ocean fishes. Taking into consideration that at the end of Neogenic period of Cainozoan era, the Atlantic and the Pacific oceans were connected by a wide strait for some time [44], we can assume presence of each of these parasites in a common large areal in the past which then was split due to powerful geological transformations on our planet. To our opinion, this also applies to widely spread brackish-water species *Myxobilatus medius*, *M. gasterostei*, and *Sphaerospora elegans* having marine origin that penetrated the Ponto-Caspian basin from the Mediterranean Sea many years ago. Possibly in the future, *Zschokkella sturionis* – a parasite for sturgeons whose parasite fauna in the Black Sea has not been studied well – will also be found in the Black Sea.

Of 46 myxosporean species of freshwater origin found in the Black Sea, most species (29) inhabit freshwater fish in the region of Dnieper Delta, as well as Dnieper and Dnieper-Bug estuaries with water salinity of 0.08–0.5 to 3–4 ‰ (less often of 6–8 ‰) within the main territory. Freshwater hosts are mostly carps, bass, and pike. There are also euryhaline hosts: Black Sea salmon (of freshwater origin); sea herring and mullet; brackish-water Gasterosteidae (of marine origin). Parasites for euryhaline fish are also registered in other full-salt sea parts, where pure marine myxosporean species also survive. Brackish-water forms (*Sphaerospora caspialosae* and *S. elegans*) are represented in the gulfs. *S. caspialosae* is also registered in the Kerch Strait – a region with salinity of 10–14 ‰ to depth of 50 m.

The fauna of Sea of Azov fish parasites includes 42 myxosporean species [3, 9, 36, 37]; 32 of them are found in the Black Sea, 20 – in the Caspian Sea. Totally 19 species (*Henneguya schizura*, *Hoferellus conifer*, *Myxidium lieberkühni*, *M. pfeifferi*, *Myxobolus bliccae*, *M. cyprini*, *M. dispar*, *M. dogieli*, *M. ellipsoides*, *M. kubanicus*, *M. macrocapsularis*, *M. magnus*, *M. muscoli*, *M. oviformis*, *M. pseudodispar*, *M. rutili*, *M. sandrae*, *Thelohanellus pyriformis*, and *Zschokkella striata*) are freshwater species, and they are parasitic only on freshwater fish species. Ten species are of freshwater origin but can be registered in marine fish species (mostly in mullets – *Myxobolus adeli*, *M. bramae*, *M. episquamalis*, *M. exiguus*, *M. ichkeulensis*, *M. muelleri*, *M. parvus*, *M. spinacurvatura*, and *Zschokkella nova*; one in gobies – *M. najdenovae*). Of the freshwater species, *Myxobolus najdenovae* is Ponto-Azov endemic. Totally 13 myxosporean species are marine ones: 2 species (*Myxodavisia cornuta* and *Myxidium bentophili*) are Sea of Azov endemics; 3 species (*Shaeromyxa sevastopoli*, *Myxidium melanostomi*, and *Ortholinea gobiusi*) are Ponto-Azov endemics; 8 species (*Ceratomyxa hepseti*, *Kudoa nova*, *Myxidium gadi*, *Myxobilatus medius*, *Sphaerospora caudata*, *S. dicentrarchi*, *S. mugilis*, and *Zschokkella sturionis*) are Mediterranean invaders.

Number of myxosporean species common for the Sea of Azov and the Black Sea is 32. Totally 12 are freshwater parasites on freshwater fish; 9 are parasites on euryhaline mullets; 1 is gobies parasite found in full-salt waters; 10 are marine species (2 of them are brackish-water forms).

The Caspian Sea fauna is well described in works of A. A. Gazimagomedov [10, 11] and Sh. R. Ibragimov [13, 14, 15, etc.]. On its myxosporean fauna, the Caspian Sea is very similar to the Black Sea. In the fauna composition, there are 68 myxosporean species with 8 having marine origin (1 (*Zschokkella sturionis*) is ancient marine species; 1 (*Sinuolinea sakinachanumae*) is Ponto-Caspian

endemic; 6 (*Sphaerospora caspailosae*, *S. donecae*, *S. elegans*, *Ceratomyxa caspia*, *Myxobilatus gasterostei*, and *M. medius*) are brackish-water myxosporeans) and 60 being freshwater species. The researchers mentioned above reported 5 Caspian Sea endemics, with *Ceratomyxa caspia* and *Sphaerospora donecae* being of marine origin and *Myxobolus saidovi*, *M. alievi*, and *Henneguya chaibulaevi* – of freshwater origin.

Common fauna of such different water basins as the Black Sea and the Caspian Sea can be explained by the fact that connection between them exists mostly due to freshwater forms (27 species). Among marine species, only 5 are common (4 of them are of brackish-water origin).

The Caspian Sea and the Sea of Azov have 18 common freshwater parasites and 2 marine parasites (one of them is of brackish-water type). Unlike the Caspian Sea, the Sea of Azov is characterized by presence of Mediterranean invaders who could penetrate it from the Black Sea after the separation of the Caspian Sea, which became an independent basin.

