



ISSN 2414-4738

Научный журнал

Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского

ЭКОСИСТЕМЫ



Флора и фауна
Биоценология
Биология и экология
видов
Охрана природы

26 ◦ 2021

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

КРЫМСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ В. И. ВЕРНАДСКОГО

ЭКОСИСТЕМЫ

2021

Выпуск 26

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION
OF THE RUSSIAN FEDERATION

V. I. VERNADSKY CRIMEAN FEDERAL UNIVERSITY

EKOSISTEMY

2021

ISSUE 26

SCIENTIFIC JOURNAL • FOUNDED IN 1979 • PUBLISHED 4 TIMES PER YEAR • SIMFEROPOL

ISSN 2414-4738

Свидетельство о регистрации СМИ – ПИ № ФС77-61820 от 18 мая 2015 г. Выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Учредитель – ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского»

Печатается по решению Научно-технического совета Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского, протокол № 4 от 4.06.2021 г.

Журнал включен в перечень ВАК по специальностям и соответствующим им отраслям науки: 03.02.01 – Ботаника (биологические науки) и 03.02.08 – Экология (по отраслям) (биологические науки)

Адрес редакции: Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского, кафедра ботаники и физиологии растений и биотехнологии, пр. Академика Вернадского, 4, Симферополь, 295007
E-mail: ekotmu@list.ru

Полнотекстовые версии статей последних выпусков журнала в формате PDF и правила для авторов размещены на официальном сайте журнала по адресу: <http://ekosystems.cfuv.ru/>

Оригинал-макет: С. В. Леонов.

На обложке: Тюльпан двуцветковый *Tulipa biflora* Pall., ландшафтный заказник «Мыс Айя», Крым (фото С. Свирина)

Подписано в печать _____. Формат 60×84/8. Усл. п. л. _____. Печать цифровая. Тираж 50 экз. Бесплатно

Заказ № _____. Дата выхода в свет _____

Отпечатано в управлении редакционно-издательской деятельности
ФГАОУ ВО «КФУ имени В. И. Вернадского»
295051, г. Симферополь, бул. Ленина, 5/7

Главный редактор

Иванов С. П., д. б. н., профессор, Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского

Заместитель главного редактора

Котов С. Ф., к. б. н., доцент, Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского

Технический редактор

Леонов С. В., к. б. н., доцент, Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского

Редактор текстов на английском и немецком языках

Шестакова Е. С., к. п. н., Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского

Ответственный секретарь

Петришина Н. Н., к. б. н., Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского

Контент-менеджер сайта

Николенко В. В., к. б. н., Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского

Члены редакционной коллегии

Багрикова Н. А., д. б. н., Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН

Бескаравайный М. М., к. б. н., Карадагская научная станция имени Т. И. Вяземского – природный заповедник РАН

Будашкин Ю. И., к. б. н., Карадагская научная станция имени Т. И. Вяземского – природный заповедник РАН

Воронин Л. В., д. б. н., доцент, Ярославский государственный педагогический университет имени К. Д. Ушинского

Довгаль И. В., д. б. н., профессор, Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН

Егоров В. Н., д. б. н., профессор, Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН

Ена А. В., д. б. н., профессор, Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского

Ермаков Н. Б., д. б. н., Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН

Захаренко Г. С., д. б. н., профессор, Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского

Ивашов А. В., д. б. н., профессор, Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского

Коба В. П., д. б. н., профессор, Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН

Корженевский В. В., д. б. н., профессор, Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН

Мацюра А. В., д. б. н., профессор, Алтайский государственный университет

Назаров В. В., к. б. н., Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского

Оберемок В. В., к. б. н., доцент, Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского

Омельченко А. В., к. б. н., доцент, Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского

Пешич В., доктор наук, профессор, Университет Черногории (University of Montenegro), Черногория

Плугатарь Ю. В., д. с.-х. н., профессор, Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН

Репецкая А. И., к. б. н., доцент, Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского

Свольнский А. Д., к. б. н., Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского

Фатерыга А. В., к. б. н., Карадагская научная станция имени Т. И. Вяземского – природный заповедник РАН

Чатгерджи Т., доктор наук (зоологии), Международная школа Хесент (Crescent), Индия

Чуян Е. Н., д. б. н., профессор, Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского

Assessment of the seasonal dynamics of the normalized differential vegetation index (NDVI) and its correlation with climate predictors in wetlands “La Tembladera” (Ecuador)

Llerena S. A., Kurbatova A. I.

*Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)
Moscow, Russian Federation
alellerenag@gmail.com, kurbatova-ai@rudn.ru*

Wetlands are considered critical ecosystems due to declining quality of their ecosystems services. Nevertheless, there have not been any climate related researched devoted to vegetation condition and biomass amount. Thus, this study examines the seasonal dynamics of vegetation and its correlations with climatic factors. This study is important for understanding of the regulatory function of this ecosystem during climate change. Two Landsat OLI8 images made in 2020 were analyzed. One image refers to the rainy season (April 12), and the other to the dry season (August 2). The radiometric and atmospheric corrections of the images and the determination of the boundaries of the study site (ROI) were developed in ENVI 5.3 program. The normalized differential vegetation index (NDVI) was calculated with ENVI 5.3 program (histograms allowed to determine biomass), and with ArcGIS 10.3 (for classification index). The Pearson coefficient (r) and the Statistica software were applied to determine the correlations between the variables. The linear relationship between the NDVI, the amount of biomass and the climatic variables was identified. In the rainy season (April) with higher temperature and precipitation, the NDVI was >0.5 and the biomass was 372613.0 t in the major part of “la Tembladera”, while in the dry season (August) with a lower temperature and precipitation rate, both the NDVI (0.14–0.5) and the biomass (333856.95 t) decreased in a considerable area of the wetland. Consequently, the seasonal dynamics of vegetation and its biomass is caused by fluctuations in these climatic variables. Thus, the biomass increased during the rainy season (higher precipitation, temperature, and humidity). These results can be used to further modelling the effects of climate change in these ecosystems.

Keywords: Wetland, “La Tembladera”, Landsat, NDVI, climate variables.

INTRODUCTION

Worldwide, anthropogenic impacts had triggered environmental problems over natural ecosystems such as wetlands. Wetlands are considered strategic ecosystems, flood absorbers and biodiversity conservation sites, hence, they are crucial ecosystem due to its ecological services (Senhadji-Navarro, Ruiz-Ochoa, Rodríguez-Miranda, 2017). The Wetland “La Tembladera” is one of the two wetlands that the province of El Oro has officially recognized by the Ramsar Convention. The ecosystem services of “la Tembladera” include the water supply for agriculture and livestock, fishing, the climate regulation and the carbon storage (Convención de Ramsar sobre los humedales, 2018). Despite the ecosystem relevance of “La Tembladera”, studies about its current state and its relationship with climate variables is non-existing.

Nowadays, it is possible to use remote sensing to interpret the evolution or dynamics of ecosystems over time and establish relationships with other factors. For instance, remote sensing has allowed the vegetation state assessment and the calculation of biomass (Llerena, Tarko, Kurbatova, Kozhevnikova, 2019; Lv..., 2019). Studies in South America that employed remote sensing analysis to calculate the NDVI and its spatial and temporal dynamics have taken great importance in recent years regarding to the management of the vegetation cover and to the climate modeling (Millano, Paredes, 2016; Paula, Zambrano, Paula, 2018). Nevertheless, studies about wetlands related with remote sensing and NDVI are few in spite of its ecosystem importance (Dong..., 2014; Bisrat, Berhanu, 2018; Aponte-Saravia, Ospina-Noreña, 2019).

Consequently, this study assess the vegetation state, biomass and their relationship with climate parameters of “La Tembladera” wetland through Normalized Differential Vegetation Index (NDVI) by using remote sensing methodology. The objective is to generate information about the behavior

of the wetland and its interaction with the climate, which can contribute to studies of vegetation cover and future climate change models. In addition, the applied methodology serves as a framework for future research in relation to the monitoring and study of other ecosystems, favoring all competent entities in matters of conservation, land planning and climate change.

MATERIAL AND METHODOLOGY

Study site. The wetland “La Tembladera” was listed as a Ramsar site in 2011. It is located in the province of El Oro in the southwest of Ecuador ($3^{\circ}29'28.63''S$ $79^{\circ}59'39.99''W$; 17 m a.s.l.) in Santa Rosa canton (fig. 1). It is made up of a water mirror (permanently flooded area) and surrounded by an area that is seasonally flooded. The total area is 1471 ha. (López-Blanco, Sinev, 2016; Quevedo, 2013).

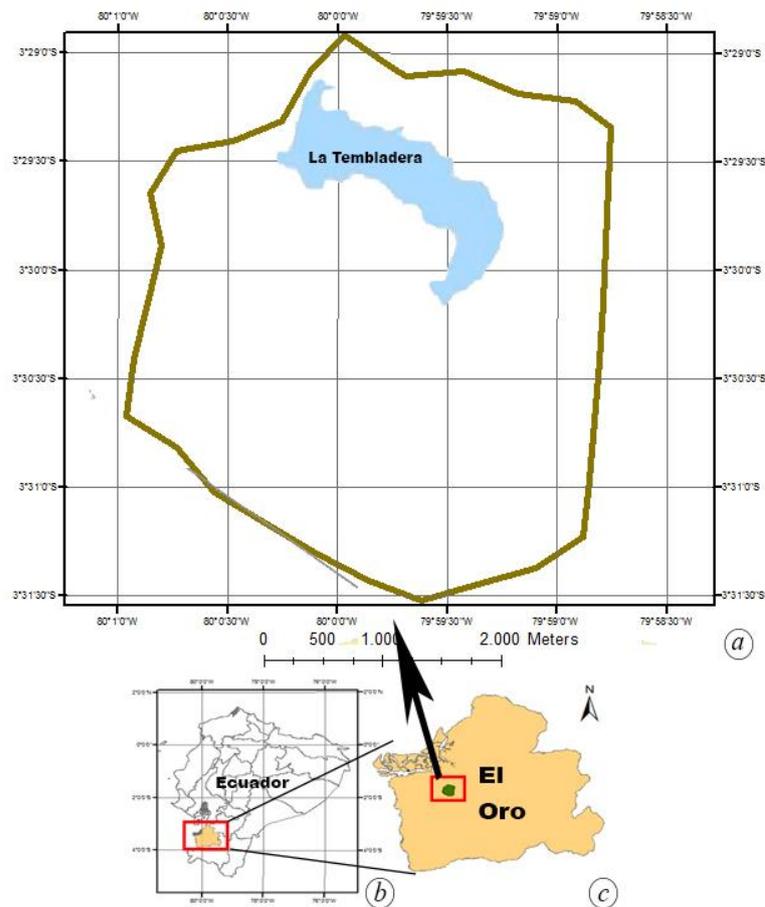


Fig. 1. Location map of “La Tembladera” (a) in Ecuador map (b) and in the Oro province (c)

Normalized Differential Vegetation Index. One of the most widely used vegetation index (VI) is the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). It is based on the comparison of visible and near-infrared light reflected from vegetation. Chlorophyll pigments absorb in the red regions of the visible spectrum, called RED zone (wavelength bands between $0,62-0,75 \mu\text{m}$.), but not in the green region where the reflectivity is much higher and its maximum value is observed in the near infrared range (NIR, wavelength bands between $0,75-1,3 \mu\text{m}$). One advantage of NDVI is that the division by zero errors are significantly reduced, also, it has a desirable measurement scale between -1 to 1, where 0 represents no vegetation, and negative values are non-vegetated surfaces (Pettorelli, 2013). The formula of the NDVI is:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Two Landsat images, corresponding to August 2nd and April 12th of 2020, that encompass the study area of La Tembladera wetland were downloaded from Earth Explorer of the United States Geological Survey (USGS). The scenes are located in the grid of the World Reference System 2 (WRS2) in the column 11 row 62.

The processing of Landsat images, radiometric calibration and atmospheric correction, was developed in ENVI 5.3 program. In this program the multispectral file (MTL) was used as initial data, the area of interest (ROI) was specified in the scenes. The atmospheric correction was developed with FLAASH Atmospheric Correction Model of the program. The resulting images (fig. 2) were used to calculate NDVI and its histograms with the tool NDVI of ENVI. Then the biomass was estimated with the data of pixel and NDVI scale from the histograms (fig. 3) (Llerena..., 2019).



Fig. 2. Processing result of the Landsat image in the ENVI 5.3. Original Landsat image (a). Result image of radiometric calibration (b). Result image of atmospheric correction (c). Differences between (b) and (c) are on pixels level.

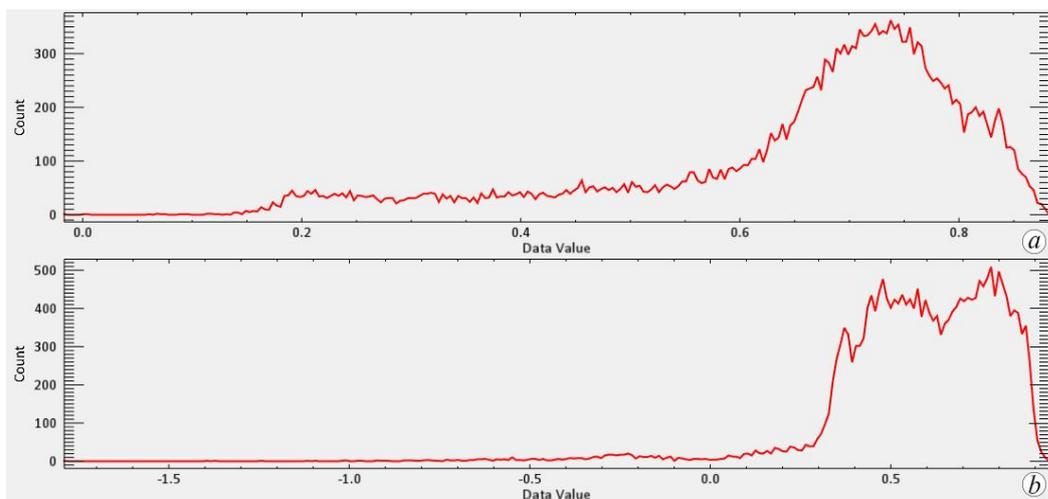


Fig. 3. Histogram of the Landsat images, the pixels are shown on the ordinate axis and the NDVI range on the abscissa axis
Histogram for NDVI in April 12th, 2020 (a). Histogram for NDVI in August 2nd, 2020 (b).

In ArcGIS 10.3 program, the two resulting images were classified in 6 vegetation intervals (Kafria, Albanakis, Oikonomidis, 2014) (table 1) in order to create the NDVI map.

Table 1

Intervals of NDVI scale from –1 to +1

Interval	Type of land cover
–0,04	Water
–0,04–0,025	Wetland
0,025–0,09	Bare ground (degraded land, roads, settlements, soil without vegetation cover)
0,09–0,14	Scarce Vegetation (scattered shrub, irrigated crops and plow fields)
0,14–0,5	Medium Vegetation (forest plantations, bushes, slow-growing plantations)
>0,5	Thick Vegetation (dense growth plants)

Vegetation biomass and climate variables correlation. The climate parameters selected for April and August were (table 2): temperature, percentage of cloudiness probability, percentage of precipitation probability, precipitation in mm, percentage of humidity probability, wind speed, water temperature, and solar energy (Kwh) (Cedar Lake Ventures, 2020)

Table 2

Climate factors at Santa Rosa canton for April and August of 2020

Factors	12.04.2020	02.08.2020
Maximum temperature (°C)	32	29
Minimum temperature (°C)	25	22
Percentage of cloudiness probability	27	72
Percentage of precipitation probability	35	1
Precipitation (mm)	66	2
Percentage of humidity Probability	99	62
Wind speed (km/h)	8	8.2
Water temperature (°C)	26	23
Solar energy (Kwh)	5.4	6.3

By using the software Statistica the correlations between the factors of climate and the biomass amount were determined.

RESULTS AND DISCUSSION

There are differences between the seasonal NDVI of “La Tembladera”. In April, which represents the rainy season, most of the wetland territory is classified as thick vegetation (NDVI >0,5, fig. 4a.). In addition, little areas within the wetland territory are medium vegetation, (NDVI: 0,14–0,5). In contrast, for dry season (august, fig. 4b.) the medium vegetation replaces the majority of thick vegetation. Furthermore, in the lagoon area the NDVI decreases and corresponds to wetland and water cover (NDVI: –0,04–0,025 and <–0,04, respectively).

The NDVI differences was also corroborated with the biomass calculation based on the NDVI histograms. The biomass was 372613.0 t for April and 333856.95 for August. In conclusion, the biomass decreased between rainy and dry season.

The correlation coefficient between the biomass and all the climate variables is showed in the figure 4. The temperature, percentage of precipitation probability, precipitation, percentage of humidity probability and the water temperature have a direct correlation ($r=1$; $p<0.5$). It means that when these climate variables increases, the biomass also increases. In contrast, the biomass showed an indirect correlation with the percentage of cloudiness probability, the wind speed and the solar energy. To conclude, the results show that the photosynthetic activity responds to the water availability (precipitation and humidity), thus, in April the vegetation index is better than in August.

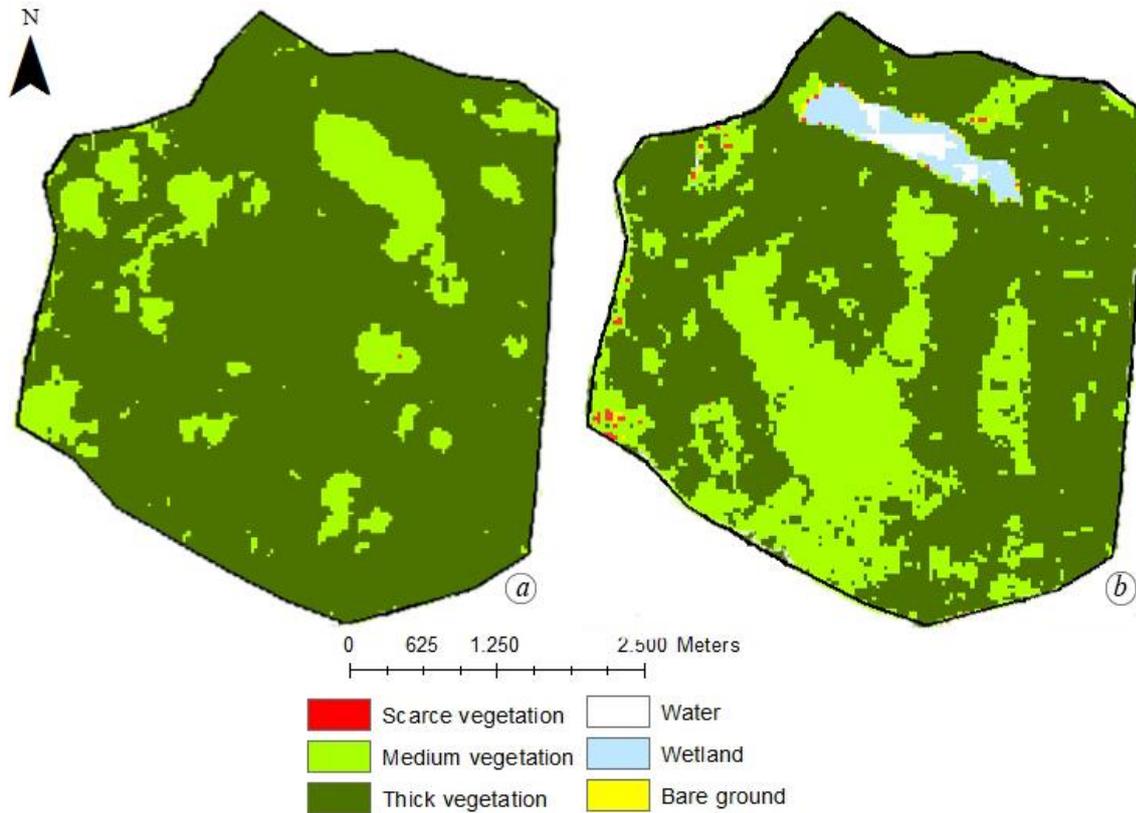


Fig. 4. La Tembladera wetland Normalized Differential Vegetation Index map for April 2020 (a) and August 2020 (b). (ArcGIS 10.3.)

Variable	Marked correlations are significant at $p < .05000$											
	$r \geq$	-1	-0.80	-0.60	-0.40	-0.20	0	0.20	0.40	0.60	0.80	1
Biomass (t)												
Maximum temperature (°C)	1.000000											
Minimum temperature (°C)	1.000000											
Percentage of cloudiness probability	-1.000000											
Percentage of precipitation probability	1.000000											
Precipitation (mm)	1.000000											
Percentage of humidity Probability	1.000000											
Wind speed (km/h)	-1.000000											
Water temperature (°C)	1.000000											
Solar energy (Kwh)	-1.000000											

Fig. 5. Pearson correlation coefficient (r) between Biomass and all the climate factors. Statistica 10.0 software

The results of the research “Evaluating the performance of spectral indexes for identify high Andean wetland” showed a lower vegetation index in the dry season as in this study. Aponte and Ospina attributed the results to hydric stress (Aponte-Saravia, Ospina-Noreña, 2019). The correlation between NDVI, wetland area, precipitation and temperature was established in an Andean wetland. Similar findings were discovered with a significant direct correlation (Garcia, Otto, 2015; Pauc-Tanco..., 2020).

CONCLUSION

From the present investigation, a positive correlation between the NDVI, the amount of biomass and the climatic variable was established, according to the Pearson coefficient ($r=1$). Thus, we found a relationship directly proportional. Furthermore, we found that the vegetation state and biomass of “La Tembladera” depend of precipitation, humidity and local temperature. In the rainy season (high

temperature and precipitation rate), the majority area of “La Tembladera” was classified as thick vegetation ($NDVI > 0.5$) and the biomass was 372613.0 t, while in dry season (low temperature and precipitation rate) in a considerable area of the wetland the index was medium vegetation ($NDVI: 0.14-0.5$) and the biomass decrease until 333856.95. In conclusion, a vigorous vegetation will be found in the rainy season. These results are aligned to the RAMSAR (Convention on Wetlands of International Importance) aims because they can contribute to studies of vegetation cover and future climate change models.

Finally, remote sensing and vegetation index analysis, such as NDVI, are key tools for monitoring and evaluating the status of wetlands under the current pressures of climate change. This methodology is effective and fast due to the fact that the satellite images are freely accessible. Also, the applied methodology could be used in different ecosystems of the country to contribute to future studies of conservation and monitoring.

Acknowledgments. The publication has been supported by the RUDN University Strategic Academic Leadership Program.

References

- Aponte-Saravia J., Ospina – Noreña, J. E. Evaluando el desempeño de índices espectrales para identificar humedales alto andinos // *Revista de Teledetección*. – 2019. – N 53. – P. 59.
- Bisrat E., Berhanu B. Identification of Surface Water Storing Sites Using Topographic Wetness Index (TWI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) Article history // *Journal of Natural Resources and Development*. – 2018. – Vol. 8 – P. 91–100.
- Cedar Lake Ventures [Electronic resource]. – Weather Spark.com. – 2020. – Retrieved from: <https://es.weatherspark.com/m/19333/8/Tiempo-promedio-en-agosto-en-Santa-Rosa-Ecuador> (Reviewed 15.01.2020).
- Convención de Ramsar sobre los humedales. Perspectiva mundial sobre los humedales: Estado de los humedales del mundo y sus servicios a las personas. – Editorial: Secretaría de la Convención de Ramsar, 2013. – P. 1–88.
- Dong Z., Wang Z., Liu D., Song K., Li L., Jia M., Ding Z. Mapping Wetland Areas Using Landsat-Derived NDVI and LSWI: A Case Study of West Songnen Plain, Northeast China // *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. – 2014. – Vol. 42, N 3. – P. 569–576.
- García E., Otto M. Caracterización Ecohidrológica De Humedales Alto Andinos Usando Imágenes De Satélite Multitemporales en La Cabecera De Cuenca Del Río Santa, Ancash, Perú // *Ecología Aplicada*. – 2015. – Vol. 14, N 1. – P. 115.
- Kafria V., Albanakis K., Oikonomidis D. Flood Susceptibility Assessment using G . I . S . An example from Kassandra // *Proceedings of the 10th International Congress of the Hellenic Geographical Society*. – 2014. – P. 287–308.
- Llerena S., Tako A., Kurbatova A., Kozhevnikova P. Assessment of carbon dynamics in Ecuadorian forests through the Mathematical Spatial Model of Global Carbon Cycle and the Normalized Differential Vegetation Index (NDVI) // *E3S Web of Conferences*. – 2019. – Vol. 96. – P. 7.
- López – Blanco C., Sinev A. Y. Cladocera biodiversity in la Tembladera Lake (Ecuador): A palaeolimnological approach // *Crustaceana*. – 2016. – Vol. 89, N 14. – P. 1611–1637.
- Lv J., Jiang W., Wang W., Wu Z., Liu Y., Wang X., Li Z. Wetland loss identification and evaluation based on landscape and remote sensing indices in Xiong'an new area // *Remote Sensing*. – 2019. – Vol. 11, N 23. – P. 1–21.
- Millano J., Paredes F. Variabilidad de la Vegetación con el Índice de Diferencia Normalizada (NDVI) en Latinoamérica // *Novum Science*. – 2016. – Vol. 2, N 4. – P. 33–44.
- Pauca – Tanco A., Ramos – Mamani C., Luque – Fernández C. R., Talavera – Delgado C., Villasante – Benavides, J. F., Quispe – Turpo, J. P., Villegas – Paredes, L. Análisis espacio temporal y climático del humedal altoandino de Chalhuanca (Perú) durante el periodo 1986-2016 // *Revista Teledetección*. – 2020. – N 55. – P. 105.
- Paula P. A., Zambrano L., Paula P. Análisis Multitemporal de los cambios de la vegetación, en la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo como consecuencia del cambio climático // *Enfoque UTE*. – 2018. – Vol. 9, N 2. – P. 125–137.
- Pettorelli N. *The Normalized Difference Vegetation Index*. – Publisher: Oxford University Press, 2013. – P. 224.
- Quevedo O. Evaluación y propuesta de modelo de gestión en los humedales Ramsar, aplicado en el subsistema marino costero de Ecuador // *Revista Non Verba*. – 2013. – Vol. 2. – P. 20.
- Senhadji – Navarro K., Ruiz – Ochoa M. A., Rodríguez – Miranda J. P. Estado ecológico de algunos humedales colombianos en los últimos 15 años: Una evaluación prospectiva // *Colombia Forestal*. – 2017. – Vol. 20, N 2. – P. 181–191.

Йерена С. А., Курбатова А. И. Оценка сезонной динамики нормализованного дифференциального индекса растительности (NDVI) и его взаимосвязь с климатическими предикторами в водно-болотных угодьях Тембладера (Эквадор) // Ekosistemy. 2021. Iss. 26. P. 5–11.

Водно-болотные угодья считаются критическими экосистемами из-за снижения качества экосистемных услуг. Тем не менее, исследований состояния растительности и количества биомассы, связанных с климатическими факторами, не существует. Таким образом, данное исследование направлено на изучение сезонной динамики растительности и ее взаимосвязи с климатическими факторами, что важно для понимания регулятивной функции данной экосистемы в ходе климатических изменений. Были проанализированы два снимка Landsat OLI8 2020 года. Одно изображение относится к сезону дождей (12 апреля), а другое – к засушливому сезону (2 августа). Радиометрические и атмосферные поправки изображений и определение границ исследуемого участка (ROI) были разработаны в программе ENVI 5.3. Нормализованный дифференциальный вегетационный индекс (NDVI) рассчитывался с помощью программы ENVI 5.3 (гистограммы позволяли определять биомассу) и с помощью ArcGIS 10.3 (для индекса классификации). Для определения корреляции между переменными применялись коэффициент Пирсона (r) и программа Statistica. Была определена слитная корреляционная линейная зависимость между NDVI, количеством биомассы и климатическими переменными. В сезон дождей (апрель) с более высокой температурой и интенсивностью осадков NDVI составлял $>0,5$ на большей части территории «Ла Тембладера», а биомасса составляла 372613,0 т, тогда как в сухой сезон (август) с более низкой температурой и более низкими осадками, на большей части площади NDVI снизился (0,14–0,5), а биомасса составила 333856,95 т. Коэффициент Пирсона подтвердил прямую корреляцию ($r=1$) между биомассой, осадками, температурой и влажностью. Следовательно, сезонная динамика растительности и ее биомассы обусловлена колебаниями именно этих климатических переменных. Таким образом, в сезон дождей (более высокие осадки, температура и влажность) биомасса увеличивалась. Эти результаты могут быть использованы для последующего моделирования последствий изменения климата в данных экосистемах.

Ключевые слова: водно-болотные угодья, «Ла Тембладера», Landsat, NDVI, климатические переменные.

Поступила в редакцию 19.02.21

Принята к печати 08.04.21

Геоэкологические проблемы природно-территориального комплекса в области влияния промышленных предприятий городского округа города Салават Республики Башкортостан

Гривко Е. В., Глуховская М. Ю., Евстифеева Т. А.

Оренбургский государственный университет

Оренбург, Россия

grivko-ev@mail.ru, commarina97@mail.ru, ta_evst@mail.ru

Проведено экологическое обоснование устойчивости геоэкосистем территории одного из центров нефтехимического комплекса Республики Башкортостан на примере городского округа города Салават. В работе использованы статистические данные инвестиционного паспорта городского округа города Салават для ранжирования земель по степени антропогенной нагрузки и расчета экологической напряженности (Н_и), экологического фонда (Рэф), коэффициента естественной защищенности (К_{ез}) исследуемых территорий по методике Б. И. Кочурова и Е. В. Гривко (Кочуров, 2013; Гривко, 2016). Последний показатель рассматривался авторами как индикатор устойчивости. Основными вкладчиками в загрязнение атмосферы являются объекты промышленных площадок ООО «Газпром нефтехим Салават» и АО «Салаватстекло». По данным лабораторных исследований был сделан вывод о том, что приоритетными примесями, содержащимися в водах реки Белой, являются гидрокарбонат-ионы, среди металлов – ионы кальция, а также органические вещества. На основании полученных данных были произведены расчеты ИЗВ по 10 приоритетным примесям: гидрокарбонат-ион, хлорид-ион, взвешенные вещества, ионы кальция, магния, кобальта, свинца, нефтепродукты и органические вещества. В качестве дополнительного метода исследования было проведено биотестирование на кресс- салате образцов почвы и поверхностных вод реки Белой. Проведенный анализ позволил с высокой долей вероятности отнести к приоритетным геоэкологическим проблемам исследуемой территории городского округа города Салават концентрацию промышленных предприятий и их инфраструктуры на узкой полосе вдоль левого берега реки Белой. Такая плотность антропогенных объектов повышает неустойчивость в природно-территориальном комплексе. Для создания положительного эколого-хозяйственного баланса рекомендуется 10 % (1062 га) земель, занятых объектами промышленных предприятий, обустроить более плотными зелеными насаждениями; 6 % (637 га) из пахотных земель, входящих в состав городского округа, перевести в категорию пастбищ и сенокосов, а 5 % (531 га) придорожных территорий основных магистралей обустроить семи- и десятирядными зелеными полосами. Данные несложные мероприятия могут позволить перевести исследуемую территорию городского округа города Салават из нестабильного состояния в среднестабильное.

Ключевые слова: экологическое состояние геоэкосистем, эколого-хозяйственный баланс территории, индикаторы устойчивости геоэкосистем, загрязнение почвы и поверхностных вод.

ВВЕДЕНИЕ

С усилением процесса урбанизации повышается антропогенное влияние на окружающую среду, что оказывает ограничивающее действие, как на природный потенциал территории, так и на экономическую и социальную сферы жизни. Это воздействие имеет негативный характер, потому что территории любого региона находятся в экологической напряженности по причине стремительного развития промышленного и сельскохозяйственного производства, огромного количества транспортных магистралей и городских поселений (Гривко и др., 2017; Помазкова, Фалейчик, 2018; Аверина, 2019).

Республика Башкортостан расположена на рубеже Европы и Азии. Занимая большую часть Южного Урала, она входит в состав Приволжского Федерального округа Российской Федерации. Общая площадь территории республика составляет 142,9 тыс. км². Республика вытянута в северо-южном направлении на 550 км, а с запада на восток — на 430 км. (Инвестиционный паспорт..., 2016; Гривко и др., 2017; Григорчук, 2019).

Территория Республики Башкортостан представляет собой типичную лесостепную зону с луговыми экосистемами. Встречаются и чисто степные ландшафты. Из-за многообразия

природных зон растительный и животный мир Башкортостана исключительно богат. Здесь встречаются многие виды флоры и фауны, которые занесены в Красную книгу, есть и эндемики – виды, встречающиеся только здесь (Красная книга..., 2014, Инвестиционный паспорт..., 2016).

Наиболее измененными и густонаселенными территориями Башкортостана являются основные промышленные центры – города Уфа, Салават, Стерлитамак, Нефтекамск, Туймазы и Октябрьский. Приоритетными отраслями, влияющими на устойчивость геоэкосистем этих территорий, являются нефтехимическая, химическая промышленность, машиностроение, топливно-энергетический комплекс, предприятия по металлообработке, пищевая промышленность и сельское хозяйство, которые оказывают сильное воздействие на основную водную артерию республики – реку Белую (Григорчук, 2019).

Поэтому целью работы было оценить степень влияния химического производства на устойчивость территории городского округа, расположенной вдоль крупной водной артерии республики Башкортостан – реки Белой.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Объектом исследования была территория городского округа города Салават. Пробы почв были отобраны с четырёх сторон промышленных площадок основных предприятий исследуемой территории с одинаковым расстоянием от берега реки. Пробы воды были отобраны напротив объектов промышленных предприятий Салаватского городского округа и городских очистных сооружений выше по течению от промышленных площадок и ниже по течению реки. Фоновые образцы проб почв и поверхностных вод были взяты на территории Национального парка Башкирия. Места отбора проб представлены на рисунке 1.

Были проанализированы статистические данные показателей химического загрязнения реки Белой с 1941 по 2016 год (Максимович, 1940; Инвестиционный паспорт..., 2016), а на основании лабораторных исследований образцов воды был произведен расчет индекса загрязнения воды (ИЗВ) (Физико-химические методы..., 1971).

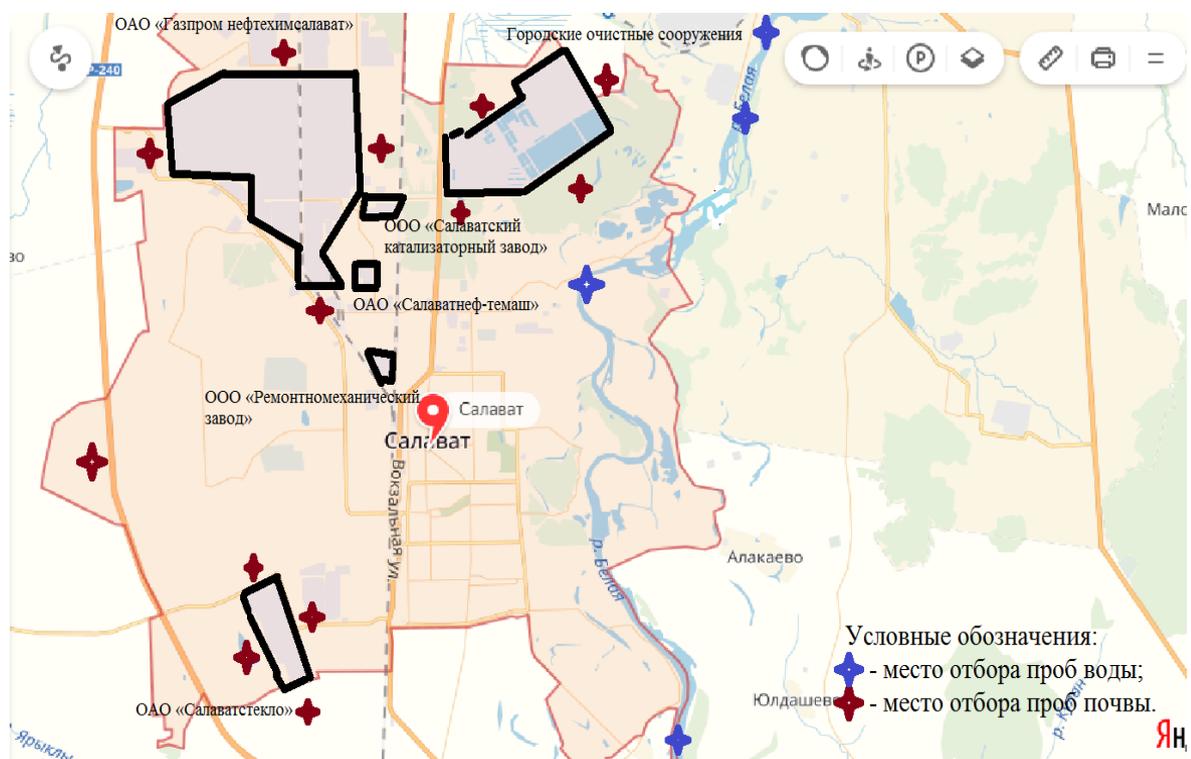


Рис. 1. Место отбора проб воды и почвы для исследований

Также использованы статистические данные инвестиционного паспорта городского округа города Салават для ранжирования земель по степени антропогенной нагрузки и расчета экологической напряженности (H_i), экологического фонда (РЭФ), коэффициента естественной защищенности ($K_{ЕЗ}$) исследуемых территорий по методике Б. И. Кочурова и Е. В. Гривко (Кочуров, 2013; Гривко, 2016)

Для оценки экологической напряженности (H_i) используют формулу:

$$H_i = \frac{10S_1 + 5S_2 + 3S_3 + S_4}{100},$$

где S_1, S_2, S_3, S_4 – доли площади высшей АН, очень высокой АН, высокой АН и средней АН соответственно, выраженной в процентах от общей площади исследуемого региона.

Оценка экологической ситуации осуществлялась на основании бальной шкалы, приведенной в таблице 1.

Таблица 1

Ранжирование территории по экологической напряженности

Значение коэффициента антропогенной преобразованности (H_i)	Экологическая ситуация
7,51 и более	Катастрофическая
6,51–7,50	Очень острая или кризисная
5,31–6,50	Острая или критическая
3,81–5,30	Умеренно острая или напряженная
2,00–3,80	Удовлетворительная

Суммарную площадь земель со средо- и ресурсостабилизирующими функциями (СФ) вычисляют по формуле:

$$P_{сф} = P_1 + 0,8P_2 + 0,6P_3 + 0,4P_4,$$

где: P_1 – площадь земель с минимальной степенью нагрузки, га;

P_2 – площади земель с условной оценкой степени антропогенной нагрузки в 2 балла, га;

P_3 – площади земель с условной оценкой степени антропогенной нагрузки в 3 балла, га;

P_4 – площади земель с условной оценкой степени антропогенной нагрузки в 4 балла, га.

Коэффициент естественной защищенности территории ($K_{ЕЗ}$), равный соотношению площади земель экологического фонда ($P_{сф}$) к общей площади исследуемой территории (P_o), определялся по формуле:

$$K_{ЕЗ} = \frac{P_{сф}}{P_o}$$

Интерпретация устойчивости ландшафта исследуемой территории производилась по следующим критериям, приведенным в таблице 2.

Определение показателей качества воды, отражающих влияние химического производства на воды реки Белая, было проведено по таким примесям как гидрокарбонат - ионам, хлорид-ионам, взвешенным веществам, ионам кальция, магния, кобальта, свинца, нефтепродуктам и показателю ХПК. Исследование проводилось в аккредитованной лаборатории ФГБУ ГЦАС «Оренбургский».

Таблица 2

Ранжирование ландшафта по устойчивости территориального комплекса

Значение коэффициента естественной защищенности ландшафта (Кез)	Степень стабильности ландшафтов
≤0,33	Нестабильный
0,34.....0,5	Малостабильный
0,51–0,65	Среднестабильный
Более 0,66	Стабильный

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В состав так называемой Южно-Башкортостанской агломерации входит город Салават, представляющий собой региональный центр нефтеперерабатывающей и химической промышленности. Город расположен на левом берегу реки Белой. Протяженность территории городского округа город Салават в длину вдоль реки Белой составляет 5,5 км, в ширину – 2,65 км. Он основан в 1948 году, имеет статус города с 1954 года. В настоящее время его население составляет 156 тыс. человек.

В настоящее время на предприятиях территории муниципального образования города Салават производится жидкое топливо, полиэтилен высокого давления, бутиловые спирты и азотные удобрения. Кроме того, на этой территории работают заводы по выпуску металлоконструкций, технического стекла и железобетонных изделий. Всё это создаёт техногенную нагрузку на природные компоненты данной территории и является фактором деградации экологической системы реки Белой (Григорчук, 2019).

Ведущие предприятия территории муниципального образования города Салават, оказывающие наибольшее влияние на экосистему реки Белой, представлены в таблице 3.

Таблица 3

Системообразующие предприятия городского округа город Салават

Наименование и адрес предприятия	Основная выпускаемая продукция	Площадь предприятия, м ²	Валовый выброс, тыс. т/год
ООО «Газпром нефтехим Салават»	Автомобильный бензин, дизельное топливо, топочный мазут, этилен	11412	22,22
АО «Салаватстекло»	Стекло листовое термополированное, сталинит, бутылки из стекла	3108	2,906
АО «Салаватнефтемаш»	Нефтегазообрабатывающее оборудование	400	1,007
ООО «Салаватский катализаторный завод»	Синтетические цеолиты, силикагели, катализаторы и сорбенты на основе оксида алюминия	1680	1,873
ООО «Ремонтно механический завод»	Запчасти: штоки, валы, цилиндрические втулки, плунжеры, фланцы, детали трубопроводов высокого	1044	0,916

На основании таблицы 5 можно сделать вывод, что приоритетными вкладчиками в загрязнение окружающей среды городского округа города Салават являются ООО «Газпром нефтехим Салават» и АО «Салаватстекло». Устойчивое развитие природно-территориального комплекса зависит, в том числе, от сбалансированного соотношения различных видов

деятельности, то есть, так называемого эколого-хозяйственного баланса (ЭХБ). Данный показатель территории, отражающий баланс между различными категориями земель, может выступать своеобразным критерием устойчивости природного потенциала. Ранжирование территории городского округа города Салават по степени экологической напряженности представлено в таблице 4.

Таблица 4

Ранжирование территории городского округа города Салават по степени экологической напряженности

Степень нагрузки	Балл	Доля земель данного вида категории, %	Виды категории земель
Очень острая (катастрофическая) ситуация	10	45,3	Земли промышленности, транспорта, городов, поселков, инфраструктуры, нарушенные земли, орошаемые и осушаемые земли
Острая (кризисная) ситуация	5	16,9	Пахотные земли, ареалы интенсивных рубок, пастбища, используемые нерационально
Умеренно острая (критическая и напряженная) ситуация	3	28,4	Многолетние насаждения, рекреационные земли, сенокосы; леса ограниченного использования, земли лесного и водного фондов
Удовлетворительная ситуация	1	9,4	Природоохранные и неиспользуемые земли

Из результатов исследования, приведенных в таблице 4, можно сделать вывод, что большая доля земель городского округа принадлежит землям промышленности, транспорта и населенных пунктов, то есть являются территориями, подверженными сильной трансформации.

Рассчитанная на основании этих данных напряженность (H_i) равная 7,2 позволяет характеризовать экологическую ситуацию данной территории как очень острую или кризисную.

Анализ архивных данных по химическому составу поверхностных вод реки Белой за период с 1941 по 2018 год отражает динамику снижения концентрации ионов кальция, сульфат-иона, сульфит-иона и хлорид-иона, а гидрокарбонат-ионов и ионов магния – динамику повышения.

Анализ статистических данных изменения концентрации загрязняющих веществ в реке Белой за последние восемьдесят лет свидетельствует об изменении химического состава воды под воздействием предприятий ООО «Газпром нефтехим Салават» и АО «Салаватстекло», располагающихся вблизи реки Белой.

Лабораторные исследования химического загрязнения поверхностных вод реки Белой производились по следующим показателям: взвешенные вещества, водородный показатель, хлорид-ион, карбонат-ион, гидрокарбонат-ион, сульфо-ион, сульфид-ион, гидросульфид-ион, ионы кальция, магния, меди, железа, цинка. Городские очистные сооружения являются подразделением ООО «Газпром нефтехим Салават», поэтому точка отбора проб совпадает. Полученные результаты приведены в таблице 5.

Анализ данных, представленных в таблице 5, показывает, что:

- в пробах воды, отобранных напротив ООО «Газпром нефтехим Салават», приоритетными примесями являются гидрокарбонат – ион (его количество превышает фоновое значение в 19,78 раза), магний-ион (превышение незначительное в 1,9 раз), кальций-

ион (его количество превышает фоновое значение в 3,9 раза) и показатель ХПК превышает фоновое значение в 11 раз;

- в пробах воды, отобранных напротив АО «Салаватстекло», приоритетными веществами, также, как и в пробах вод, отобранных напротив ООО «Газпром нефтехим Салават», приоритетными являются гидрокарбонат-ион (его количество превышает фоновое значение в 16,2 раза), магний-ион (его количество превышает фоновое значение в 2,7 раза), кальций-ион (превышение незначительное – в 1,27 раза), показатель ХПК превышает фоновое значение в 7,8 раз, а ион свинца составляют 3,3 ПДК;

- в пробах воды, отобранных после объединенной промышленной площадки ООО «Газпром нефтехим Салават» и городских очистных сооружений вниз по течению реки, приоритетными веществами так же являются гидрокарбонаты (здесь их количество превышает фоновое значение в 20,9 раза), кальций-ион (превышает незначительно – в 1,3 раза) и показатель ХПК (превышает фоновое значение в 8,9 раз).

Таблица 5

Средние значения концентраций загрязняющих веществ в поверхностных водах реки Белой

Загрязняющее вещество	Место отбора пробы					ПДК для водоемов рыб/хоз значения
	ООО «Газпром нефтехим Салават»	АО «Салаватстекло»	Городские очистные сооружения		Фон	
			до пром площадки	после пром площадки		
Средние значения показателей, мг/л						
Взвешенные вещества	21,4	3,8	21,4	2,10	0,15	6,7
HCO ₃ ⁻	360	295	380	360	18,2	29,5
Cl ⁻	15,3	8,6	15,3	9,3	175	300
Ca ²⁺	37,6	12,4	37,6	12,4	9,73	180
HS ⁻	0,68	0,9	0,68	0,3	-	-
Mg ²⁺	39,9	57	39,9	24	21	40
Fe ³⁺	7,1	4,5	7,1	3,2	0,09	0,1
Zn ²⁺	0,23	0,58	0,47	0,23	0,006	0,01
NH ₄ ⁺	26,8	3	26,8	2,3	0,1	0,5
SO ₄ ²⁻	5,9	5,2	5,9	4,6	67	100
Cu ²⁺	0,057	0,025	0,057	0,043	0,0007	0,001
As ⁻	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05
Co ²⁺	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,1
Нефтепродукты	0,044	0,02	0,03	0,02	0,022	0,03
Pb ²⁺	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,006
ХПК	80	56	80	64	7,2	50

Исходя из данных таблицы 5, можно сказать, что приоритетными примесями, содержащимися в реке Белой, являются гидрокарбонат-ион, кальций-ион и показатель ХПК.

Проанализировав результаты проб воды, пришли к выводу, что превышение нормативов для водоемов рыбохозяйственного назначения наблюдается по следующим примесям:

гидрокарбонат-ион, гидросульфид-ион, магний-ион, ионы железа, цинка, аммония, меди и показатель ХПК.

На основании полученных данных были произведены расчеты ИЗВ по 10 приоритетным примесям: гидрокарбонат-ион, хлорид-ион, взвешенные вещества, ионы кальция, магния, кобальта, свинца, мышьяка, нефтепродукты и показатель ХПК. Данные представлены в таблице 6.

Таблица 6

Качество воды реки Белой выше и ниже территории городского округа города Салават

Место отбора проб воды	ИЗВ	Качество вод	Класс реки
Выше промышленной площадки АО «Салаватстекло»	4,61	Очень загрязненная	3б
Ниже промышленной площадки АО «Салаватстекло»	4,8	Очень загрязненная	3б
Выше промышленной площадки ООО «Газпром нефтехим Салават»	5,1	Грязная	4а
Ниже промышленной площадки ООО «Газпром нефтехим Салават»	5,5	Грязная	4а
Ниже Городских очистных сооружений	5,67	Грязная	4а

Самым загрязненным участком реки Белой является территория, расположенная напротив промышленной площадки АО «Салаватстекло».

Были проведены лабораторные исследования проб почвы, отобранных на наиболее загрязнённых участках (ООО «Газпромнефтехим Салават» и АО «Салаватстекло»). Полученные данные приведены в таблице 7.

Таблица 7

Средние значения концентраций загрязняющих веществ в почве городского округа города Салават

Место отбора проб	Концентрация загрязняющих веществ, мг/кг						
	Cl^-	HS^-	HCO_3^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	SO_4^{2-}	NH_4^+
Севернее от АО «Салаватстекло»	100,24	3,6	500,67	80,7	19	40	99,87
Южнее АО «Салаватстекло»	112	3,6	499	88,7	18	36,9	97,6
Западнее АО «Салаватстекло»	146	3,6	678,9	90,1	20	30	98,4
Восточнее АО «Салаватстекло»	184,95	4,03	748,5	99,7	21	48,7	101,8
Севернее от ООО «Газпром нефтехим Салават»	200,7	3,7	800,7	91	19	36,0	121,9
Южнее ООО «Газпром нефтехим Салават»	240	3,7	798,2	94	17	36,1	121,3
Западнее ООО «Газпром нефтехим Салават»	230	4,1	802,9	92	17	36,7	120,8
Восточнее ООО «Газпром нефтехим Салават»	289,3	4,4	810,75	95	20	36,9	123,9
За трассой Р240	85,8	2,5	404,6	67,2	13,8	19	77,3
Фоновые значения	19,9	1,4	303,2	20	2,4	10,75	66,2

В исследуемых образцах почвы привышение фонового значения идет по хлорид-ионам, гидрокарбонатам, кальцию, магнию, сульфат-иону и аммоний.

В качестве подтверждения полученных выводов были проведены анализы проб почв и воды методом биотестирования на кресс-салате. Полученные данные приведены в таблице 8.

Таблица 8

Результаты биотестирования на кресс-салате почвенных образцов, отобранных в зоне влияния химических предприятий

Место отбора проб почв		Всхожесть, %		Загрязнение почвы
		на водных вытяжках	на почве	
АО «Салаватстекло»		30	26,7	Среднее
ООО «Газпромнефтехим Салават»		18	16,4	Сильное
Городские очистные сооружения	Вначале промплощадки по течению реки Белой	20	18	Сильное
	После промплощадки по течению реки Белой	33,3	30	Среднее
Фон		100	93,3	Отсутствует

По результатам таблицы 8 можно сделать вывод, что всхожесть кресс-салата на пробах почвы, взятых на участках ООО «Газпром нефтехим Салават» и АО «Салаватстекло», крайне низкая. Это свидетельствует о достаточно сильном загрязнении почвы.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что приоритетными факторами, влияющими на устойчивость природно-территориального комплекса городского округа города Салават, включающего участок реки Белой, является концентрация промышленных площадок на узком участке в 15 км².

Дополнительный анализ устойчивости территории округа был осуществлен по пространственным показателям: так называемому экологическому фонду, коэффициенту естественной защищенности и степени антропогенной нагрузки, отражающих эколого-хозяйственный баланс территории.

Данные распределения земель по различному типу природопользования представлены в таблице 9.

Из полученных результатов, представленных в таблице 9, следует, что наибольшую долю от территории занимают земли, занятые промышленными сооружениями, дорожно-транспортным комплексом, полигоны отходов, свалки, то есть сильно нарушенные земли. Тем не менее, земли, обладающие средовосстанавливающими функциями, такие как, лесной фонд, сенокосы, водный фонд, территории природных памятников, составляют более 50 %, что является позитивным фактором для устойчивости территории.

Основные показатели, отражающие степень устойчивости территории городского округа города Салават, приведены в таблице 10.

Полученные расчетные показатели свидетельствуют о недостаточной устойчивости исследуемой территории. Поэтому данный вывод позволил наметить мероприятия для стабилизации ландшафта территории. С этой целью было предложено 10 % (1062 га) земель, занятых сооружениями промышленных предприятий, обустроить более плотными зелеными насаждениями. Для этого необходимо: 6 % (637 га) из пахотных земель перевести в категорию пастбищ и сенокосов, а 5 % (531 га) придорожных территорий основных магистралей перевести из двухрядных древесно-кустарниковых полос в семи – и десятирядные.

Результаты сравнительного анализа фактического состояния, прогнозируемой антропогенной нагрузки и экологического потенциала ПТК после реализации дополнительных природоохранных мероприятий представлены в таблице 11.

Таблица 9

Ранжирование территории городского округа города Салават по степени антропогенной нагрузки после перераспределения земель

Степень антропогенной нагрузки	Категория земель	Площадь, га	Объединенная доля категории земель, %
Высшая (АН ₆)P ₆	земли, занятые промышленными сооружениями	1442	
	земли под дорогами	1679	
	нарушенные земли	16	
	полигоны отходов, свалки	35	
	пески	39	
	овраги	13	
	всего.	3224	
Очень высокая (АН ₅)P ₅	болота.	76.	0,7
Высокая (АН ₄)P ₄	пашня	831	7,4
	пастбища	375	
Средняя (АН ₃)P ₃	земли под водой	249	5,9
	всего	624.	
	всего	624.	
Низкая (АН ₂)P ₂	многолетние насаждения	3097	
	сенокосы	315	
	земли, покрытые лесами	763	
	земли, не покрытые лесами	369	
	лесные насаждения, не входящие в лесной фонд	496	
	всего	5040	
Очень низкая (АН ₁)P ₁	Другие земли	997	9,4
Итого		9885	100

Таблица 10

Показатели, отражающие степень устойчивости территории городского округа города Салават

Показатели устойчивости территории	Значение показателей
Количество природных памятников	9
Экологический потенциал ландшафта (ЭПЛ)	P _{сф} =4170 га K _{ез} =0,4 (40%)
Экологическое состояние ландшафта	Нестабильный
Экологическая напряженность (H _i)	7,2
Экологическая ситуация	Очень острая или кризисная

Результаты расчетов, представленные в таблице 11, свидетельствуют, что предложенные мероприятия позволят стабилизировать состояние ландшафтов, повысить коэффициент естественной их защищенности с 40 до 54 % и понизить экологическую напряженность с 7,2 до 5,1 исследуемой территории городского округа города Салават.

Таким образом, данные несложные мероприятия позволят перевести исследуемую территорию из нестабильного состояния в среднестабильное.

Таблица 11

Оценка эффективности мер по созданию эколого-хозяйственного баланса на территории городского округа города Салават

Район	До мероприятий	После мер по созданию эколого-хозяйственного баланса
Количество природных памятников	9	9
Экологический потенциал ландшафта (ЭПЛ)	$P_{сф}=4170$ га $K_{сз}=0,4$ (40%)	$P_{сф}=5732,8$ га $K_{сз}=0,54$ (54%)
Ранжирование экологического состояния ландшафта	Нестабильный	Среднестабильный
Экологическая напряженность (H_i)	7,2	5,1
Экологическая ситуация	Очень острая или кризисная	Умеренно острая

ВЫВОДЫ

1. Сложившаяся экологическая ситуация на исследуемой территории типичного лесостепного характера ландшафтов во многом определяется ее ресурсно-промышленным потенциалом. Наиболее измененными природно-территориальными комплексами Башкортостана являются участки, занятые промышленными центрами республики. Приоритетными факторами, влияющими на устойчивость геоэкосистем данной территории, являются нефтехимическая, химическая отрасли, машиностроение, ТЭК, предприятия по металлообработке, пищевая промышленность и сельское хозяйство. Главной водной артерией республики является река Белая, поверхностные воды которой подвержены загрязнению.

2. Не смотря на положительный баланс между сильно измененными ландшафтами и малоизмененными, экологическая напряженность достаточно высокая, а ландшафты неустойчивы.

3. Для стабилизации ландшафта территории можно рекомендовать следующие архитектурно – планировочные мероприятия: 10 % (1062 га) земель, занятых промышленными сооружениями, обустроить более плотными зелеными насаждениями; 6 % (637 га) из пахотных земель перевести в категории пастбищ и сенокосов и 5 % (531 га) придорожных территорий основных магистралей не двухрядными зелеными древесно-кустарниковыми полосами, а семирядными и десятирядными. Данные меры позволят стабилизировать ландшафты и понизить напряженность в природно-территориальном комплексе городского округа города Салават. При таком распределении земель степень стабильности ландшафтов повысится, а ее можно будет классифицировать как среднестабильную.

Список литературы

Аверина А. Е. Природно-ресурсный потенциал регионов – основа их устойчивости // Природно-ресурсный потенциал, экология и устойчивое развитие регионов России: сборник статей XVII Международной научно-практической конференции. – Пенза: РИО ПГАУ, 2019. – С. 3–5.

Берестенко Е. Д., Григорьев Ю. И. Влияние экологической нагрузки на состояние здоровья человека // Вестник новых медицинских технологий. – 2010. – № 2. – С. 305–307.

Гамм Т. А., Гривко Е. В. Экологическая оценка динамики состояния почв при хозяйственной деятельности в Оренбургской области. – Москва: Изд-во РУСАИНС, 2018. –190 с.

Григорчук Н. В. Факторы, влияющие на экологическую уязвимость береговой зоны при строительстве и размещении объектов нефтегазового освоения // Природно-ресурсный потенциал, экология и устойчивое развитие регионов России: сборник статей XVII Международной научно-практической конференции. – Пенза: РИО ПГАУ, 2019. – С. 33 – 38.

Гривко Е. В., Степанов А. С., Шайхутдинова А. А. Сравнительный анализ природного потенциала западного Оренбуржья на примере Бугурусланского и Абдулинского районов // Известия Оренбургского аграрного университета. – 2017. – № 4 (66). – С. 234–240.

Гривко Е. В., Тухтаназарова К. Р., Дулова К. С. Оценка степени антропогенной преобразованности природно-территориального комплекса Центрального Оренбуржья // Агентство перспективных научных исследований (АПНИ). Современные тенденции развития науки и технологий. – 2016. – № 4–3. – С. 83–87.

Дюкова С. А. Основные направления повышения рекреационного потенциала лесных территорий в пределах Волгоградского водохранилища в границах Саратовской области // Природно-ресурсный потенциал, экология и устойчивое развитие регионов России: сборник статей XVII Международной научно-практической конференции. – Пенза: РИО ПГАУ. – 2019. – С. 60–64.

Инвестиционный паспорт городского округа город Салават Республики Башкортостан, 1.10.2016 г. [Электронный ресурс]. – Республиканские порталы. Администрация городского округа города Салават Республики Башкортостан. – 2016. – Режим доступа – <https://salavat.bashkortostan.ru/documents/active/210148/>

Кочуров Б. И., Лобковский В. А., Смирнов А. Я. Концепция эффективного природопользования в аспекте устойчивого развития // Проблемы региональной экологии. – 2013. – № 3 (май – июнь). – С. 136–143.

Красная книга Республики Башкортостан. – Уфа: Информреклама, 2014. – 243 с.

Максимович Г. А. Химическая география вод суши. – Москва. – 1940. – С. 82–155.

Помазкова Н. В., Фалейчик, Л. М. Оценка эколого-хозяйственного баланса территории Забайкальского края // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. – 2018. – № 2. – С. 5–15.

Рыбак В. А. Анализ и оптимизация антропогенной нагрузки на окружающую среду // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2012. – № 3 (150). – С. 93–99.

Физико-химические методы анализа / [Ред. В. Б. Алексовский и К. Б. Яцимирский]. – Ленинград: Изд-во Химия. – 1971. – С. 79–82.

Grivko E. V., Evstifeeva T. A., Glukhovskaya M. Yu. Geocological problems of natural territorial complexes influenced by large industrial centers (exemplified by the Salavat urban district of the Republic of Bashkortostan) // Ekosistemy. 2021. Iss. 26. P. 12–22.

An ecological substantiation of sustainability of geoecosystems at the territory of one of the centers of the petrochemical complex in the Republic of Bashkortostan was carried out on the example of district of Salavat. The researchers used the statistical data from the investment passport of the urban district of Salavat to rank the lands according to the degree of anthropogenic load and calculate the environmental stress, ecological fund, natural protection coefficient of the studied territories on the basis of B.I. Kochurov and E. V. Grivko methodology (Kochurov, 2013; Grivko, 2016). The last indicator was considered as an indicator of sustainability. The main contributors to air pollution are the facilities of the industrial sites of “Gazprom Neftekhim Salavat, LLC” and “Salavatsteklo, JSC”. The laboratory tests prove that the priority contaminants contained in the Belaya River are bicarbonate ions, among metals – calcium ions as well as organic substances. On the basis of the obtained data water pollution index was calculated for 10 priority impurities: bicarbonate ion, chloride ion, suspended solids, ions of calcium, magnesium, cobalt, lead, petroleum products and organic substances. Biotesting of samples of soil and surface waters of the Belaya River was carried out on watercress as an additional research method. The analysis made it possible, with a high degree of probability, to classify the concentration of industrial enterprises and their infrastructure on a narrow fifteen-kilometer strip along the left bank of the Belaya River as a leading geocological problem of the studied territory. Such density of anthropogenic objects increases unsustainability of the natural-territorial complex. To create a positive ecological and economic balance, it is recommended to equip 10 % (1062 hectares) of land occupied by industrial enterprises with denser green spaces. Moreover, 6 % (637 hectares) of the arable land that is part of the urban district should be transferred to the category of pastures and hayfields, and 5 % (531 hectares) of roadside areas of the main highways should be equipped with seven-to-ten-row green belts. These simple measures can improve the situation and transfer the studied territory of the urban district of Salavat from an unsustainable state to a moderately sustainable one.

Key words: ecological state of geoecosystems, ecological and economic balance of the territory, indicators of stability of geoecosystems, soil and surface water pollution.

*Поступила в редакцию 21.12.20
Принята к печати 10.03.21*

УДК 581.9:551.583(470.620)

Прогнозирование влияния климатических изменений на пространственное распределение чужеродного компонента флоры юга черноморского побережья Краснодарского края

Егошин А. В.

*Сочинский национальный парк
Сочи, Россия
avegoshin@gmail.com*

Инвазии чужеродных видов представляют одну из серьёзных угроз для биоразнообразия нашей планеты, которая в условиях ускоряющейся глобализации и климатических изменений становится всё более острой. Побережье юга Краснодарского края в силу своих биоклиматических условий и высокого уровня антропогенной нагрузки является вторичным ареалом для большого количества чужеродных видов. Согласно результатам пространственного моделирования, в настоящее время климатические условия наиболее удовлетворяют биологическим требованиям только 74 из 182 чужеродных видов широко представленных в регионе исследований. В статье приведены результаты пространственного моделирования всех наиболее опасных чужеродных видов региона с использованием программы MaxEnt и предикторных биоклиматических переменных Worldclim, дан прогноз их распространения в 2050 и 2070 годах с использованием климатической модели CCSM4 для четырёх репрезентативных траекторий концентраций (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5). Результаты моделирования показали, что климатические изменения будут способствовать дальнейшему распространению далеко не всех чужеродных видов, ныне широко представленных в регионе. Прогнозируемые климатические изменения приведут к сокращению территории комфортной для произрастания некоторых пришлых видов. При этом условия самого экстремального сценария климатических изменений (RCP8.5) будут тормозить распространение всех представителей современного пула чужеродных видов региона. Высказано предположение, что в будущем следует ожидать обновление регионального пула пришлых видов.

Ключевые слова: инвазии, чужеродные виды растений, Кавказ, Краснодарский край, Сочи, моделирование, GIS, Maxent.

ВВЕДЕНИЕ

Юг Черноморского побережья Краснодарского края характеризуется высоким уровнем геоморфологического и климатического разнообразия, что способствовало формированию здесь богатого уникального видового и экосистемного разнообразия в прошлом и способствует натурализации большого числа экзотических видов в настоящее время.

В последнее время побережье Краснодарского является одним из самых популярных направлений туристского отдыха и внутренней миграции в стране, что неизбежно ведёт к росту антропогенной нагрузки, ускоряя процессы трансформации экосистем. В итоге это приводит к тому, что регион становится всё более уязвимым в отношении дальнейшей натурализации, как преднамеренно, так и непреднамеренно интродуцированных чужеродных видов. Ожидается, что климатические изменения будут способствовать дальнейшему увеличению ареала некоторых видов живых организмов, в том числе и чужеродных (Climate Change..., 2014). Поэтому изучение влияния климатических изменений на пространственное распределение чужеродных видов имеет важное значение для сохранения уникального биоразнообразия региона. На пространственное распределение чужеродных видов оказывает влияние множество различных экологических факторов, как биотических, так и абиотических, которые сложно оценить в комплексе. Тем не менее в последнее десятилетие появилось в открытом доступе большое количество пространственных данных содержащих различную информацию об окружающей среде (Vega et al., 2018) равно, как и пространственных данных о местах присутствия экземпляров различных видов живых организмов (GBIF, EDDMapS), что даёт возможность моделировать процессы

распространения чужеродных видов на новой родине, в том числе и с учётом климатических изменений (Schwartz et al., 2006; Rodríguez et al., 2007; Peterson, 2011).

Цель настоящей работы – провести моделирование пространственного распределения наиболее агрессивных чужеродных видов на юге Черноморского побережья Краснодарского края, а также спрогнозировать их дальнейшее распространение.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Регионом исследований является район Большого Сочи, располагающийся на юге Краснодарского края России и простирающийся от водораздела рр. Магри и Шепси – на северо-западе и до реки Псоу – на юго-востоке. Значительную часть территории (~83 %) изучаемого района занимают особо охраняемые природные территории Федерального значения (Сочинский национальный парк, Кавказский государственный природный биосферный заповедник).

По способности проникать в экосистемы юга Черноморского побережья Краснодарского края различной степени нарушенности все чужеродные виды региона исследований были подразделены на 6 классов (Егошин, 2018):

1) виды, которые встречаются в местах заноса не более двух вегетационных сезонов, а затем исчезают без должного агротехнического ухода

2) виды, произрастающие в местах заноса, но не размножающиеся без участия человека (растения парков)

3) виды, произрастающие в местах заноса продолжительное время, размножающиеся, но не покидающие место заноса

4) виды, распространяющиеся в антропогенно нарушенных экосистемах (дороги, ЛЭП и т. д.)

5) виды, способны внедряться не только в антропогенно-нарушенные, но и в естественно нарушенные экосистемы (прибрежные местообитания, вывалы деревьев)

6) виды, обладающие способностью натурализоваться в естественных экосистемах, не имеющих следов естественных и антропогенных нарушений.

Объектом исследований были виды, представляющие наибольшую угрозу для биоразнообразия экосистем региона (классы 3–6).

В ходе проведения полевых исследований с 2015 по 2019 год фиксировали географические координаты мест произрастания чужеродных видов растений. Собранный массив данных было дополнен информацией, представленной в базах данных по биоразнообразию (www.gbif.org, www.eddmaps.org). Впоследствии данные о распространении чужеродных видов были пространственно «прорежены» с использованием инструмента SDMtoolbox в среде ArcGIS (дистанция прореживания составила 1 км). В итоге общее количество мест произрастания чужеродных видов составило 420642. Минимальное количество данных о местах произрастания имел вид *Paulownia tomentosa* (Thunb.) Steud (375 точек), максимальное – *Conyza canadensis* (L.) Cronquist (20913 точек). Моделирование пространственного распределения видов проводили в среде MaxEnt (v. 3.3.3k) методом максимальной энтропии (Phillips et al., 2006; West et al., 2016). Расчёт проводили в 15 проворностях, выполняя 10 тысяч итераций по каждому пикселю, используемых в ходе анализа растровых изображений. Для каждого изучаемого вида 25 % точек находок использовали в качестве тестовой выборки, 75 % – в качестве обучающей (Zhang et al., 2018).

При этом в качестве источника предикторных переменных использовали биоклиматические растровые изображения Worldclim (www.worldclim.org), как усреднённые за временной период с 1970 по 2000, так и прогнозные на 2050 и 2070 годы, рассчитанные с использованием климатической модели CCSM4 для четырёх репрезентативных траекторий концентраций (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5), характеризующих величину антропогенно обусловленного радиационного воздействия, достигаемого к 2100 году по сравнению с 1750 годом (2,6; 4,5; 6,0 и 8,5 Вт/м²). Эти растры содержат информацию о различных климатических параметрах: BIO1 – Средняя годовая температура, BIO2 – Средняя суточная амплитуда температуры, BIO3 – Изотермичность (BIO1/BIO7) * 100, BIO4 – Стандартное отклонение температур, BIO5 – Максимальная температура самого тёплого месяца года, BIO6 – Минимальная температура

самого холодного месяца года, BIO7 – Годовая амплитуда температуры (BIO5-BIO6), BIO8 – Средняя температура самой влажной четверти года, BIO9 – Средняя температура самой сухой четверти года, BIO10 – Средняя температура самой тёплой четверти года, BIO11 – Средняя температура самой холодной четверти года, BIO12 – Годовая сумма осадков, BIO13 – Сумма осадков в самом влажном месяце года, BIO14 – Сумма осадков в самом сухом месяце года, BIO15 – Коэффициент вариации осадков, BIO16 – Сумма осадков во влажной четверти года, BIO17 – Сумма осадков в сухой четверти года, BIO18 – Сумма осадков в самой тёплой четверти года, BIO19 – Сумма осадков в самой холодной четверти года. Результаты пространственного моделирования были представлены в виде растровых картографических изображений, каждая ячейка которых (в нашем случае площадь ячейки составляла 1 км²) содержит вероятностную оценку пригодности биоклиматических условий местности требованиям анализируемых видов. Затем проводили дискретную классификацию полученных растровых изображений. Для этого в качестве порогового значения использовали 10-ый процентиль. Значения ниже 10 процентилля считали, как неудовлетворяющие экологическим требованиям анализируемых видов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Общее число агрессивных и потенциально опасных чужеродных видов в изучаемом регионе составляет 182 (Солодыко, 2002; Зернов, 2013; Тимухин и др., 2015; Tuniyev и др., 2017), но согласно результатам пространственного моделирования, биоклиматические условия изучаемого района наиболее комфортны только для 74 видов и в будущем, в результате климатических изменений ситуация может кардинальным образом измениться (Егошин, 2020).

Анализ растровых изображениям Worldclim показывает, что заметные климатические изменения будут преимущественно наблюдаться в среднегорных и высокогорных районах Большого Сочи. Наиболее высокую скорость роста среднегодовой температуры следует ожидать к 2050 году (рис. 1).

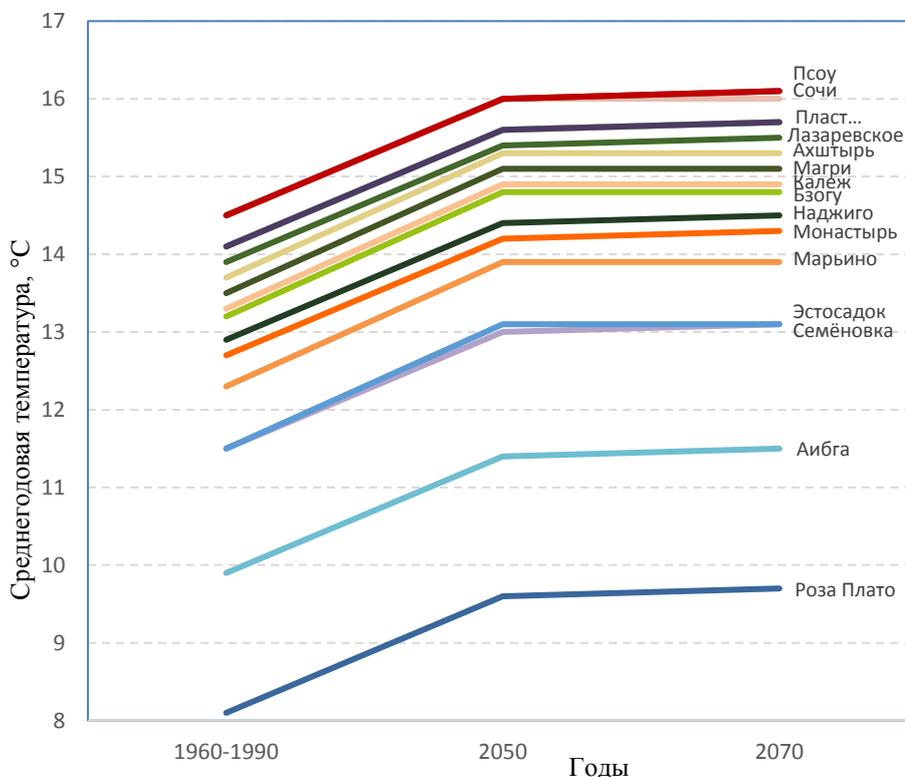


Рис. 1. Среднегодовая температура в основных населённых пунктах Большого Сочи

Повышение среднегодовой температуры в населённых пунктах изучаемого региона к 2050 году в зависимости от сценария будет варьировать от 1,5 до 2,6 °С, а к 2070 году от 1,6 до 3,6 °С. При этом рост максимальной температуры самого тёплого месяца года к 2050 году составит от 2,3 °С (репрезентативная траектория концентраций: RCP2.6) до 3,6 °С (репрезентативная траектория концентраций: RCP8.5), а к 2070 году – 2°С и 5°С соответственно. Изменения годовой суммы осадков составят от +30мм (RCP2.6) до –42мм (RCP8.5) к 2050 году и от –8мм (RCP2.6) до –36мм (RCP8.5) к 2070 году.

Такие климатические изменения не могут не повлиять на видовой состав и распространение чужеродных видов в регионе.

В целом климатические условия 2050 и 2070 годов будут благоприятствовать дальнейшему распространению таких видов как *Ambrosia artemisiifolia* L., *A. fruticosa* L., *Andropogon virginicus* L., *Abutilon theophrasti* Medikus, *Conyza bonariensis* (L.) Cronqist, *Cyclachaena xanthiifolia* (Nutt.) Fresen, *Duchesnea indica* (Andrews) Focke, *Elaeagnus pungens* Thunb., *Euphorbia maculata* L., *Euphorbia nutans* Lag., *Ligustrum lucidum* W.T. Aiton, *Microstegium japonicum* (Miq.) Koidz., *Microstegium vimineum* (Trin.) A. Camus, *Miscanthus sinensis* Andersson, *Oenothera erythrosepala* Borbas, *O. biennis* L., *O. oakesiana* (Gray) J.W. Robbins ex S. Wats. & Coult., *Phytolacca americana* L., *Oxalis corniculata* L., *Setaria pumila* (Poir.) Roem. & Schult., *Setaria viridis* (L.) P. Beauv. *Trachycarpus fortunei* (Hook.) H.Wendl (рис. 2 и 3).

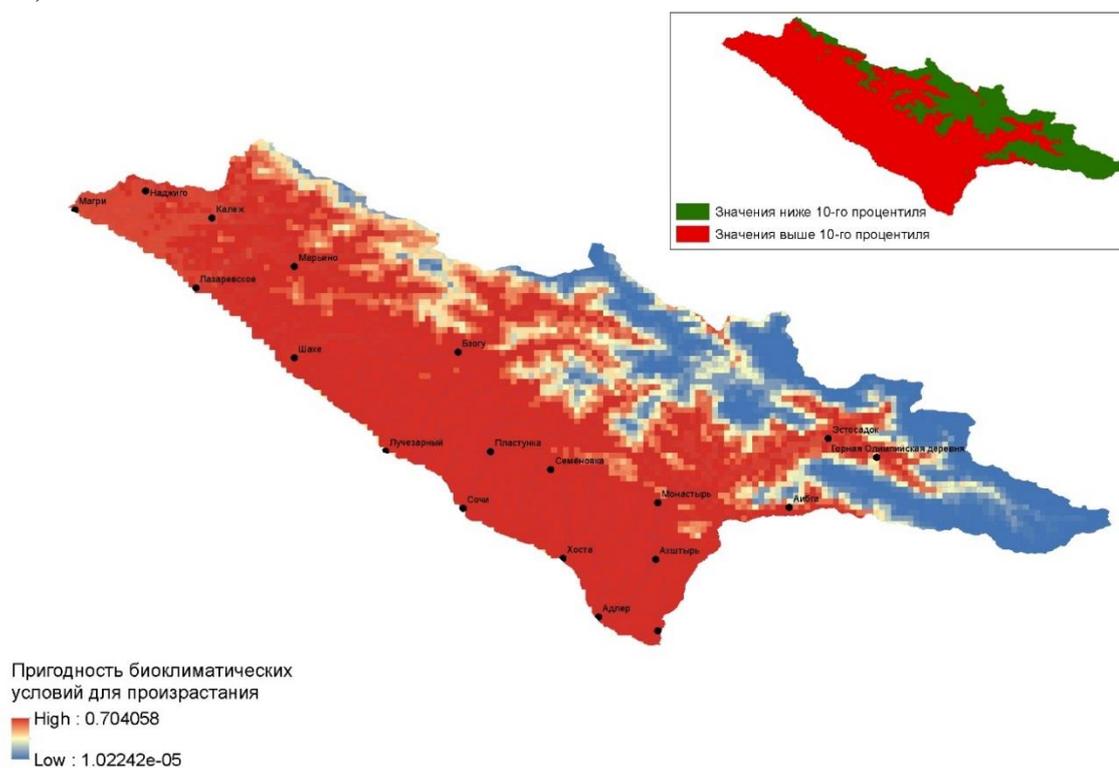


Рис. 2. Пригодность биоклиматических условий для произрастания *Duchesnea indica* (Andrews) Focke (AUC 0,934)

Как видно из рисунка, наибольший вклад в построение модели пространственного распределения вида вносят факторы: ВЮ11 – 25,2 % (коэффициент перемутации – 11,7 %), ВЮ17 – 19,8 % (коэффициент перемутации – 1,2 %), ВЮ1 – 17,7 % (коэффициент перемутации – 13 %). Красным цветом обозначены территории наиболее пригодные для произрастания вида, синим – малоприспособленные. Карта в правом верхнем углу – результат дискретной классификации растра с использованием 10-го перцентиля.

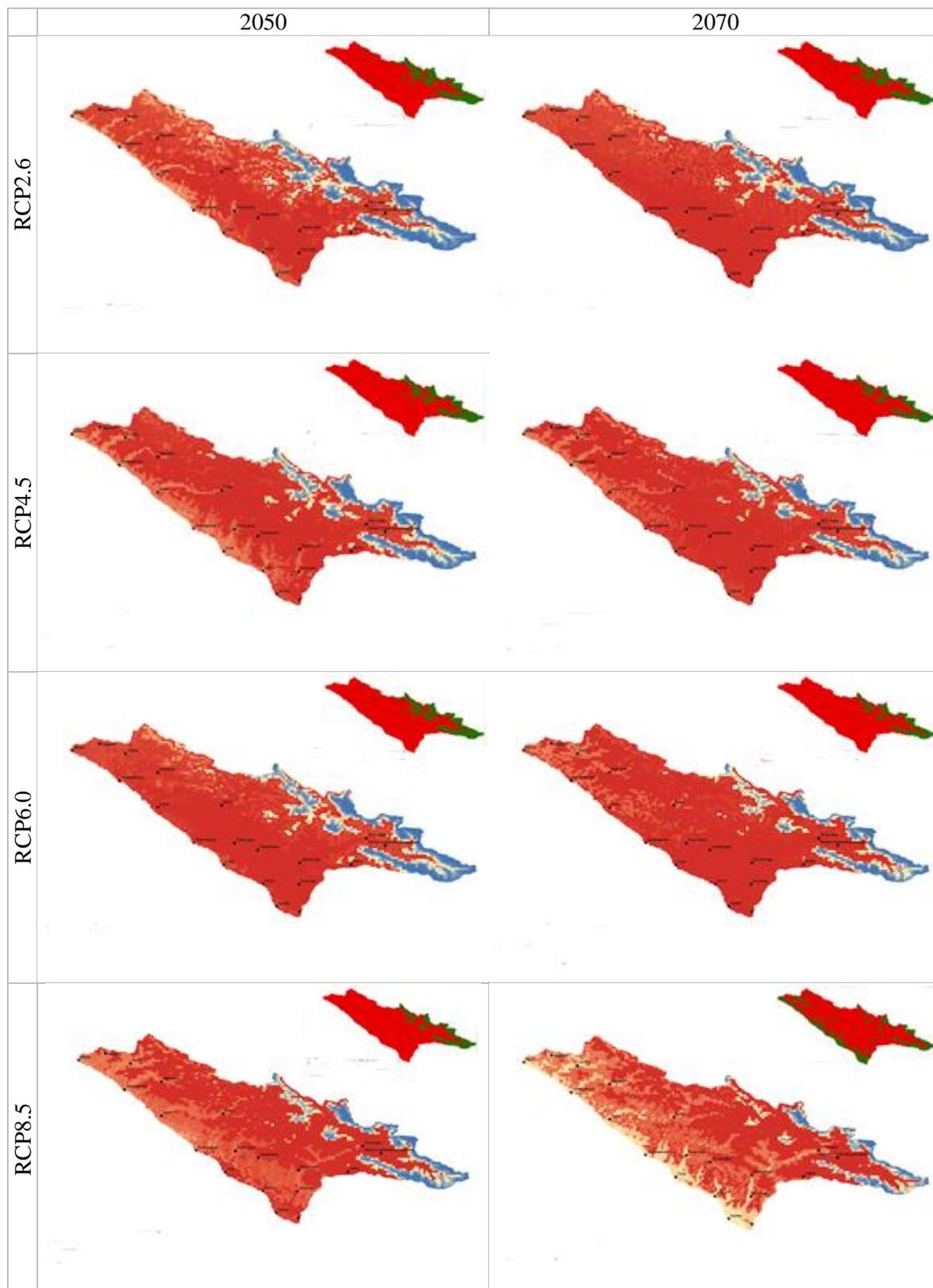


Рис. 3. Пригодность биоклиматических условий для произрастания *Duchesnea indica* (Andrews) Focke в 2050 и 2070 году, рассчитанная для четырех репрезентативных траекторий концентраций (RCP)

RCP2.6 – самый оптимистичный сценарий климатических изменений, RCP8.5 – самый пессимистичный.