Conclusion. When moving from west to east (from the Black Sea to the Caspian Sea), a gradual impoverishment of marine myxosporean fauna and its replacement by freshwater species are observed. In the Black Sea, correlation of marine and freshwater forms is approximately equal. In the Sea of Azov, elements of freshwater fauna begin to dominate. They reach considerable priority in the Caspian Sea where marine species are represented mainly by freshwater forms. As for impoverishment of abundance of myxosporean species directed from the Black Sea to the Caspian Sea (it was marked by Z. Donets), it does occur.

Part of this work conducted by V. M. Yurakhno was carried out within the framework of government research assignment of IBSS no. AAAA-A18-118020890074-2.

REFERENCES / СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Arkhangelsky A. D. Hydrogen sulfide contamination of some Tertiary sea basins of the Crimea and Caucasus region and its connection with the origin of petroleum. *Neftyanoe khozyaistvo*, 1926, vol. 10, iss. 4, pp. 483–486. (in Russ.)
2. Arkhangelsky A. D., Strakhov N. M. *Geological History of the Black Sea*. Moscow ; Leningrad : Izd-vo AN SSSR, 1938, 226 p. (in Russ.)
3. Bortnikov E. S., Strizhakova T. V., Boiko N. E., Ruzhinskaya L. P., Shevkoplyasova N. N. Myxobolosis of the flathead grey mullet *Mugil cephalus* in the Russian waters of the Black Sea. In: *Contemporary Problems of Theoretical and Marine Parasitology : Coll. of Sci. Papers / K. V. Galaktionov, A. V. Gaevskaya* (Eds). Sevastopol : Izd-l' Bondarenko N. Yu., 2016, pp. 211–213. (in Russ.)
4. Campbell N. The myxosporean parasitofauna of the Atlantic horse mackerel, *Trachurus trachurus* (L.) in the North-East Atlantic Ocean and Mediterranean Sea. *Acta Parasitologica*, 2005, vol. 50, no. 2, pp. 97–101.
5. Dogel V. A. *General Parasitology*. Leningrad : Izd-vo Leningr. un-ta, 1962, 464 p. (in Russ.)
6. Donets Z. S. Zoogeographical analysis of myxosporeans in the USSR southern water reservoirs. *Trudy Zoologicheskogo instituta AN SSSR*, 1979, vol. 87, pp. 65–90. (in Russ.)
7. Donets Z. S. Formation of myxosporeans fauna in the USSR southern seas. *Trudy Zoologicheskogo instituta AN SSSR*, 1981, vol. 107, pp. 74–79. (in Russ.)
8. Donets Z. S. *Myxosporeans of the USSR Southern Rivers Basins* : avtoref. diss. ... d-ra biol. nauk. Leningrad, 1982, 43 p. (in Russ.)
9. Gaevskaya A. V., Gusev A. V., Delyamure S. L., Donets Z. S., Iskova N. I., Korniyushin V. V., Kovaleva A. A., Margaritov N. M., Markevich A. P., Mordvinova T. N., Naidenova N. N., Nikolaeva V. M., Parukhin A. M., Pogoreltseva T. P., Smogorzhevskaya L. A., Solonchenko A. I., Shteyn G. A., Schulman S. S. (Contrs). *Opredelitel' parazitov pozvonochnykh Chernogo i Azovskogo morei. Paraziticheskie bespozvonochnye ryb, ryboyadnykh ptits i morskikh mlekopitayushchikh*. Kiev : Naukova dumka, 1975, 552 p. (in Russ.)
10. Gazimagomedov A. A. To the study of parasitic Protozoa of the Caspian Sea fish. In: *Sbornik nauchno-issledovatel'skikh rabot Dagestanskogo nauchno-issledovatel'skogo veterinarnogo instituta*. Makhachkala, 1970, vol. 4, pp. 291–293. (in Russ.)
11. Gazimagomedov A. A. New species of mucous sporozoans of the Caspian Sea fish. In: *Voprosy fiziologii, biokhimii, zoologii, parazitologii* : sbornik nauchnykh soobshchenii kafedry fiziologii cheloveka

- i zhivotnykh, zoologii i biokhimii. Makhachkala, 1970, pp. 72–76. (in Russ.)
12. Gürkanlı C., Okkay S., Çiftçi Y., Yurakhno V., Özer A. Morphology and molecular phylogeny of *Ortholinea mullusi* sp. nov. (Myxozoa) in *Mullus barbatus* from the Black Sea. *Diseases of Aquatic Organisms*, 2018, vol. 127, pp. 117–124. <https://doi.org/10.3354/dao03192>
 13. Ibragimov Sh. R. *Caspian Sea Fish Parasites (Species Composition, Ecology, Origin and Fauna Formation)*: avtoref. dis. ... d-ra biol. nauk. Baku, 1991, 47 p. (in Russ.)
 14. Ibragimov Sh. R. Zoogeographical status of Caspian Sea with consideration of the data on fish parasites. In: *Sovremennye problemy biologicheskikh resursov Kaspiiskogo morya*: materialy mezhdunar. konf., posvyashch. 90-letiyu Azerb. NIIRKh, 15–17 Sept., 2003. Baku, 2003, pp. 224–228. (in Russ.)
 15. Ibragimov Sh. R. Parasite fauna of the Caspian Sea for long period of observations. In: *Problemy ikhtiopatologii v nachale XXI veka*: materialy mezhdunar. nauch. konf. Saint Petersburg, 2009, pp. 65–78. (in Russ.)
 16. Iskov M. P. Myxosporeans (Myxosporea). In: *Fauna Ukrainy*. Kiev: Naukova dumka, 1989, vol. 37, iss. 4, 210 p. (in Russ.)
 17. Kessler K. F. Fish inhabiting and occurring in Aral-Caspian-Pontian ichthyological region. *Trudy Aralo-Kaspiyskoi ekspeditsii*, 1877, iss. 4, 360 p. (in Russ.)
 18. Kolesnikova M. G., Donets Z. S. Fauna of myxosporeans in the Crimean coast fish. In: *Parazitologiya i patologiya morskikh organizmov*: tez. dokl. 14-go Vsesoyuzn. simp. Kaliningrad, 1987, pp. 89–90. (in Russ.)
 19. Lubat V., Radujkovic B., Marques A., Bouix G. Parasites des poissons marins du Montenegro: Myxosporidies. *Acta Adriatica*, 1989, vol. 30, no. 1/2, pp. 31–50.
 20. Moshu A. Ja., Trombitsky I. D. New parasites (Apicomplexa, Cnidosporea) of some Clupeidae fishes from the Danube and Dniester basins. In: *Academician Leo Berg – 130: Coll. of Sci. Articles*. Bendery: Eco-TIRAS; Tipogr. “ELAN POLIGRAF”, 2006, pp. 95–103.
 21. Naidenova N. N. *Parazitofauna ryb semeistva bychkovykh Chernogo i Azovskogo morei*. Kiev: Naukova dumka, 1974, 182 p. (in Russ.)
 22. Osmanov S. U. Materials for the Black Sea fish parasitic fauna. *Uchenye zapiski Leningradskogo pedinstitutu im. Gertsena*, 1940, vol. 30, pp. 187–265. (in Russ.)
 23. Ovcharenko M., Yurakhno V., Tytar V. Review of microparasites of mullets in the Mediterranean basin and the Sea of Japan. *Revista Română de Parazitologie*, 2007, vol. 17 (suppl.), pp. 142–143.
 24. Özer A., Okkay S., Gürkanlı C. T., Çiftçi Y., Yurakhno V. Two novel myxosporean parasites in Black Sea fishes: *Kudoa niluferi* sp. nov. and *Kudoa anatolica* sp. nov. (Cnidaria: Myxosporea). *Diseases of Aquatic Organisms*, 2018, vol. 128, no. 3, pp. 225–233. <https://doi.org/10.3354/dao03227>
 25. Özer A., Özkan H., Yurakhno V. New host and geographical records for *Ortholinea orientalis* (Schulman et Schulman-Albova, 1953) (Myxozoa, Myxosporea). *Acta Zoologica Bulgarica*, 2015, vol. 67, no. 4, pp. 595–597.
 26. Özer A., Özkan H., Güneydağ S., Yurakhno V. First report of several myxosporean (Myxozoa) and monogenean parasites from fish species collected from Sinop coasts of the Black Sea. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2015, vol. 15, pp. 741–749. https://doi.org/10.4194/1303-2712-v15_3_18
 27. Özer A., Özkan H., Gürkanlı C. T., Yurakhno V., Çiftçi Y. Morphology, histology and phylogeny of *Henneguya sinova* sp. nov. (Myxobolidae: Myxozoa) infecting gills of *Parablennius tentacularis* in the Black Sea, Turkey. *Diseases of Aquatic Organisms*, 2016, vol. 118, no. 3, pp. 207–215. <https://doi.org/10.3354/dao02968>
 28. Özer A., Öztürk T., Özkan H., Çam A. First report of *Enteromyxum leei* (Myxozoa) in the Black Sea in a potential reservoir host *Chromis chromis*. *Fish Pathology*, 2014, vol. 49, iss. 2, pp. 57–60. <https://doi.org/10.3147/jsf.49.57>
 29. Özer A., Yurakhno V. Parasite fauna of garfish *Belone belone* collected from Sinop coasts of the Black Sea, Turkey. *Bulletin of the European Association of Fish Pathology*, 2013, vol. 33, no. 6, pp. 171–180.
 30. Reshetnikova A. V. *Parasitic Fauna of Some Food Fish Species of the Black Sea*: avtoref. dis. ... kand. biol. nauk. Leningrad, 1954, 14 p. (in Russ.)
 31. Şimşek E. First molecular data on *Myxobolus episquamalis* (Myxozoa: Myxosporea) infecting the scale of grey mullet (*Mugil cephalus*) off the Turkish Black Sea coasts. *Türkiye Parazitoloji Dergisi = Turkish Journal of Parasitology*, 2019, vol. 43, iss. 3, pp. 135–142. (in Turkish). <https://doi.org/10.4274/tpd.galenos.2019.6294>
 32. Strakhov N. M. *Istoriya geologii*. 2nd edition, revised. Moscow: Gosuchpedizdat, 1938, 501 p. (in Russ.)