Согласно результатам моделирования, прогнозируемые климатические изменения приведут к сокращению территории комфортной для произрастания многих чужеродных видов, распространённых в настоящее время на территории изучаемого района. К таким видам можно отнести: *Amaranthus blitum* L., *Amaranthus retroflexus* L., *Bidens bipinnata* L., *Bidens frondosa* L., *Buddleja davidii* Franch., *Catalpa ovata* D. Don., *Conyza canadensis* (L.) Cronquist, *Digitaria sanguinalis* (L.) Scop., *Galinsoga ciliata* (Raf.) Blake, *Galinsoga parviflora* Cav., *Gleditsia triacanthos* L., *Helminthotheca echioides* (L.) Holub, *Hemerocallis fulva* L., *Muhlenbergia schreberi* J.F. Gmel., *Oxalis stricta* L., *Paspalum dilatatum* Poir., *Robinia pseudoacacia* L., *Rosa multiflora* Thunb., *Solidago canadensis* L., *Sorghum halepense* (L.) Pers. (рис. 4 и 5).

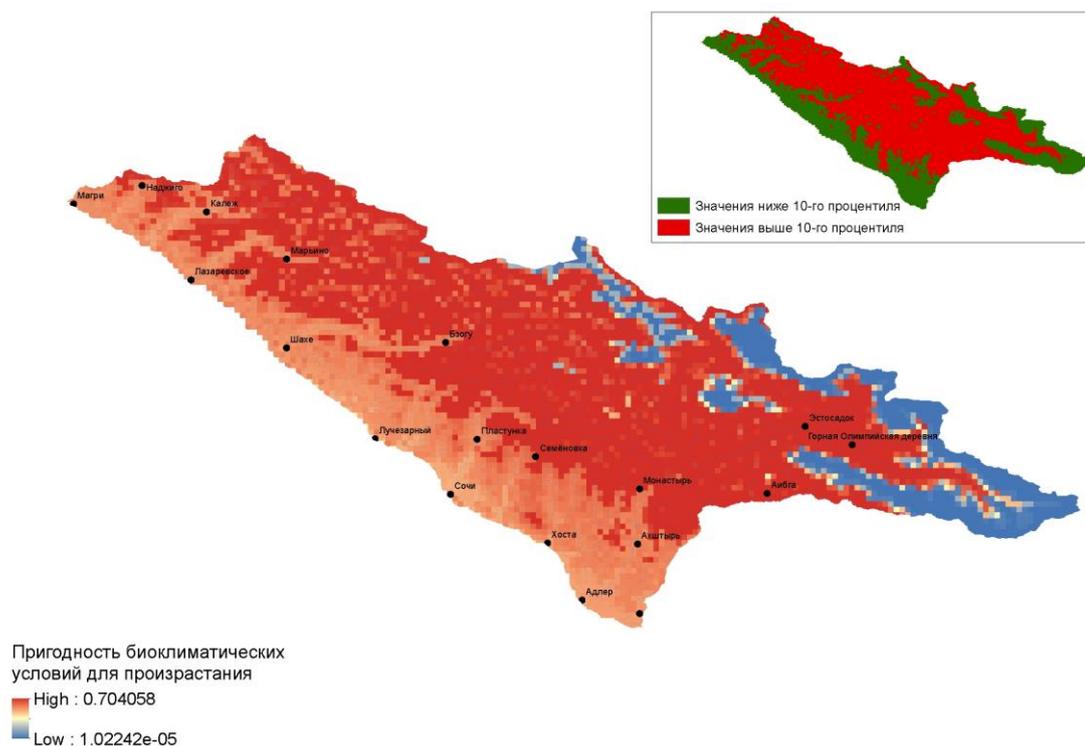


Рис. 4. Пригодность биоклиматических условий для произрастания *Hemerocallis fulva* L. (AUC 0,954)

Наибольший вклад в построение модели пространственного распределения вида вносят факторы: BIO14 – 31,2 % (коэффициент перемутации – 2,1 %), BIO1 – 25,1 % (коэффициент перемутации – 9,1 %). Красным цветом обозначены территории наиболее пригодные для произрастания вида, синим – малоприспособленные. Карта в правом верхнем углу – результат дискретной классификации раstra с использованием 10-го перцентиля.

При этом самый экстремальный сценарий климатических изменений (RCP8.5) будет негативно влиять на распространение всех чужеродных видов, широко представленных ныне на изучаемой территории.

Результат суммирования растровых изображений, характеризующих пригодность биоклиматических условий для произрастания изучаемых чужеродных видов растений представлен на рисунках 6 и 7.

Площади районов потенциальной инвазионной опасности, выделенные на основании пригодности территории для произрастания различного количества чужеродных видов растений, приведены в таблице 1.

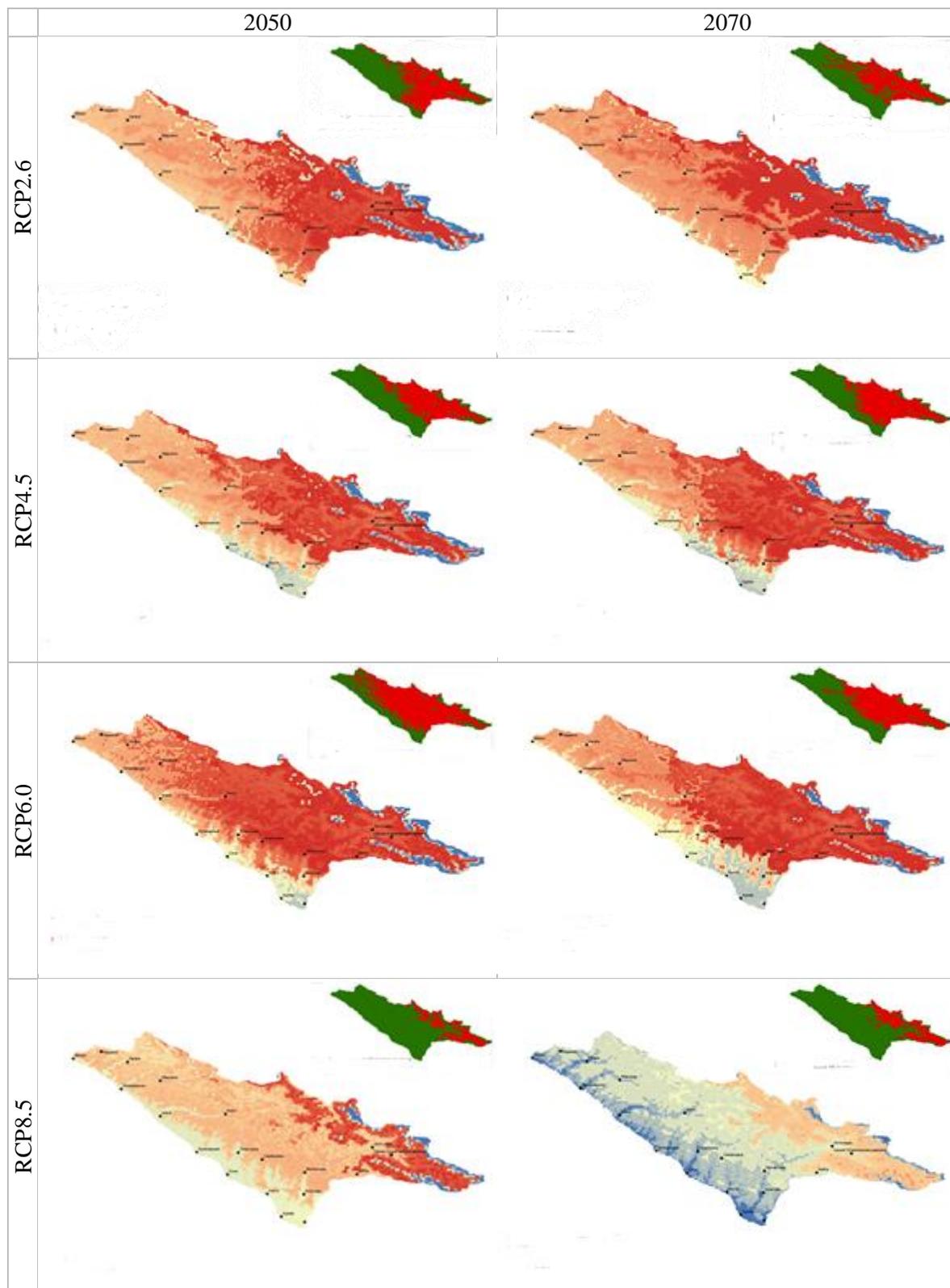


Рис. 5. Пригодность биоклиматических условий для произрастания *Hemerocallis fulva* L. в 2050 и 2070 году, рассчитанная для четырех репрезентативных траекторий концентраций (RCP) RCP2.6 – самый оптимистичный сценарий климатических изменений, RCP8.5 – самый пессимистичный.

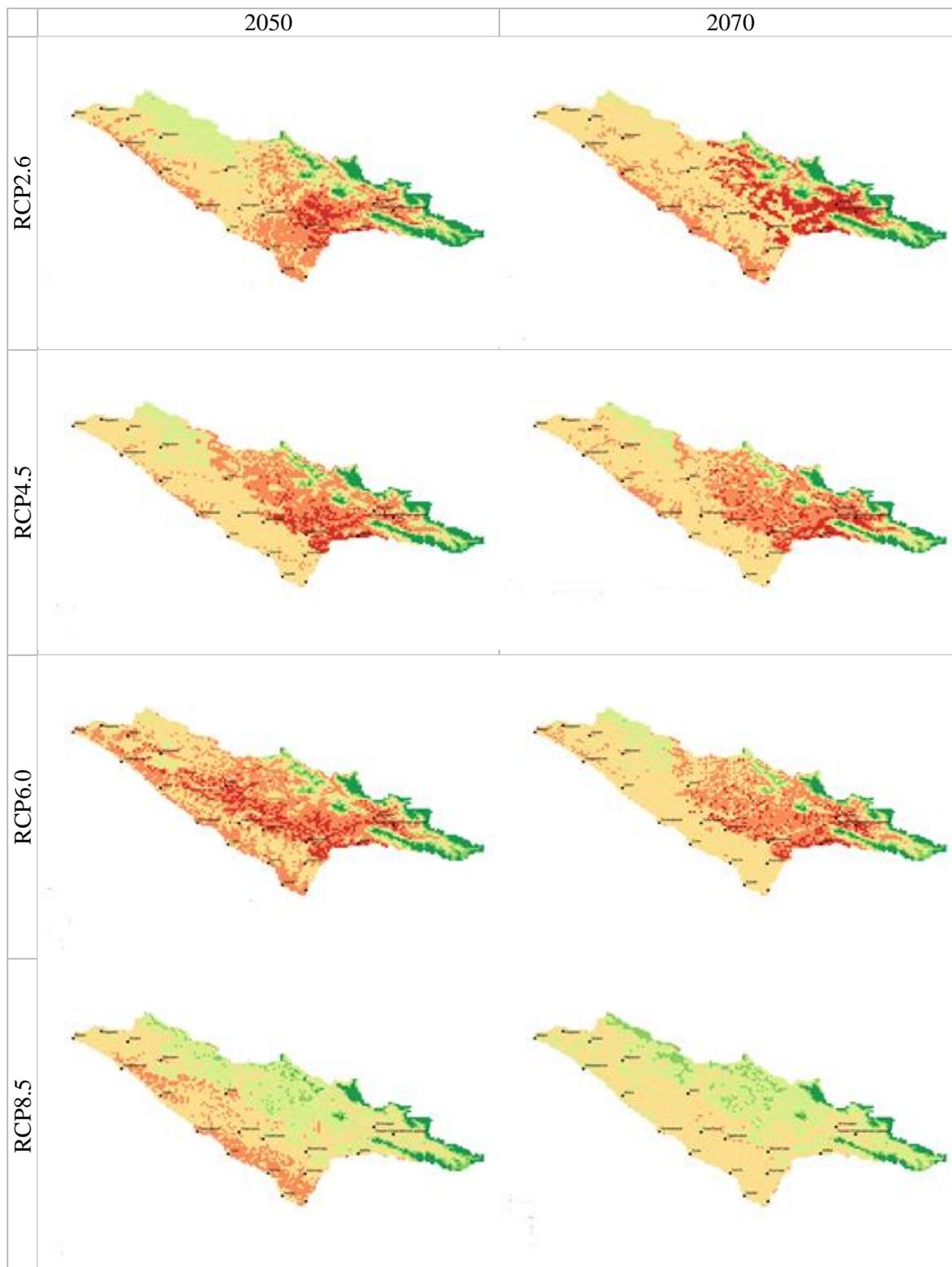


Рис. 6. Пригодность биоклиматических условий для произрастания наиболее агрессивных чужеродных видов в 2050 и 2070 году, рассчитанная для четырех репрезентативных траекторий концентраций (RCP) RCP2. 6 – самый оптимистичный сценарий климатических изменений, RCP8.5 – самый пессимистичный. Число видов: ■ 0 - 10 ■ 11 - 20 ■ 21 - 30 ■ 31 - 40 ■ 41 - 45 ■ 46 - 60

Таблица 1

Площадь районов потенциальной инвазионной опасности Большого Сочи, рассчитанная для четырех репрезентативных траекторий концентраций (RCP), км²

Район	1960-1990	RCP2.6		RCP4.5		RCP6.0		RCP8.5	
		2050	2070	2050	2070	2050	2070	2050	2070
1	478,6	240,6	230,9	201,9	156,8	183,8	129,0	156,7	125,1
2	157,2	157,9	155,3	122,4	103,1	154,7	138,6	192,5	263,8
3	173,9	642,4	204,6	357,3	284,2	207,3	314,8	1110,0	1223,3
4	594,0	1345,8	1846,7	1705,5	1746,4	1218,7	1823,4	1541,6	1787,8
5	1629,5	892,6	618,8	826,3	905,0	1299,8	821,3	393,4	11,6
6	408,4	162,6	384,9	211,6	229,6	331,9	184,5	-	-

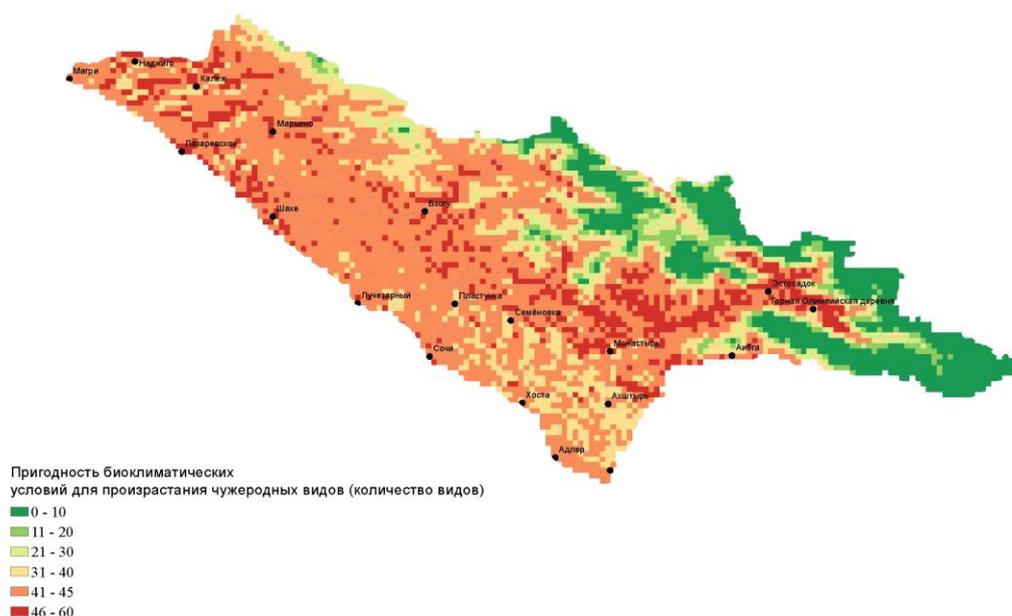


Рис. 7. Пригодность биоклиматических условий для произрастания наиболее агрессивных чужеродных видов. Территории пригодные для произрастания наибольшего количества чужеродных видов изображены красным цветом

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время климатические условия наиболее удовлетворяют биологическим требованиям 74 из 182 чужеродных видов, широко представленным в регионе исследований.

Результаты моделирования пространственного распределения видов-вселенцев свидетельствуют о том, что климатические изменения могут в сильной степени повлиять на современный региональный пул чужеродных видов растений. Изменяющиеся климатические условия перестанут удовлетворять биологическим требованиям некоторых агрессивных инородных видов. При этом климатические условия самого экстремального сценария климатических изменений (RCP8.5) будут тормозить распространение всех представителей современного пула чужеродных видов региона. По-видимому, дальнейший процесс климатических изменений будет сопровождаться появлением и распространением новых видов чужеродных растений на юге Черноморского побережья Краснодарского края.

Список литературы

- Егошин А.В. Адвентивный компонент флоры Юга Российского Причерноморья. Моделирование пространственного распределения адвентивных видов, на примере *Paulownia tomentosa* / Сочинскому национальному парку – 35 лет // Труды Сочинского национального парка. – Выпуск 12. – Сочи: Типография «Оптима», 2018. – С. 140 – 153.
- Егошин А. В. Видовой состав, структура и пространственное распределение чужеродного компонента флоры Юга Российского Причерноморья // Живые и биокосные системы. – 2020. – № 32. – Режим доступа: URL: <https://jbks.ru/archive/issue-32/article-3>
- Зернов А. С. Иллюстрированная флора юга Российского Причерноморья. – М.: Товарищество научных изданий КМК. – 2013. – 588 с.
- Солодько А. С. Флора Сочинского Причерноморья. – Сочи. – 2002. – 65 с.
- Тимухин И. Н., Туниев Б. С. Современная экспансия инвазивных видов флоры сосудистых растений в Сочинском Причерноморье // Изучение флоры Кавказа: тез. докл. Междунар. науч. конф. – Пятигорск, 2015. – С. 106–107.
- Climate Change: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / [Eds. Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer]. IPCC. – Geneva, Switzerland. – 151 p.
- Peterson A. T. Ecological niche conservatism: a time-structured review of evidence // Journal of Biogeography. – 2011. – N 38. – P. 817–827.
- Rodríguez J. P., Brotons L., Bustamante J., Seoane J. The application of predictive modelling of species distribution to biodiversity conservation // Diversity and Distributions. – 2007. – N 13. – P. 243–251.
- Schwartz M. W., Iverson L. R., Prasad A. M., Matthews S. N., O'Connor R. J. Predicting extinctions as a result of climate change // Ecology. – 2006. – N 87. – P. 1611–1615.
- Tuniyev B. S., Timukhin I. N. Species composition and comparative-historical aspects of expansion of alien species of vascular plants on the Sochi Black Sea Coast (Russia) // Nature Conservation Research. Заповедная наука. – 2017. – N 2 (4). – P. 2–25.
- Vega G. C., Pertierra L. R., Olalla-Tárraga M. Á. MERRAclim, a high-resolution global dataset of remotely sensed bioclimatic variables for ecological modelling // Scientific Data. – 2018. – N 4. – 170078 p.
- Zhang K., Yao L., Meng J., Tao J. Maxent modeling for predicting the potential geographical distribution of two eony pecies under climate change // Science of the Total Environment. – 2018. – Vol. 634. – P. 1326–1334.

Egoshin A.V. The influence of climate change on the spatial distribution of flora alien component on the southern Black Sea coast of Krasnodar Krai // *Ekosistemy*. 2021. Iss. 26. P. 23–32.

Invasion of alien species is one of the most serious threats to our planet's biodiversity, which is becoming more and more urgent in the context of accelerating globalization and climate change. The southern coast of Krasnodar Krai (agglomeration of Greater Sochi) is a secondary habitat for a large number of alien species due to its bioclimatic conditions and a high level of anthropogenic impact. According to the results of spatial modeling, climatic conditions meet the biological requirements of only 74 of the 182 alien species widely represented in the research area. The article focuses on the results of spatial modeling of all the most dangerous alien species in the region (made with the MaxEnt program and bioclimatic predictor variables Worldclim). Moreover, on the basis of CCSM4 climate model the study gives a forecast of alien species distribution in 2050 and 2070 for four representative concentration trajectories (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5). The results of simulation show that further spatial distribution of not all alien species that are now widely represented in the region will be affected by climate change. The predicted climatic changes will lead to a reduction in the area comfortable for growth of some alien species. Simultaneously, the climatic conditions of the most extreme scenario of climatic changes (RCP8.5) will slow down the spread of all representatives of the modern pool of alien species in the region. It was supposed that new, more thermophilic alien species would appear on the Black Sea coast of the Krasnodar Krai in the future.

Key words: invasion, alien species of plants, the Black Sea, the Caucasus, Sochi, modeling, GIS, Maxent, spatial modeling, species distribution modelling, SDM.

Поступила в редакцию 03.02.21

Принята к печати 24.04.21

УДК 630*114.351+582.475]:504.05

Трансформация лесной подстилки сосновых насаждений Казахского мелкосопочника под влиянием антропогенного фактора

Данчева А. В.

*Государственный аграрный университет Северного Зауралья
Тюмень, Россия
a.dancheva@mail.ru*

Представлены результаты исследований влияния рекреационных нагрузок на количественные и качественные показатели лесной подстилки в сосновых насаждениях основных лесорастительных условий Казахского мелкосопочника (на примере государственного национального природного парка ГНПП «Бурабай»). Результаты работы свидетельствуют о деградации лесной подстилки под влиянием интенсивного рекреационного воздействия. Выявлены особенности формирования лесной подстилки в сосняках, произрастающих в условиях повышенных рекреационных нагрузок. Установлено, что увеличение рекреационной нагрузки более 10 чел./га/дн. способствует уменьшению запаса, мощности и доли органосодержащей части лесной подстилки в среднем в 1,5–2 раза. В зоне активного посещения (ФЗ–I) очень сухих сосняков отмечается увеличение запаса лесной подстилки и снижением ее мощности, за счет измельчения опада и его уплотнения, без дальнейшего разложения и перехода в гумусовый слой. Проанализированы структурные и количественные показатели лесной подстилки в зависимости от лесорастительных условий. Выявлено, что максимальным запасом лесной подстилки характеризуются сосняки очень сухих и влажных условий произрастания. При этом, мощность лесной подстилки во влажных сосняках существенно превышает таковую в очень сухих сосняках. Данный факт объясняется замедленным процессом разложения лесной подстилки в очень сухих условиях произрастания и накоплением ее запаса по сравнению с влажными лесорастительными условиями. С точки зрения пожароустойчивости по совокупности природных и антропогенных факторов, а также на основании полученных данных по количественным и качественным показателям лесной подстилки, сосняки сухих условий произрастания Казахского мелкосопочника являются наиболее пожароопасными. Полученные в ходе проведенных исследований данные могут быть использованы при проектировании противопожарных мероприятий в сосновых насаждениях соответствующего региона.

Ключевые слова: лесная подстилка, сосновые насаждения, лесорастительные условия, рекреационные нагрузки.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия рекреационное лесопользование стало одним из востребованных видов использования лесов. В связи с интенсивным использованием лесов в целях рекреации, возникает серьезная экологическая проблема взаимодействия человека и природы, где рекреация выступает как комплексный фактор по отношению к лесному биоценозу, вызывающий множественные, в большинстве случаев, отрицательные последствия для устойчивости лесных насаждений (Анциферов и др., 2019). Эта проблема становится особенно актуально для лесодефицитных территорий, к которым можно отнести Казахстан (Данчева, Залесов, 2016).

Антропогенное воздействие на лесные фитоценозы выражается в изменении структуры и продуктивности насаждений, а также влияет на формирование неоднородности накопления и разложения органического вещества, способствует изменению фракционного состава, запасов и скорости разложения растительного опада и приводит к трансформации органических веществ лесных подстилок (Лянгузова и др., 2020).

Лесная подстилка является одним из важных компонентов лесного биогеоценоза и отражает основные направления функционирования экосистем (Johansson et al., 1995; Ильина, Сапожников, 2007; Lang et al., 2009; Волков, 2015; Кузнецов и др., 2019; Шуркина, 2019; Семенюк и др., 2020). Выступая связующим звеном между растительностью и почвой, лесная подстилка является интегральным показателем процесса почвообразования,

гумифицирования, успешности и скорости лесовозобновления. Структурные показатели лесной подстилки такие, как запас, мощность, соотношение различных ее фракций, могут служить индикаторами состояния почвы и критерием, определяющим устойчивость и продуктивности биогеоценоза под влиянием различного рода антропогенных факторов (пожаров, вырубок, рекреации и так далее) (Berg et al., 1999; Попова, 2007; Кулакова, 2020; Пристова, 2020).

Согласно выше приведенной информации вопросы изучения лесной подстилки, их трансформация под воздействием антропогенных факторов и тесной взаимосвязи со всеми компонентами лесных насаждений являются актуальным направлением исследований.

Цель наших исследований – провести анализ влияния рекреационных нагрузок на количественные и качественные показатели лесной подстилки в сосновых насаждениях Казахского мелкосопочника (на примере ГНПП «Бурабай»), произрастающих в различных лесорастительных условиях и на основе полученных данных разработать ряд предложений по повышению рекреационной устойчивости исследуемых насаждений.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования по определению запасов лесной подстилки проводились на территории ГНПП «Бурабай», в чистых по составу, одновозрастных высокополнотных сосновых насаждениях, произрастающих в различных функциональных зонах (ФЗ) (Данчева, Залесов, 2016): ФЗ-I – зона активного посещения, ФЗ-II – зона умеренного посещения, ФЗ-III – зона слабого посещения (условно контроль). Вид сосновых насаждений, произрастающих в различных лесорастительных условиях Казахского мелкосопочника, представлены на рисунках 1 и 2.

Основные характеристики лесорастительных условий, в которых произрастают изучаемые сосняки (Бирюков, 1974):

В очень сухих лесорастительных условиях сосняки произрастают в условиях хронического недостатка влаги и приурочены к сильно инсолируемым вершинам и верхней трети склонам горных кряжей, сопок и увалов. Почвы – бурые мелкопрофильные супесчаные скелетные. Состав древостоя изменяется от 10С до 9С1Б, класс бонитета V–Va. Подлесок редкий: можжевельник казацкий, кизильник, шиповник иглистый. Живой напочвенный покров редкий и состоит из накипных лишайников, гвоздики песчаной, вероники седой, очитка.

Сухие лесорастительные условия характеризуются периодическим недостатком влаги и относятся к инсолируемым средним частям склонов горных кряжей и холмогорий. Почвы – бурые элювиированные слабо дерновые мелко – и среднепрофильные осолоделые. Состав древостоя изменяется от 10С до 9С1Б, бонитет – IV–V. Подлесок редкий неравномерный: шиповник иглистый, кизильник черноплодный. Живой напочвенный покров средней густоты и представлен в основном лишайниками кустистыми, сон-травой, вероникой седой и колосистой, вейником наземным.

В свежих лесорастительных условиях сосняки произрастают в условиях достаточного увлажнения за счет атмосферных осадков и аккумуляции поверхностного стока и приурочены к слабоинсолируемым нижним пологим частям склонов горных возвышенностей мелкосопочных гряд и увалов. Почвы – бурые лесные вторично-дерновые элювиированные глубокопрофильные, скелетные, осолоделые. Состав древостоя изменяется от 10СедБ, Ос до 7СЗБ, Ос, бонитет – II–III. Подлесок редкий: шиповник иглистый, коричневый, кизильник, спирея. Живой напочвенный покров густой: зеленые мхи, грушанка однобокая и зонтичная, папоротник орляк, вейник наземный, коротконожка перистая.

Во влажных лесорастительных условиях сосняки произрастают в условиях достаточного увлажнения за счет атмосферных осадков, аккумуляции поверхностного стока



Рис. 1. Сосновые насаждения Казахского мелкосопочника очень сухих условий произрастания (ФЗ–III) (a) и сухих условий произрастания (ФЗ–III) (b)

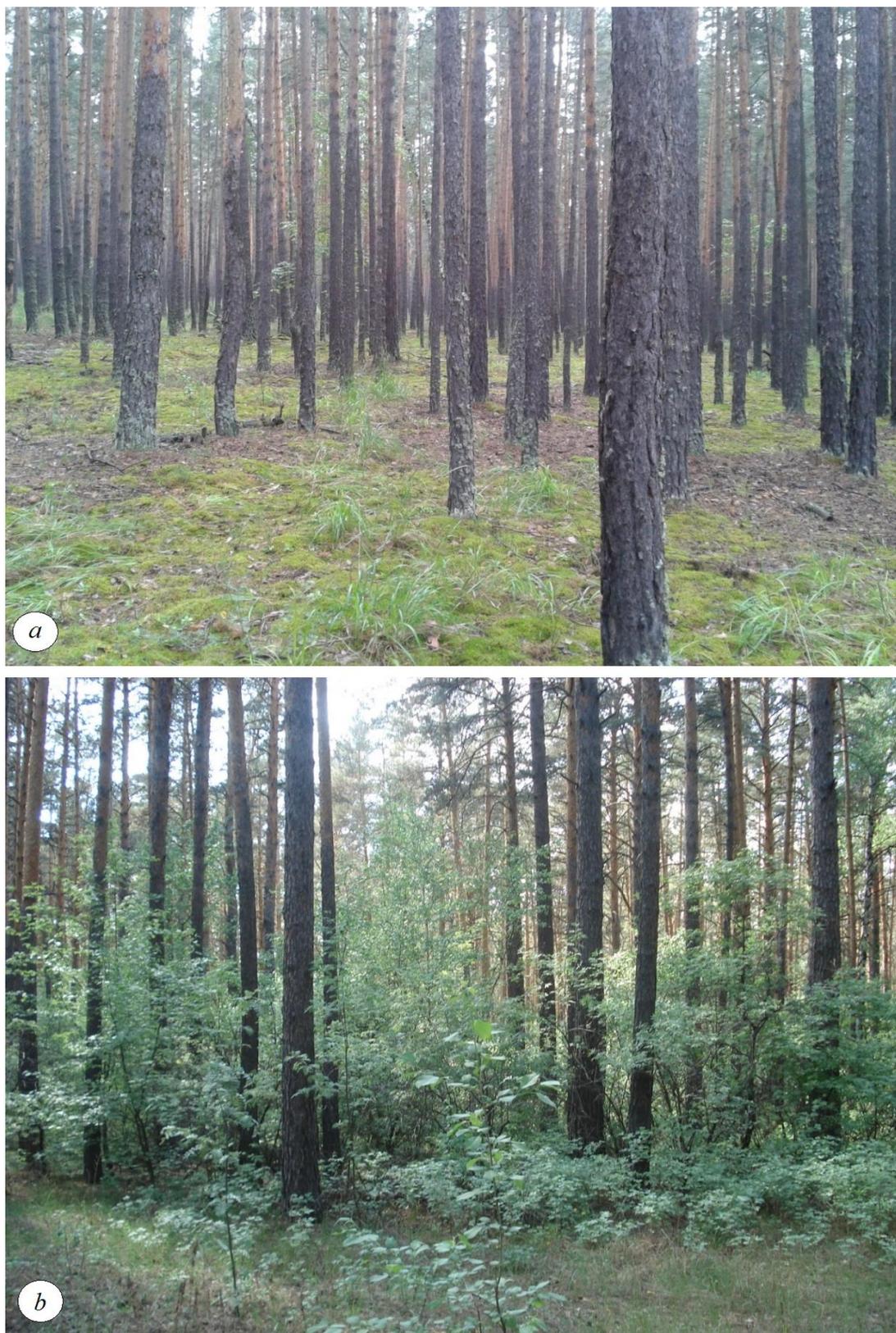


Рис. 2. Сосновые насаждения Казахского мелкосопочника свежих условий произрастания (ФЗ–III) (a) и влажных условий произрастания (ФЗ–III) (b)

и частично за счет грунтовых вод, и приурочены к хорошо дренированным террасам современных озерных котловин и ложбин стока; шлейфам увалов. Почвы – бурые лесные вторично-дерновые элювиированные глееватые и дерновые аллювиальные. Состав древостоя изменяется от 10СедБ, Ос до 7СЗБ, ОС, бонитет – I–II. Подлесок средней густоты: смородина черная, кизильник, шиповник, ива кустарниковая. Живой напочвенный покров густой: зеленые мхи, вейник тростниковый, папоротник, грушанка круглолистная, герань луговая, борщевик.

Сбор экспериментальных данных по определению запасов лесной подстилки и её мощности осуществлялся на 84 временных пробных площадях (ВПП). Для изучения лесной подстилки закладывались площадки по методике Н. П. Курбатского (1970) размером 20×25 см с помощью шаблона. Пробы лесной подстилки брали на границе ВПП с прилегающей территорией в 3–4-х кратной повторности. Массу подстилки и опада определяли весовым способом после высушивания образцов до воздушно-сухого состояния. Всего обмерено 262 образца лесных подстилок. Мощность замеряли на всех сторонах учетной площадки (10–12 кратной повторности) с последующим вычислением среднего значения. Подстилочно-опадный коэффициент вычисляли как отношение массы подстилки к массе опада. Полученные данные были статистически обработаны с использованием электронных таблиц Microsoft Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Лесная подстилка является весьма чувствительным индикатором условий местопроизрастания лесных насаждений, а толщина и запас подстилки – наиболее информативными показателями антропогенного воздействия на лесные фитоценозы. Массовое посещение лесных насаждений влечет за собой нарушение структуры лесной подстилки, уменьшение ее мощности и запаса.

Данные запаса и мощности лесной подстилки в зависимости от степени рекреационного воздействия, представленные на рисунке 3а, свидетельствуют о снижении величины рассматриваемых показателей в 1,4–1,9 и 1,2–1,6 раза соответственно в зоне активного посещения (ФЗ–I), характеризующейся IV стадией дигрессии (Данчева и др., 2017), в сравнении с зоной умеренного посещения (ФЗ–II) и зоной контроля (ФЗ–III). Данная закономерность характерна для всех лесорастительных условий за исключением очень сухих условий произрастания, где в зоне активного посещения (ФЗ–I) наблюдается увеличение общего запаса лесной подстилки при сравнительно низком показателе ее мощности.

Данный факт объясняется отмеченных в ходе исследований процессом уплотнения лесной подстилки, а не выбивания ее до минерального слоя, как это происходит в большинстве случаев. Выявлено отсутствие в рассматриваемой зоне гумусового слоя. Весь объем подстилки представлял собой измельченный опад, в котором не наблюдалось процессов разложения. Одной из главных причин наблюдаемого процесса измельчения опада и его уплотнения, без дальнейшего разложения и перехода в гумусовый слой, является недостаток эдафического увлажнения, характерного для очень сухих лесорастительных условий района исследований.

В зоне активного посещения (ФЗ–I) очень сухих и сухих условий произрастания, рекреация наблюдается в виде прогулок отдыхающих и экскурсантов по всей территории. Тропинки в исследуемой ФЗ отсутствуют, что приводит к дроблению (измельчению) лесной подстилки, ее уплотнению, изменению ее мощности и соотношению подгоризонтов (рис. 3б).

Учитывая полученные нами ранее данные (Данчева и др., 2017) по единовременной рекреационной посещаемости в зоне активного посещения (ФЗ–I) в очень сухих и сухих сосняках, уплотнение лесной подстилки, сопровождающееся увеличением ее общего запаса, происходит при показателе от 32 до 81 чел./га/дн., который превышает показатель допустимой рекреационной посещаемости, в среднем, в 4–10 раз.

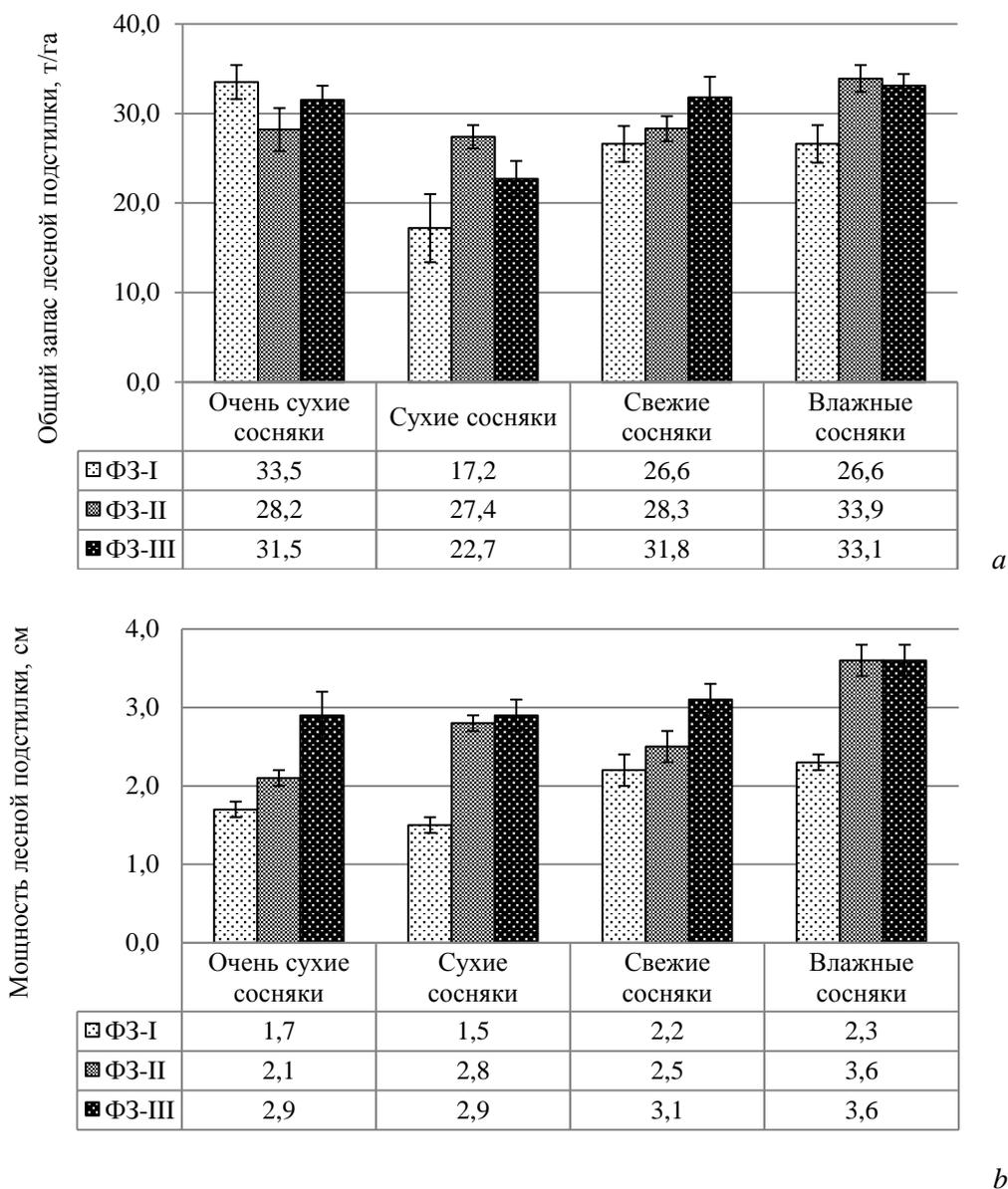


Рис. 3. Средние значения общего запаса лесной подстилки (а) и ее мощности (б) в сосняках Казахского мелкосопочника в зависимости от степени рекреационного воздействия и лесорастительных условий

В свежих и влажных сосняках в зоне активного посещения (Φ3-I) снижение общего запаса лесной подстилки отмечается при показателе рекреационной посещаемости от 13 до 20 чел./га/дн.

Следует отметить, что достоверных различий в значениях рассматриваемого показателя между зоной активного посещения (Φ3-I) и зоной умеренного посещения (Φ3-II), и зоной контроля (Φ3-III) всех рассматриваемых лесорастительных условий не наблюдается ($t_{расч.}=0,4-2,1$ при $t_{0,05}=2,1-2,2$).

Статистический анализ мощности лесной подстилки в зависимости от степени рекреационного воздействия указывает на наличие достоверных различий в ее величине между зоной активного посещения (Φ3-I) и зоной контроля (Φ3-III) во всех лесорастительных условиях ($t_{расч.}=3,2-6,3$ при $t_{0,05}=2,1-2,2$).

В то же время, существенные различия в мощности и запасе лесной подстилки между зоной умеренного посещения (ФЗ–II) и зоной контроля (ФЗ–III) во всех рассматриваемых лесорастительных условиях отсутствуют ($t_{расч.}=0,3-2,0$ при $t_{0,05}=2,1-2,2$).

По данным среднесезонной единовременной рекреационной посещаемости в зоне умеренного посещения (ФЗ–II), которая составляет 3,4 чел./га/дн. и рекреационной посещаемости в пределах от 3 до 11 чел./га/дн., можно утверждать, что данные значения рекреационной нагрузки не влияют на величину запаса и мощности лесной подстилки; изменения рассматриваемых показателей наблюдается при рекреационной посещаемости 10 чел./га/дн. и более, характерной для зоны активного посещения (ФЗ–I).