33. Strakhov N. M. *Osnovy istoricheskoi geologii*. In 2 parts. Moscow : Gosgeolizdat, 1948, pt. 1, 253 p. ; pt. 2, 396 p. (in Russ.)
34. Yurakhno V. M. New data of the fauna of myxosporidians from fishes of the Black Sea. *Parazitologiya*, 1993, vol. 27, no. 4, pp. 320–326. (in Russ.)
35. Yurakhno V. M. *Myxosporeans of the Black Sea Fish: Systematics, Fauna, Ecology, Zoogeography*. [dissertation]. Sevastopol, 1994, 297 p. (in Russ.)
36. Yurakhno V. M. To fish myxosporean fauna (Myxozoa, Myxosporea) in Taganrog Gulf (Sea of Azov). *Vestnik zoologii*, 2005, suppl. 19, pt. 2, pp. 369–370. (in Russ.)
37. Yurakhno V. M. The origin of the Black Sea fish myxosporean (Myxozoa, Myxosporea) fauna. *Vestnik zoologii*, 2009, suppl. 23, pp. 199–207. (in Russ.)
38. Yurakhno V. M., Naidenova N. N. *Davisia cornuta* sp. n. (Myxosporea: Sinuolineidae), the parasite of *Neogobius fluviatilis* Pallas in the Azov Sea. *Ekologiya morya*, 2000, iss. 51, pp. 78–80. (in Russ.)
39. Yurakhno V. M., Ovcharenko N. A. Myxosporeans of the World Ocean mullets. In: *Parazitologiya v XXI veke – problemy, metody, resheniya* : materialy IV Vseros. kongr. Parazitologicheskogo obshchestva Rossiiskoi akademii nauk, 20–25 Oct., 2008. Saint Petersburg : “Lema”, 2008, pp. 231–234. (in Russ.)
40. Yurakhno V. M., Ovcharenko M. O. Study of Myxosporea (Myxozoa), infecting worldwide mullets with description of a new species. *Parasitology Research*, 2014, vol. 113, iss. 10, pp. 3661–3674. <https://doi.org/10.1007/s00436-014-4031-5>
41. Yurakhno V. M., Özer A. N. Fauna of myxosporeans of the Ponto-Caspian basin fishes (origin, comparative analysis). In: *Sovremennye problemy parazitologii i ekologii. Chteniya, posvyaschennye pamyati S. S. Shulmana* : sbornik trudov Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, Tolyatti, 15–17 May, 2018. Tolyatti : Poliar, 2018, pp. 334–345. (in Russ.)
42. Zenkevich L. A. *Fauna i biologicheskaya produktivnost' morya*. Moscow : Sovetskaya nauka, 1947, 588 p. (Morya SSSR ; vol. 2). (in Russ.)
43. Zenkevich L. A. *Biologiya morei SSSR*. Moscow : Izd-vo AN SSSR, 1963, 740 p. (in Russ.)
44. *Zhizn' zhivotnykh* : in 7 vols / Polyanskiy Yu. I. (Ed.). Moscow : Prosveshchenie, 1987, vol. 1, 448 p. (in Russ.)

ИСТОРИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И ОСОБЕННОСТИ ФАУНЫ МИКСОСПОРИДИЙ РЫБ ПОНТО-КАСПИЙСКОГО БАССЕЙНА