В формировании лесной подстилки и ее запасов в лесных насаждениях главную роль играет опад, его фракционный состав и запас, а также скорость разложения. Под влиянием рекреационных нагрузок, выражающихся хождением рекреантов по участкам лесных массивов (рис. 4), происходит уплотнение, а некоторых случаях и выбивание напочвенного покрова до минерального слоя почвы, что способствует снижению доли разложившегося опада и уменьшению содержания гумуса и дальнейшему обеднению минерального состава почв со снижением качественных их показателей.



Рис. 4. Зона активного посещения (ФЗ–I) в сосновых насаждениях сухих условий произрастания

Данные исследований, приведенные в таблице 1, свидетельствуют о значительных различиях в массе опада между зоной активного посещения (ФЗ–I) и зоной контроля (ФЗ–III) во всех лесорастительных условиях. В очень сухих и сухих сосняках в ФЗ–I данный показатель снижается в 2,0–2,6 раза, в свежих и влажных сосняках – в 1,5–1,6 раза, в сравнении с ФЗ–III.

Существенных различий в массе опада между зоной умеренного посещения (ФЗ–II) и зоной контроля (ФЗ–III) не наблюдается.

Лесная подстилка, аккумулируя в себе отмирающую и опадающую органическую массу древесного полога (лесного опада), постоянно претерпевает структурные изменения,

проявляющиеся в соотношении минерализационных и гумификационных остатков. Интенсивность процесса разложения лесной подстилки и ее гумификации в антропогенно ненарушенных насаждениях зависит от множества факторов, к основным из которых относятся лесорастительные условия, возраст, состав древостоя и т.д. (Данчева, 2018). Для оценки скорости разложения опада используется подстильно-опадный коэффициент, повышение значения которого свидетельствует о снижении интенсивности биологического круговорота.

Таблица 1

Среднестатистические значения показателей лесной подстилки в зависимости от степени рекреационного воздействия и лесорастительных условий

Показатель	Функциональные зоны (ФЗ)		
	I	II	III
Очень сухие сосняки (С ₁)			
Запас опада, т/га	2,5±0,3	6,3±0,9	6,6±0,8
Запас органосодержащей подстилки, т/га	31,0±1,8	21,9±2,6	24,9±1,4
Подстильно-опадный коэффициент	13,1±1,1	4,2±0,7	4,2±0,6
Сухие сосняки (С ₂)			
Запас опада, т/га	2,0±0,3	5,0±0,5	4,1±0,7
Запас органосодержащей подстилки, т/га	15,2±3,5	22,4±1,1	18,6±1,7
Подстильно-опадный коэффициент	7,2±0,7	4,8±0,5	5,2±0,8
Свежие сосняки (С ₃)			
Запас опада, т/га	4,0±0,6	6,6±1,0	6,1±0,7
Запас органосодержащей подстилки, т/га	22,6±2,7	21,7±1,6	25,7±2,4
Подстильно-опадный коэффициент	7,3±1,8	3,8±0,5	4,7±0,8
Влажные сосняки (С ₄)			
Запас опада, т/га	5,0±0,6	8,3±1,2	8,2±0,6
Запас органосодержащей подстилки, т/га	21,6±2,1	25,6±1,3	24,9±1,1
Подстильно-опадный коэффициент	4,5±0,7	3,6±0,7	3,2±0,3

Согласно данным таблицы, подстильно-опадный коэффициент в зоне активного посещения (ФЗ–I) всех рассматриваемых условий произрастания колеблется в пределах от 4,5 до 13,1, что в 1,4–3,1 раза превышает аналогичный показатель в зоне умеренного посещения (ФЗ–II) и зоне контроля (ФЗ–III) и свидетельствует о более низких темпах минерализации растительных остатков.

Медленное преобразование растительных остатков, с коэффициентом 13,1 наблюдается в зоне активного посещения (ФЗ–I) в очень сухих сосняках. В сухих условиях произрастания подстильно-опадный коэффициент составляет 7,2, в свежих – 7,3 и во влажных – 4,5. Из выше приведенных данных видно, что по мере увеличения степени эдафического увлажнения, отмечается снижение количественного показателя подстильно-опадного коэффициента.

Снижение подстилочно-опадного коэффициента с увеличением степени эдафического увлажнения сохраняется в зоне умеренного посещения (ФЗ-II) и зоне контроля (ФЗ-III).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Увеличение интенсивности рекреационного воздействия способствует уменьшению запаса, мощности и доли органосодержащей части лесной подстилки. В ФЗ-I очень сухих сосняков отмечается увеличение запаса лесной подстилки и снижение ее мощности, за счет ее уплотнения под воздействием рекреационных нагрузок.

Уменьшение запаса и мощности лесной подстилки (ЛП) происходит при рекреационной нагрузке 10 чел./га/дн. и более.

Максимальным запасом лесной подстилки характеризуются сосняки очень сухих и влажных условий произрастания. При этом, при близких значениях запаса лесной подстилки, ее мощность во влажных сосняках существенно превышает таковую в очень сухих сосняках.

С практической точки зрения, полученные данные по запасам и структуре лесной подстилки можно использовать при проектировании противопожарных мероприятий исследуемого района, поскольку запас и структура лесной подстилки является одним из основных факторов, определяющих природную опасность и интенсивность лесных пожаров.

В целях повышения рекреационной привлекательности исследуемой территории и сохранения рекреационной устойчивости и предотвращения деградации лесных насаждений в процессе их использования рекомендуется создание искусственных изгородей из древесно-кустарниковых растений вдоль дорожно-тропиночной сети и по периметру рекреационного лесного участка с целью предотвращения вытаптывания территории за их пределами. Проводить периодический мониторинг за состоянием лесных насаждений; придерживаться строгого соблюдения норм рекреационной нагрузки на исследуемую территорию.

Список литературы

- Анциферов А. Л., Кабоев К. М., Яблоков Е. О. Пространственное размещение почвенной мезофауны хвойно-широколиственного леса в условиях рекреационного воздействия (на примере базы отдыха «Сосновый посад» в Костромской области) // Электронный научно-образовательный журнал ВГСПУ «Грани познания». – 2019. – № 6(65). – С. 18–24.
- Бирюков В. Н. Лесорастительное районирование и классификация колочных лесов Северного и Центрального Казахстана // Леса и древесные породы Северного Казахстана. – Л.: Наука. 1974. – С. 16–26.
- Ведрова Э. Ф., Мухортова Л. В., Метелева М. К. Трансформация органического вещества подстилки в лесных культурах // Лесоведение. – 2018. – № 1. – С. 24–36.
- Волков А. Г. Лесная подстилка в парцеллах ельников северной подзоны тайги // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2015. – № 2. – С. 63–39.
- Данчева А. В., Залесов С. В., Султанова Р. Р. Функциональное зонирование сосняков рекреационного назначения Казахского Мелкосопочника // Вестник БГАУ. – 2017. – № 2 (42). – С. 101–105.
- Данчева А. В., Залесов С. В. Использование комплексного оценочного показателя для оценки состояния рекреационных сосняков ГНПП «Бурабай» // Бюллетень науки и практики. – 2016. – № 3 (4). – С. 46–55.
- Данчева А. В. Повышение рекреационной устойчивости и привлекательности сосновых лесов Казахстана: дис. ... доктора сельскохозяйств. наук: спец. 06.03.02 Лесоведение, лесоводство, лесоустройство и лесная таксация. – Уфа: Башкирский ГАУ, 2018. – 515 с.
- Ильина Т. М., Сапожников А. П. Лесные подстилки как компонент лесного биогеоценоза // Вестник КрасГАУ. – 2007. – № 5. – С. 45–48.
- Кузнецов В. А., Рыжова И. М., Стома Г. В. Изменение лесных экосистем мегаполиса под влиянием рекреационного воздействия // Почвоведение. – 2019. – № 5. – С. 633–642.
- Курбатский Н. П. Исследования количества и свойств лесных горючих материалов // Вопросы лесной пирологии. – Красноярск: Институт леса и древесины СО АН СССР. – 1970. – С. 5–18.
- Кулакова Н. Ю. Особенности круговорота биофильных элементов в подстилках экосистем полупустыни Северного Прикаспия // Почвоведение. – 2020. – № 11. – С. 1341–1352.
- Лянгузова И. В., Примак П. А., Волкова Е. Н., Салихова Ф. С. Пространственное распределение запасов напочвенного покрова и лесной подстилки в фоновых и дефолирующих сосновых лесах Кольского полуострова // Растительные ресурсы. – 2020. – Т. 56, вып. 4 – С. 335–350.
- Мухортова Л. В. Анализ трансформации лесной подстилки в 25-летних хвойных культурах // Лесоведение. – 2008. – № 5. – С. 36–44.

Попова Н. В. Методы использования данных по скорости освобождения химических элементов из подстилки для диагностики устойчивости экосистем // Вестник Российского ун-та дружбы народов. Серия Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2007. – № 1. – С. 19–26.

Пристова Т. А. Скорость разложения растительного опада в лиственных насаждениях послерубочного происхождения в условиях средней тайги Республики Коми // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. – 2020. – № 3. – С. 62–72.

Семенюк О. В., Телеснина В. М., Богатырев Л. Г., Бенедиктова А. И., Кузнецова Я. Д. Оценка внутрибиогеоценозной изменчивости лесных подстилок и травяно-кустарничковой растительности в еловых насаждениях // Почвоведение. – 2020. – № 1. – С. 31–43.

Шуркина В. В. Изменение запаса и фракционного состава лесной подстилки в кедровниках, пораженных шестизубчатым короедом (участок «Малый Абакан» заповедника «Хакасский») // Успехи современного естествознания – 2019. – № 3. – С. 40–45.

Lang S. I., Cornelissen J. H. C., Klahn T., Van Logtestijn R. S. P., Broekman R., Schweikert W., Aerts R. An experimental comparison of chemical traits and litter decomposition rates in a diverse range of subarctic bryophyte, lichen and vascular plant species // Journal of Ecology. – 2009. – Vol. 97 (5). – P. 886–900. doi.org/10.1111/j.1365-2745.2009.01538.x

Berg B., Albrektson A., Berg M. P., Cortina J., Johansson M–B., Gallardo A., Mgadeira M., Pausas J., Kiratz W., Vallejo R., McLaugherty C. Amounts of litter fall in some pine forests in European transect, in particular Scots pine // Annals of Forest Science. – 1999. – Vol. 56. – P. 625–639. doi.org/10.1051/forest:19990801

Johansson M. B., Berg B., Meentemeyer V. Litter mass loss rates in late stages of de-composition in a climatic transect of pine forests. Long-term decomposition in a Scots pine forest. IX // Canadian Journal of Botany. – 1995. – Vol. 73. – P. 1509–1521.

Dancheva A. V. Anthropogenic transformation of the forest litter of pine forests of the Kazakh Upland // Ekosistemy. 2021. Iss. 26. P. 33–42.

The article presents the results of studies of the influence of recreational loads on the quantitative and qualitative indices of forest litter in pine stands in different forest growth conditions in Kazakh Upland exemplified by State National Nature Park “Burabay”. The obtained data reveal the degradation of the forest litter influenced by intense recreational exposure. The peculiarities of the of forest litter formation in pine forests growing under conditions of increased recreational loads are examined. It is found out that the increase in recreational load for more than 10 people/ha/day will lead to decline of capacity and organic containing part of forest litter in average to 1, 5-2 times. The area of actively visited dry pine stands suffers the increase of forest litter and decrease of its capacity due to fall out shredding and compaction without further decay and transition to the humus layer. The structural and quantitative indices of forest litter were analyzed according to the forest growing conditions. It was revealed that pine forests with very dry and humid growing conditions were characterized by the maximum reserve of forest litter. At the same time, the thickness of the forest litter in moist pine forests significantly exceeded that in very dry pine forests. This fact is explained by the slow processes of forest litter decomposition in very dry growing conditions and the accumulation of its stock in comparison with wet forest conditions. On the basis of the received data on quantitative and qualitative indices of forest litter it was concluded that fire resistance of pine plantations growing in dry conditions of Kazakh Upland was very low because of combination of natural and anthropogenic factors. The data obtained can be used in the design of fire protection measures in pine forests of the studied area.

Key words: forest litter, pine forest, forest growth conditions, recreational impact.

*Поступила в редакцию 20.01.21
Принята к печати 09.02.21*

Результаты исследования функционального состояния мейобентосной фауны в высокосульфидных биотопах прибрежных озёр-лагун Кандалакшского залива (Белое море)

Иванова Е. А.¹, Краснова Е. Д.², Воронов Д. А.^{3,4}, Тимофеев В. А.¹, Гулин М. Б.¹

¹ Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН

Севастополь, Россия

katya.iva@mail.ru

² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

Москва, Россия

³ Институт проблем передачи информации имени А. А. Харкевича РАН

Москва, Россия

⁴ Институт физико-химической биологии имени А. Н. Белозерского Московский государственный университет

имени М. В. Ломоносова

Москва, Россия

Представлены результаты исследований по изучению экофизиологического состояния мейофауны в донных осадках двух меромиктических водоемов, находящихся на различных стадиях геологической изоляции от Белого моря. Установлено, что активные живые бентосные организмы высокосульфидных биотопов способны проникать не глубже верхней границы хемоклина. В озёрах-лагунах Кандалакшского залива Белого моря обитающие на глубине залегания верхней границы редокс-хемоклина организмы: нематоды, хирономиды и олигохеты отличались высокой двигательной активностью. На нижней кромке хемоклина обнаружены неподвижные нематоды и коловратки, относящиеся к мёртвой компоненте сообщества. В аноксической зоне на дне сульфидного озера на глубине 7,5 м мейобентос не обнаружен. Массовое обнаружение неподвижных бентосных инфузорий, представленных, в основном, семейством Tintinnidae у верхней кромки хемоклина озера Трёхцветное не позволяет однозначно заключить об их физиологическом состоянии. Основным лимитирующим фактором, ограничивающим проникновение оксибионтного зообентоса в редокс-зону изученных меромиктических беломорских лагун, является, очевидно, наблюдаемое здесь сочетанное действие острого дефицита растворённого кислорода с одновременным сероводородным заражением водной среды и бентали. С другой стороны, наоборот, к позитивным свойствам данного местообитания можно отнести высокое содержание потенциальных пищевых ресурсов (биомасса фото- и хемолитотрофных микроорганизмов), а также, возможно, наблюдаемый ранее в хемоклине слой с повышенной температурой среды. Примечательно, что этот температурный феномен, отмечаемый в большинстве стратифицированных озёр-лагун Заполярья, наиболее развит именно в зимний период.

Ключевые слова: мейобентос, гипоксия, сероводородное заражение, доля живых и мёртвых организмов, меромиктические лагуны, Белое море.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования возможности выживания бентосных гидробионтов в донной среде с критическими условиями существования – острой гипоксией и сероводородным заражением – активно обсуждаются в научных публикациях в последние годы (Заика, Сергеева, 2009; Гулин, 2012; Иванова, 2017; Стунжас, 2019). Примерами таких экстремальных местообитаний могут служить и сульфидные биотопы донных осадков беломорских меромиктических озёр-лагун, «отшнуровывающихся» от данного водоёма в связи с поднятием его берегов в Голоцене (Краснова и др., 2016).

Ключевым параметром исследуемых прибрежных местообитаний является значительное сероводородное заражение донной среды, происходящие в процессе бактериальной сульфатредукции в совокупности с выраженной плотностной стратификацией водной толщи. Следствием наличия высокой концентрации сероводорода в осадках является острая гипоксия среды в редокс-зоне, переходящая с глубиной в аноксию.

На побережье Белого моря из-за постгляциального поднятия берега возникло множество прибрежных озер-лагун, в разной степени изолированных от моря. На данный момент их известно уже более двадцати. В зависимости от стадии изоляции водообмен морской воды происходит с разной периодичностью и с интенсивностью. Данная работа касается двух водоемов, которые в типологическом ряду отделяющихся от Белого моря водоемов находятся на его разных полюсах.

Проблема исследования биоразнообразия донной фауны экстремальных местообитаний заключается в корректности оценки численности реально обитающих в них, функционально активных организмов. Причиной подобных расхождений служат, прежде всего, методические ограничения. Так, при работе с фиксированными пробами практически невозможно определить долю живой и мёртвой компоненты в сообществе. И зачастую отмершие тела учитываются как живые, тем самым завышая реальную численность мейобентоса.

Достаточно простым способом определения физиологического состояния фауны признаётся визуальное наблюдение нефиксированных проб методом прямого микроскопирования (Giere, 2009; Мокиевский, 2009). Такой избирательный учёт активного зообентоса в пробах позволяет избежать завышенных оценок численности из-за добавления в общий счёт и мёртвых тел, и давать точную оценку плотности поселений животных.

Целью данной работы является определение доли активной живой компоненты сообществ мелких (длиной до 1 мм) донных животных из осадков сульфидных биотопов отшнуровывающихся озёр-лагун Белого моря с помощью серии визуальных наблюдений физиологического состояния мейобентоса методом прямого микроскопирования.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Сборы нефиксированных «живых» проб донных грунтов проводились в озёрах-лагунах – озере Трёхцветное и озере на мысе Зелёный в Кандалакшском заливе Белого моря, Карельский берег (рис. 1) в сентябре 2018 и марте 2019 годов.

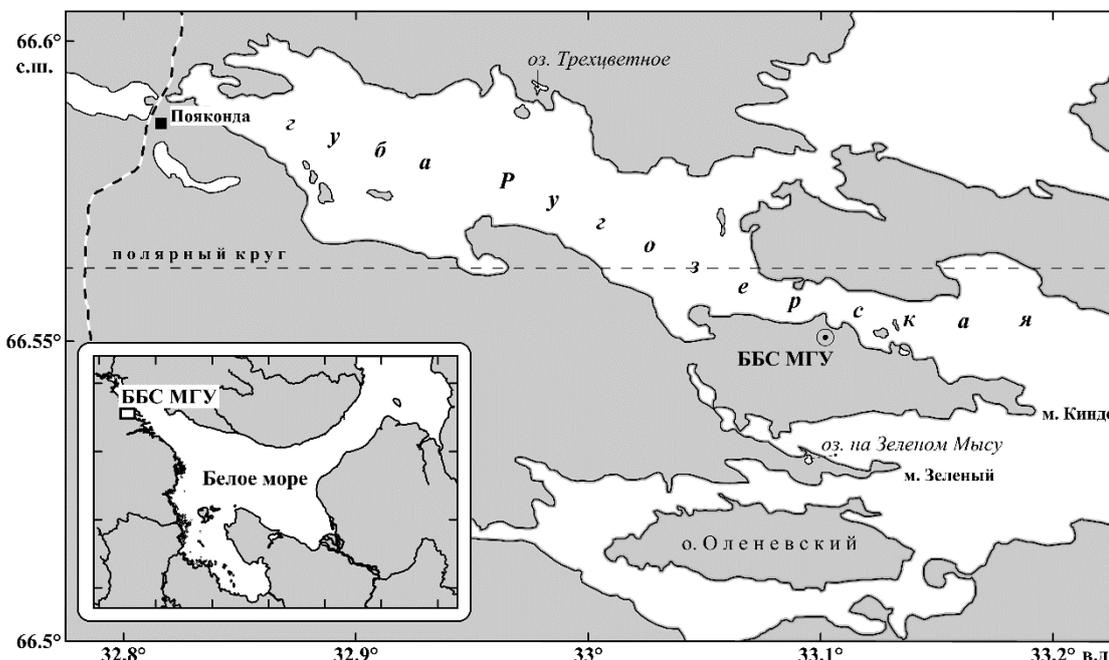


Рис. 1. Район исследований в Кандалакшском заливе Белого моря

Озеро на мысе Зелёный (66°31'49"N, 33°05'42"E) представляет раннюю стадию изоляции (Краснова и др., 2015): уровень воды в ней находится между уровнями полной и малой воды

в море. Из-за этого в лагуну в каждом приливном цикле поступает некоторое количество морской воды, но приливной цикл асимметричный – с коротким приливом и долгим отливом. В поверхностном слое, который свободно обменивается водой с морем, солёность воды такая же, как на прилегающей морской акватории. В придонном слое, из-за рассола, который образуется при каждом ледоставе, затем опускается на дно и сохраняется в ковше лагуны, солёность на несколько единиц выше. Различия в солёности поверхностного и придонных слоев достаточны для возникновения плотностной стратификации, которая сохраняется в течение всего года.

Озеро Трёхцветное (66°35'31"N, 32°58'40"E), напротив, представляет продвинутую стадию изоляции: его уровень поднят над уровнем моря настолько, что водоем больше не подвержен приливному явлению. Поверхностный 1,5 м слой воды пресный, но в ковше озера хранится реликтовая морская вода, сохранившаяся со времен, когда озеро было морским заливом. Из-за различий в плотности этих слоев в озере Трёхцветном сформировалась устойчивая меромиксия (Краснова, 2017; Savvichev et al., 2018). В обоих водоемах есть хемоклин, разделяющий аэробную и анаэробную зоны. В озере Трёхцветном он практически совпадает с галоклином. В озере на мысе Зелёный хемоклин располагается на 2–3 м ниже галоклина, и промежуток между хемоклином и галоклином заполнен соленой водой с аэробными условиями, изолированной от атмосферы, благодаря чему в летнее время там может накапливаться кислород, выработанный фитопланктоном в ходе фотосинтеза и достигать 200 % насыщения. В этом соленом высокоаэрированном слое иногда наблюдается погруженный максимум температуры, который благоприятствует развитию аэробной биоты (Краснова, Воронов, 2019а; Краснова, Воронов, 2019б).

Работы проводились с использованием малогабаритных плавсредств – вёсельной лодки и одноместного плотика. Позиционирование выполняли с привязкой к глубине дна по эхолоту Garmin Fishfinder 140. Отбор проб грунта произведен с помощью дночерпателя Экмана-Берджи с квадратным сечением корпуса (площадь захвата 15×15 см), из которого поршневой пластиковой трубкой диаметром 40 мм брали образец грунта с неповреждённой стратификацией. Толщина взятого слоя грунта составляла в 2018 году 0–1 см, в 2019 – 0–0,5 см. Навеска просматривалась целиком под микроскопом в камере Богорова. Подробно методика наблюдений описана в работе (Иванова, 2017).

Измерения концентрации растворённого кислорода и температуры в водной толще и непосредственно на границе «вода – донные осадки» осуществляли *in situ* с применением оксиметра HQ40d (Hach, США), снабжённого погружным блоком сенсоров на кабель-тросе – оптодом оксиметра и термистором, и оптическим оксиметром YSI ProODO (США).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Концентрация кислорода и другие параметры среды (окислительно-восстановительный потенциал (ОВП), солёность). Результаты измерения физико-химических параметров среды представлены в таблице 1. Помимо значений, полученных нами, приведены среднеемноголетние, а также минимальные и максимальные данные для этих горизонтов по результатам многолетнего мониторинга, (Krasnova et al., 2015; Lunina et al., 2019), что позволяет охарактеризовать степень постоянства или динамичности условий обитания организмов. Анализ архивных данных необходим для полной картины пространственного распределения бентоса по глубине, поскольку экстремобионтная фауна зачастую способна пережить кратковременную аноксию.

На графике (рис. 2) представлены результаты наших измерений концентрации кислорода на озере Зелёный мыс. По данным многолетнего мониторинга (2012–2019 гг.) расположение редокс-хемоклина в озере Трёхцветное, в течение годового цикла на протяжении всего периода исследований, фиксировалась на глубине 2,0 м, тогда как в аналогичном стратифицированном озере на мысе Зелёный редокс-хемоклин находился существенно глубже (в интервале 3,5–5,5 м) и его местоположение изменялось в разные

Таблица 1

Физико-химические параметры придонного слоя воды (концентрация кислорода, окислительно-восстановительный потенциал (ОВП) и солёность)

Параметр		Озеро Трёхцветное			Озеро на мысе Зелёный
		Глубина и время взятия проб			
		1,5 м март 2019	2 м сентябрь 2018	7,5 м сентябрь 2018	4,5 м март 2019
Кислород, мг/л	При отборе проб Min. /Ср./ Max.	<u>0,34</u> 0 / 6,4 / 28	<u>0,29</u> 0 / 0,19 / 3.6	<u>0,00</u> 0 / 0 / 0	<u>0,00</u> 0 / 4 / 14
ОВП, мВ	При отборе проб Min. /Ср./ Max.	<u>+250</u> -352/+124/+284	<u>-177</u> -351/-263/+13	<u>-377</u> -422/-388/-314	<u>-289</u> -283/32/+234
Солёность, ‰	При отборе проб Min. /Ср./ Max.	<u>0,4</u> 0/3/14	<u>4,2</u> 2/10/17	<u>21,9</u> 19,7/22,0/22,7	<u>27,5</u> 26,4/28/29,0

Примечание к таблице. Над чертой (выделены жирным) представлены собственные данные; под чертой – среднегодовые и экстремальные значения за период с лета 2012 по март 2019 года по (Krasnova et al., 2015; Lunina et al., 2019).

сезоны (Krasnova et al., 2015; Lunina et al., 2019), что согласуется с полученными нами результатами (табл. 1).

Соленость воды в озере Трёхцветное (по данным 2012–2019 гг.) в слое воды до глубины 1,5 м постепенно уменьшалась (от 14 единиц до нуля). Вода на этом горизонте обычно аэрирована, заморные условия были зарегистрированы только в самом начале наблюдений в 2012 году. После экстремального заброса воды из моря, вызванного необычно высокими подъемами после ветрового нагона, в этот период произошло частичное перемешивание озера, из-за чего сероводород из нижних слоев попал в поверхностную воду, а хемоклин на некоторое время поднялся до уровня 1 м. Такое нарушение стратификации, привело к тому, что на следующий год на этой глубине возник солоноватый слой с массовым развитием фитопланктона, который насытил воду кислородом до 261 % насыщения, что соответствовало 28 мг/л. В последующий период исследований с горизонта 1,5 м условия стали аэробными, а с 2 м началась анаэробная зона. Глубина 7,5 м (максимальная в этом водоеме) характеризовалась, как зона с постоянными анаэробными условиями, самой высокой солёностью (близкой к солёности в море) и резко отрицательным ОВП (Krasnova et al., 2015; Lunina et al., 2019).

В озере на мысе Зелёный положение хемоклина нестабильно, и на глубину 4,5 м может приходиться как аэробная, так и анаэробная его часть, а ОВП варьирует в пределах 0,5 V от – 283 до +234 mV, но чаще он отрицательный. Солёность здесь всегда высокая и превышает таковую на соседних морских акваториях из-за концентрирования рассола, который образуется при формировании льда (Krasnova et al., 2015; Lunina et al., 2019). Полученные нами результаты по концентрации кислорода, солёности воды и значениям окислительно-восстановительного потенциала укладываются в диапазон описанных архивных данных (табл. 1).

Мейобентос. Результаты полевых экспериментов по изучению физиологического состояния бентосной мейофауны в исследованных меромиктических лагунах Белого моря представлены в таблице 2.

В наиболее глубоком месте озера Трёхцветное (7,5 м), где концентрация сероводорода достигает максимальных значений (Losyuk, Kokryatskaya, Krasnova, 2015), в пробах грунта ни живых, ни неподвижных или разложившихся организмов обнаружено не было. На нижней границе хемоклина озера Трёхцветное, на изобате 2 м живой мейобентос также отсутствовал,

однако здесь были найдены неподвижные нематоды и коловратки. Напротив, у верхней кромки хемоклина озёр Трёхцветное и Зелёный мыс численность активного живого мейобентоса достигала 20 – 25 % от общего числа обнаруженных организмов. Все активные формы были представлены Metazoa: Nematoda, Chironomida, Oligochaeta.

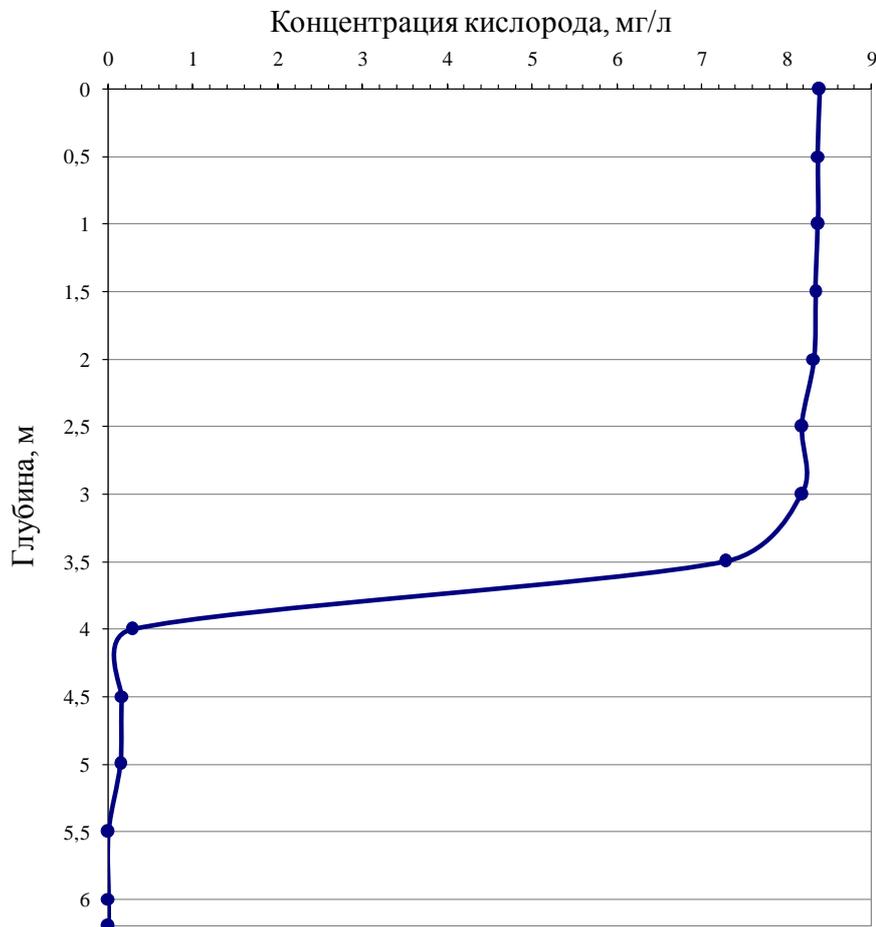


Рис. 2. Вертикальный профиль концентрации кислорода в озере на мысе Зелёный (сентябрь 2018 г.)

На глубине 1,5 м озера Трёхцветное большинство неподвижных форм составляли одноклеточные организмы – преимущественно Ciliophora. Однако определить физиологическое состояние бентосных инфузорий, большинство из которых здесь представлено семейством Tintinnidae, оказалось затруднительно. Известно, что инфузории этого семейства находятся в известковой раковине и увидеть признаки их активного движения сложно. Несмотря на это, хорошая сохранность раковин, так же как и их обилие, может косвенно указывать на массовое присутствие бентосных цилиат в пределах хемоклина (на глубине 1,5–2 м) озера Трёхцветное.

Другие неподвижные Metazoa, довольно разнообразно представленные в пробах, не проявляли двигательной активности, не реагировали на прикосновение препаровальной иглы или на свет и, с большой долей вероятности, могут быть отнесены к мёртвым организмам.

В озере на мысе Зелёный на глубине 4,5 м, где в марте 2019 года начиналась анаэробная зона, мейобентос был очень беден. В поверхностном слое осадка обнаружено всего несколько особей брюхоногих моллюсков, ракушковых рачков и инфузорий, все они были неподвижны. Живыми были только нематоды, которых в пробе тоже было очень мало.

Таблица 2

Визуальные наблюдения мейофауны в пробах сульфидных осадков меромиктических озёр-лагуна Белого моря (численность, экз./100 см²)

		Название озера, глубина и время взятия проб							
		Озеро Трёхцветное						Озеро на мысе Зеленый	
		1,5 м март 2019		2 м сентябрь 2018		7,5 м сентябрь 2018		4,5 м март 2019	
Слой	Таксон	Ж	Н	Ж	Н	Ж	Н	Ж	Н
0,0–0,5 см									
	Bivalvia (juvenile)	0	112	0	0	0	0	0	0
	Ciliata	0	1448	0	0	0	0	0	8
	Chironomida	8	0	0	0	0	0	0	0
	Gastropoda	0	0	0	0	0	0	0	8
	Nematoda	304	0	0	0	0	0	8	0
	Oligochaeta	72	0	0	0	0	0	0	0
	Ostracoda	0	0	0	0	0	0	0	8
0–1,0 см		0	0	0	0	0	0	0	0
	Bivalvia juv.	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ciliata	0	0	0	8	0	0	0	0
	Сpironomida	0	0	0	0	0	0	0	0
	Nematoda	0	0	0	24	0	0	0	0
	Oligochaeta	0	0	0	0	0	0	0	0
	Rotatoria	0	0	0	8	0	0	0	0
Всего, экз./0,01м ²		384	1560	0	40	0	0	8	24
Всего, %		20	80	0	100	0	0	25	75

Примечание к таблице: Ж – живые, активно движущиеся организмы; Н – неподвижные организмы/

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в сульфидных осадках двух меромиктических водоемов, частично изолированных от Белого моря, у верхней границы хемоклина (озеро Трёхцветное – 1,5 м, озеро на мысе Зелёный – 4,5 м) все обнаруженные в пробах нематоды, хиромониды и олигохеты находились в активно-подвижном состоянии. Вместе с тем, у нижней кромки хемоклина (озеро Трёхцветное – 2 м) все обнаруженные нематоды и коловратки были неподвижны и не проявляли признаков активной жизнедеятельности, что с большой вероятностью, позволяет их отнести к мёртвой компоненте сообщества. На дне озера Трёхцветное на глубине 7,5 м в условиях аноксии мейобентос не обнаружен.

Массовое обнаружение неподвижных бентосных инфузорий у верхней кромки хемоклина озера Трёхцветное не позволяет однозначно заключить об их физиологическом состоянии.

Поскольку озёра-лагуны являются экотопом с высокоградиентными пространственно-временными условиями, агрессивными для обитающих там гидробионтов, активные живые бентосные организмы способны проникать не глубже верхней границы хемоклина.

Основным лимитирующим фактором, ограничивающим проникновение оксибионтного зообентоса в редокс-зону изученных меромиктических беломорских лагун, является, очевидно, наблюдаемое здесь сочетанное действие острого дефицита растворённого кислорода с одновременным сероводородным заражением водной среды и бентали. С другой стороны, наоборот, к позитивным свойствам данного местообитания можно отнести высокое содержание потенциальных пищевых ресурсов (биомасса фото- и хемолитотрофных микроорганизмов), а также, возможно, наблюдаемый ранее в хемоклине слой с повышенной температурой среды. Примечательно, что последний феномен, отмечаемый в большинстве стратифицированных озёр-лагун Заполярья, наиболее развит именно в зимний период.

Благодарности. Авторы глубоко признательны В. П. Чекалову (ИнБЮМ, Севастополь) за помощь при проведении полевых работ, а также администрации и штату Беломорской биологической станции МГУ им. М. В. Ломоносова за возможность проведения полевых работ на ее базе.

Исследование проведено по теме государственного задания ФИЦ ИнБЮМ «Функциональные, метаболические и токсикологические аспекты существования гидробионтов и их популяций в биотопах с различным физико-химическим режимом», номер государственной регистрации НИОКТР АААА-А18-118021490093-4, а также поддержаны РФФИ (грант 19-05-00377).

Список литературы

- Гулин М. Б. К изучению роли гипоксии и аноксии в жизни морских эукариот // Морской экологический журнал. – 2012. – Т. 11, Вып. 1. – С. 1–11.
- Гулин М. Б. Батиметрическое распределение живых активных форм зообентоса в хемоклине Чёрного моря // Морской экологический журнал. – 2013. – Т. 12, Вып. 1. – С. 5–17.
- Заика, В. Е., Сергеева, Н. Г. Вертикальное распределение глубоководных инфузорий в Чёрном море // Морской экологический журнал. – 2009. – Т. 8, Вып. 1. – С. 32–36.
- Иванова Е. А. Экология мейобентоса метановых сипов Чёрного моря: фаунистические характеристики и результаты наблюдений физиологического состояния методом прямого микроскопирования // Экосистемы. – 2017. – Вып. 10. – С. 28–34.
- Краснова Е. Д., Воронов Д. А., Демиденко Н. А., Кокрятская Н. М., Пантюлин А. Н., Рогатых Т. А., Самсонов Т. Е., Фролова Н. Л. К инвентаризации реликтовых водоемов, отделяющихся от Белого моря // Комплексные исследования Бабьего моря, полуизолированной беломорской лагуны: геология, гидрология, биота – изменения на фоне трансгрессии берегов // Труды Беломорской биостанции МГУ. – 2016. – Т. 12. – С. 211–241.
- Краснова Е. Д., Воронов Д. А. Заглубленный максимум температуры в озерах с устойчивой стратификацией на побережье Белого моря // Трешниковские чтения – 2019: Современная географическая картина мира и технологии географического образования: Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Ульяновск: УлГПУ им. И. Н. Ульянова, 2019а. – С. 145–148.
- Краснова Е. Д., Воронов Д. А. Как формируется заглубленный максимум температуры в беломорских меромиктических водоёмах? // Геология морей и океанов: Материалы XXIII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. 3. – Москва: ИОРАН, 2019б. – С. 160–164.
- Краснова Е. Д. Водоёмы, отделяющиеся от моря: разнообразие и типовая структура // Изучение, рациональное использование и охрана природных ресурсов Белого моря. – Санкт-Петербург: Зоологический институт РАН, 2017. – С. 115–118.
- Краснова Е. Д., Воронов Д. А., Мардашова М. В., Пантюлин А. Н., Фролова Н. Л. Многолетняя изменчивость физико-химических параметров в частично изолированной лагуне на Зеленом мысу (Карельский берег Белого моря) // Сборник тезисов IV Международной научно-практической конференции Морские исследования и образование: MARESEDU-2015. – Москва, 2015. – С. 451–454.
- Мокиевский В. О. Экология морского мейобентоса. – М.: Т-во научных изданий КМК, 2009. – 286 с.
- Стунжас П. А., Гулин М. Б., Зацепин А. Г., Иванова Е. А. О возможности присутствия кислорода в верхнем слое осадков сероводородной зоны Черного моря // Океанология. – 2019. – Т. 59, № 1. – С. 166–169. DOI: 10.31857/S0030-1574591166-169
- Giere O. Meiobenthology – the Microscopic Motile Fauna of Aquatic Sediments, 2nd ed. – Berlin, Heidelberg: Springer – Verlag, 2009. – 527 p.

Krasnova E. D., Kharcheva A. V., Milyutina I. A., Voronov D. A., Patsaeva S. V. Study of microbial communities in redox zone of meromictic lakes isolated from the White Sea using spectral and molecular methods // Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom. – 2015. – Vol. 95, N 8. – P. 1579–1590. DOI:10.1017/S0025315415000582

Losyuk G., Kokryatskaya N., Krasnova E. Formation of hydrogen sulfide in isolated basins at the Karelian of the White Sea coast // EARSeL eProceedings. – 2015. – Vol. 14. – P. 49–54. DOI: 10.12760/02-2015-1-07

Lunina O. N., Savvichev A. S., Babenko V. V., Boldyreva D. I., Kuznetsov B. B., Kolganova T. V., Krasnova E. D., Kokryatskaya N. M., Veslopolova E. F., Voronov D. A., Demidenko N. A., Letarova M. A., Letarov A. V., Gorlenko V. M. Seasonal variations in the structure of an anoxygenic phototrophic bacterial community from the meromictic lake Trekhtsvetnoe (Kandalaksha Bay, White Sea) // Microbiology. – 2019. – Vol. 88, N 1. – P. 100–114. DOI: 10.1134/S002626171901004

Savvichev A. S., Babenko V. V., Lunina O. N., Letarova M. A., Boldyreva D. I., Veslopolova E. F., Demidenko N. A., Kokryatskaya N. M., Krasnova E. D., Gaisin V. A., Kostryukova E. S., Gorlenko V. M., Letarov A. V. Sharp water column stratification with an extremely dense microbial population in a small meromictic lake, Trekhtsvetnoe // Environmental Microbiology. – 2018. – Vol. 20, Iss. 10. – P. 3784–3797. DOI: 10.1111/1462-2920.1438

Savvichev A. S., Babenko V. V., Lunina O. N., Letarova M. A., Boldyreva D. I., Veslopolova E. F., Demidenko N. A., Kokryatskaya N. M., Krasnova E. D., Gaisin V. A., Kostryukova E. S., Gorlenko V. M., and Letarov A. V. Sharp water column stratification with an extremely dense microbial population in a small meromictic lake, Trekhtsvetnoe // Environmental Microbiology. – 2018. – Vol. 20, Iss. 10. – P. 3784–3797. DOI: 10.1111/1462-2920.14384

Ivanova E. A., Krasnova E. D., Voronov D. A., Timofeev V. A., Gulin M. B. The results of the functional state of the meiobenthic fauna research in high-sulfide biotopes of coastal lakes-lagoons of the Kandalaksha Bay (White Sea) // Ekosistemy. 2021. Iss. 26. P. 43–50.