В. М. Юрахно¹, А. Н. Озер²

¹Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»,
Севастополь, Крым

²Синопский университет, Синоп, Турция
E-mail: viola_taurica@mail.ru

Рассмотрена история становления фауны миксоспорициев рыб Понто-Каспийского бассейна. Работа основана на оригинальном материале по миксоспорициевым рыбам Чёрного моря (собиран в 1987–2018 гг.) и Азовского моря (1997–2016). Всего исследованы 15 368 экз. рыб 87 видов (14 297 экз. рыб 80 видов в Чёрном море и 1071 экз. рыб 19 видов в Азовском). Материал собран методом неполных паразитологических вскрытий и обработан по общепринятым методикам. Также проанализированы все доступные литературные источники по миксоспорициевым черноморских, азовских и каспийских рыб (в библиографическом списке указаны только наиболее значимые публикации). Проведён сравнительный анализ фауны миксоспорициев рыб Чёрного, Азовского и Каспийского морей. Указано, что всего в Чёрном море известно 108 видов этих паразитов, в Азовском море — 42, в Каспийском море — 68. Общими для фауны миксоспорициев рыб Азовского и Чёрного морей являются 32 вида, Каспийского и Чёрного — 32, Азовского и Каспийского — 20. Во всех трёх морях встречаются 16 видов миксоспорициев. К настоящему времени из 108 видов миксоспорициев в Чёрном море 29 обнаружены исключительно в пресноводных рыбах, обитающих в устьях рек и лиманов со значительным опреснением. Для 79 видов хозяевами служат морские виды рыб, встречающиеся в основном в полносолёной части моря. Из них 17 имеют пресноводное происхождение: 7 видов встречаются в пресноводных рыбах и эвригалинных кефалях, 1 является паразитом пресноводных и морских лососевых рыб, а 9 имеют хозяевами только кефалей или других

видов морских рыб. Морские формы представлены эндемиками: понтическими (22 вида), понто-азовскими (3) и понто-каспийскими (2), а также средиземноморскими вселенцами (35 видов). Среди пресноводных миксоспориций только 1 вид эндемичен для Чёрного моря и 1 является понто-азовским эндемиком; большинство остальных видов широко представлено в пресных водоёмах. Среди средиземноморских вселенцев следует отметить 23 вида, найденных в Средиземном море; 12 видов пока не встречены в Средиземном море (вероятно, главным образом из-за слабой изученности в нём этой группы паразитов). Фауна миксоспориций рыб Азовского моря насчитывает 42 вида миксоспориций, 32 из которых найдены в Чёрном море, 20 — в Каспийском. К пресноводным видам, паразитирующим исключительно в пресноводных видах рыб, относятся 19. Ещё 10 видов имеют пресноводное происхождение, но встречаются и в морских видах рыб (преимущественно в кефалевых, а один вид — в бычковых). Из пресноводных видов 1 является понто-азовским эндемиком. К морским относятся 13 видов миксоспориций: 2 азовских эндемика, 3 понто-азовских эндемика, 8 средиземноморских вселенцев. Из 68 видов миксоспориций рыб Каспийского моря 8 являются морскими (1 древнеморской вид, 1 понто-каспийский эндемик, 6 солоноватоводных миксоспориций), 60 — пресноводными. Эндемиков Каспийского моря известно 5 (2 вида морского происхождения и 3 — пресноводного). Установлено, что при продвижении с запада на восток (от Чёрного моря к Каспийскому) наблюдается постепенное обеднение фауны морских миксоспориций и замещение её фауной пресноводных видов. Отмечено также обеднение видового состава миксоспориций рыб Азовского и Каспийского морей по сравнению с таковым Чёрного моря.

Ключевые слова: фауна, миксоспориции, рыбы, Чёрное море, Азовское море, Каспийское море

ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

**ПАМЯТИ ЮВЕНАЛИЯ ПЕТРОВИЧА ЗАЙЦЕВА
(18.04.1924 – 08.01.2020)**

Ушёл из жизни всемирно известный учёный-гидробиолог, академик НАН Украины, доктор биологических наук, профессор Ювеналий Петрович Зайцев. Ему принадлежат открытие морского нейстона и формулирование концепции контурных биотопов моря. Ю. П. Зайцев — автор и соавтор более чем 350 научных работ, а также ряда научно-популярных книг. Под его руководством выполнено и защищено 6 докторских и 24 кандидатских диссертации.



Восьмого января 2020 г. в Одессе после продолжительной болезни скончался Ювеналий Петрович Зайцев — выдающийся учёный-гидробиолог, академик Национальной академии наук Украины, доктор биологических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники Украины, лауреат Государственной премии Украины.

Ю. П. Зайцев родился в селе Байрамча Аккерманского уезда Бессарабии (ныне село Николаевка-Новороссийская Саратского района Одесской области Украины) в семье учителя. Детство и юность провёл в селе Большая Балабановка (ныне село Николаевка Белгород-Днестровского района Одесской области).

В 1949 г. окончил биологический факультет Одесского государственного университета имени И. И. Мечникова (ныне Одесский национальный университет). С 1950 по 1956 г. работал лаборантом на Гидробиологической станции ОГУ. Под научным руководством профессора И. И. Пузанова Ювеналий Петрович выполнил и защитил в ОГУ в 1956 г. кандидатскую диссертацию по теме «Размножение рыб с пелагической икрой в Одесском заливе».

В этой работе приведены результаты первого в науке определения величин удельного веса пелагических икринок различных видов черноморских рыб — параметра, позволившего выявить глубину нахождения икринок в анизотропной пелагиали опреснённой северо-западной части Чёрного моря.