The article presents the results of the studies of physiological state of meiofauna taken from the bottom sediments of two meromictic lakes which had different stages of geological isolation from the White Sea. It was concluded that active living benthic organisms of these high-sulfide biotopes could penetrate no deeper than the upper boundary of the chemocline. Organisms living at the depth of the upper redox-chemocline boundary (nematodes, chironomids and oligochaetes) in the lakes-lagoons of the Kandalaksha Bay (White sea) have high locomotor activity characteristics. Nematodes and rotifers were found on the lower edge of the chemocline, but they were motionless and did not show signs of active life. Therefore, they, with a high degree of probability, could be attributed to the dead component of the community. No meiobenthos was found in the anoxic zone at the bottom of the sulfide lake at a depth of 7.5 m. Finding abundant motionless benthic ciliates, belonging to the family Tintinnidae at the upper edge of the chemocline of Lake Trekhtsvetnoe does not allow researchers to make unambiguous conclusion about their physiological state. The main factor limiting the penetration of zoobenthic oxybionts into the redox zone of the studied meromictic White Sea lagoons is obviously the combined effect of deficiency of dissolved oxygen with simultaneous contamination of the aquatic environment and benthos with hydrogen sulfide. On the contrary, the positive properties of this habitat can be attributed to the high content of potential food resources (biomass of photo- and chemolithotrophic microorganisms), and, probably, the previously observed layer of the chemocline with an increased temperature. It is noteworthy that the latter phenomenon, which is observed in most of the stratified lakes-lagoons of the polar region, is most developed in the winter period.

Key words: meiobenthos, hypoxia, hydrogen sulfide contamination, proportion of living and dead organisms, meromictic lagoons, White Sea.

Поступила в редакцию 28.12.20

Принята к печати 05.03.21

Донная фауна юго-западной части Азовского моря: трансформация биоценоза макрозообентоса в начале XXI века

Ревков Н. К., Болтачева Н. А.

ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН»
г. Севастополь, Российская Федерация
nrevkov@yandex.ru, nboltacheva@mail.ru

Более 80 лет, с момента первого количественного описания в 1930-е годы, одним из основных биоценозов, занимавших самые обширные площади и преобладающим в количественном развитии, в бентосе Азовского моря являлся биоценоз *Cerastoderma*. Однако, проникновение в Азовском море в 1989 году недавнего дальнеморского вселенца в черноморский бассейн – двустворчатого моллюска *Anadara kagoshimensis* – определило начало последующих биоценологических изменений. По результатам анализа материалов, полученных в 2016–2017 годы в 84, 86, 90, 96, 100 рейсах НИС «Профессор Водяницкий», на обширном юго-западном участке Азовского моря было отмечено формирование единого биоценоза *Anadara*, в который ранее доминировавшие аборигенные виды *Cerastoderma glaucum* и *Abra segmentum* вошли на правах субдоминантов. Настоящая работа является продолжением анализа этих данных. Её цель – оценка особенностей трансформации основного аборигенного биоценоза Азовского моря – *Cerastoderma* в биоценоз вида-вселенца *Anadara*. В работе использованы материалы по трём временным периодам, соответствующим разным уровням солёности Азовского моря: 1930-е (9,3–11,1 ‰), 1950-е (11,6–12,1 ‰) и 2016–2017 годы (13,5–14,0 ‰). Результаты анализа показали высокий уровень сходства (60 %) состава ядер аборигенных биоценозов *Abra* и *Cerastoderma* и нового биоценоза *Anadara*. Трансформация аборигенных биоценозов юго-западного участка бассейна в биоценоз *Anadara* стала результатом как успешной экспансии *A. kagoshimensis*, так и снижения количественного развития аборигенного комплекса видов в условиях роста солёности бассейна. В 2016–2017 годы за счёт *A. kagoshimensis* отмечено «компенсаторное» увеличение количественного развития зообентоса, превышающее таковое 1930-х годов. В биоценозе *Cerastoderma* в период с 1930-х по 1950-е годы количество видов в группах Mollusca, Polychaeta и «Прочие виды» – существенно не изменилось, однако у Crustacea сократилось более чем в 2 раза. С 1950-х (биоценоз *Cerastoderma*) по 2016–2017-е годы (биоценоз *Anadara*) произошло близкое к двукратному увеличению количества видов в группах Mollusca, Polychaeta и «Прочие виды» при незначительном увеличении количества видов Crustacea.

Ключевые слова: макрозообентос, виды-вселенцы, многолетние изменения, биоценоз, *Cerastoderma glaucum*, *Anadara kagoshimensis*, Азовское море.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение структурной организации (биоценозов) донной фауны Азовского моря берёт начало со ставшей уже классической работы В. П. Воробьева (1949) «Бентос Азовского моря». На основе материала, собранного в период с 1933 по 1939 год на 1,5 тыс. станциях, автор провёл детальный анализ состава и биоценологической организации зообентоса Азовского моря. В выделенных им пяти фаунистических районах бассейна (восточная часть Таганрогского залива, западная часть Таганрогского залива, собственно Азовское море, Утлюкский лиман, Сиваш и солёные кубанские лиманы) было зарегистрировано 136 видов макрозообентоса, входящих в состав 15 олигомикстных (сформированы небольшим числом видов) биоценозов (Воробьев, 1949). Донная фауна собственно Азовского моря была представлена семью основными биоценозами – *Hydrobia*, *Abra* (*Syndesmia*), *Cerastoderma* (*Cardium*), *Mytilaster*, *Amphibalanus*, *Alitta* (*Nereis*), *Lentidium* (*Corbulomia*) – из которых только два (*Cerastoderma* и *Abra*) являлись наиболее распространёнными и занимали соответственно 32 и 32 % (весной) и 38 и 28 % (осенью) площади всех биоценозов. Коэффициент общности видов в них был одним из самых высоких среди всех биоценозов собственно Азовского моря (61), уступая только аналогичному коэффициенту биоценозов

Nephtys и *Amphibalanus* (73). В биоценозах *Abra* и *Cerastoderma* 1930-х годов было зарегистрировано 44 вида – 32 % от их общего количества в бентосе Азовского моря.

Последующие исследования в 1950–1957 годы показали наличие в бентосе Азовского моря 20 биоценозов, из которых 14 были отмечены в собственно Азовском море (Старк, 1960). Они имели динамические границы и различались степенью своего развития (вплоть до отсутствия в бентосе региона) в различные сезоны и годы. Постоянно регистрируемыми в различные сезоны 1950-х годов были только 10 биоценозов – двустворчатых моллюсков *Cerastoderma*, *Abra*, *Lentidium*, *Mytilaster*, гастроподы *Hydrobia*, усоногого рака *Amphibalanus*, полихет *Nephtys*, *Alitta (Nereis)* и не идентифицированных до вида представителей Oligochaeta и Ostracoda. При этом биоценоз *Cerastoderma* был представлен 30 видами макрозообентоса и во все периоды исследований занимал самые большие площади в собственно Азовском море (Старк, 1960; Некрасова, 1977). Указанное превалирование биоценоза *Cerastoderma* стало основанием к заключению о возможности «рассматривать весь бентос Азовского моря (без Таганрогского залива), как единый биоценоз *Cardium* (совр. *Cerastoderma*), а отдельные единично встречающиеся биоценозы, как его модификации» (Старк, 1960, стр. 171).

Относительно стабильное, хотя и в разных границах, существование основных биоценозов Азовского моря – *Cerastoderma* и *Abra* – подтверждается и по результатам более поздних бентосных исследований, выполненных в 1990-е (Золотарев и др., 1995; Студеникина и др., 1998; Любин, 1999; Фроленко, 2000) и 2000-е годы (Набоженко и др., 2006; Терентьев, 2008).

Единая картина чередования биоценозов, состоящих из определённого набора ценозообразующих аборигенных видов, была нарушена после появления в Азовском море дальнеморских вселенцев: в середине 1970-х – *Mya arenaria* (Савчук, 1980), а в конце 1980-х – *Anadara kagoshimensis* (Чихачев и др., 1994). Их доминирование в бентосе (с формированием собственного биоценоза) впервые было отмечено: *M. arenaria* – в 1978 году в районе Бердянской косы (Савчук, 1980), *A. kagoshimensis* – в 1992 году в районе Казантипского залива (Фроленко, Двинянинова, 1998). Оба вселенца оказались конкурентоспособными, «потеснив» биоценозы аборигенных видов, однако, на период 1989–1995 годов «не внесли заметных устойчивых изменений в структуру и распределение донных сообществ Азовского моря, обогатив лишь её фауну» (Матишов и др., 2008). Тем не менее, в отношении *A. kagoshimensis*, ситуация в последствии начала меняться. Так, если в 1997 году (Фроленко, Двинянинова, 1998) и 2006 году (Терентьев, 2008), на южном (включая юго-западный) участке моря, происходила сначала устойчивая регистрация биоценоза *Anadara* наряду с биоценозами аборигенных видов, то уже к 2016–2017 годам было отмечено стабильное (двухлетнее и во все сезоны) монодоминирование *A. kagoshimensis* в бентосе обширного участка юго-западного сектора Азовского моря (Болтачева и др., 2021). В сформировавшемся здесь биоценозе *Anadara* ранее основные ценозообразующие виды – церастодерма и абра – выступили в ранге субдоминантов, общий состав макрофауны включал 45 таксонов видовой и 6 неидентифицированных до вида групп высокого ранга.

Целью настоящей работы была оценка особенностей трансформации основного аборигенного биоценоза Азовского моря – *Cerastoderma* в биоценоз вида-вселенца – *Anadara*.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Данная работа является продолжением анализа материалов по донной фауне юго-западного участка акватории Азовского моря, полученных в 2016–2017 годы в ходе комплексных гидробиологических экспедиций (84, 86, 90, 96 и 100 рейсы) на НИС «Профессор Водяницкий». В первом сообщении (Болтачева и др., 2021) выполнено описание современного состояния донной макрофауны указанного региона. Для реализации цели в настоящей работе за основу взяты три периода, по которым имеются матрицы данных, позволяющих выполнить сравнительные расчёты на уровне сопоставления одноимённых (или параллельных) биоценозов. Это материалы 1930-х (Воробьев, 1949), 1950-х (Старк, 1960) и 2016–2017 годов (Болтачева и др., 2021). Согласно картографическим данным,

представленным в работах этих лет, основными биоценозами на юго-западном участке Азовского моря (полигоне наших исследований) являлись биоценозы *Cerastoderma* и *Abra* (1930-е гг.), *Cerastoderma* (1950-е гг.) и *Anadara* (2016–2017 гг.).

Биоценозы выделяли по доминирующему по биомассе виду. Кроме этого при сравнении материалов разных лет использованы два варианта оценки количественного развития таксонов:

1) на основе «индекса плотности» (ИП) (Воробьев, 1949);

2) на основе «индекса функционального обилия» (ИФО), являющегося оценочным эквивалентом энергетической роли гидробионтов (Мальцев, 1990).

Приведённые выше индексы использованы в выражениях:

$$\text{ИП} = (V_i \times p_i)^{1/2} \quad \text{и} \quad \text{ИФО} = N_i^{0.25} \times V_i^{0.75},$$

где: V_i , N_i и p_i – соответственно биомасса (г/м²); численность (экз./м²) и встречаемость (%) таксона «i».

Для многомерного анализа в матрицы включены наиболее значимые виды для соответствующих периодов времени (Воробьев, 1949; Старк, 1960; Болтачева и др., 2021), формирующие, по определению В. П. Воробьева (1949), «ядра» соответствующих биоценозов бентоса. Для основного биоценоза бассейна – *Cerastoderma* – использованы данные по следующим годам и сезонам (месяцам): 1930-годы (весна, осень (вне заморной зоны и в заморной зоне)), 1950 год (июль), 1951 (апрель, июль, октябрь), 1952 (июль), 1953 (апрель, июль, октябрь), 1954 (апрель, июль, октябрь), 1955 (январь, апрель, июль, октябрь), 1956 (апрель, июль, октябрь), 1957 (апрель, июль, октябрь), 2016 (октябрь, апрель, июнь), 2017 (июль, декабрь). Дополнительно в исходную матрицу включены имеющиеся данные по биоценозу *Abra* для 1930-х годов (весна и осень).

Выделение относительно однородных группировок бентоса выполнено по результатам 2-D ординации (MDS анализ) log-трансформированной матрицы данных в пакете программ PRIMER v5 (Clarke, 1993; Clarke, Gorley, 2001). В качестве меры сходства станций использован коэффициент сходства Брэя-Куртиса. Определение ценозообразующих видов бентоса выполнено по нетрансформированным значениям ИФО на основе их вклада во внутрикмплексное сходство (SIMPER анализ пакета PRIMER v5) (Clarke, Gorley, 2001).

При сравнении материалов разных лет по ИП использовано их подразделение на весенний и осенний (1930-е и 2016 гг.) и летний (1956 и 2017 гг.) периоды исследований.

К руководящим видам биоценоза («константам» по В. П. Воробьеву) отнесены виды с встречаемостью 50 и более процентов, к характерным («второстепенным») – с встречаемостью 25–50 %, к редким («случайным») – с встречаемостью менее 25 %. Индекс Чекановского-Сьеренсена (сходство фаун) вычисляли по формуле:

$$2a/(b+c),$$

где: a – число общих видов; b и c – число видов в сравниваемых списках.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Таксономический состав. Сопоставление видового богатства макрозообентоса в одном из основных биоценозов Азовского моря – биоценозе *Cerastoderma* на обозначенных промежутках времени (1930-е, 1950-е и 2016–2017 гг.) показывает следующее. В период с 1930-х по 1950-е годы основное количество видов в таксонах Mollusca, Polychaeta и «Прочие виды» – не претерпело существенных изменений, при их значительном сокращении у Crustacea (более чем в 2 раза) (табл. 1). С 1950-х по 2016–2017 годы произошло близкое к двукратному увеличение представленности Mollusca, Polychaeta и «Прочие виды», количество видов Crustacea осталось приблизительно на том же уровне. Кроме данных, представленных в таблице 1, укажем также на аналогичные низкие показатели развития

ракообразных в последние годы в южной части Азовского моря, представленные в работах А.С. Терентьева (2008) – 4 вида, Н.М. Литвиненко и О.В. Евченко (2006) – 12 видов.

Таблица 1

Количество видов основных таксономических групп в Азовском море по годам

Таксон	1930-е ¹ Все биоценозы	1930-е ¹ Биоценозы			1956 ² Биоценоз <i>Cerastoderma</i>	2015 ³ Биоценоз <i>Anadara</i>	2016–2017 ⁴ (наши данные) Биоценоз <i>Anadara</i>
		<i>Abra</i>	<i>Cerastoderma</i>	суммарно для <i>Abra</i> и <i>Cerastoderma</i>			
Mollusca	23	6	6	7	7	11	12
Polychaeta	34	7	8	8	8	12	15
Crustacea	60	14	22	23	10	8	13
Other	19	3	6	6	5	5	10
Всего	136	30	42	44	30	36	50

Примечание к таблице. ¹ – по В. П. Воробьеву (1949), ² – по И. Н. Старк (1960), ³ – по Л. Н. Фроленко и О. С. Мальцевой (2017), ⁴ – по Н. А. Болтачевой с соавторами (2021).

Типизация структуры макрозообентоса по встречаемости видов в двух крайних временных точках нашего исследования (1930-е, биоценоз *Cerastoderma* и 2016–2017 гг., биоценоз *Anadara*) показала их сходство (рис. 1). При совпадении доли руководящих видов, и неизменно высокой доле редких видов, в современный период отмечен более высокий уровень относительной представленности таксонов, относимых к группе характерных видов.



Рис. 1. Структура донных биоценозов Азовского моря – *Anadara* (А) в 2016–2017 годы (наши данные) и *Cerastoderma* (В) в 1934–1937 годы (Воробьев, 1949) по встречаемости видов

Биоценотическое сходство зообентоса на основе ИФО. Бентос интересующего нас юго-западного участка акватории Азовского моря в разные периоды исследования представлен тремя основными биоценозами – *Cerastoderma*, *Abra* и *Anadara*. При всём разнообразии названий, основанных на доминирующих позициях одного из видов, список основных видов («ядер») биоценозов, приводимый для 1930-х (Воробьев, 1949), 1950-х (Старк, 1960) и 2016–2017 годов (Болтачева и др., 2021), весьма сходен. В нём представлены моллюски *Cerastoderma glaucum*, *Abra segmentum*, *Hydrobia acuta*, *Mytilaster lineatus*, полихеты *Alitta succinea* и *Nephtys hombergii* и усоногий рак *Amphibalanus improvisus*. Это относительное однообразие доминирующих видов дало высокий уровень биоценотического сходства (более 50 %) (рис. 2). Вне зависимости от сезона съёмки и длины временного ряда по годам, все данные разделились на 3 кластера, представленные десятилетними периодами исследования.

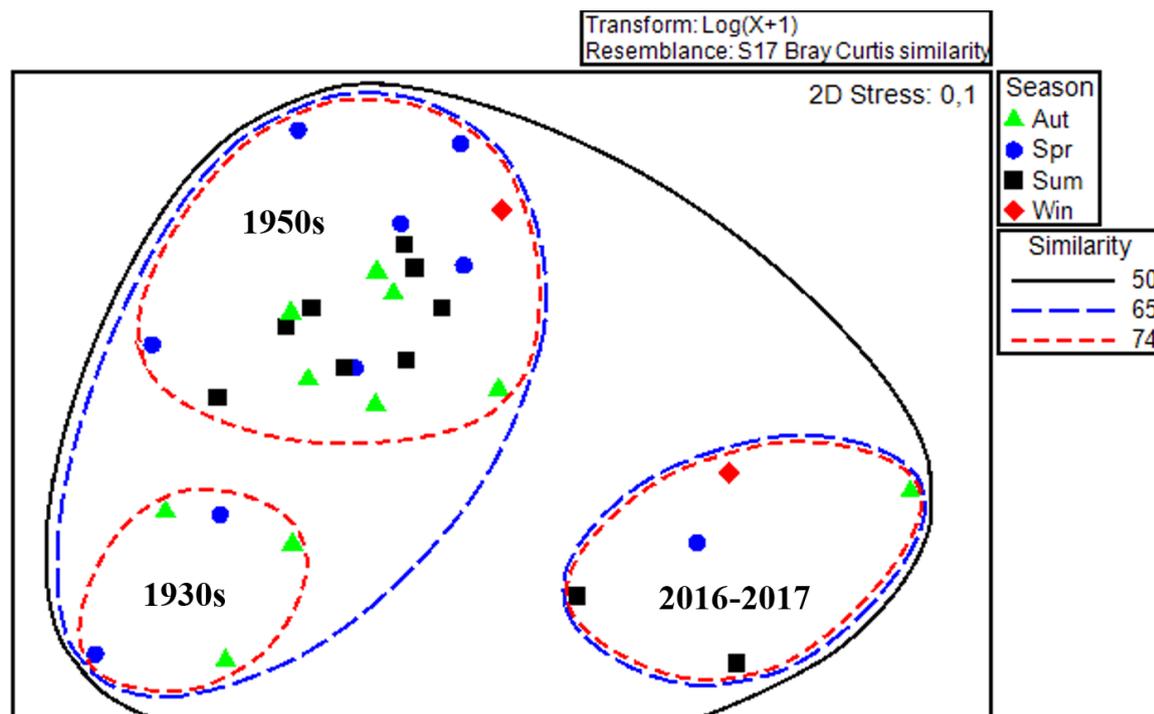


Рис. 2. 2-D ординация данных, полученных в разные сезоны 1930-х (из Воробьев, 1949), 1950-х (из Старк, 1960) и 2016–2017 годов (наши данные, осреднённые по сезонам)

В 1930-е годы в биоценозе *Cerastoderma* основными комплексообразующими видами были *C. glaucum* и *A. segmentum*, на долю которых суммарно приходилось более 90 % вклада во внутрикомплексное сходство (табл. 2). В 1950-е годы, на фоне в целом сохранившегося уровня развития церастодермы, абра теряет свои позиции кодоминанта и переходит в группу видов, в равной степени претендующих на вторую (но далёкую от первой) позицию лидерства. В 2010-е годы, на фоне появившегося нового лидера в бентосе региона и в целом Азовского моря – *A. kagoshimensis* – позиции как церастодермы, так и абры выглядят ещё более скромно (см. табл. 2).

Многолетняя динамика ИФО. Для упрощения изложения материала при обозначении объекта исследования на временном интервале 1930-е – 2010–2017 годы – будет использован термин биоценоз *Anadara/Cerastoderma* (биоценоз *Anadara* и его «исторический» предшественник биоценоз *Cerastoderma*).

В многолетней динамике биоценоза *Anadara/Cerastoderma* отмечен отрицательный тренд количественного развития основного комплексообразующего вида *C. glaucum* по ИФО – его последовательное пропорциональное (в 1,8 раз) снижение с 484 (1930-е) до 276 (1950-е) и 156 (2016–2017 гг.) (см. табл. 2). Многолетняя динамика второго по значимости комплексообразующего вида в биоценозе *Cerastoderma* 1930-х годов – *A. segmentum* – сводится к пятикратному снижению её ИФО со 194 (1930-е) до 36 (1950-е) и дальнейшему фактическому сохранению достигнутого уровня ИФО – 40 (2016–2017 гг.). Если судить по сумме ИФО первых 10 наиболее значимых видов, то в эти же годы наблюдалось сначала снижение количественного развития бентоса: с 767 (1930-е) до 456 (1950-е), а после успешного освоения анадарой Азовского моря – повышение до 1020 (2016–2017) (см. табл. 2). Это происходило, в основном, за счёт комплексообразующих видов моллюсков. Без их учёта сумма ИФО остальных видов изменялась с 89 (1930-е) до 143 (1950-е) и 114 (2016–2017). Полученные результаты указывают, что в одном из ведущих биоценозов Азовского моря – биоценозе *Anadara/Cerastoderma* в 1950-е годы наблюдался наиболее низкий (в сравнении с 1930-ми и 2016–2017 гг.) уровень количественного развития бентоса.

Наиболее благоприятными годами развития *A. segmentum* и *Alitta succinea* в биоценозе *Anadara/Cerastoderma* были 1930-е, когда ИФО данных видов превышал его аналогичные значения в последующие периоды исследования соответственно в 5 и 2–3 раза. Динамика развития *A. improvisus* в целом повторяет таковую в биоценозе в целом: снижение значения ИФО в 1950-е и достижение максимума – в 2016–2017 годы. Наиболее стабильный уровень значений ИФО на анализируемой шкале времени отмечен у *Hydrobia acuta*.

Таблица 2

Ранжированный (по вкладу во внутрикомплексное сходство) список основных видов в донных биоценозах *Cerastoderma* (1930-е и 1950-е гг.) и *Anadara* (2016–2017 гг.) в разные периоды исследования

Виды	Ср. ИФО	$\bar{\alpha}_i$	$\bar{\alpha}_i/SD(\bar{\alpha}_i)$	$\bar{\alpha}_i$ %	Cum. $\bar{\alpha}_i$ %
1930-е годы. Среднее сходство: 51,84					
<i>Cerastoderma glaucum</i>	484,33	36,90	5,61	62,79	62,79
<i>Abra segmentum</i>	194,18	16,43	1,28	27,96	90,74
<i>Hydrobia acuta</i>	40,76	2,33	4,67	3,96	94,71
<i>Amphibalanus improvisus</i>	22,61	1,09	1,77	1,85	96,56
<i>Alitta succinea</i>	12,32	1,08	1,47	1,83	98,39
<i>Nephtys hombergii</i>	3,51	0,44	5,30	0,75	99,14
<i>Lentidium mediterraneum</i>	2,93	0,22	1,52	0,37	99,51
Ostracoda	2,89	0,18	2,64	0,30	99,81
<i>Brachynotus sexdentatus</i>	2,18	0,07	2,34	0,11	99,92
<i>Ampelisca diadema</i>	1,35	0,03	0,58	0,06	99,98
<i>Mytilaster lineatus</i>	7,26	0,01	0,58	0,02	100,00
1950-е годы. Среднее сходство: 61,75					
<i>Cerastoderma glaucum</i>	276,29	44,21	3,12	70,96	70,96
<i>Hydrobia acuta</i>	35,99	3,57	1,20	5,74	76,69
Ostracoda	23,48	3,34	1,23	5,35	82,05
<i>Amphibalanus improvisus</i>	17,80	2,84	1,72	4,55	86,60
<i>Abra segmentum</i>	36,34	2,19	0,71	3,51	90,11
<i>Mytilaster lineatus</i>	15,64	2,12	1,12	3,41	93,52
<i>Lentidium mediterraneum</i>	32,65	1,42	0,52	2,28	95,80
<i>Nephtys hombergii</i>	8,43	1,34	2,99	2,15	97,94
Oligochaeta	5,33	0,80	1,18	1,28	99,22
<i>Alitta succinea</i>	3,63	0,48	1,42	0,78	100,00
2010-е годы. Среднее сходство: 67,49					
<i>Anadara kagoshimensis</i>	711,25	38,52	1,20	75,14	75,14
<i>Cerastoderma glaucum</i>	156,47	6,78	0,78	13,23	88,37
<i>Amphibalanus improvisus</i>	25,20	1,50	1,32	2,92	91,29
<i>Abra segmentum</i>	39,51	1,34	0,94	2,62	93,91
<i>Nephtys hombergii</i>	14,22	1,16	5,22	2,27	96,17
Ostracoda	23,27	1,07	1,17	2,08	98,25
<i>Alitta succinea</i>	6,26	0,45	2,27	0,88	99,13
<i>Hydrobia acuta</i>	38,43	0,24	0,41	0,46	99,60
Oligochaeta	2,43	0,12	0,95	0,23	99,82
<i>Mytilaster lineatus</i>	2,80	0,09	1,38	0,17	99,99
<i>Mya arenaria</i>	1,64	0,01	0,26	0,01	100,00

Примечание к таблице. Ср. ИФО – среднее значение индекса функционального обилия; $\bar{\alpha}$ – абсолютный и $\bar{\alpha}_i$ % – относительный вклады вида «i» в среднее сходство Брэя–Куртиса внутри комплекса; SD – стандартное отклонение.

Многолетняя динамика ИП. Приводимый в работах В. П. Воробьева (1949) и И. Н. Старк (1960) табличный и графический материалы позволили сопоставить количественное развитие биоценоза *Anadara/Cerastoderma* на основе ИП: 1930-е и 2016 годы в весенний и осенний периоды, 1956 и 2017 годы – в летний период.

Весной 1936 года в биоценозе *Cerastoderma* абсолютным доминантом по ИП была *C. glaucum*, субдоминантом – *Abra segmentum* (рис. 3). Высокие показатели ИП также были отмечены у полихеты *Alitta succinea* и усоного рака *A. improvisus*. В число второстепенных видов входили моллюски *H. acuta*, *Mytilaster lineatus* и полихета *N. hombergii* (см. рис. 3). В 2016 году руководящим видом в сообществе стала *A. kagoshimensis*, *C. glaucum* перешла в положение субдоминанта с ИП=124 (в 1936 г. ИП=164). На третьем месте – *A. improvisus* с ИП=48 (в 1936 г. ИП=13), что, видимо, связано с увеличением количества субстрата (раковины самой *A. kagoshimensis*) для прикрепления *A. improvisus*. *A. segmentum* стало меньше, а у полихет *A. succinea* и *N. hombergii* высокие показатели индекса плотности сохранились. В число второстепенных форм вошел вселенец *Mya arenaria*. *H. acuta* и *M. lineatus*, не исчезли, но перешли в число второстепенных видов; их индекс плотности снизился с 12 и 5, соответственно, до 5 и 3. Таким образом, структура весеннего биоценоза *Anadara* в 2016 году отличалась от таковой биоценоза *Cerastoderma* 1930-х годов только наличием *A. kagoshimensis*, все «постоянные» и «второстепенные» виды не только присутствовали, но их количественные соотношения и последовательность расположения на кривых доминирования-разнообразия были сходными.

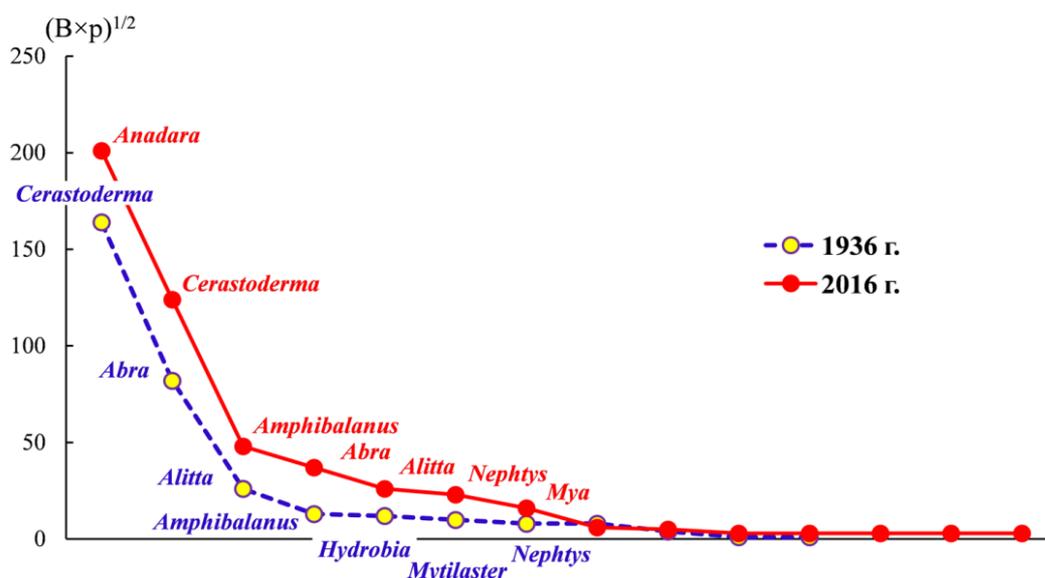


Рис. 3. Кривые рангового распределения видов (по ИП) в биоценозах *Anadara* (весна 2016 г.) и *Cerastoderma* (весна 1936 г., из (Воробьев, 1949))

Приведены родовые названия видов, под *Abra* подразумевается *Abra segmentum*, остальные рода представлены одним видом, их полные названия приведены в тексте.

Осенью 1936 года в биоценозе *Cerastoderma* доминирующими видами оставались *C. glaucum* и *A. segmentum*, однако структура сообщества в районах, подвергнувшихся летом замору, отличалась от таковой в районах вне замора (рис. 4). *C. glaucum* резко доминировала над *A. segmentum* там, где замора не было. Среди второстепенных видов выделялись *A. improvisus*, *M. lineatus*, *A. succinea*. В районах, где произошел замор, *C. glaucum* и *A. segmentum* выравнивались по биомассе и индексу плотности, а по численности *A. segmentum* даже превышала *C. glaucum*. На первый план среди второстепенных видов выходили формы более выносливые к дефициту кислорода – *H. acuta* и *N. hombergii*.

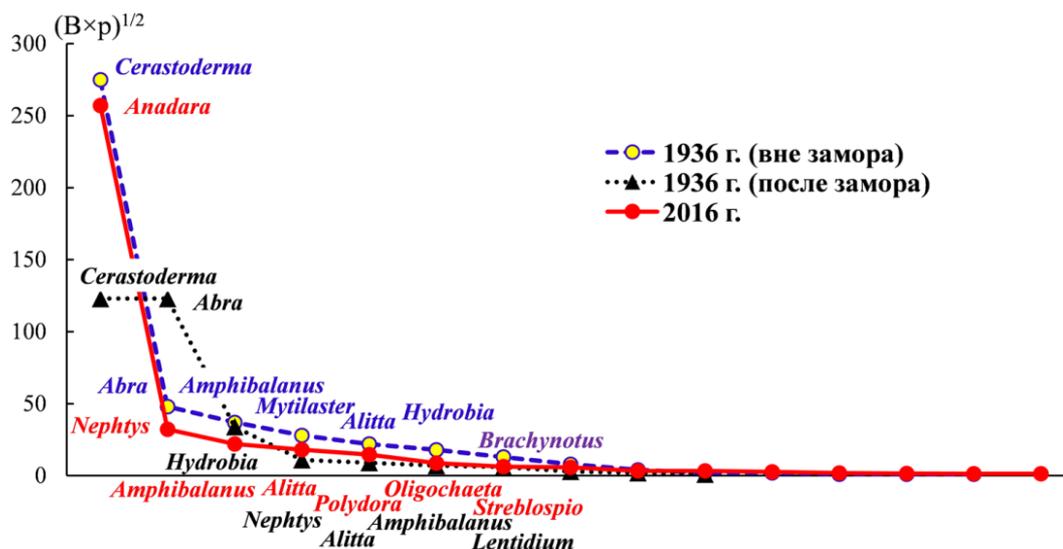


Рис. 4. Кривые рангового распределения видов (по ИП) биоценозов *Anadara* (осень 2016 г.) и *Cerastoderma* (осень 1936 г., из (Воробьев, 1949))

Приведены родовые названия видов, под *Abra* подразумевается *Abra segmentum*, остальные рода представлены одним видом, их полные названия приведены в тексте.

Осенью 2016 года доминирующим видом в биоценозе была анадара, в число второстепенных – входили *N. hombergii*, *A. improvisus*, *A. succinea*, а также полихеты-вселенцы *P. cornuta* и *S. gynobranchiata*. Церастодерма и абра обнаружены были либо в крайне малых количествах (*C. glaucum*), либо в виде преимущественно молоди (*A. segmentum*). Следует отметить, что в предшествующее время, в июне 2016 года, на этом же полигоне численность и биомасса *C. glaucum* и *A. segmentum* были достаточно велики (345 и 170 экз./м², 149,3 и 18,2 г/м² соответственно) с встречаемостью обоих видов – 100 % (Болтачева и др., 2021). Можно предположить, что в конце лета 2016 года на исследуемом участке акватории создались кислород-дефицитные (заморные) условия, что привело к отмиранию менее устойчивых к этим условиям форм – *C. glaucum* и *A. segmentum*, а *A. kagoshimensis* благополучно перенесла этот период. Летом 2017 года субдоминантом в биоценозе анадары вновь стала церастодерма, абра также возвратилась в состав характерных видов.

Сопоставление доступных данных для летней серии наблюдений указывает на то, что структура биоценоза *Anadara* 2017 года, близка к таковой биоценоза *Cerastoderma* 1956 года (рис. 5). Из шести видов, входивших в 1956 году в ядро биоценоза *Cerastoderma*, пять входили в ядро биоценоза *Anadara* и в 2017 году, *M. lineatus* перешел в состав второстепенных видов, *A. succinea*, напротив, вошла в число руководящих форм (в 1956 г. была в числе второстепенных).

В многолетнем ряду наблюдений суммарный ИП первых 10-ти наиболее значимых видов в биоценозе *Anadara/Cerastoderma* снижается почти в 2 раза с 774 (1930-е гг.) до 478 (1950-е). Дальнейшее поведение суммарного значения ИП оказалось в большой степени зависимым от появления в бентосе *A. kagoshimensis*. Без её учёта отмечено продолжение снижения суммарного ИП, упавшего к 2016–2017 годам до 189. Иная картина складывается при учёте *A. kagoshimensis*: суммарный ИП 10-ти наиболее значимых видов в 2016–2017 годы уже превышает уровень развития бентоса 1930-х в 1,3 раза.

Многолетняя динамика биомассы. Сравнение количественного развития макрозообентоса в 1936 и 2016 годы показало, что в весеннее время в 2016 году биомасса церастодермы была достаточно велика (154 г/м²), но в 1,7 раз ниже, чем в 1936 году (270,1 г/м²). Однако за счет появления анадары (406 г/м²) биомасса биоценоза в целом была выше в

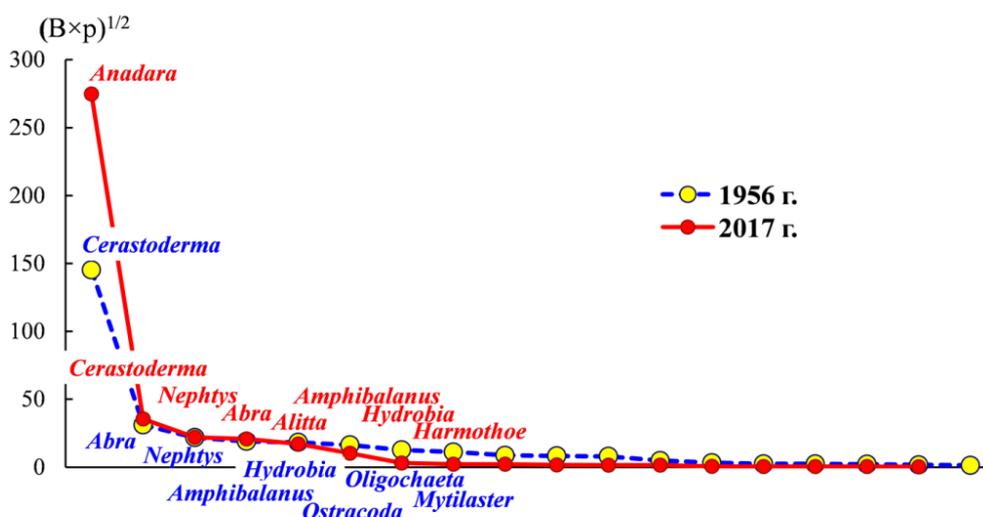


Рис. 5. Кривые рангового распределения видов (по ИП) в биоценозах *Anadara* (лето 2017 г.) и *Cerastoderma* (лето 1956 г., по (Старк, 1960))

Приведены родовые названия видов, под *Abra* подразумевается *Abra segmentum*, остальные рода представлены одним видом, их полные названия приведены в тексте.

1,5 раза. Показатели биомассы бентоса в биоценозе анадары осенью 2016 года были более близки к показателям биоценоза церастодермы 1936-го года вне заморного района (686,1 и 845,6 г/м² соответственно), при этом на долю анадары, в первом случае, приходилось 96 % всей биомассы биоценоза. В конце осени-начале зимы 2017 года биомасса бентоса достигла 1501 г/м², превысив показатели 1936 года в 1,8 раз, с сохранением доли *A. kagoshimensis* в 96 % в его общей биомассе (Болтачева и др., 2021).

Летом 1956 года, средняя биомасса бентоса в биоценозе *Cerastoderma* составляла 252,8 г/м² (вклад церастодермы – 83 %, 210,9 г/м²) (Старк, 1960). Летом 2016 года биомасса бентоса в биоценозе анадары достигала 734 г/м² (при доле *A. kagoshimensis* 74 %), из них 149 г/м² приходилось на *C. glaucum* (с долей в общей биомассе бентоса 20 %). Таким образом, количественные показатели развития церастодермы для этих двух периодов близки, но за счет анадары общая биомасса бентоса в 2016 году в 2,9 раз выше, чем в 1956 году. Сравнение средней биомассы бентоса (для собственно Азовского моря) в 1930-е и в 1950-е годы показало, что почти во все годы и сезоны в 1950-е годы биомасса была существенно ниже, чем в 1930-е годы. Исключение составляли лишь апрель 1956 и 1957 годов, когда биомасса была выше, чем в 1934 году (Старк, 1960).

ОБСУЖДЕНИЕ

Подробный анализ факторов, определяющих количественное развитие, состав и структурные характеристики (биоценологическую организацию) зообентоса Азовского моря содержится в работе В. П. Воробьева (1949). К основным из них отнесены 1) количественное распределение пищи, 2) рельеф дна и распределение грунтов, 3) течения и перемещения водных масс, 4) температурный режим, 5) газовый режим, 6) солевой режим, 7) биологические особенности организмов и 8) биоценологические связи организмов. Комплексный анализ указанных основных факторов позволил В.П. Воробьеву описать основные закономерности формирования и распределения бентоса Азовского моря. Фактически эти же факторы в той или иной степени отвечают и за формирование многолетних изменений донной экосистемы Азовского моря, пожалуй, с одним добавлением – необходимостью учёта фактора «инвазии» (фактора появления новых элементов фауны, способных приводить к изменениям в составе аборигенных видов и образуемых ими биоценозов). Рассмотрим основные изменения,

которые представлены нами в рамках анализа многолетних данных, и сопоставим эти изменения с возможными факторами их определяющими.

Таксономический состав. В период с 1930-х по 2016–2017 годы в биоценозе *Anadara/Cerastoderma* отмечены изменения видового богатства основных таксономических групп: 1950-е и 2016–2017 годы были беднее 1930-х по группе ракообразных, а 2016–2017 годы – богаче 1930-х и 1950-х по группам моллюсков, полихет и прочим видам. В отношении отмеченного сокращения количества регистрируемых видов ракообразных мы присоединяемся к уже сложившемуся мнению о влиянии на данный процесс роста солёности вод (Некрасова, 1972; Закутский и др., 1978; Фроленко, 2000), поскольку значительное количество азовоморских Crustacea относятся к олигогалинным видам (Мордухай-Болтовской, 1960). Несмотря на колебательный характер солёности вод Азовского моря, включающий периоды распреснения и осолонения бассейна (Дашкевич и др., 2014), в анализируемых нами трёх периодах наблюдений прослеживается чёткий положительный тренд изменения солёности: 9,3–11,1 ‰ (1931–1937 гг.), 11,6–12,1 ‰ (1950–1957 гг.) и 13,5–14 ‰ (2016–2017 гг.) (Бердников, 2006; Кочергин и др., 2018; наши данные). Отмеченное (в этом ряду) повышение солёности до 11,6 ‰ и выше – явилось критическим для развития некоторых олигогалинных форм ракообразных. Однако, не следует упускать из вида и вариант биоценологических перестроек, связанных с изменением степени заиленности субстрата и замещением эпифаунных биоценозов, в которых обильно представлены ракообразные, на биоценозы с превалированием инфавны (Старк, 1951).