В 1956 г. Ю. П. Зайцев в должности младшего научного сотрудника Одесской биостанции Института гидробиологии АН УССР начал комплексные исследования открытого им в Чёрном море ранее неизвестного науке сообщества организмов — морского нейстона (в первую очередь его нижнего яруса — гипонейстона). Использование полупогружённых сетей оригинальной конструкции позволило собрать большой объём новой научной информации, которая касалась различных морских организмов, приспособленных к жизни в верхнем слое воды (0...–5 см). Изучение условий эволюционного формирования морского нейстона показало всеобщий характер присутствия приповерхностного сообщества пелагиали, что в дальнейшем подтвердили исследования во всём Мировом океане.

Открытие Ювеналия Петровича вызвало интерес среди западных учёных и поспособствовало началу изучения морского нейстона во Франции, Италии, Германии, Великобритании, Алжире и других странах. Его монография «Морская нейстонология», опубликованная в 1970 г. в Киеве, на следующий год была издана на английском языке в США и Израиле. В 1974 г. журнал *Soviet Life* включил открытие морского нейстона в число важнейших достижений науки в СССР. Используя сети конструкции Ю. П. Зайцева, иностранные коллеги нашли и описали разнообразный нейстон в различных океанах. Г. Г. Поликарпов определил морской нейстон как экологическую мишень радиоэкологического фактора и наиболее «критический» биоценоз на земном шаре, поскольку самые высокие концентрации радионуклидов наблюдаются именно в поверхностной плёнке воды и в пене.

По приглашению иностранных правительств Ю. П. Зайцев выступал с научными докладами и курсом лекций перед студентами и преподавателями во Франции, США, Канаде, ЮАР, Турции, Японии.

В 1964 г. Ювеналий Петрович защитил в ОГУ докторскую диссертацию на тему «Гипонейстон Чёрного моря и его значение». Постановлением Президиума АН УССР в Одесском отделении ИнБЮМ был создан отдел гипонейстона. Объектами исследования стали бактерии, одноклеточные водоросли, беспозвоночные и личинки рыб на ранних стадиях онтогенеза в специфическом слое нейстала.

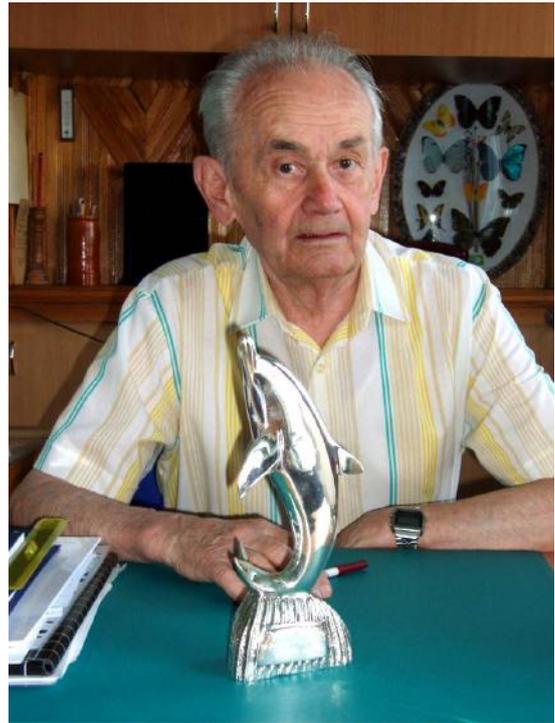
В 1968 г. ВАК СССР утвердил Ю. П. Зайцева в звании профессора. В 1969 г. его избрали членом-корреспондентом Академии наук УССР.

Ювеналий Петрович сформулировал концепцию контурных биотопов моря, населённых сообществами организмов-контуробионтов. Он выделил внешние контуры пелагиали на её границах с атмосферой, берегом, дном и реками: аэроконтур (граница пелагиаль — атмосфера), псаммоконтур (граница пелагиаль — песчаный берег и дно), литоконтур (граница пелагиаль — каменистый берег и дно), пелоконтур (граница пелагиаль — илистый берег и дно) и потамоконтур (граница между морскими и речными водными массами). Каждому контурному биотопу присущи приспособленные к его специфическим условиям группы организмов, главным образом состоящие из особей на ранних стадиях онтогенеза.

Исключением из этого правила считали глубоководный пелоконтур Чёрного моря в сероводородной области, где существование организмов-оксибионтов называли невозможным *a priori*. Благодаря предпринятым по инициативе Ю. П. Зайцева и Г. Г. Поликарпова комплексным исследованиям удалось обнаружить в донных отложениях на глубине до 2200 м жизнеспособные стадии развития оксибионтов из верхних слоёв Чёрного моря; из них в лабораторных условиях были выведены культуры гетеротрофных бактерий, грибов и микроводорослей.

Ювеналий Петрович принимал участие в работе Черноморской экологической программы (Black Sea Environmental Programme, BSEP) как международный эксперт по вопросам биологического разнообразия и экологии моря. Его монографии и статьи по международной черноморской тематике опубликованы в Нью-Йорке в издательстве ООН.