Современное увеличение видового богатства в группах моллюсков, полихет и прочих видов отчасти связано с повышением солёности, обусловившим благоприятные условия для проникновения и развития в Азовском море ближнеморских вселенцев. Известно, что периодическое увеличение солёности бассейна приводило к появлению здесь, а более всего – в прикерченском районе, некоторых черноморских форм бентоса. Это отмечалось на пиках солёности (более 13 ‰) в 1970-е годы (Закутский и др., 1978; Литвиненко, Евченко, 2006). Но появление ряда дальнеморских видов-вселенцев (эвригалинных или солоноватоводных) явилось результатом интенсификации судоходства, развития марикультуры (Болтачева и др., 2021).

Среди общих закономерностей многолетнего изменения экосистемы Азовского моря следует отметить тенденцию увеличения степени обогащения донных отложений органическим веществом. Его концентрация в осадках 2007–2013 годов возросла по сравнению с 1980–1987 годами в 1,5–1,9 раз (Александрова и др., 2014). В таких условиях появление дополнительных потребителей органического вещества – детритофагов, в лице видов-вселенцев сем. Spionidae, может способствовать более полному усвоению избытка доступной органики в донных отложениях Азовского моря. Представитель этого семейства – *Polydora cornuta* – распространился по всему Азовскому морю, а в юго-западной части вошел в число руководящих видов биоценоза *Anadara* с встречаемостью 84 % и плотностью до 1014 экз./м² (в среднем 154 экз./м²). Натурализация других спионид вселенцев в Азовское море – *Streblospio gynobranchiata* и *Marenzelleria neglecta*, видимо, еще не завершена, однако они зарегистрированы во всех частях собственно Азовского моря (Лисицкая, Болтачева, 2016; Фроленко, Мальцева, 2017; Syomin et al., 2017; Болтачева, Лисицкая, 2019). В наших осенних сборах 2016 года численность *S. gynobranchiata* достигала 2316 экз./м². Перечисленные представители сем. Spionidae являются эврибионтными видами-оппортунистами, выносливыми к понижению содержания кислорода и к высокому уровню эвтрофирования (Radashevsky, Selifonova, 2013).

Количественное развитие зообентоса и солёность. Несомненно, что фактор солёности является одним из определяющих и в количественной динамике развития отдельных видов, как и зообентоса в целом. Снижение развития *C. glaucum*, как и аборигенного комплекса видов зообентоса в целом, отмечаемые нами на фоне роста солёности в 1930-е, 1950-е и 2016–2017 годы, подтверждаются данными других исследователей (Воробьев, 1949; Некрасова, 1977).

Хотя *C. glaucum* и является типичным эвригалинным организмом с диапазоном границ солёности 2,5–42 ‰ (Карпевич, 1955, цит. по Старк, 1960), но в Азовском море её наибольшее развитие приурочено к акваториям с малой солёностью – 7–10 ‰ (Воробьев, 1949). М. Я. Некрасова (1977), по результатам анализа материалов 1953–1974 годов, в Азовском море выделяла два типа донных биоценозов, сменяющих друг друга в годы низкой и высокой солёности вод. В годы низкой солёности (10–11,5 ‰) наблюдалась высокая биомасса бентоса – в среднем 280 г/м², с массовой долей *C. glaucum*, равной 69,5 %, и *A. segmentum* – 13,2 %. В годы повышенной солёности (12–12,5 ‰) биомасса бентоса снижалась до 225 г/м². Это происходило за счет большинства видов, однако особенно большое снижение наблюдалось у *A. segmentum* – до 18,6 г/м² (8,7 % от общей биомассы); площади биоценозов *C. glaucum* и *A. segmentum* при этом уменьшались (Некрасова, 1977). Для периода 1991–2005 годов показана отрицательная связь между средней биомассой *C. glaucum* и изменением солёности собственно Азовского моря (Гаркопа, Сарвилина, 2011). Однако, следует обратить внимание на то, что не само снижение солёности в годы многоводных рек, а повышенное поступление в бассейн биогенных элементов и взвешенной органики – могло являться фактором, усиливающим развитие фильтраторов-сестонофагов, каким, например, является *C. glaucum* (Старк, 1960).

В целом, однако, предполагается (Матишов и др., 2008), что за период с 1933 по 2000-е годы колебания солёности не изменили решающим образом распределение бентосных сообществ Азовского моря. Повышение его солёности приводило к некоторому увеличению биомассы и изменению площадей распространения фоновых аборигенных видов, но не определяло коренных перестроек в характере распределения донных сообществ. Таким образом, вплоть до конца 2000-х годов, в Азовском море сохранялся единый «моллюско-балианусовый биоценоз» (по Воробьеву) или «биоценоз *Cardium*» (по Старк).

Появление в Азовском море в 1989 году эмигранта из Чёрного моря (*A. kagoshimensis*) – нарушило эту «стабильность». Уже к 2016–2017 годам развитие зообентоса, оцениваемое по суммарному ИФО первых 10 наиболее значимых видов, за счёт анадары в 1,3 раза превышало, а по уровню биомассы – было сопоставимо или превышало аналогичные параметры развития биоценоза 1930-х годов. Освоение новых площадей и увеличение биомассы этого нового вселенца определялись его высокими адаптационными возможностями к новым условиям обитания (Ревков, Щербань, 2017), включая положительную реакцию на повышение солёности (Живоглядова и др., 2021). Так в годы опреснения Азовского моря (2000–2006 гг.), когда средняя солёность водоёма составляла менее 10 ‰, было отмечено снижение количественного развития анадары и уменьшение площади ее биоценоза, который обнаруживался лишь в отдельные сезоны (Фроленко, 2006; Набоженко и др., 2006; Фроленко, Мальцева, 2017). С 2007 года, на фоне роста среднегодовой солёности моря до уровня 13,37‰ в 2015 году, отмечены устойчивые тенденции расширения ареала, включая проникновение в Таганрогский залив (Фроленко, Мальцева, 2017), и увеличения общих запасов анадары в Азовском море к 2018 году до 15 млн. тонн (Живоглядова и др., 2021).

По итогам сопоставления количественного развития зообентоса и уровня солёности вод следует обратить внимание на следующее. Отмеченная нами динамика снижения количественного развития аборигенного комплекса видов соотносится не со шкалой времени в целом, а с определёнными периодами наблюдения (1930-е, 1950-е и 2016–2017 гг.), в которых солёность бассейна представлена, как отмечено ранее, по нарастающей (соответственно 9,3–11,1 ‰, 11,6–12,1 ‰ и 13,5–14 ‰). Не только биомасса биоценоза церастодермы, но и средняя биомасса бентоса в собственно Азовском море в 1950–1955 годы были существенно ниже, чем в 1930-е годы. В весеннее время она составляла от 35 до 82 % значения этого показателя в 1930-е годы, в осеннее – 51–66 % (Старк, 1960). Лишь осенью 1957 года средняя биомасса бентоса достигла уровня 95 % от биомассы в 1930-е годы. Это повышение авторы связывали со снижением (относительно начала 1950-х гг.) уровня солёности вод в 1956–1957 годы (Спичак, 1960; Старк, 1960). В другие периоды наблюдения, в связи с многолетним характером флуктуаций солёности Азовского моря, на этой же шкале (1930-е – 2016–2017 гг.) в годы понижения солёности бассейна были отмечены периоды

усиления развития аборигенного комплекса видов. Так, в 2004 году в период снижения солёности Азовского моря до 9–11 ‰ (Кочергин и др., 2018) на его юго-западном участке было отмечено увеличение биомассы руководящего вида биоценоза *C. glaucum* до 1 и более кг/м² (Набоженко и др., 2006). На тот момент *A. kagoshimensis* была представлена в бентосе исключительно молодью, что дало основание отнести её к «постоянно флуктуирующим временным субдоминантам» сообщества *Cerastoderma–Hydrobia–Amphibalanus* (Набоженко и др., 2006).

Многолетняя динамика бентоса и кислородный режим. Другим важным гидрохимическим фактором, определяющим развитие бентоса, является кислородный режим придонных горизонтов. Его действие в основном ассоциируется с формированием периодических сезонных (летних) замороз донной фауны Азовского моря, приводящих к изменениям в распределении бентосных сообществ (Воробьев, 1949; Старк, 1960; Фроленко, Семиглазова, 1998; Студеникина и др., 1998; Матишов и др., 2008). Основные ценозообразующие виды бассейна – *C. glaucum* и *A. segmentum* – имеют разную чувствительность к придонной гипоксии. Первый – «стенооксигенный», второй – вынослив к кратковременному дефициту кислорода и может до 5–8 дней находиться в анаэробных условиях (Воробьев, 1949). Периодические заморы донной фауны и сероводородное заражение грунтов на обширных участках Азовского моря приводят к снижению численности и биомассы церастодермы, уменьшению площадей, занятых ее биоценозом (Студеникина и др., 1998; Александрова и др., 2014). Так, площадь биоценоза церастодермы снизилась с 31–38 % в 1930-е годы (Воробьев, 1949) до 4–11 % в 1996–1997 годы (Фроленко, Семиглазова, 1998). Резкое сокращение биомассы церастодермы осенью 2016 года, по сравнению с весной и началом лета 2016 года (в 34–35 раз), в юго-западной части Азовского моря произошло, предположительно, именно в результате развития гипоксии в летнее время (Болтачева и др., 2021). При этом биомасса анадары возросла в 2016 году в 1,2 раза, а в 2017 году – в 1,9 раз. Физиолого-биохимические особенности, присущие *A. kagoshimensis* (наличие эритроцитарного гемоглобина и др.), позволяют ей существовать в условиях гипоксии (Андреенко и др., 2009) даже в сочетании с сероводородным заражением среды (Головина, 2019). Последнее является фактором, повышающим конкурентоспособность анадары, по отношению к аборигенным видам зообентоса при возможном сезонном усилении кислород-дефицитных условий в Азовском море.

Межгодовую динамику кислородной депрессии определяют многие факторы – изменение температурного фона, ветровая активность, изменение объёма стока рек и первичной продукции (Александрова, 2012). Известно, что площадь дна с дефицитом кислорода (насыщение кислородом <60 %) увеличивалась, в среднем с 8 (1960–1987 гг.) до 14 тыс. км² (1988–2008 гг.), при распространении депрессии кислорода с высокой повторяемостью на 50–90 % площади Азовского моря (Александрова, 2012). В связи с этим, в условиях стабильного (с середины 1980-х гг.) повышения среднегодовой температуры вод Азовского моря (Дашкевич, Бердников, 2008), при ослаблении ветрового режима, определяющего вертикальное перемешивание вод, в летнее время серьёзно усиливается угроза формирования обширных гипоксических/аноксических зон и замора донной фауны. В таком случае можно ожидать снижение количественного развития оксифильных форм бентоса и дальнейшего распространения анадары в донных биоценозах.

Трансформация биоценоза. В бентосе юго-западного участка Азовского моря к 2016–2017 годам мы констатируем формирование единого биоценоза *Anadara*, который «поглотил» (объединил) ранее существовавшие в данном регионе биоценозы аборигенных видов. Последние остались представленными в биоценозе *Anadara* субдоминантами в соответствующих биоценологических комплексах (Болтачева и др., 2021). Причина отмеченной трансформации биоценозов очевидна и заключается в сверхуспешном освоении *A. kagoshimensis* акватории Азовского моря и её абсолютном количественном доминировании в зообентосе региона.

Идея большого сходства состава донной фауны Азовского моря и возможность формального объединения некоторых аборигенных биоценозов в единый биоценоз

рассматривалась и ранее. Так, по мнению В. П. Воробьева (1949), с точки зрения общности видов, бентос большей части собственно Азовского моря в 1930-е годы мог быть представлен в виде единого «смешанного» моллюско-балайнусового биоценоза. При более жёстком подходе к критериям понятия биоценоз («наличие определённой структуры и количественных соотношений между видами, его (биоценоз) составляющими») эта «смешанная» структура была разбита на отдельные биоценозы, названные по доминирующим в них видам. Биоценоз *Cerastoderma* (= *Cardium*) В. П. Воробьев (1949) рассматривал, как проявление «пяти постоянно встречающихся комплексов». В этих комплексах руководящими видами в паре с церастодермой выступали весной и осенью пять общих видов, формирующих «ядро» биоценоза *Cerastoderma* – абра (=синдесмия), балайнус, нереис, гидробия, митилястер. Доминируя в своём развитии над другими формами бентоса, церастодерма в данном случае выступала в качестве вида-объединителя различных (по видам-субдоминантам) биоценологических комплексов.

Биоценоз *Anadara* в 2016–2017 годы – это фактически тот же биоценоз *Cerastoderma* предыдущих лет, только с другим (новым) лидером – *A. kagoshimensis*. Трансформация биоценоза *Cerastoderma* в биоценоз *Anadara* произошла в результате добавления нового вида-доминанта без явных изменений в самой структуре «ядра» биоценоза. Ранее существовавший на большой площади юго-западного участка Азовского моря биоценоз *Cerastoderma* – преобразовался в биоценоз *Anadara*.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время в фазе осолонения вод на значительной площади дна юго-западной части Азовского моря наиболее широко распространённый ранее биоценоз двустворчатого моллюска *Cerastoderma glaucum* трансформировался в биоценоз другого двустворчатого моллюска – *Anadara kagoshimensis*, с сохранением «ядра» видов прежнего биоценоза. Причина подобной трансформации заключается в исключительно успешном освоении анадарой акватории Азовского моря и превращении её в доминирующий вид в бентосе региона. Можно предположить, что дальнейшая экспансия последней в Азовском море (в условиях сохранения уровня солёности бассейна) – может привести к трансформации других аборигенных биоценозов в биоценоз *Anadara* на более обширных площадях бассейна.

В многолетнем ряду наблюдений, включающем периоды 1930-х, 1950-х и 2016–2017 годов, на фоне роста (в рамках этих периодов) солёности Азовского моря, отмечено снижение показателей количественного развития аборигенного комплекса видов. В 2016–2017 годы, за счёт развития *Anadara kagoshimensis*, зарегистрировано «компенсаторное» увеличение суммарной биомассы зообентоса, превышающей таковую 1930-х годов.

Современное увеличение видового богатства в группах Mollusca, Polychaeta и «Прочие виды», с нашей точки зрения, связано с повышением солёности (в 2016 году его уровень превысил в среднем 13,5 ‰) способствующим понтизации фауны Азовского моря, а также с интенсификацией судоходства и развитием марикультуры, которые привели к появлению ряда дальнеморских видов-вселенцев. В условиях возрастающего обогащения донных осадков органическим веществом, появление и распространение в Азовском море чужеродных видов детритоядных полихет сем. Spionidae – будет способствовать более полному усвоению избытка органики и снижению угрозы сероводородного загрязнения.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ИМБИ по тематике: «Закономерности формирования и антропогенная трансформация биоразнообразия и биоресурсов Азово-Черноморского бассейна и других районов Мирового океана» (№ гос. регистрации 121030100028-0).

Список литературы

- Александрова З. В. Многолетняя изменчивость кислородного режима и содержания биогенных веществ в Азовском море // Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна. Ростов-на-Дону: ФГУП АЗНИИРХ, 2012. – С. 18–35.
- Александрова З. В., Баскакова Т. Е., Шевцова Е. А., Долженко С. В. Основные закономерности развития гипоксии в придонном слое Азовского моря и ее экологические последствия для гидробионтов // Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна. Ростов-на-Дону: ФГУП АЗНИИРХ, 2014. – С. 11–32.
- Андреев Т. И., Солдатов А. А., Головина И. В. Адаптивная реорганизация метаболизма у двусторчатого моллюска *Anadara inaequalis* Bruguiere в условиях экспериментальной аноксии // Доповіді НАН України. – 2009. – № 7. – С. 155–160.
- Бердников С. В. Моделирование крупномасштабных изменений океанологических характеристик экосистемы Азовского моря // Закономерности экосистемных процессов в Азовском море, ЮНЦ РАН. – М.: Наука, 2006. – С. 137–229.
- Болтачева Н. А., Лисицкая Е. В. Полихеты юго-западной части Азовского моря // Экосистемы. – 2019. – Вып. 19 (49). – С. 133–141.
- Болтачева Н. А., Ревков Н. К., Надольный А. А., Аннинская И. Н. Донная фауна юго-западной части Азовского моря: Таксономический состав и биоценогическая организация макрозообентоса в 2016–2017 годах // Морской биологический журнал. – 2021. (в печати).
- Воробьев В. П. Бентос Азовского моря. Труды АЗЧерНИРО. – Симферополь: Крымиздат, 1949. – Вып. 13. – 193 с.
- Гаргопа Ю. М., Сарвилина С. В. Климатические изменения зообентоса Азовского моря в условиях антропогенного воздействия // Водные ресурсы. – 2011. – Т. 38, № 6. – С. 698–706.
- Головина И. В. Устойчивость к негативным воздействиям и соотношение активности ферментов энергетического обмена в тканях черноморских моллюсков *Mytilus galloprovincialis* Lamarck, 1819 и *Anadara kagoshimensis* (Tokunaga, 1906) // Морской биологический журнал. – 2019. – Т. 4, № 3. – С. 37–47. DOI: 10.21072/mbj.2019.04.3.04
- Дашкевич Л. В., Бердников С. В. Математическое моделирование температурного режима и тепловой баланс Азовского моря // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2008. – № 4. – С. 5–18.
- Дашкевич Л. В., Кулыгин В. В., Бердников С. В. Многолетнее изменение средней солёности Азовского моря: данные наблюдений и модельный расчет // Экология. Экономика. Информатика (7–12 сентября 2014) Сборник статей в 2 т. Южный федеральный университет: Издательство Южного федерального университета. – Ростов-на-Дону, 2014. Том 1: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. – С. 175–182.
- Живоглядова Л. А., Ревков Н. К., Фроленко Л. Н., Афанасьев Д. Ф. Экспансия двусторчатого моллюска *Anadara kagoshimensis* (Tokunaga, 1906) в Азовском море // Российский журнал биологических инвазий. – 2021. – № 1. – С. 83–94.
- Закутский В. П., Алдакимова А. Я., Толоконникова Л. И., Губина Г. С., Копец В. А., Некрасова М. Я. Изменение планктона и бентоса Азовского моря в условиях антропогенного воздействия // Гидробиологический журнал. – 1978. – Т. 14, № 1. – С. 28–34.
- Золотарев П. Н., Литвиненко Н. М., Терентьев А. С. Исследования структуры донного сообщества западной части Азовского моря с помощью метода биоиндикации экологических аномалий в бентали морских водоемов // Труды южного научно-исследовательского института морского рыбного хозяйства и океанографии. – 1995. – Т. 41. – С. 68–71.
- Кочергин А. Т., Жукова С. В., Мальгин Е. Ю. Межгодовая изменчивость солёности и вертикальной термохалинной устойчивости в различных районах Азовского моря в летний период 1992–2016 гг. // Системы контроля окружающей среды. – 2018. – Вып. 31. – С. 63–68.
- Лисицкая Е. В., Болтачева Н. А. Полихеты, вселившиеся в азово-черноморский бассейн в конце 20 – начале 21 века // Окружающая среда и человек. Современные проблемы генетики, селекции и биотехнологии: Материалы Международной научной конференции и молодежной научной конференции (Ростов-на-Дону, Россия, 5–8 сентября 2016 г.). – Ростов-на-Дону, 2016. – С. 211–213.
- Литвиненко Н. М., Евченко О. В. Изменение качественного и количественного состава зообентоса Азовского моря после зарегулирования реки Дон // Современные проблемы экологии Азово-Черноморского бассейна: Материалы II Международной конференции (Керчь, ЮГНИРО, 26–27 июня 2006 г.). – Керчь: Изд-во ЮГНИРО, 2006. – С. 36–41.
- Любин П. А. Зообентос Азовского моря // Современное развитие эстуарных экосистем на примере Азовского моря. – Апатиты: КНЦ РАН, 1999. – С. 167–194.
- Мальцев В. И. О возможности применения показателя функционального обилия для структурных исследований зооценозов // Гидробиологический журнал. – 1990. – Т. 26, № 1. – С. 87–88.
- Матишов Г. Г., Шохин И. В., Набоженко М. В., Польшин В. В. Многолетние изменения донных сообществ Азовского моря в связи с характером осадконакопления и гидрологическим режимом // Океанология. – 2008. – Т. 48, № 3. – С. 425–435.

- Мордухай-Болтовской Ф. Д. Каталог фауны свободноживущих беспозвоночных Азовского моря // Зоологический журнал. – 1960. – Т. 39, № 10. – С. 1454–1465.
- Набоженко М. В., Шохин И. В., Сарвилин С. В., Коваленко Е. П. Современное состояние макрозообентоса Азовского моря // Вестник Южного научного центра РАН. – 2006. – Т. 2, № 2. – С. 83–92.
- Некрасова М. Я. Зообентос Азовского моря после зарегулирования стока Дона // Зоологический журнал. – 1972. – Т. 51, Вып. 6. – С. 789–797.
- Некрасова М. Я. Изменения бентоса Азовского моря под влиянием осолонения // Зоологический журнал. – 1977. – Т. 56, Вып. 7. – С. 983–989.
- Ревков Н. К., Щербань С. А. Особенности биологии двустворчатого моллюска *Anadara kagoshimensis* в Черном море // Экосистемы. – 2017. – Вып. 9 (39). – С. 47–56.
- Савчук М. Я. *Mya arenaria* L. – новый элемент в фауне Азовского моря // Вестник зоологии. – 1980. – № 5. – С. 11–15.
- Спичак М. К. Гидрологический режим Азовского моря в 1951–57 гг. и его влияние на некоторые химические и биологические процессы // Труды АзНИИРХ. – 1960. – Т. 1, Вып. 1. – С. 115–142.
- Старк И. Н. Состояние кормовой базы бентосоядных рыб северо-восточной части Азовского моря // Труды АзЧерНИРО. Сборник работ по Азовскому морю. – Крымиздат: Симферополь, 1951. – Вып. 15. – С. 201–233.
- Старк И. Н. Годовая и сезонная динамика бентоса в Азовском море // Труды АзНИИРХ. – 1960. – Т. 1, Вып. 1. – С. 167–229.
- Студеникина Е. И., Воловик С. П., Толоконникова Л. И., Фроленко Л. Н., Селиванова Е. В. Характеристика донных сообществ Азовского моря в современный период // Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна (Сборник научных трудов (1996–1997 гг.)). – Ростов-на-Дону: Изд-во АзНИИРХ, 1998. – С. 67–77.
- Терентьев А. С. Макрозообентос юго-западной части Азовского моря в условиях эксплуатации газоконденсатных месторождений // Экологічна безпека прибережної та шельфової зон та комплексне використання ресурсів шельфу (Збірник наукових праць). – Севастополь, 2008. – Вып. 17. – С. 327–348.
- Фроленко Л. Н. Зообентос Азовского моря в условиях антропогенных воздействий: автореф. дис. ... канд. биол. наук: спец. 03.00.16. – Краснодар, 2000. – 24 с.
- Фроленко Л. Н. Оценка состояния донных биоценозов Азовского моря // Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна (Сборник научных трудов (2004–2005 гг.)). – Ростов н/Д: Изд-во АзНИИРХ, 2006. – С. 77–87.
- Фроленко Л. Н., Двинянинова О. В. Формирование биоценоза вселенца кунearки *Cunearca cornea* в Азовском море // Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна. – Ростов-на-Дону: Изд-во АзНИИРХ, 1998. – С. 115–118.
- Фроленко Л. Н., Мальцева О. С. О сообществе *Anadara* в Азовском море // Современные рыбохозяйственные и экологические проблемы Азово-Черноморского региона: Матер. IX междунар. науч.-практ. конф. (Керчь, 6 октября 2017 г.). – Керчь: КФ (ЮгНИРО) ФГБНУ АзНИИРХ, 2017. – С. 99–103.
- Фроленко Л. Н., Семиглазова А. В. Трансформация биоценоза церастодермы *Cerastoderma lamarcki* в условиях антропогенного преобразования режима Азовского моря // Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна. – Ростов-на-Дону: Изд-во АзНИИРХ, 1998. – С. 118–122.
- Чихачев А. С., Фроленко Л. Н., Реков Ю. И. Новый вселенец в Азовское море // Рыбное хозяйство. – 1994. – № 3. – С. 40–41.
- Clarke K. R. Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure // Australian Journal of Ecology. – 1993. – Vol. 18. – P. 117–143.
- Clarke K. R., Gorley R. M. PRIMER v5: User Manual/Tutorial. Primer-E. – Plymouth, 2001. – 92 p.
- Radashevsky V. I., Selifonova Zh. P. Records of *Polydora cornuta* and *Streblospio gynobranchiata* (Annelida, Spionidae) from the Black Sea // Mediterranean Marine Science. – 2013. – Vol. 14, N 2. – P. 261–269.
- Syomin V., Stradomsky B., Fomina E., Matishov D., Sikorski A., Bastrop R., Köhler N. The invasion of the genus *Marenzelleria* (Polychaeta: Spionidae) into the Don river mouth and the Taganrog bay: morphological and genetic study // Journal of the Marine Biological Association of the UK. – 2017. – Vol. 97, N 5. – P. 975–984.

Revkov N. K., Boltachova N. A. Benthic fauna of the south-western part of the Sea of Azov: transformation of macrozoobenthos biocoenosis at the beginning of the XXI century // Ekosistemy. 2021. Iss. 26. P. 51–66.

Cerastoderma biocoenosis has been one of the main biocoenoses that occupied the most extensive areas and prevailed in quantitative development in the benthos of the Sea of Azov for more than 80 years, since the first quantitative description were made there in 1930s. However, the penetration of the bivalve *Anadara kagoshimensis* (a recent invader to the Black Sea basin) to the Sea of Azov in 1989 determined the beginning of subsequent biocoenotic changes. Systematic benthic surveys were conducted in 2016–2017 during cruises #84, #86, #90, #96, #100 aboard R/V “Professor Vodyanitsky” on the extensive south-western section of the Sea of Azov. The results of the surveys revealed the formation of a single *Anadara* biocoenosis, in which the previously dominant native species *Cerastoderma glaucum* and *Abra segmentum* became subdominants. The present research continues the analysis of these data. Its purpose is to assess the features of transformation the *Cerastoderma* biocoenosis, which was the main native biocoenosis in the Azov Sea – to the biocoenosis of alien species *Anadara kagoshimensis*. The paper uses materials of three time-periods corresponding to different levels of salinity of the Sea of Azov: 1930s (9.3–11.1 %), the 1950s (11.6–12.1 %) and 2016–2017 (13.5–14.0 %). The results of the analysis showed a high level of similarity (60 %) in the composition of the cores of two native biocoenoses of *Abra* and *Cerastoderma* and the new *Anadara* biocoenosis. The transformation of the native biocoenoses on the southwestern section of the basin into the *Anadara* biocoenosis resulted both from the successful expansion of *A. kagoshimensis* and a decrease in the quantitative development of the aboriginal species complex under the conditions of increasing salinity of the basin. A compensatory increase in the quantitative development of zoobenthos was observed in 2016–2017 exceeding that of the 1930s due to *A. kagoshimensis*. From 1930s to 1950s the number of species in the *Cerastoderma* biocoenosis in the groups of Mollusca, Polychaeta and “Other species” did not change significantly, but in Crustacea group it decreased by more than 2 times. From 1950s (*Cerastoderma* biocoenosis) to 2016-2017s (*Anadara* biocoenosis) there was a nearly two-fold increase in the number of species in the groups of Mollusca, Polychaeta and “Other species” while the number of Crustacea species increased slightly.

Key words: macrozoobenthos, invasive species, long-term changes, biocoenosis, *Cerastoderma glaucum*, *Anadara kagoshimensis*, Sea of Azov.

Поступила в редакцию 25.12. 20
Принята к печати 04.03.21

УДК 504.054:[546.74+546.47]:633.88

Особенности накопления цинка и никеля некоторыми лекарственными растениями, произрастающими на территориях с различной степенью техногенной нагрузки

Головин А. В., Скрыпник Л. Н., Масютин Я. А.

Институт живых систем Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта
Калининград, Россия
anton.golovin00@mail.ru

Статья посвящена изучению особенностей накопления цинка и никеля некоторыми видами лекарственных растений. Объектами данного исследования выступили виды растений, которые характеризуются богатым комплексом фитохимических компонентов и проявляют различную биологическую активность: крапива двудомная (*Urtica dioica* L.), золотарник канадский (*Solidago canadensis* L.) и чертополох колючий (*Carduus acanthoides* L.). С использованием метода рентгенофлуоресцентной спектроскопии выполнен анализ на содержание тяжелых металлов (Pb, Zn, Cu, Ni, Mn, V) в почвах пробных площадок с различной степенью техногенной нагрузки: лесная опушка поселка Дубровка Багратионовского района Калининградской области; территория парка Макса Ашманна города Калининграда; территория вблизи Калининградской ТЭЦ-2 города Калининграда. Показано, что почва, собранная вблизи поселка Дубровка, отличалась более низким содержанием практически всех исследованных элементов. В почвах на территории вблизи Калининградской ТЭЦ-2 и на территории парка М. Ашманна выявлено превышение нормативных санитарных показателей для мышьяка, цинка и никеля (площадка около ТЭЦ-2). Проанализировано содержание цинка и никеля в различных органах исследуемых видов растений (корни, стебли, листья), произрастающих на почвах пробных площадок. Для характеристики особенностей накопления цинка и никеля в растениях были рассчитаны: коэффициент задержки, коэффициент накопления и интенсивности перехода элементов. Установлено, что содержание цинка в растениях варьировалось от 50 до 250 мг/кг, никеля – от 10 до 65 мг/кг в зависимости от вида растения и места произрастания. На основании анализа полученных данных было выявлено, что в листьях золотарника канадского и чертополоха колючего происходило накопление цинка (содержание цинка было в 1,2–2,6 раза выше по сравнению со стеблем и корнем). В листьях крапивы двудомной при минимальном техногенном воздействии накапливался никель (содержание никеля было в 2–3 раза выше по сравнению со стеблем и корнем). Также было установлено, что корневая система изучаемых видов растений выполняет депонирующую функцию по отношению к никелю в условиях высокой техногенной нагрузки.

Ключевые слова: цинк, никель, крапива двудомная, золотарник канадский, чертополох колючий, накопление.

ВВЕДЕНИЕ

Важное место среди большинства негативных последствий, связанных с деятельностью человека, занимает загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами. Термин «тяжелые металлы» не имеет четкого, общепринятого определения, что создает некоторые трудности при их анализе и изучении. Как правило, к тяжелым металлам относят химические элементы с относительной атомной массой >50 а.е.м., атомным номером, начиная с 23, или плотностью >5 г/см³, являющиеся металлами или металлоидами (Ильин, 1991; Теплая, 2013; Титов и др., 2014). Эти химические элементы обладают высокой токсичностью и способностью передаваться по пищевым цепям (Титов и др., 2014). Как правило, к ним относят Pb, Cu, Zn, Ni, Co, Cd, Bi, Sn, Fe, Mn, Hg и другие.

Несмотря на уменьшение поступления тяжелых металлов за счет спада производств на промышленных предприятиях, в России проблема загрязнения ими стоит остро: до 11 % российских почв имеют высокие показатели загрязнения тяжелыми металлами (Титов и др., 2014; Barsova et al., 2019). Их поступление обусловлено как природными процессами (ветровая эрозия, вулканическая деятельность, лесные пожары, биологические процессы и др.), так и деятельностью человека (автотранспорт, сельское хозяйство, горнодобывающий, металлургический, энергетический, химический, нефтяной промышленные комплексы,

полигоны ТБО и мусороперерабатывающие предприятия) (Джувеликян и др., 2009; Снежко, Шевченко, 2011; Теплая, 2013; Титов и др., 2014). Но важно отметить, что увеличение концентраций тяжелых металлов в поверхностном слое почв напрямую связано именно с техногенными воздействиями (Титов и др., 2014).

Практически всегда увеличение концентрации тяжелых металлов в почве приводит к повышению их уровня в растительных организмах. При этом поступая в больших количествах, тяжелые металлы негативно влияют на жизнедеятельность растений: вызывают торможение роста, развития, нарушение процессов дыхания и фотосинтеза, нарушение водного обмена и в конечном итоге могут привести к гибели (Титов и др., 2014). Стоит, однако, отметить, что многие тяжелые металлы (например, Cu, Ni, Zn, Co, Mo) являются в физиологических концентрациях эссенциальными для растений микроэлементами, активно участвующими в метаболических процессах и обуславливающими его нормальное функционирование (Ильин, 1991; Титов и др., 2014). Например, известно, что цинк участвует в окислительно-восстановительных процессах, в синтезе нуклеиновых кислот и белков, связан с деятельностью гормонов, входит в состав многих ферментов (карбоксипептидаза С, алкогольдегидрогеназа и др.) либо активирует их работу (Ильин, 1991; Перельман, Касимов, 1999; Титов и др., 2011, 2014). Роль никеля в растительных организмах менее изучена. Установлено, что он входит в состав нескольких ферментов, таких, например, как глиоксалаза-I и уреазы, участвующих в метаболизме азота в высших растениях (Seregin, Kozhevnikova, 2006; Титов и др., 2011; Shahzad et al., 2018).

По способности накапливать тяжелые металлы растения принято делить на три группы:

1) аккумуляторы – растения, которые накапливают металлы в основном в надземных органах и при низком, и при высоком содержании их в почве;

2) индикаторы – растения, концентрация в которых тяжелых металлов отражает его содержание в окружающей среде;

3) исключатели – растения, которые накапливают металлы в основном в корнях, поступление в надземную часть ограничено (Титов и др., 2011).

Большая часть наземных растений, произрастающих на планете, относится к последней категории – к растениям-исключателям. Однако среди наземных растений есть виды, которые активно накапливают тяжелые металлы (например, некоторые представители семейства Brassicaceae и Crassulaceae) (Гладков, Гладкова, 2019; Awa, Nadibarata, 2020; Peng et al., 2020). Виды растений, активно поглощающие тяжелые металлы из окружающей среды, изучаются, как правило, с точки зрения их фиторемедиационного потенциала (Awa, Nadibarata, 2020). При этом аккумулирующей способностью обладают и некоторые лекарственные растения, для которых важно исследовать особенности поступления и распределения тяжелых металлов с точки зрения дальнейшего безопасного использования этих растений в качестве сырья в фармацевтической промышленности. В качестве примера можно привести представителей рода *Achillea*, имеющих богатый комплекс биологически активных соединений, однако, как отмечается в некоторых исследованиях, некоторые виды этого рода проявляют высокую аккумулирующую способность по отношению к тяжелым металлам, что может существенно ограничивать их использование в качестве фармацевтических препаратов (Семенова, 2020).

На территории Калининградской области произрастает широкий спектр растений, проявляющих лекарственные свойства. В число таких растений входят, как широко распространённые на территории области виды – золотарник канадский (*S. canadensis*) и крапива двудомная (*U. dioica*), так и менее распространённые такие, как чертополох колючий (*C. acanthoides*) (Дедков, 1999; Данилкина, Дедков, 2020).

Комплекс биологически активных веществ золотарника канадского представлен в основном фенольными соединениями (флавоноиды, дубильные вещества, кумарины, фенолкарбоновые кислоты) и в меньшей степени эфирными маслами, тритерпеновыми сапонинами. Уже сейчас экстракты этого вида растения широко используются в России и в зарубежных странах как компоненты лекарственных препаратов для лечения заболеваний мочеполовой системы (Сулейманова и др., 2017; Сулоев и др., 2019). Не менее богата биологически активными соединениями и крапива двудомная. В её составе также отмечается

высокое содержание фенольных соединений (фенолкарбоновые кислоты, флавоноиды, лигнаны, кумарины, дубильных веществ), а также присутствуют органические кислоты, тритерпеноиды, каротиноиды (Сошникова, 2006; Копытько и др., 2011). Фитопрепараты на основе крапивы используются для лечения внутренних кровотечений различного рода, заболеваний печени, заболеваний легких (Чернявских, 2019). По некоторым показателям крапиву двудомную превосходит чертополох колючий. В корнях этого вида содержание антоцианов и флавонолов выше, чем в корнях крапивы двудомной (Захаров и др., 2018). Листья и цветки чертополоха колючего также отличаются высоким содержанием фенольных кислот (кофейной, хлорогеновой, феруловой, кумаровой и др.) и флавоноидов (гликозидов апигенина, кверцетина, лютеолина) (Kozuga et al., 2019). Экстракты чертополоха проявляют гепатопротекторное, антибактериальное, противогрибковое и противовирусное фармакологическое действие (Varut et al., 2018).

Целью данной работы явилось исследование особенностей накопления цинка и никеля растениями золотарника канадского (*S. canadensis*), крапивы двудомной (*U. dioica*) и чертополоха колючего (*C. acanthoides*), произрастающими на территориях с различной степенью техногенной нагрузки.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Объектами исследования настоящей работы стали почвы пробных площадок и растения (золотарник канадский, крапива двудомная и чертополох колючий), произрастающие на них, расположенные на территории Калининградской области: парк имени Макса Ашманна (г. Калининград), Калининградская ТЭЦ-2 (г. Калининград) и лесная опушка (п. Дубровка, Багратионовский район, Калининградская область). Методом «конверта» на пробных площадках были отобраны пробы почв и растений (согласно ГОСТ Р 58588-2019). Почвенные пробы были освобождены от остатков растений и беспозвоночных, высушены, измельчены и просеяны через сито с диаметром 0,2 мм. Средняя проба была получена методом квартования. Пробы растений были представлены корнями, стеблями и листьями изучаемых видов. Части растений были предварительно промыты, высушены при температуре 50 °С. По окончании высушивания пробы измельчались до тонкодисперсного состояния. Подготовленные таблетки-излучатели из проб почв и растений исследовались на содержание тяжелых металлов методом РФС с использованием прибора «Спектроскан МАКС-GV» (НПО Спектрон, Россия) с серебряной трубкой анода при напряжении 40,1 кВ (Методика..., 2004; Григорьев, 2012). Время экспозиции для почвенных проб составляло 40 мин, для растительных проб – 30 мин. В образцах почвы определяли валовое содержание Pb, As, Zn, Cu, Ni, Mn и V, в растительных образцах – Zn и Ni. Измерения проводили в трех повторностях.

По полученным данным были рассчитаны индексы, характеризующие поглощение ТМ растениями из почвы и распределение тяжелых металлов в органах растений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенных исследований было установлено валовое содержание некоторых тяжелых металлов в почвах пробных площадок, отличающихся различной степенью техногенной нагрузки. Результаты представлены в таблице 1.

Из представленных в таблице 1 данных видно, что в целом почва, собранная вблизи поселка Дубровка, отличалась более низким содержанием практически всех исследованных элементов. Данная территория по сравнению с двумя другими расположена в удалении от автомобильных дорог и промышленных предприятий и представляет собой площадку с наименьшим влиянием техногенных факторов. Кроме того, стоит отметить, что на исследуемых площадках на территории вблизи Калининградской ТЭЦ-2 и на территории парка М. Ашманна выявлено превышение ПДК/ОДК для мышьяка и цинка и никеля (площадка около ТЭЦ-2). Для остальных ТМ превышение ПДК не обнаружено. На

исследуемой площадке, расположенной вблизи леса поселка Дубровка Багратионовского района, превышение ПДК/ОДК исследуемых ТМ не выявлено.

Таблица 1

Содержание тяжелых металлов в почве исследуемых площадок
(среднее значение \pm стандартное отклонение)

Химический элемент	Пробные площадки			ОДК* (ПДК**)
	п. Дубровка	Парк М. Ашманна	ТЭЦ-2	
Pb, мг/кг	18,53 \pm 9,23	19,01 \pm 9,45	19,07 \pm 9,51	32*
As, мг/кг	1,09 \pm 3,17	7,13 \pm 3,26	8,51 \pm 3,33	2*
Zn, мг/кг	26,28 \pm 1,75	82,25 \pm 2,25	74,88 \pm 2,21	55*
Cu, мг/кг	0	0	0	33*
Ni, мг/кг	4,62 \pm 1,84	18,75 \pm 1,97	20,61 \pm 2,01	20*
Mn, мг/кг	295,84 \pm 10,73	218 \pm 9,56	304,10 \pm 11,53	1500**
V, мг/кг	19,20 \pm 7,76	60,98 \pm 9,21	69,39 \pm 9,65	150**

Примечание к таблице. * – ориентировочно-допустимые концентрации для валового содержания согласно ГН 2.1.7.2511-09; ** – предельно-допустимые концентрации для валового содержания согласно ГН 2.1.7.2041-06.

Результаты определения содержания цинка и никеля в различных органах исследуемых растений (золотарника канадского, крапивы двудомной и чертополоха колючего) представлены на рисунках 1 и 2.