Он участвовал в работе объединённых групп экспертов ООН по научным аспектам охраны моря (Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection, GESAMP). На заседании *The Sea-surface Microlayer and Its Role in Global Change* в США в 1994 г. Ю. П. Зайцев выступил с докладом «Нейстон морей и океанов». В заключительный документ этого форума,



GESAMP Reports and Studies (№ 59, 1995), было вынесено предложение об организации системы мониторинга Neuston Watch («Нейстонный дозор») для отслеживания состояния нейстона, оказывающего влияние на процесс массэнергообмена между океаном и атмосферой, в различных районах Мирового океана.

Ювеналий Петрович — автор и соавтор более чем 350 научных работ, в том числе 18 монографий, опубликованных в издательствах 20 стран. Кроме того, он автор научно-популярных книг по экологическому образованию и воспитанию юных читателей. Среди них — «За стеклом подводной маски», «Это удивительное море», «Твой друг море», «Жизнь морской поверхности», «Мир дельты», «Введение в экологию Чёрного моря», «Дикая природа в городе», послужившие для многих молодых людей ориентирами в выборе профессий биолога и эколога.

Под научным руководством Ю. П. Зайцева выполнено и защищено 6 докторских и 24 кандидатских диссертации.

Ювеналий Петрович в течение 17 лет (1972–1989) возглавлял Институт морской биологии (ранее Институт биологии южных морей) НАН Украины. Летом 2019 г. в ИМБ торжественно отметили 95-ю годовщину со дня рождения Ю. П. Зайцева, посвятив этой дате большую научную конференцию, в которой активно участвовал сам юбиляр.

Несмотря на болезнь, Ювеналий Петрович до последних дней занимался научной работой. Его здоровье серьёзно ухудшилось после трагического события в родном институте — декабрьского пожара, унёсшего жизни его ученика и преемника на посту директора, члена-корреспондента НАН Украины Бориса Александрова и секретаря Галины Иванович.

Ю. П. Зайцев прожил долгую, плодотворную и яркую жизнь — жизнь подлинного Учёного и Интеллекта. Он отличался неизменной доброжелательностью, дружелюбием и оптимизмом. Светлая память о Ювеналии Петровиче навсегда останется в наших сердцах.

Коллеги из ФИЦ ИнБЮМ имени А. О. Ковалевского РАН и ИМБ НАН Украины

**TO THE MEMORY OF YUVENALI ZAITSEV
(18.04.1924 – 08.01.2020)**

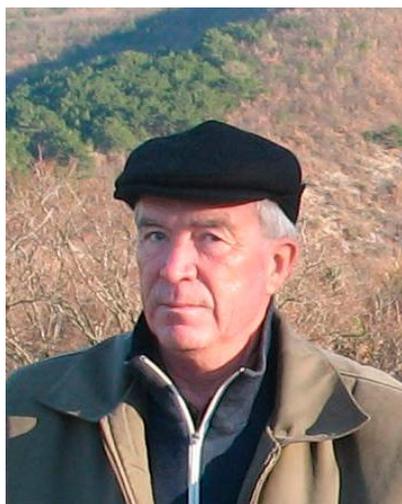
An outstanding hydrobiologist, Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine, D. Sc., and Professor Yuvenali Zaitsev passed away. It was he who discovered marine neuston and formulated the concept of contour biotopes of the sea. Yu. P. Zaitsev is the author and co-author of more than 350 scientific publications, as well as of a number of popular science books. Under his scientific supervision, 6 doctoral and 24 master's dissertations were completed and defended.

ПАМЯТИ ЮРИЯ МИХАЙЛОВИЧА БУРЧЕНКО
(09.05.1945 – 22.02.2020)

I haven't been able to think of anybody
whom I'd care to send out to look
for horses in his stead.

– J. D. Salinger, "Raise High the Roof Beam, Carpenters"

Ушёл из жизни Юрий Михайлович Бурченко. Более 30 лет он проработал в ИнБИОМ, где в разное время руководил отделами информации, патентования и международных связей. Ю. М. Бурченко был неординарным лингвистом.



Не стало Юрия Михайловича Бурченко. В это трудно поверить, потому что невозможно представить большего жизнелюба.

Вся его долгая трудовая деятельность прошла в двух академических учреждениях — киевском Институте микробиологии и вирусологии и севастопольском Институте биологии южных морей, где он в разное время руководил отделами информации, патентования и международных связей. Ю. М. Бурченко проработал в ИнБИОМ около 30 лет. Он встречал многих зарубежных коллег, был участником международных морских экспедиций и совещаний, активно способствовал вписыванию исследований института в мировую науку.

Юрий Михайлович нежно любил Севастополь. Он мог до мелочей воспроизводить исторические подробности и «вылепливать» безукоризненно точную картину событий, удивляя даже профессиональных историков. Он поражал неординарностью суждений и энциклопедическим складом ума, для которого не существовало пределов. Его уникальная память хранила всё, что он придирчиво и бережно «складывал» туда в течение своей жизни, и до боли обидно, что он не оставил это для нас: он терпеть не мог всякого рода бумажные носители, да и электронные не очень жаловал.