Более низким накоплением цинка характеризовались растения, произрастающие на территории вблизи поселка Дубровка, почвы которой отличалась также минимальным содержанием цинка по сравнению с другими пробными площадками (рис. 1). Максимальное содержание цинка выявлено во всех исследованных растениях, произрастающих на территории возле ТЭЦ-2. При этом наибольшая разница в содержании цинка в растениях с разных пробных площадок зафиксирована для золотарника канадского (в 2,5 раза), а минимальная – для чертополоха (в 1,6 раз). Стоит отметить, что при повышенном содержании цинка в почве растения золотарника накапливали более высокие концентрации цинка, по сравнению с растениями крапивы двудомной и чертополоха колючего. Ранее в работе (Bielecka, Krolak, 2019) также было установлено, что накопление цинка в растениях золотарника канадского прямо пропорционально его концентрации в почве.

Сравнительный анализ распределения цинка в различных органах исследованных растений показал, что для растений золотарника канадского и чертополоха колючего наиболее высокое содержание цинка было характерно для листьев, тогда как растения крапивы характеризовались более или менее равномерным распределением данного элемента по всем органам, особенно при высоком содержании цинка в почве. Накопление цинка в надземных частях (преимущественно в листьях) золотарника канадского свидетельствует о фитоэкстракционной способности данного растения по отношению к цинку (Bielecka, Krolak, 2019). Выявленная в нашем исследовании тенденция к накоплению цинка в листьях чертополоха колючего позволяет также рассматривать данный вид в качестве растения, обладающего высоким потенциалом к фитоэкстракции цинка из почв. Однако для более обоснованного вывода необходимо проведение дополнительных исследований по накоплению цинка растениями чертополоха колючего, произрастающими на разных типах почв с более широким диапазоном варьирования концентрация цинка в почве.

В отличие от цинка содержание никеля в исследованных растениях в меньшей степени зависело от уровня данного элемента в почвах пробных площадок (рис. 2). Так, для золотарника канадского содержание никеля в растениях, произрастающих возле поселка Дубровка и возле ТЭЦ, было примерно одинаковым (43–44 мг/кг суммарно по всем частям)

и минимальным в растениях с территории парка М. Ашманна (8 мг/кг). При этом уровень никеля в почве парка М. Ашманна и возле ТЭЦ-2 различались незначительно. В растениях крапивы двудомной минимальное содержание никеля уставлено в образцах, собранных с территории возле ТЭЦ-2 (почва с максимальным содержанием никеля), а пробы с двух других территорий достоверно не различались. Для растений чертополоха колючего, напротив, максимальный уровень никеля выявлен в образцах с территории, расположенной возле ТЭЦ-2.

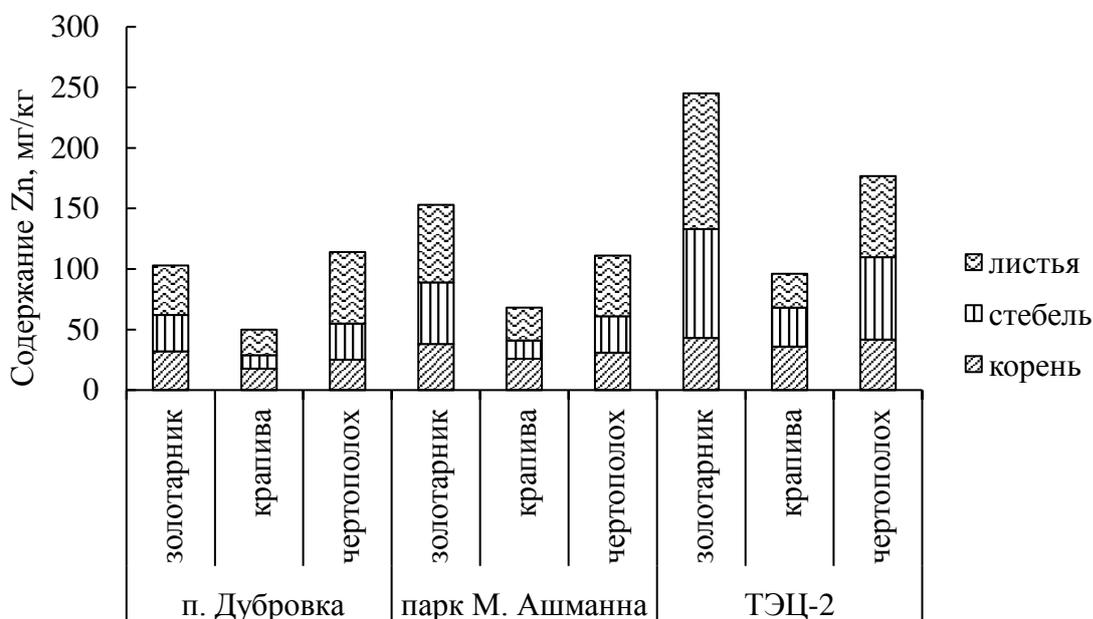


Рис. 1. Содержание цинка в различных частях исследуемых растений в зависимости от места произрастания

Отличалось от цинка и распределение никеля по органам исследованных растений. Для всех растений, произрастающих на почвах с высоким содержанием никеля, максимальный уровень этого элемента был определен в корнях. Особенно высоким содержанием никеля отличались корни крапивы (парк М. Ашманна) и золотарника и чертополоха (ТЭЦ-2). При низком содержании никеля в почве максимальный уровень его накопления отмечался в листьях исследованных растений, за исключением золотарника, для которого и в этом случае максимум был установлен в корнях.

В настоящее время Фармакопея XIV (ФС 1.5.3.0009.15) нормирует содержание в лекарственных растениях таких элементов, как Pb, Cd, Hg, As, для Zn и Ni таких норм не установлено. Согласно (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989) избыточная (токсичная) концентрация цинка для растений находится в пределах от 100 до 400 мг/кг, никеля – от 10 до 100 мг/кг сухого вещества. В соответствии с этими значениями все исследованные виды растений накапливали токсичные концентрации никеля. В отношении цинка растения крапивы, произрастающие на всех пробных площадках, характеризовались относительно невысоким содержанием этого химического элемента (менее 100 мг/кг), остальные изучаемые виды накапливали токсические концентрации цинка.

Коэффициент задержки (КЗ), или акропетальный коэффициент, характеризует депонирующие свойства корня и рассчитывается как отношение содержания элемента в корне к его содержанию в надземной части растений в соответствии с формулой (Сибгатуллина и др., 2014):

$$K3 = \frac{C(\text{Э})_{\text{корень}}}{C(\text{Э})_{\text{надзем. часть}}},$$

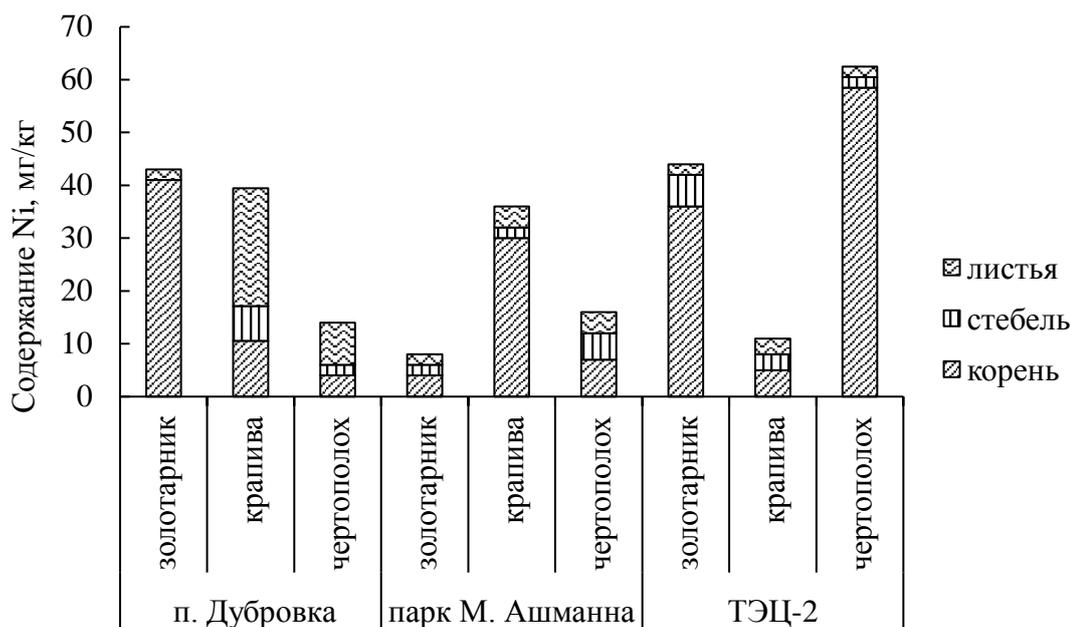


Рис. 2. Содержание никеля в различных частях исследуемых растений в зависимости от места произрастания

где: КЗ – коэффициент задержки; $C(\text{Э})_{\text{корень}}$ и $C(\text{Э})_{\text{надзем.часть}}$ – концентрации химического элемента в корнях и надземной части растения соответственно, мг/кг.

Для сравнения аккумулирующей способности растений были рассчитаны коэффициенты накопления (КН), представляющие собой отношение содержание элемента в сухой массе растения к его валовому содержанию в почве в соответствии с формулой 2 (Глазовский, 1987):

$$\text{КН} = \frac{C(\text{Э})_{\text{растение}}}{C(\text{Э})_{\text{почва}}},$$

где: КН – коэффициент накопления; $C(\text{Э})_{\text{растение}}$ и $C(\text{Э})_{\text{почва}}$ – концентрации химического элемента во всем растении и почве, на котором растение произрастает, соответственно, мг/кг.

Результаты расчетов коэффициентов задержки и накопления для каждого вида растения представлены в таблице 2.

Анализ коэффициентов задержки цинка показал, что все исследованные виды растений отличались низкой депонирующей способностью корней. КЗ для всех растительных образцов был менее 1 вне зависимости от места произрастания растений. Несколько иная ситуация наблюдалась для никеля. Как уже отмечалось выше, некоторые растения активно накапливали никель именно в корнях. В частности, высокие показатели коэффициентов задержки были установлены для растений золотарника, собранных в поселке Дубровка и возле ТЭЦ-2 (20,5 и 4,5 соответственно), растений чертополоха с территории возле ТЭЦ-2 (14,6) и для растений крапивы, произрастающих в парке М. Ашманна (5,0). Более высокое накопление никеля в корнях по сравнению с цинком связано, прежде всего, с высокой биофильностью последнего.

Цинк, в отличие от никеля, обладает более широким спектром функций в растительных организмах, в частности он входит в состав многочисленных ферментов, участвует в репликации ДНК, регуляции экспрессии ряда генов, гормональной регуляции, а также обеспечивает целостность мембран. Несмотря на то, что никель также является эссенциальным для растений микроэлементом, однако потребность в нем у растений значительно ниже по сравнению с цинком. Порог достаточной концентрации никеля

составляет 0,1–5 мг/кг, цинка – 27–150 мг/кг сухого вещества (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989). При этом для растений более характерен избыток никеля, чем его дефицит. Как правило, избыточное накопление никеля приводит к серьезным последствиям для растения – снижению биомассы, замедлению роста, нарушениям процессов фотосинтеза, абсорбции питательных веществ и транспирации, хлорозу и некрозу листьев (Ahmad, Ashraf, 2012). Таким образом, концентрирование никеля в корнях растений и сокращение его транслокации в надземные органы может рассматриваться в качестве защитной реакции растений от его токсического действия.

Таблица 2

Коэффициенты задержки и накопления ТМ исследуемыми видами растений в зависимости от места произрастания

Вид растения	Пробная площадка	Цинк		Никель	
		КЗ	КК	КЗ	КК
Золотарник	п. Дубровка	0,45	3,96	20,5	8,60
	Парк М. Ашманна	0,33	1,87	1,00	0,42
	ТЭЦ-2	0,21	3,27	4,50	2,10
Крапива	п. Дубровка	0,55	4,38	0,37	7,89
	Парк М. Ашманна	0,62	0,83	5,00	1,89
	ТЭЦ-2	0,60	1,28	0,83	0,52
Чертополох	п. Дубровка	0,28	4,38	0,40	2,80
	Парк М. Ашманна	0,39	1,35	0,78	0,84
	ТЭЦ-2	0,31	2,36	14,6	2,98

Как правило, при низком содержании элемента в почве накопительная способность растений увеличивается. В проведенном нами исследовании практически для всех растений, собранных с различных пробных площадок, коэффициенты накопления составляли более 1, как для цинка, так и для никеля. Однако так как разные виды растений отличаются разной потребностью в тех или иных микроэлементах, это нашло отражение и в полученных нами результатах. Так, для никеля наиболее высокие коэффициенты накопления установлены для растений золотарника и крапивы, произрастающих на территории с низким содержанием никеля в почве (8,60 и 7,89 соответственно). Для растений чертополоха КН были в целом ниже – максимальный составил 2,98 и был характерен, напротив, для растений, произрастающих на территории возле ТЭЦ, то есть на почве с высоким содержанием никеля. Высокие коэффициенты накопления для никеля могут быть связаны с высоким содержанием азота в почве. Считается, что крапива является биоиндикатором по отношению к азоту, то есть в большинстве случаев это растение произрастает на почвах, богатых им (Пестова, 2020). Роль никеля в высших растениях, главным образом, связывают с работой фермента уреазы (Ahmad, Ashraf, 2012). Данный фермент катализирует реакцию перевода азота мочевины в аммонийный азот, который в дальнейшем вовлекается в общий метаболизм азота в организме, в том числе в биосинтез различных азотистых соединений (Ahmad, Ashraf, 2012). Таким образом, растениям, произрастающим на почвах с высоким содержанием азота, необходим никель для поддержания оптимальной активности уреазы, обеспечивающей метаболизм азота в растении.

Для более подробного изучения транслокации цинка и никеля по исследуемым растениям также были рассчитаны коэффициенты интенсивности (Ефремов и др., 2015) перехода тяжелых металлов из почвы в корень:

$$I_{\text{почва-корень}} = \frac{C(\text{Э})_{\text{корень}}}{C(\text{Э})_{\text{почва}}}$$

где: $I_{\text{почва-корень}}$ – интенсивность перехода элемента из почвы в корневую систему растения,

$C(\text{Э})_{\text{корень}}$ и $C(\text{Э})_{\text{почва}}$ – концентрации химического элемента в корневой системе растения и почве, на которой произрастает.

Из корня в стебель:

$$I_{\text{корень-стебель}} = \frac{C(\text{Э})_{\text{стебель}}}{C(\text{Э})_{\text{корень}}}$$

где: $I_{\text{корень-стебель}}$ – интенсивность перехода элемента из корневой системы в стебель растения; $C(\text{Э})_{\text{стебель}}$ и $C(\text{Э})_{\text{корень}}$ – концентрации химического элемента в стебле и корневой системе растения.

Из стебля в листья:

$$I_{\text{стебель-листья}} = \frac{C(\text{Э})_{\text{листья}}}{C(\text{Э})_{\text{стебель}}}$$

где: $I_{\text{стебель-листья}}$ – интенсивность перехода элемента из стебля в листья растения, $C(\text{Э})_{\text{листья}}$ и $C(\text{Э})_{\text{стебель}}$ – концентрации химического элемента в листьях и стебле растения.

Результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3

Интенсивности перехода цинка и никеля в системе почва – корень – стебель – листья

Вид растения	Пробная площадка	Цинк			Никель		
		Почва – корень	Корень – стебель	Стебель – листья	Почва – корень	Корень – стебель	Стебель – листья
Золотарник	п. Дубровка	1,23	0,93	1,37	8,20	0	*
	Парк М. Ашманна	0,46	1,34	1,25	0,21	0,50	1,00
	ТЭЦ-2	0,57	2,09	1,24	1,71	0,17	0,33
Крапива	п. Дубровка	0,68	0,61	1,91	2,20	0,64	3,14
	Парк М. Ашманна	0,32	0,58	1,80	1,58	0,07	2,00
	ТЭЦ-2	0,48	0,89	0,88	0,24	0,6	1,00
Чертополох	п. Дубровка	0,96	1,20	1,97	0,80	0,50	4,00
	Парк М. Ашманна	0,38	0,97	1,67	0,37	0,71	0,80
	ТЭЦ-2	0,56	1,62	1,42	2,79	0,03	1,00

Примечание к таблице. * расчет не проводился.

Ранее нами отмечалось о возможной схожести к накоплению цинка у растений золотарника канадского и чертополоха колючего. При анализе коэффициентов интенсивностей перехода эта схожесть проявлялась более выражено. Коэффициенты интенсивности перехода цинка из стебля в листья практически для всех видов были больше 1 не зависимо от уровня этого элемента в почве. Исключение составили растения крапивы, произрастающие на пробной площадке возле ТЭЦ-2. Для этих растений интенсивность перехода цинка из корня в стебель и из стебля в листья была примерно одинаковой, что может свидетельствовать о загрязнении цинком растений крапивы на участке ТЭЦ-2.

Если рассматривать интенсивности перехода никеля по органам, можно отметить, что для растений крапивы и чертополоха, произрастающих на участке с низким содержанием никеля в почве, коэффициенты были наиболее высокими (3,14 и 4,00 соответственно).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено, что почва, собранная на лесной опушке (территория с минимальной техногенной нагрузкой), отличалась более низким содержанием практически всех исследованных элементов (в 1,2–7,0 раз) по сравнению с образцами почв, собранных вблизи Калининградской ТЭЦ-2 и в парке М. Ашманна, для которых, кроме того, обнаружено превышение санитарных показателей для мышьяка, цинка и никеля (площадка около ТЭЦ-2).

2. В результате проведенного исследования выявлено, что золотарник канадский и чертополох колючий активно аккумулировали в листьях цинк: содержание цинка в корнях данных растений было 1,2–2,6 и 1,2–2,0 раз выше по сравнению с его содержанием в стебле и корнях соответственно.

3. В условиях повышенной техногенной нагрузки (территория вблизи ТЭЦ-2) исследуемые растения накапливали в корнях никель. Так, коэффициент задержки никеля для золотарника канадского составил 4,50, крапивы двудомной – 5,00, чертополоха колючего – 0,78.

4. В условиях минимального техногенного воздействия крапива двудомная проявляла выраженную аккумуляционную способность по отношению к никелю, накопление которого происходило в основном в листьях: интенсивность перехода никеля из стебля в листья для растений крапивы двудомной составила 1,00 (ТЭЦ-2), 2,00 (парк Макса Ашманна), 3,14 (поселок Дубровка).

5. Следует также отметить, что отсутствие в Фармакопеи РФ (XIV издание) нормирования содержания цинка и никеля в лекарственных растениях накладывает определенные трудности в стандартизации сырья и может привести к производству и использованию фитопрепаратов, загрязненных данными тяжелыми металлами. В связи с токсичным действием высоких концентраций цинка и никеля на организм человека представляется необходимым включение в Фармакопею нормативных показателей по их содержанию в лекарственном растительном сырье.

Список литературы

Гладков Е. А., Гладкова О. В. Экобиоготехнологические подходы для повышения коэффициента биологического поглощения растений в фиторемедиации // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. – 2019. – № 4. – С. 32–40.

Глазовский Н. Ф. Биогеохимический круговорот химических элементов и подходы к его изучению // Биогеохимический круговорот веществ в биосфере. М.: Наука. – 1987. – С. 56–64.

ГН 2.1.7.2041-06 Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве.

ГН 2.1.7.2511-09 Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве.

ГОСТ Р 58588-2019 Отбор и подготовка растительных проб для изотопного анализа.

Григорьев А. В. Рентгенофлуоресцентный анализ растительных материалов, способы добавок и внешнего стандарта // Известия Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена. – 2012. – №. 144. – С. 82–91.

Данилкина Н. В., Дедков В. П. Распространение золотарника канадского (*Solidago canadensis* L.) в восточной части региона Балтийского моря // Информационные технологии в исследовании биоразнообразия – 2020: Матер. III Нац. науч. конф. с международным участием, посвященная 100-летию со дня рождения академика РАН ПЛ Горчаковского (Екатеринбург, 5–10 октября 2020 г.) – Екатеринбург, 2020. – С. 167.

Джувеликян Х. А., Щеглов Д. И., Горбунова Н. С. Загрязнение почв тяжелыми металлами. Способы контроля и нормирования загрязненных почв. – Воронеж: издательство ВГУ, 2009. – 22 с.

Ефремов И. В., Горшенина Е. Л., Солопова В. А., Рахимова Н. Н., Рябых Е. И., Чернова О. Н. Комплексная оценка миграционной способности и риска загрязнения тяжелыми металлами компонентов почвенно-растительных систем // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2015. – №. 13(188) – С. 133–137.

Захаров В. Л., Кудашкина Т. А., Жихорева В. И. Содержание биологически активных веществ в корнях лекарственных травянистых растений // Агропромышленные технологии Центральной России. – 2018. – № 3. – С. 8–15.

Ильин Б. Б. Тяжелые металлы в системе почва – растение. – Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1991. – 151 с.

Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. – М.: Мир, 1989. – 439 с.

Конспект сосудистый растений Калининградской области: справочное пособие / [Ред. В. П. Дедков]. – Калининград: Калининградский ун-т, 1999. – 107 с.

- Копытько Я. Ф., Лапинская Е. С., Сокольская Т. А. Применение, химический состав и стандартизация сырья и препаратов *Urtica* (обзор) // Химико-фармацевтический журнал. – 2011. – № 10. – С. 32–41.
- Методика выполнения измерений массовой доли металлов и оксидов металлов в порошкообразных пробах почв методом рентгенофлуоресцентного анализа. М 049-П/04. СПб.: ООО НПО «Спектрон», 2004. – 20 с.
- ОФС.1.5.3.0009.15 Определение содержания тяжелых металлов и мышьяка в лекарственном растительном сырье и лекарственных растительных препаратах.
- Перельман А. И., Касимов Н. С. Геохимия ландшафта. – М.: Астрель-2000, 1999. – 404 с.
- Пестова О. А. Биоиндикационный метод определения загрязнителя в окружающей среде // Экологические проблемы региона и пути их разрешения. – 2020. – С. 22–28.
- Семенова В.В. Аккумуляция тяжелых металлов представителями рода тысячелистник (*Achillea L.*) в условиях высотной зональности Северо-восточного Кавказа: дис. ... канд. биол. наук: 03.02.08: спец. Экология (биологические науки). – Нижний Новгород: ПИБР обособленное подразделение ФГБУН Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, 2020. – 141 с.
- Сибгатуллина М. Ш., Александрова А. Б., Иванов Д. В., Валиев В. С. Оценка биогеохимического состояния травянистых растений и почв Волжско-Камского заповедника // Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. – 2014. – Т. 156. – №. 2. – С. 87–102.
- Снежко С. И., Шевченко О. Г. Источники поступления тяжелых металлов в атмосферу // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2011. – №. 18. – С. 35–37.
- Сошников О.В. Изучение химического состава и биологической активности растений рода крапива: автореф. дис. ... канд. фарм. наук. – Курск: ГОУ ВПО «Курский государственный медицинский университет Федерального агентства по здравоохранению и социальному развитию», 2006 – 24 с.
- Сулейманова Ф. Ш., Нестерова О. В., Матюшин А. А. Исторический опыт и перспективы использования травы золотарника канадского (*Solidago canadensis L.*) в медицине // Здоровье и образование в XXI веке. – 2017. – № 4. – С. 142–149.
- Сулоев И. С., Дудецкая Н.А., Теслов Л.С., Лужанин В.Г., Яковлев Г.П. О некоторых видах рода Золотарник (обзор) // Медико-фармацевтический журнал «Пульс». – 2019. – №. 6. – С. 68–76.
- Теплая Г. Н. Тяжелые металлы как фактор загрязнения окружающей среды (обзор литературы) // Астраханский вестник экологического образования. – 2013. - № 1(23) – С. 182–192.
- Титов А. Ф., Казнина Н. М., Таланина В. В. Тяжелые металлы и растения: моногр. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. – 194 с.
- Титов А. Ф., Таланова В. В., Казнина Н. М. Физиологические основы устойчивости растений к тяжелым металлам: учебное пособие – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2011. – 77 с.
- Чернявских В.И. Биологические ресурсы *Urtica Dioica L.*: направления исследований и перспективы использования // Полевой журнал биолога. – 2019. – Т. 1, № 3. – С. 131–149.
- Ahmad M. S. A., Ashraf M. Essential roles and hazardous effects of nickel in plants // Reviews of environmental contamination and toxicology [Ed. D. M. Whitacre]. – New York: Springer, 2012. – P. 125-167.
- Awa S. H., Hadibarata T. Removal of heavy metals in contaminated soil by phytoremediation mechanism: a review // Water, Air and Soil Pollution. – 2020. – Vol. 231, N 2. – P. 47.
- Barsova N., Yakimenko O., Tolpeshita I., Motuzova G. Current state and dynamics of heavy metal soil pollution in Russian Federation — A review // Environmental pollution. – 2019. – Vol. 249. – P. 200–207.
- Bielecka A., Królak E. *Solidago canadensis* as a bioaccumulator and phytoremediator of Pb and Zn // Environmental Science and Pollution Research. – 2019. – Vol. 26, N 36. – P. 36942–36951.
- Kozyra M., Komsta L., Wojtanowski K. Analysis of phenolic compounds and antioxidant activity of methanolic extracts from inflorescences of *Carduus* sp. // Phytochemistry letters. – 2019. – N 31. – P. 256–262.
- Peng J. S., Guan Y. H., Lin X. J., Xu X. J., Xiao L., Wang H. H., Meng S. Comparative understanding of metal hyperaccumulation in plants: a mini-review // Environmental Geochemistry and Health. – 2020. – P. 1–9.
- Seregin I. V., Kozhevnikova A. D. Physiological role of nickel and its toxic effects on higher plants // Russian Journal of Plant Physiology. – 2006. – Vol. 53, N 2. – P. 257–277.
- Shahzad B., Tanveer M., Rehman A., Cheema S. A., Fahad S., Rehman S., Sharma A. Nickel; whether toxic or essential for plants and environment – A review // Plant Physiology and Biochemistry. – 2018. – Vol. 132. – P. 641–651.
- Varut R. M., Gird C. E., Rotaru L. T., Varut M. C., Pisoschi C. G. Evaluation of polyphenol and flavonoid profiles and the antioxidant effect of *Carduus acanthoides* hydroalcoholic extract compared with vaccinium myrtillus in an animal model of diabetes mellitus // Pharmaceutical Chemistry Journal. – 2018. – Vol. 51, N 12. – P. 1088–1095.

Golovin A. V., Skrypnik L. N., Masyutin Ya. A. Particularities of zinc and nickel accumulation by certain medicinal plants in territories with varying degrees of technological load // Ekosistemy. 2021. Iss. 26. P. 67–77.

The article focuses on the study of zinc and nickel accumulation patterns of certain medicinal plants. The subjects of the study are the species that are characterized by a rich complex of phytochemical components and have various biological activities: nettle (*Urtica dioica* L.), Canadian goldenrod (*Solidago canadensis* L.), and thistle (*Carduus acanthoides* L.). X-ray fluorescence spectrometry was used to analyze the content of heavy metals (Pb, Zn, Cu, Ni, Mn, V) in the soils at test sites with different degrees of anthropogenic load: the forest edge of the village of Dubrovka, Bagrationovsky district, Kaliningrad region; the territory of the Max Aschmann Park in Kaliningrad; the area near the Kaliningrad Thermal Power Station-2 (TPS-2). It was revealed that the soil collected near the village of Dubrovka had a lower content of practically all the studied elements. In the soil near the Kaliningrad TPS-2 and in the territory of the M. Ashmann Park, the excess of the standard sanitary indicators of arsenic, zinc and nickel was detected. The content of zinc and nickel in various organs of the studied plant species (roots, stems, leaves) growing on the soils of the test sites was analyzed. To characterize the particularities of zinc and nickel accumulation by plants, the following factors were calculated: a delay factor, a concentration coefficient and a rate of element transition. The zinc content of plants was found to vary from 50 to 250 mg/kg, nickel from 10 to 65 mg/kg, depending on the plant species and site. Based on the analysis of the obtained data, it was revealed that the leaves of goldenrod and thistle accumulated zinc (zinc content in leaves was 1.2–2.6 times higher compared to stems and roots). The leaves of nettle accumulated nickel under minimal anthropogenic impact, (the nickel content in leaves was 2-3 times higher compared to stems and roots). It was highlighted that the root system of the plant species under study accumulates nickel under conditions of high technological load.

Key words: zink, nickel, nettle, goldenrod, thistle, accumulation.

*Поступила в редакцию 18.02.21
Принята к печати 06.04.21*

УДК 631*4:621.43.06:633.877

Влияние содержания тяжёлых металлов на молекулярную динамику функциональных групп структуры хвойных деревьев

Умаров Н. Н.¹, Абдуманонов А.², Шукуров Т.³, Абдулаев С. Ф.³

¹Худжандский государственный университет имени академика Б. Гафурова
Худжанд, Таджикистан,
nasimchon-74@mail.ru

²Худжандский научный Центр НАНТ
Худжанд, Таджикистан
abduali-53@mail.ru

³Физико-технический институт имени С. У. Умарова НАНТ
Душанбе, Таджикистан,
t_shukurov@mail.ru

Методами инфракрасной спектроскопии и рентгенофлуоресцентного анализа исследовано влияние выхлопных газов автотранспорта на молекулярную динамику функциональных групп вечнозелёных декоративных хвойных деревьев. Выявлено, что колебания значений спектральных характеристик функциональных групп в зависимости от вида деревьев изменяются. Показано, что максимум полосы поглощения в области гидроксильных групп исследованных деревьев смещается от 10 до 50 см⁻¹, в области метильно-метиленовых групп – от 10 до 30 см⁻¹, а в области деформационных колебаний С–О–Н – от 10 до 20 см⁻¹, что, очевидно, связано с изменением межмолекулярного взаимодействия функциональных групп. Концентрация тяжёлых металлов в листьях вечнозелёных декоративных растений отражается на инфракрасных спектрах, о чём свидетельствуют смещения максимума полос поглощения и интенсивности полос. Установлено, что кипарис арizonский (*Cypress arizonica*), можжевельник заравшанский (*Juniperus seravschanica*) и туя восточная (*Thuja orientalis*) поглощают свинца примерно в 3 раза больше, чем каждого из других исследованных элементов, кипарис вечнозелёный (*Cypress sempervirens*) поглощает больше мышьяка более чем в 1,5 раза, а можжевельники *Juniperus seravschanica* и *Juniperus virginiana* поглощают примерно в 1,5 раза больше кобальта. Установлено, что коэффициент биологического поглощения в зависимости от вида деревьев и металлов изменяется от 0,1 до 3,6 раза. Сделан вывод, что при правильном подборе и размещении растений и использовании современных методов их выращивания можно значительно снизить загрязнение окружающей среды – воздуха и почвы.

Ключевые слова: колебания функциональных групп, тяжёлые металлы, хвойные деревья, рентгенофлуоресцентный анализ, инфракрасная спектроскопия.

ВВЕДЕНИЕ

В современном технологическом мире в результате производственной деятельности человека происходит загрязнение атмосферы, водной среды и почвы. В промышленно развитых странах, по оценкам специалистов (Коробкин, Передельский, 2001; Березина, Афанасьева, 2009; Добровольский, Никитин, 2012), загрязнение воздуха более чем на 50 % обусловлено транспортом, около 20 % приходится на отопительные системы, столько же на промышленность, около 10 % на переработку и сжигания отходов.

В состав выхлопных газов входят разные компоненты – сернистый газ (SO₂), оксиды азота (NO, NO₂), угарный газ (CO₂), озон (O₃), соединения фтора, углеводороды, а также тяжёлые металлы (ТМ), которые загрязняют атмосферу и почву (Березина, Афанасьева, 2009; Добровольский, Никитин, 2012).

Загрязнения атмосферы, почв, биообъектов выхлопными газами и тяжёлыми металлами приводят к ухудшению экологических условий окружающей среды (Коробкин, Передельский, 2001; Березина, Афанасьева, 2009). Растения и деревья, которые растут в этих условиях, естественно реагируют на загрязнённости среды, при этом происходят изменения структуры и свойства биоматериалов. Однако, влияние экологических условий на структуру

и свойства биообъектов растительного происхождения для декоративных вечнозелёных растений, произрастающих в Северном Таджикистане, практически не исследовано. В связи с этим, важным является детальное исследование влияние экоусловий на структуру и свойства указанных биообъектов прямыми физическими методами, в том числе методом инфракрасной (ИК) спектроскопии и рентгенофлуоресцентного анализа.

Цель работы – исследовать колебания функциональных групп для выявления количественного содержания тяжелых металлов в составе листьев вечнозелёных декоративных деревьев.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В качестве объектов исследований были выбраны образцы листьев кипариса аризонского (*Cypress arizonica* E. L.) и кипариса вечнозелёного (*Cypress sempervirens* L.), можжевельника виргинского (*Juniperus virginiana* L.) и можжевельника зеравшанского (*Juniperus seravschanica* Kom.), а также туи восточной (*Thuja orientalis* L.).

Для проведения ИК-спектроскопических исследований образцы, листья хвойных деревьев отобрали в середине августа. Для повышения надёжности экспериментальных результатов, а также для статистики образцы были отобраны у шести деревьев. Образцы (листья) собирали с высоты 2–2,3 м от поверхности земли. Расстояние между деревьями составило около 50 м.

ИК-спектры записывались на спектрометре SPECORD-75IR. Образцы были приготовлены согласно (Ильяшенко и др., 2009; Умаров и др., 2014, 2016, 2020). В состав таблетки входило 600 мг КВг (калий бром) и 8 мг измельченной листвы растений.

Для получения информации о влиянии окружающей среды на накопление микроэлементов и ТМ был проведен рентгенофлуоресцентный анализ. Относительное содержание ТМ в хвойных растениях определено по методике, предложенной в работах (Ширкин, 2009; Абдуллаев и др., 2019; Умаров и др., 2020).

В работе для определения коэффициента биологического поглощения элементов растений использовали формулу, предложенную в работах (Растения для..., 1986; Федорова, 1996; Абдуллаев и др., 2019):

$$K_i^{бп} = \frac{C_i^p}{C_i^{почв}},$$

где: C_i^p – содержание i -го тяжёлого металла в растении, мг/кг; $C_i^{почв}$ – содержание i -го тяжёлого металла в почве, мг/кг.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Мониторинг экологической ситуации окружающей среды в современном технологическом мире является важнейшей задачей общества и науки. Растительный мир, в том числе, декоративные деревья, которые широко используются для озеленения и очистки воздуха в урбанистической среде, являются индикатором экологического состояния внешней среды.

На рисунке 1 приведены примеры ИК-спектров листьев деревьев из одинаковых экологических условий среды. В таблице 1 приведены ИК-спектроскопические характеристики листьев указанных видов деревьев.

Из данных таблицы и рисунка 1 можно заключить, что во всех спектрах в диапазоне частот 2600–3800 см⁻¹ наблюдаются две широкие полосы с максимумами при 3280, 2910 см⁻¹ – *Cypress arizonica*; 3280, 2900 см⁻¹ – *Juniperus virginiana* .; 3250, 2890 см⁻¹ – *Juniperus seravschanica*.; 3280, 2880 см⁻¹ – *Thuja orientalis* .; 3250, 2890 см⁻¹ – *Cypress sempervirens* ., также полоса с более низкой интенсивностью в области 2880–2990 см⁻¹. Согласно (Ильяшенко и др., 2009; Умаров и др., 2014, 2016), первую полосу с максимумами в области 3290–3240 см⁻¹ можно отнести к валентным колебаниям межмолекулярных связей ОН-групп. Как видно,

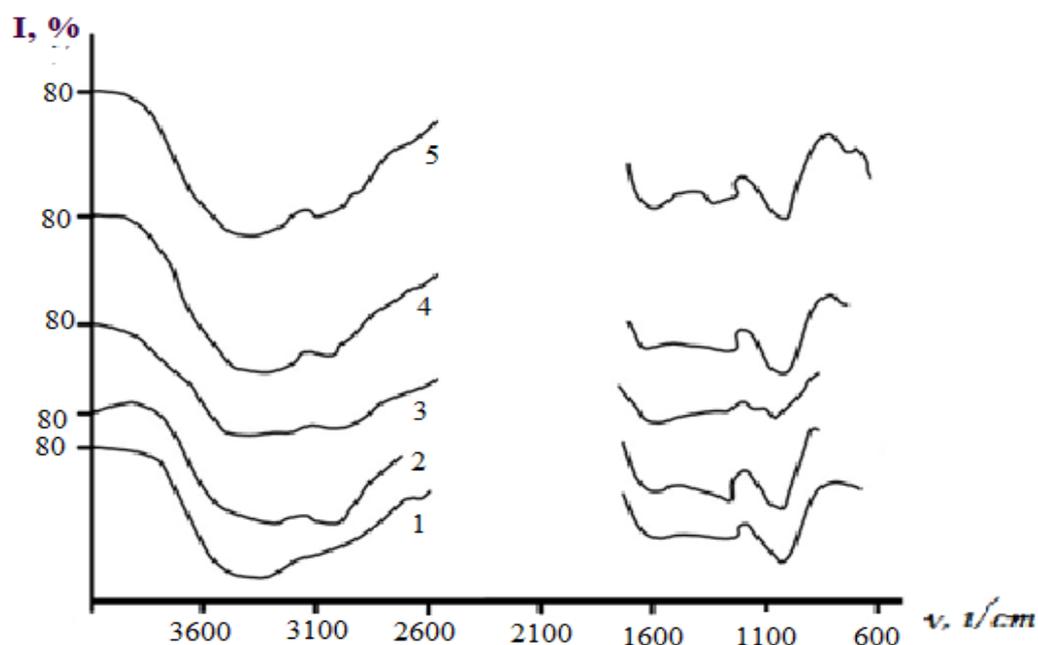


Рис. 1. ИК-спектры листьев вечнозелёных растений

1 – кипарис аризонский (*Cypress arizonica*), 2 – можжевельник виргинский (*Juniperus virginiana*), 3 – можжевельник зеравшанский (*Juniperus seravschanica*), 4 – туя восточная (*Thuja orientalis*), 5 – кипарис вечнозелёный (*Cypress sempervirens*). По вертикали: I – интенсивность полос поглощения; по горизонтали: ν – частота максимумов полос поглощения.

Таблица 1

Спектральные характеристики листьев вечнозелёных хвойных деревьев

Вид	Функциональная группа	$\nu_{max} \text{ см}^{-1}$	D	$0,5\nu \text{ см}^{-1}$
Кипарис аризонский (<i>Cypress arizonica</i> .)	ОН CH, CH ₂ , CH ₃ C–O–H	3290	0,506	430
		2910	0,438	
		1080	0,300	
Можжевельник виргинский (<i>Juniperus virginiana</i>)	ОН CH, CH ₂ , CH ₃ C–O–H	3280	0,359	520
		2900	0,270	
		1070	0,320	
Можжевельник зеравшанский (<i>Juniperus seravschanica</i> .)	ОН CH, CH ₂ , CH ₃ C–O–H	3250	0,351	720
		2890	0,293	
		1090	0,270	
Туя восточная (<i>Thuja orientalis</i>)	ОН CH, CH ₂ , CH ₃ C–O–H	3280	0,590	520
		2880	0,325	
		1090	0,293	
Кипарис вечнозелёный (<i>Cypress sempervirens</i> .)	ОН CH, CH ₂ , CH ₃ C–O–H	3240	0,351	420
		2890	0,351	
		1090	0,370	

Примечание к таблице. ν_{max} – частота максимумов полос поглощения функциональных групп; D – оптическая плотность функциональных групп; $0,5\nu$ – полуширина полос поглощения гидроксильных групп.

спектры отличаются друг от друга по величине полуширины полос поглощения, оптической плотности, а также смещения полос поглощения на величину до 50 см^{-1} , очевидно, это зависит от вида деревьев и их структурного строения. Можно полагать, что эти изменения связаны с

инородными веществами в составе древесины. Полосы поглощения в области 2880–2910 см⁻¹, имеющие широкую полуширину полос с незначительной интенсивностью, можно отнести к валентным колебаниям метильных и метиленовых функциональных групп. Обычно в этой области появляются две или три чёткие узкие полосы поглощения, однако, в нашем случае вместо редких узких полос наблюдается одна широкая полоса с максимумом при 2910–2880 см⁻¹. Появление широких полос в данной области частот можно отнести за счёт наложения полос поглощения метильных и метиленовых функциональных групп. Незначительные смещения около 30 см⁻¹ полос поглощения можно объяснить за счёт меж- и внутримолекулярных взаимодействий этих функциональных групп.

Полоса поглощения деформационных колебаний С–О–Н наблюдается при частотах для кипариса аризонского – 1080; можжевельника виргинского – 1070; можжевельника зеравшанского – 1090; туи восточной – 1090 и кипариса вечнозелёного – 1090 см⁻¹. Здесь также наблюдаются смещения частот максимумов полос поглощения на 20 см⁻¹ и изменение интенсивности от вида деревьев. Это свидетельствует о неравнозначности межмолекулярных взаимодействий функциональных групп листьев исследованных растений, то есть они, возможно, по-разному поглощают вредные вещества из состава атмосферы и почв, что отражается на ИК-спектрах.