Ю. М. Бурченко был неординарным лингвистом. Вне зависимости от языка, на котором ему приходилось писать, он искусно работал с каждым текстом, будь то статья или монография.

С грустью приходится сказать, что Юрий Михайлович больше не будет взирать с любовью на каждый уголок своего родного города. Он ушёл в вечность, и утешает одно: он не мог попасть в компанию скучных людей.

TO THE MEMORY OF YURI BURCHENKO
(09.05.1945 – 22.02.2020)

Yuri Mikhailovich Burchenko passed away. He worked in IBSS for about 30 years, directing the departments of information, patents, and international relationships. He was an impeccable linguist.

Научное издание

Морской биологический журнал
основан в феврале 2016 г.

Учредитель:

ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»

Издатели журнала:

ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»
ФГБУН Зоологический институт РАН

Рекомендовано к печати решением учёного совета
ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей
имени А. О. Ковалевского РАН»
(протокол № 2 от 27.03.2020).

Свидетельство о государственной регистрации:

Сер. ПИ № ФС 77 - 76872 от 24.09.2019

Сер. ЭЛ № ФС 77 - 76873 от 24.09.2019

ISSN 2499-9768 print

ISSN 2499-9776 online

Выпускающий редактор:

Рябушко В. И.

Корректор:

Копытова О. Ю.

Перевод статей англоязычной версии:

Тренкеншу Т. А., Надточенко И. А.

Компьютерная вёрстка:

Баяндин А. С.

Оригинал-макет подготовлен Геворгизом Р. Г.
в пакете \LaTeX (TeX Live 2015 / Debian Linux)
с использованием свободных шрифтов FreeSerif и FreeSans.

Подп. к печати 27.03.2020	Формат 60 × 84/8	Бум. офсетная № 1	Печать офсетная
Уч.-изд. листов 12,1	Усл. печ. листов 12,56	Тираж 150 экз.	Заказ № 2002951

Типография: ИП Ермолов М. П., ОГРНИП 314920436710081 от 26.12.2014;
ул. Кулакова, д. 59, г. Севастополь, 299011;
тел.: +7 978 704-51-11; e-mail: print-e@yandex.ru.



Вниманию читателей!

*Институт биологии южных морей
имени А. О. Ковалевского РАН,
Зоологический институт РАН*

*издают
научный журнал*

МОРСКОЙ БИОЛОГИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

- МБЖ — периодическое издание открытого доступа. Подаваемые материалы проходят независимое двойное слепое рецензирование. Журнал публикует обзорные и оригинальные научные статьи, краткие сообщения и заметки, содержащие новые данные теоретических и экспериментальных исследований в области морской биологии, материалы по разнообразию морских организмов, их популяций и сообществ, закономерностям распределения живых организмов в Мировом океане, результаты комплексного изучения морских и океанических экосистем, антропогенного воздействия на морские организмы и экосистемы.
- Целевая аудитория: биологи, экологи, биофизики, гидро- и радиобиологи, океанологи, географы, учёные других смежных специальностей, аспиранты и студенты соответствующих научных и отраслевых профилей.
- Статьи публикуются на русском и английском языках.
- Периодичность — четыре раза в год.
- Подписной индекс в каталоге «Пресса России» — Е38872. Цена свободная.

Заказать «Морской биологический журнал»

можно в научно-информационном отделе ИнБЮМ. Адрес: ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», пр. Нахимова, 2, г. Севастополь, 299011, Российская Федерация. Тел.: +7 8692 54-41-10. E-mail: mbj@imbr-ras.ru.

*A. O. Kovalevsky Institute of Biology
of the Southern Seas of RAS,
Zoological Institute of RAS*

*publish
scientific journal*

MARINE BIOLOGICAL JOURNAL

- MBJ is an open access, peer reviewed (double-blind) journal. The journal publishes original articles as well as reviews and brief reports and notes focused on new data of theoretical and experimental research in the fields of marine biology, diversity of marine organisms and their populations and communities, patterns of distribution of animals and plants in the World Ocean, the results of a comprehensive studies of marine and oceanic ecosystems, anthropogenic impact on marine organisms and on the ecosystems.
- Intended audience: biologists, ecologists, biophysicists, hydrobiologists, radiobiologists, oceanologists, geographers, scientists of other related specialties, graduate students, and students of relevant scientific profiles.
- The articles are published in Russian and English.
- The journal is published four times a year.
- The subscription index in the “Russian Press” catalogue is E38872. The price is free.

You may order Marine Biological Journal

in the Scientific Information Department of IBSS. Address: A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, 2 Nakhimov avenue, Sevastopol, 299011, Russian Federation. Тел.: +7 8692 54-41-10. E-mail: mbj@imbr-ras.ru.