Изучение концентрации ТМ в почвах и растениях позволяет оценить распределение и миграции этих веществ в экосистеме.

В таблице 2 приведены результаты анализа микроэлементов ТМ в листьях деревьев, полученных рентгенофлуоресцентным методом. По результатам анализа обнаружено, что декоративные хвойные деревья по-разному поглощают тяжёлые металлы.

Таблица 2

Содержание тяжелых металлов в листьях хвойных деревьев (мг/кг воздушно-сухой массы)

Металлы и их оксиды	Кипарис аризонский (<i>Cypress arizonica</i>)	Можжевельник виргинский (<i>Juniperus virginiana</i>)	Можжевельник зеравшанский (<i>Juniperus seravschanica</i>)	Туя восточная (<i>Thuja orientalis</i>)	Кипарис вечнозелёный (<i>Cypress sempervirens</i>)	Почва
Sr	84,6	85,2	85,3	84,0	86,4	91,34
Pb	22,2	15,1	22,1	22,3	8,05	6,06
As	40,6	57,3	50,2	50,4	75,3	51,2
Zn	34,2	32,2	37,3	30,2	33,4	32,5
Cu	54,1	54,3	53,1	54,6	54,1	49,9
Ni	2,10	1,10	2,13	0,75	1,04	8,12
Co	1,30	1,80	1,70	1,20	1,32	1,10
Fe ₂ O ₃ (%)	2,14	2,11	2,15	2,13	2,14	1,70
MnO	142,0	142,2	143,5	142,6	142,1	150,9
Cr	94,3	94,4	94,0	94,1	94,5	94,8
V	74,3	68,1	73,2	68,6	67,3	66,8

Примечание к таблице. Тяжёлые металлы: Sr – стронций, Pb – свинец, As – арсений, Zn – цинк, Cu – медь, Ni – никель, Co – кобальт, Fe₂O₃ – оксид железа, MnO – оксид марганца, Cr – хром, V – ванадий.

На рисунке 2 приведены коэффициенты биологического поглощения ТМ листьями деревьев. Этот параметр можно использовать для оценки экологического состояния окружающей среды. В случае $K_i^{бп} > 1$ можно говорить о высоком накоплении элементов, если $K_i^{бп} < 1$, то можно говорить о низком уровне накопления тяжёлых металлов и их оксидов.

Из данных рисунка 2 и таблицы 2 видно, что самое большое количество свинца имеется в листьях *Cypress arizonica*, *Juniperus seravschanica* и *Thuja orientalis*, то есть эти деревья хорошо поглощают атомы свинца. А мышьяка больше всего поглощают *Cypress Sempervirens* L. и *Juniperus Virginiana* (L.). Атомов никеля больше чем другие, поглощают *Juniperus seravschanica* Kom. и *Cypress arizonica* *Juniperus seravschanica* и *Juniperus virginiana* больше поглощают атомов кобальта. Содержание других элементов ТМ отличается от 5 до 15 % для остальных изученных хвойных деревьев.

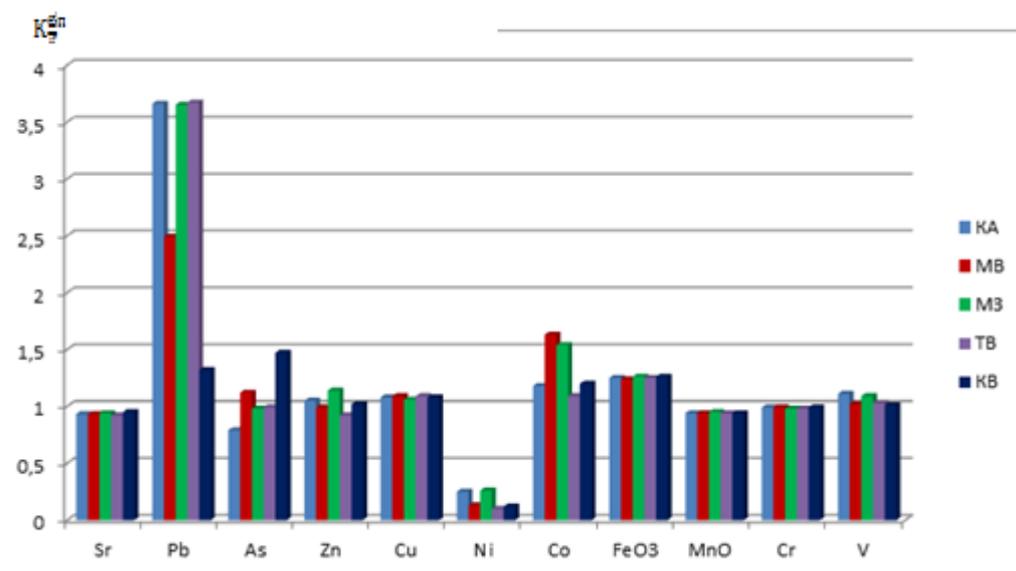


Рис. 2. Диаграмма коэффициента биологического поглощения (K_i^{bp}) тяжёлых металлов и оксидов листьями деревьев

КА – кипарис арizonский, MB – можжевельник виргинский, M3 – можжевельник зеравшанский, TB – туя восточная, KB – кипарис вечнозеленый.

Накопление ТМ в листьях отражается и на ИК-спектрах, о чём свидетельствует уменьшение интенсивности полос поглощения функциональных групп *Juniperus Seravschanica* и *Juniperus virginiana*, а также *Cypress arizonica*.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате ИК-спектроскопического и рентгенофлуоресцентного исследований листьев хвойных растений установлено, что максимумы и интенсивности полос поглощения меж- и внутримолекулярных связей зависят от концентрации тяжёлых металлов в их составе. Тяжелые металлы (ТМ) существенно влияют на молекулярную динамику функциональных групп листьев и, тем самым, на их физико-химические свойства. На основе анализа результатов ИК-спектров и рентгенофлуоресцентного анализа можно оценить влияние ТМ на количество функциональных групп растений.

Как показали результаты исследований, *Cypress arizonica*, *Juniperus seravschanica* и *Thuja orientalis* поглощают свинца примерно в три раза больше, чем каждого из других элементов, *Cypress sempervirens* более чем в 1,5 раза поглощает больше мышьяка, а можжевельники *Juniperus seravschanica* и *Juniperus virginiana* поглощает примерно в 1,5 раза больше кобальта.

В зависимости от вида деревьев коэффициент биологического поглощения изменялся от 0,1 до 3,6. Результаты оценок поглощения тяжелых металлов хвойными деревьями свидетельствуют о возможности использования указанных растений в качестве своеобразных фильтров для реабилитации атмосферы и почв, загрязненных веществами выхлопных газов, в том числе ТМ. Поэтому, правильным подбором и размещением растений по территории с использованием современных методов их выращивания можно значительно уменьшить загрязнение воздуха и почвы, что позволит, в целом, улучшить экологическое состояние окружающей среды.

Благодарности. Авторы выражают признательность директору ФТИ имени С. У. Умарова НАНТ кандидату физико-математических наук Фарходу Шокиру за всестороннюю поддержку в проведении экспериментальных работ.

Список литературы

- Абдуллаев С. Ф., Сафаралиев Н. М., Партоев К. Исследование биологического поглощения тяжёлых металлов растением-фиторемедиантом – топинамбуром (*Helianthus tuberosus* L.) // Химическая безопасность. – 2019. – Т. 3, № 1. – С. 110–117.
- Березина Н. А., Афанасьева Н. Б. Экология растений. – М.: Издательский центр «Академия», 2009. – 400 с.
- Добровольский Г. В., Никитин Е. Д. Экология почв. – М.: Изд-во Московского университета, 2012. – 412 с.
- Ильяшенко Н. В., Дементьева С. М., Хижняк С. Д., Пахомов П. М., Ильяшенко В. Д. Использование метода Фурье ИК-спектроскопии для изучения изменений химического состава (*Potentilla erecta* (L.) Raeusch. под действием антропогенных факторов // Вестник Тверского государственного университета. Серия Биология и экология. – 2009. – Вып. 13. – С. 211–220.
- Коробкин В. И., Передельский Л. В. Экология. – Ростов-на-Дону: Изд-во «Феникс», 2001. – 576 с.
- Растения для декоративного садоводства Таджикистана. – М.: Наука, 1986. – 15 с.
- Умаров Н., Давлатмамадова С. Ш., Шукуров Т., Усмонов А., Марупов Р. Влияние экологических факторов молекулярного структурообразования корней донника лекарственного (*Melelotus officinalis* (L.) Pall.) // Доклады академии наук Республики Таджикистан. – 2014. – Т. 57, № 3. – С. 215–219.
- Умаров Н. Н., Шукуров Т., Юсупов И. Х., Марупов Р. Исследования влияния дозы радиационного фона на спектральные характеристики лекарственного донника (*Melilotus officinalis* L.) методом ИК- и ЭПР-спектроскопии // Ученые записки Худжанского государственного университета имени академика Б. Гафурова. Естественные и экономические науки. – 2016. – № 4 (39). – С. 52–60.
- Умаров Н. Н., Шукуров Т., Абдуллаев С. Ф. Влияние пестицидов на содержание тяжёлых металлов и молекулярную динамику растительных природных соединений // Экосистемы. – 2020. – Выпуск 24. – С. 152–157.
- Федорова А. И. Биоиндексация состояния городской среды по реакции древесных растений // Геоэкологические проблемы устойчивого развития городской среды. Воронежского государственного университета «Квадрат». – 1996. – С. 212–213.
- Ширкин Л. А. Рентгенофлуоресцентный анализ объектов окружающей среды. – Владимир: Изд-во Владимирского государственного университета, 2009. – 65 с.

Umarov N. N., Abdumanonov A., Abdullayev S. F., Shukurov T. Influence of Heavy Metal Content on Molecular Dynamics of Functional Groups of Coniferous Trees Structure // Ekosistemy. 2021. Iss. 26. P. 78–83.

The influence of exhaust gases and heavy metals (HM) content on the molecular dynamics of functional groups of evergreen ornamental coniferous trees was studied by infrared spectroscopy and X-ray fluorescence analysis. Moreover, it was revealed that the fluctuations in the values of the spectral characteristics of functional groups varied depending on the tree species. The analyses showed that the maximum of the absorption band of hydroxyl groups shifted from 10 to 50 cm^{-1} , while methyl-methylene groups experienced shifts from 10 to 30 cm^{-1} , and deformation vibrations of C–O–H from 10 to 20 cm^{-1} . These results are the most probably connected with a change in the intermolecular interaction of functional groups. The concentration of heavy metals in the leaves of ornamental perennial plants influenced infrared spectra. This conclusion was supported by shifts of maximum of absorption bands and intensity of the bands. It was found out that *Cypress arizonica*, *Juniperus seravschanica* and *Thuja orientalis* absorbed approximately 3 times more lead than each of the other studied elements; *Cypress sempervirens* absorbed 1.5 times more arsenic; *Juniperus seravschanica* and *Juniperus virginiana* absorbed about 1.5 times more cobalt. It is concluded that correct selection and placement of plants enforced by application of modern methods of their cultivation can result in significant reduction of air and soil pollution.

Key words: fluctuations of functional groups, heavy metals, coniferous trees, X-ray fluorescence analysis, infrared spectroscopy.

Поступила в редакцию 02.03.21
Принята к печати 06.04.21

УДК 594.382(292.471):591.9

Первая находка испанского слизня *Arion vulgaris* (Pulmonata, Arionidae) в Крыму

Леонов С. В.

Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского
Симферополь, Республика Крым, Россия
leo-zoology@yandex.ru

В работе представлены данные о первых находках слизней рода *Arion* на территории Крымского полуострова, в том числе о первой анатомически подтверждённой находке испанского слизня (*Arion lusitanicus* auctt., non Mabile, 1868, или *Arion vulgaris* Moquin-Tandon, 1855). Показано, что размеры и внешний облик позволяют отнести данного слизня к подроду *Arion* s. str., а строение половой системы (более длинный по отношению к атриуму яйцевод и удлинённая лигула) дифференцирует его от остальных представителей подрода. Обнаружение свежих кладок и разновозрастных особей в течение года позволяют говорить о размножении вида в Крыму и о потенциальной возможности его расселения по территории полуострова.

Ключевые слова: *Arion vulgaris*, *Arion lusitanicus*, испанский слизень, Крым.

ВВЕДЕНИЕ

Крупные оранжевые или коричневые слизни из рода *Arion* (рис. 1 *a-d*), широко расселившиеся за минувшее столетие по Европе, известны под названием «испанский слизень» («Spanish slug» – англ.). Проблема заключается в том, что группа слизней из рода *Arion* практически не дифференцируема по внешнему виду, и А. Мокин-Тандон (Moquin-Tandon, 1855, с. 10), описывая компанию разнообразных сортов «*Arion rufus* Linnaeus, 1758», вполне уместно именует их «обманщиками» («des charlatans» – фр.). Именно в этой работе содержится первое описание внешнего облика, а главное – половой системы, соответствующее тому «испанскому слизню», который уже не первое десятилетие расселяется по Европе, продвигаясь в основном с запада на восток (Лихарев, Виктор, 1980; Гураль-Сверлова, Гураль, 2011; Welter-Schultes, 2012; Балашов, 2016 и др.). В России вид был впервые обнаружен в 2009 году в промышленных теплицах Твери (Шиков, 2016), в настоящее время он встречается в Москве и Подмосковье, а недавно был найден во Владикавказском дендрарии (Северная Осетия) (Шиков, Комаров, 2020) – авторы называют его в этой своей работе *A. lusitanicus* s. l.

Необходимо отметить, что использование названия «*Arion lusitanicus* Mabile, 1868» по отношению к этому широко распространённому и активно расселяющемуся западноевропейскому слизню поставлено под сомнение довольно давно, причём И. М. Лихарев и А. Й. Виктор (1982) отмечают также, что это название применялось к разным представителям подрода. По остроумному замечанию И. В. Балашова (Balashov, 2018, с. 12) широко распространённый вид оказался «практически безымянным (practically nameless – англ.)». Приводя целый ряд довольно веских аргументов, автор (Balashov, 2018) предлагает закрепить за обсуждаемым видом не совсем корректное, но уже устоявшееся за последние годы название «*A. vulgaris* Moquin-Tandon, 1855», и мне кажется, что это мнение вполне убедительно обосновано.

Если обратиться к первоисточнику (Moquin-Tandon, 1855), становится понятно, что автор описания не рассматривал форму «*vulgaris*» как самостоятельный вид. Фактически в работе указано, что все описания и рисунки с 1 по 27 в таблице I относятся к виду *A. rufus*, а отдельные уточнения касаются разных сортов. Сорту «*vulgaris*» в таблице посвящён лишь один рисунок (Moquin-Tandon, 1855, Pl. I, fig. 1), где изображён внешний вид слизня



Рис. 1. Находки *Arion* sp. в Симферопольском районе (Крым, Россия)

a – лиственный лес в окрестностях с. Краснолесье (масштабный отрезок ~50 мм, фото А. Н. Бондаря, 2013); *b–d* – садовый центр «Велес», с. Перевальное (фото Т. В. Усик, 2018); *e* – кладки *Arion vulgaris* 17.09.2019 в садовом центре «Велес» (фото О. С. Чеботарёвой).

(рис. 2*b*), и одна лишь фраза в описании – «Животное рыжее или коричневатое, одноцветное (Animal roux ou brunatre, unicolore – фр.)» (Moquin-Tandon, 1855, с. 10). Очевидно, что подобного описания для точной идентификации вида недостаточно. Однако приводимый здесь же рисунок половой системы *A. rufus* (Moquin-Tandon, 1855, Pl. I, fig. 12), который автор не связывает с каким-либо из описанных вариантов, явно относится не к этому виду (в его современном понимании), а к нашему – «безымянному»: здесь хорошо видны характерные пропорции атриума (*atrium*) и яйцевода (*oviduct*) (рис. 2*c*).

A. vulgaris может распространяться не только с растениями, но, вероятно, и с почвой, камнями, древесиной, мусором и другими материалами (Kozłowski, 2007; Păpureanu et al., 2014). Благодаря высокой экологической пластичности, вид быстро завоёвывает новые места обитания и почти всегда при этом наносит существенный сельскому хозяйству (Proschwitz 1996; Dvořák, Horsák, 2003; Kozłowski, 2007 и др.).

Наиболее вероятным представителем рода *Arion*, отмечаемым в Крыму последние годы, является испанский слизень, однако для достоверной идентификации вида необходимы половозрелые экземпляры и их анатомическое исследование.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Первичной информацией послужили опросы местных жителей и, в особенности, сотрудников садовых центров и ландшафтных дизайнеров по поводу периодических встреч с «крупными рыжими слизнями» (в период 2005 – 2010 гг.), однако проверка этих сведений на месте ни разу не привела к успешной находке. Первые достоверные случаи регистрации (2013, 2018 гг.) обеспечены фотографиями, сделанными туристами и сотрудницами садового центра «Велес» (с. Перевальное, Симферопольский район) на встроенные камеры смартфонов (рис. 1). В декабре 2018 года сотрудницами указанного центра был собран и зафиксирован в 96% этаноле натуральный материал (15 разновозрастных экземпляров, из них – 5 половозрелых). Для идентификации вида было проведено вскрытие 3 экземпляров и изучение половой системы. В сентябре 2019 года были собраны живые слизни (8 экземпляров), два из которых впоследствии также были анатомированы. Помимо этого, во время весеннего и

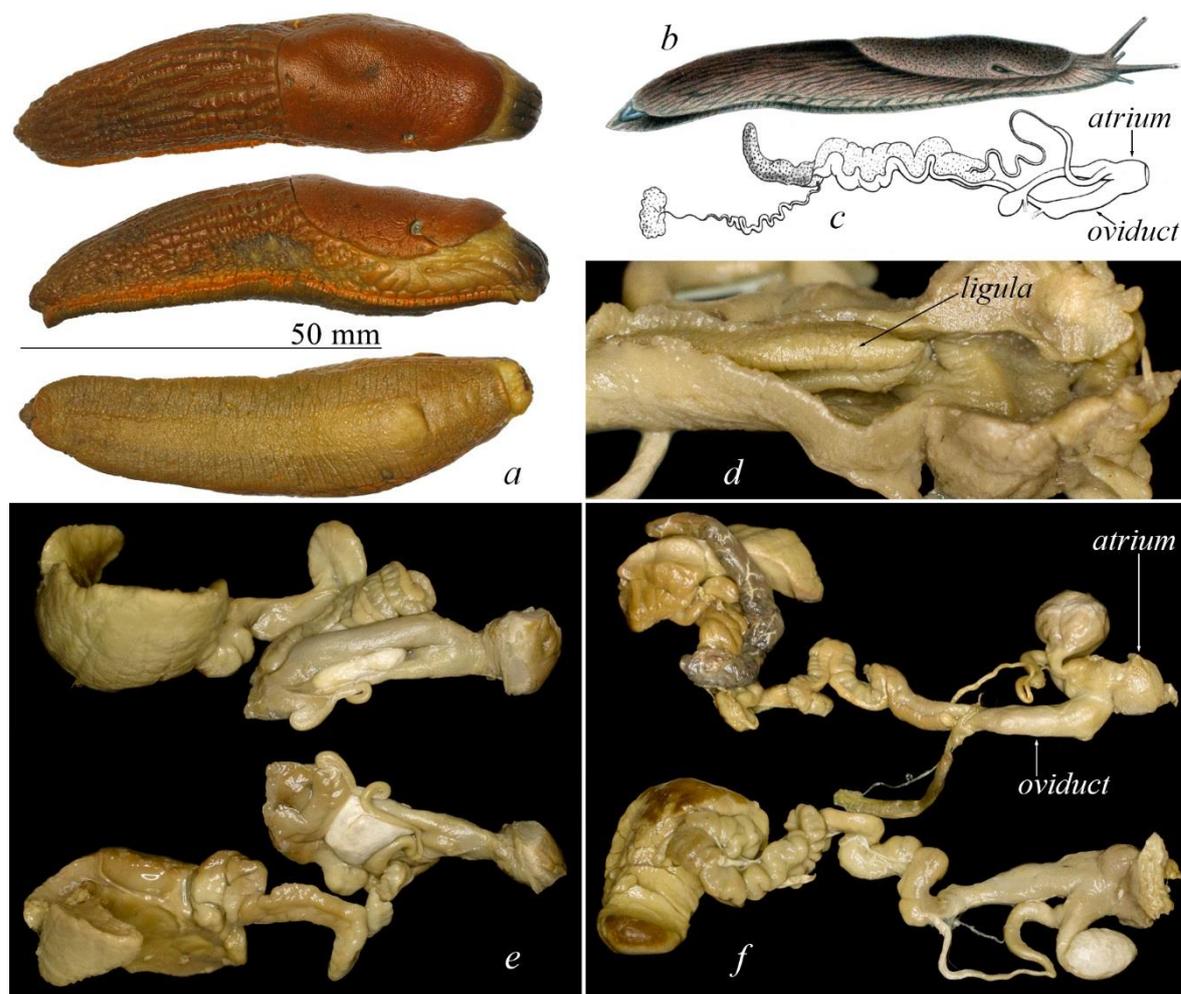


Рис. 2. *Arion vulgaris* Moquin-Tandon, 1855

a – внешний вид *Arion vulgaris*, найденного в садовом центре «Велес» (с. Перевальное, Симферопольский район, Крым, Россия), после фиксации в спирте (фото С. В. Леонова, 2019); *b, c* – “*Arion rufus*” из Moquin-Tandon, 1855: внешний вид варианта “*vulgaris*” (*b*) и половая система (*c*) (Pl. 1, fig. 1 и 12 оригинала, соответственно); *d-f* – половая система *Arion vulgaris* из садового центра «Велес» (фото С. В. Леонова, 2019): вскрытый яйцевод (*d*), общий вид в компактном (*e*) и расправленном (*f*) состоянии.

осеннего выездов в садовый центр «Велес» на месте была проведена оценка размерно-возрастного состава. В течение 2020 года сотрудниками питомника растений «Добрый жук» мне были переданы несколько разновозрастных (в том числе половозрелых) экземпляров коричневых слизней, которые относились к роду *Arion* и были мной анатомированы.

В качестве определителя использована монография И. М. Лихарева и А. Й. Виктора (1982). Материал хранится на кафедре экологии и зоологии Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского (Симферополь). Фотографии получены с использованием оптической системы из фотоаппарата Canon EOS 650D, удлинительного кольца Kenko 20 мм, объектива Canon EF 50mm f/1.8 STM и кольцевого светодиодного осветителя для макросъемки Amaron Halo ACL-C60. Для максимально корректной цветопередачи был использован автоматический баланс белого (при постобработке) на фотографиях с рисунка 1 и настроенный по белому полю (во время съёмки) на фотографиях с рисунков 2 (кроме 2*b*) и 3.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Впервые слизень из рода *Arion* был достоверно зарегистрирован в Крыму в 2013 (Леонов, Бондарь, 2013). А. Н. Бондарь нашёл и сфотографировал крупного (для масштаба при съёмке был использован спичечный коробок длиной около 50 мм) оранжевого слизня (рис. 1а) в лиственном лесу недалеко от Симферополя (примерно в 1 км к юго-западу от села Краснолесье). К сожалению, натуральный материал не был собран. По фотографиям мне удалось определить, что слизень относится к роду *Arion*: несмотря на посредственное качество фото, на нём видно, что мантия составляет около трети длины тела, пневмостом занимает антемедиальное положение, тело имеет характерную для некоторых форм оранжевую окраску. Кроме того, размер слизня в сокращённом состоянии около 75 мм позволил отнести его к подроду *Arion* s. str. Однако определить вид, который достоверно можно отличить от других представителей подрода только по строению половой системы, не было возможности. Повторные обследования биотопа как «по горячим следам», так и на протяжении 2014–2019 годов не принесли успеха.

Несмотря на то, что первая находка бы ла сделана в естественном биотопе, наиболее вероятной является всё же относительно недавняя антропохорная интродукция слизня, так как фаунистические сводки не упоминали ни одного представителя рода *Arion* для Крыма (Пузанов, 1925; Lindholm, 1926; Лихарев, Виктор, 1980; Sysoev, Shileyko, 2009; Леонов, 2009; Welter-Schultes, 2012; Балашов, 2016 и др.). В то же время это достаточно крупные яркие, бросающиеся в глаза слизни (рис. 1–3), так что вероятность, что их просто не обнаружили, невелика. Неподалёку от места находки (около 200 м) расположен дачный массив, где представлено большое количество растений-интродуцентов, использованных для декоративного озеленения. Вероятней всего, именно с ними был занесён обнаруженный слизень.

По устным сообщениям ландшафтного дизайнера С. О. Вишневого яркие оранжевые слизни порой встречаются на ввозимых растениях (он периодически наблюдал подобных ещё в начале нынешнего столетия), поэтому в декабре 2018 года на территории крупного садового центра «Велес» (с. Перевальное, Симферопольский район) было проведено исследование, в результате которого выявлены разновозрастные особи *Arion*. Сотрудницы садового центра сообщили, что этих слизней они регулярно наблюдают (а иногда и фотографируют, рис. 1b–d), причём даже в состоянии копуляции (рис. 1b), которая, судя по наличию кладок (рис. 1e) и разновозрастных особей, регулярно приносит плоды.

Собранный сотрудниками центра «Велес» натуральный материал обеспечил возможность анатомического исследования, по результатам которого установлено, что это – *A. lusitanicus* в понимании И. М. Лихарева и А. Й. Виктора (1982) и ряда других авторов, или *A. vulgaris*, как мы и предлагаем вслед за И. В. Балашовым (2018) именовать его в дальнейшем.

Это первая анатомически подтверждённая находка *A. vulgaris* на территории Крымского полуострова. Характерными признаками вида является более длинный относительно атриума яйцевод (*oviduct*) (рис. 2c, e, f), а также наличие в яйцеводе продольных складок и большой вытянутой лигулы (*ligula*) (рис. 2d).

Собранные живыми в сентябре 2019 (рис. 3) и октябре 2020 года слизни после анатомирования также были отнесены мной к этому виду. Самый крупный экземпляр (рис. 3d) в состоянии активного передвижения достигал длины около 110 мм.

Помимо этих находок поступила информация о встречах в Крыму с крупными рыжими слизнями в сафари-парке «Тайган» в Белогорском районе в 2019 году (Жвакина С., личное сообщение), в Феодосии в 2019 и 2020 году (О. Г. Розенберг, личное сообщение). Живые слизни были собраны в питомнике растений «Добрый жук» в окрестностях с. Донское Симферопольского района, анатомирование 2 половозрелых экземпляров из этой выборки подтвердило их принадлежность к виду *A. vulgaris*.

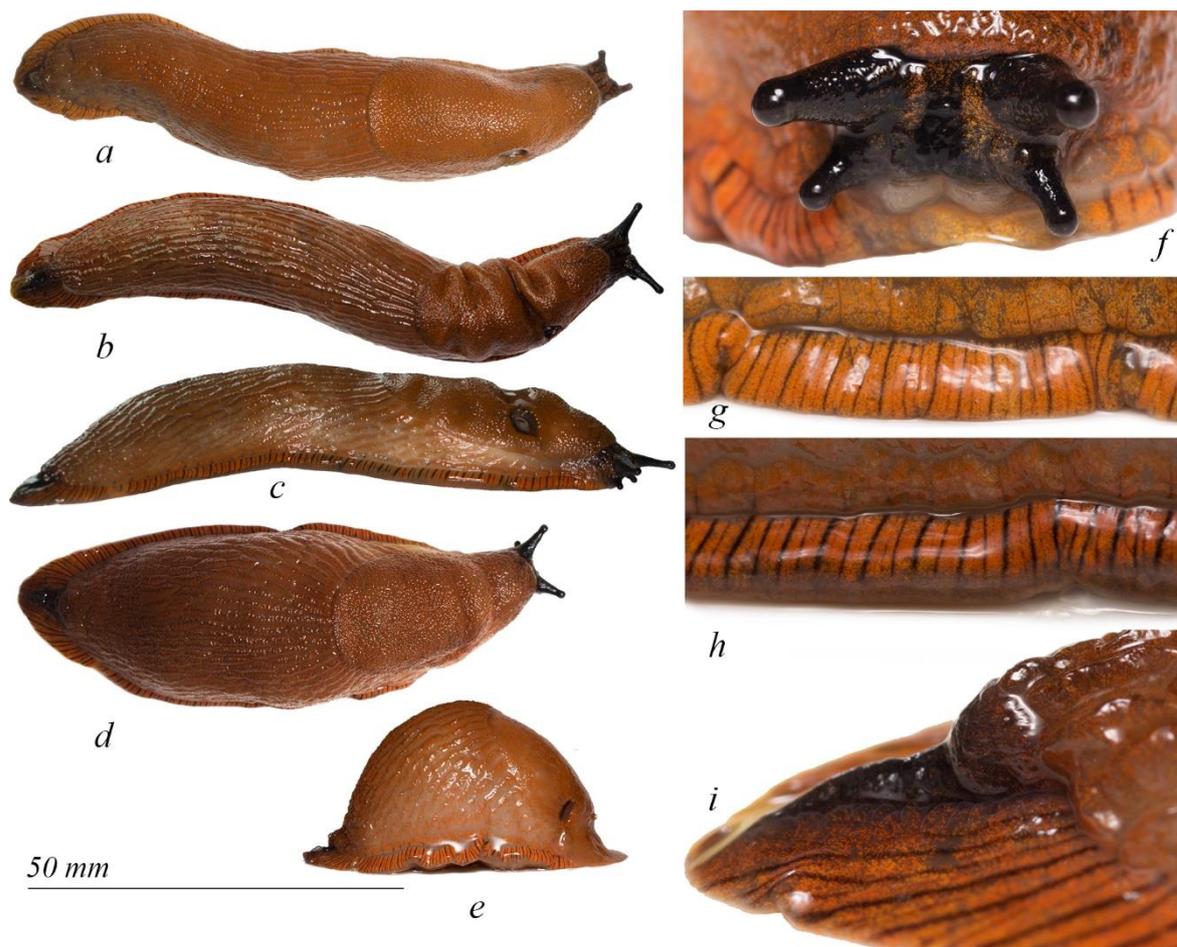


Рис. 3. Внешний вид живых экземпляров *Arion vulgaris* Moquin-Tandon, 1855, собранных в садовом центре «Велес» (с. Перевальное, Симферопольский район, Крым, Россия) в сентябре 2019 года

a–e – общий вид: в состоянии активного движения (*a–c*), в покое (*d*) и в сокращённом состоянии (*e*) в одном масштабе; *f* – голова; *g, h* – боковой край подошвы; *i* – каудальный край подошвы. (фото С. В. Леонова, 2019)

Размножение испанского слизня приурочено к концу лета – осени, а вылупление молоди может происходить осенью, но в некоторых случаях могут перезимовывать кладки (Kozłowski, 2007), таким образом практически в любое время года можно наблюдать и ювенильных, и предвзрослых, и половозрелых слизней в зависимости от времени вылупления и способа зимовки, что подтверждается нашими наблюдениями в питомниках «Велес» и «Добрый жук». Поздней осенью и зимой значительно сокращается доля взрослых слизней, которые крайне редко доживают до весны.

Высочайшая плодовитость, – по данным разных авторов (цит. по Roth, 2012) одна особь *A. vulgaris* способна отложить за сезон от 50 до 550 яиц – широкий спектр кормов, которые вид может использовать, высокая активность и невысокая популярность у хищников (из-за густой и вязкой слизи) позволяют достигать плотности популяций более 50 экземпляров на квадратный метр (Kozłowski, 2007). Осенью 2019 года на территории садового центра «Велес» нам удалось обнаружить 5 кладок (76, 118, 93, 120, 89) – в среднем 99 яиц в кладке, причём первые две кладки были обнаружены под одним цветочным горшком (рис. 1e), не исключено, что это две порции яиц, отложенных одной особью испанского слизня.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Первая подтверждённая находка испанского слизня *A. vulgaris* на территории Крымского полуострова и сведения о его размножении, плодовитости и новых встречах в Крыму за последние годы (рис. 4), позволяют предположить, что в скором времени этот вид может закрепиться в качестве синантропа в теплицах, садах, парках и сельскохозяйственных угодьях. С учётом его потенциальной опасности как вредителя, необходима разработка карантинных мероприятий и информирование населения. В то же время, сотрудники питомников, где были собраны слизни, сообщили, что не обнаружили сколько-нибудь заметных повреждений, по крайней мере, на культурных растениях. Также и по нашим наблюдениям слизни чаще встречались на пустующих участках теплиц, среди сорняков и растительных отходов.

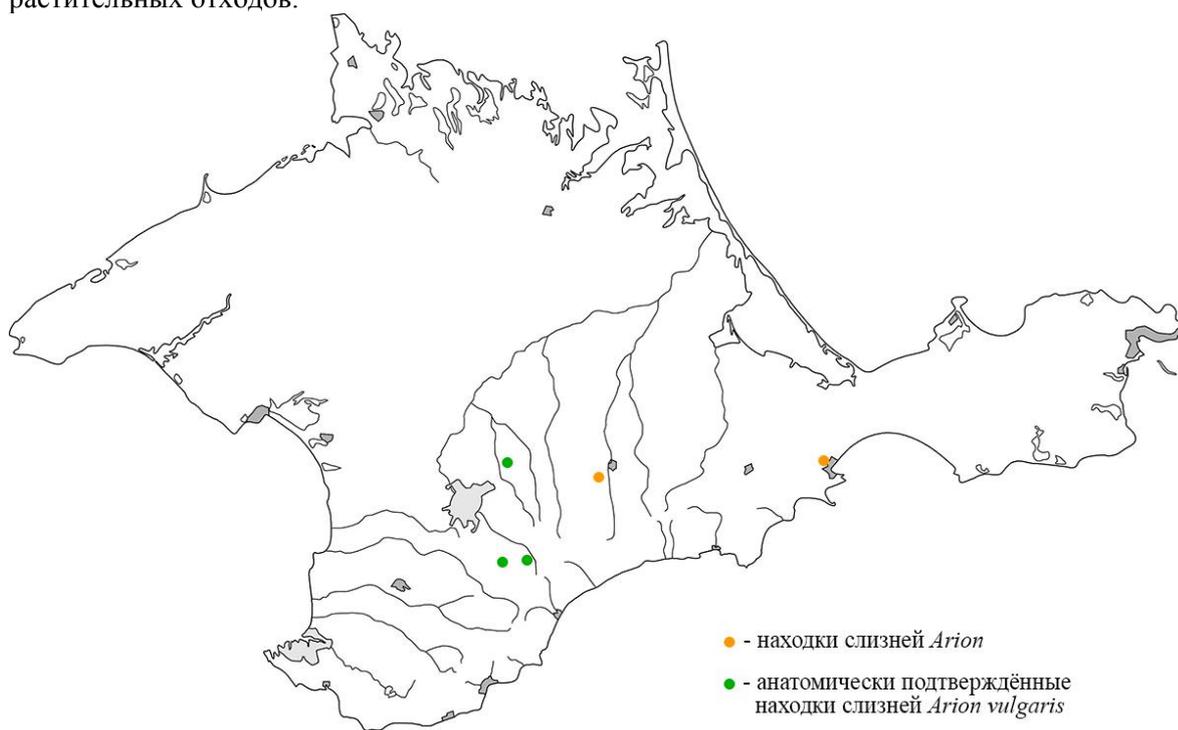


Рис. 4. Места находок испанского слизня в Крыму

Благодарности. Автор выражает признательность Е. В. Шикову за внимание к рукописи и ценные критические замечания, С. О. Вишневскому за информацию о находках и помощь в проведении исследований в садовом центре «Велес»; А. В. Гарда, А. А. и Е. С. Пожидаевым за организацию исследований в питомнике «Добрый жук» и материал оттуда; О. О. Чеботарёвой, Т. В. Усик, А. Н. Бондарю за сбор материала и фотографии; сотрудникам садового центра «Велес» и питомника «Добрый жук», а также А. В. Дыгану за сбор материала.

Список литературы

- Балашов И. А. Моллюски. Стебельчатоглазые // Фауна Украины. – 2016. – Т. 29, вып. 5. – С. 592 с.
- Гураль-Сверлова Н. В., Гураль Р. И. Морфологические, анатомические и поведенческие особенности слизней из комплекса *Arion lusitanicus* s. l. (Arionidae) на западе Украины // Ruthenica. – 2011. – Т. 21, № 2. – С. 97–111.
- Леонов С. В. Наземные моллюски (Mollusca; Gastropoda) Крыма: список видов // Экосистемы, их оптимизация и охрана. – 2009. – Вып. 20. – С. 14–19.
- Леонов С. В., Бондарь А. Н. Первая находка слизня рода *Arion* (Gastropoda: Pulmonata: Arionidae) в Крыму // Материалы международной научной конференции, посвященной 100-летию юбилею со дня рождения Семена Львовича Делямура и 90-летию со дня рождения Александра Сергеевича Скрябина (Симферополь, 5 декабря 2013). – Симферополь, ТНУ, 2013. – С. 29.

- Лихарев И. М., Виктор А. И. Слизни фауны СССР и сопредельных стран (Gastropoda terrestria nuda). Фауна СССР. Моллюски. – Т. 3, вып. 5. – Л.: Наука, 1980. – 437 С.
- Пузанов И. И. Материалы к познанию наземных моллюсков Крыма. Ч. I. Моллюски горного Крыма // Бюллетень МОИП. Отдел биологический. – 1925. – Т. 33. – С. 48–104.
- Шиков Е. В. Адвентивные виды наземной малакофауны центра Русской равнины // Ruthenica, 2016. – Т. 26, №. 3–4. – С. 153–164.
- Шиков Е. В., Комаров Ю. Е. *Arion lusitanicus* s. l. (Mollusca, Gastropoda, Arionidae) в Северной Осетии // Наука, природа и общество: Материалы Всерос. конф. посв. 100-летию Ильменского гос. зап-ка, 100-летию со дня рожд. ак. П. Л. Горчаковского и 70-летию со дня рожд. минералога В. О. Полякова. – Миасс: ЮУ ФНИЦ МиГ УрО РАН, 2020. – С. 160–163.
- Balashov I. Case 3685 – *Arion vulgaris* Moquin-Tandon, 1855 (Gastropoda, Stylommatophora, Arionidae): proposed validation of the specific name as available // Bulletin of Zoological Nomenclature. – 2018. – Vol. 75(1), P. 12–15 (Print: 0007-5167 Online: 2057-0570).
- Dvořák L., Horsák M. Současné poznatky o plzáku *Arion lusitanicus* (Mollusca: Pulmonata) v České republice // Časopis Slezského muzea Opava (A). – N 52. – P. 67–71.
- Lindholm W. A. Ein Beitrag zur Kenntniss der Molluskenfauna der Krim // Archiv für Molluskenkunde. – 1926. – B. 58. – P. 161–177.
- Kozłowski J. The distribution, biology, population dynamics and harmfulness of *Arion lusitanicus* Mabille, 1968 (Gastropoda) introduced in Poland // Journal of Plant Protect research. – 2007. – N 47. – P. 219–230.
- Moquin-Tandon A. Histoire naturelle des mollusques terrestres et fluviatiles de la France contenant des études générales sur leur anatomie et leur physiologie et la description particulière des genres, des espèces et des variétés. – Tome second. – Baillièrè, Paris. – 1855. – 646 p.
- Păpureanu A. M., Reise H., Varga A. First records of the invasive slug *Arion lusitanicus* auct. non Mabille (Gastropoda: Pulmonata: Arionidae) in Romania // Malacologica Bohemoslovaca. – 2014. – N 13. – P. 6–11.
- Proschwitz T. von *Arion lusitanicus* Mabille and *A. rufus* (L.) in Sweden, a review of the occurrence, spread and naturalization // Göteborgs Naturhistoriska Museum, Årstryck, 1996. – P. 137–138.
- Roth S., Atteland B. A., Solhøy T. Some notes on reproductive biology and mating behaviour of *Arion vulgaris* Moquin-Tandon 1855 in Norway including a mating experiment with a hybrid of *Arion rufus* (Linnaeus 1758) x *ater* (Linnaeus 1758) // Journal of Conchology. – 2012. – Vol. 41, N 2. – P. 249–257.
- Sysoev A., Schileyko A. Land Snails and Slugs of Russia and Adjacent Countries. In: Pensoft Series Faunistica. – Vol. 87. – Sofia; Moscow: Pensoft, 2009. – 454 p.
- Welter-Schultes F. European non-marine molluscs, a guide for species identification. – Göttingen: Planet Poster Editions, 2012. – 679 p.

Leonov S. V. The first record of the Spanish slug *Arion vulgaris* (Pulmonata, Arionidae) in Crimea // Ekosistemy. 2021. Iss. 26. P. 84–90.

The paper presents data on the first records of the genus *Arion* slugs on the territory of the Crimean Peninsula, including the first anatomically confirmed record of the Spanish slug (*Arion lusitanicus* auct., Non Mabille, 1868, or *Arion vulgaris* Moquin-Tandon, 1855). It is shown that the size and external view allow this slug to be attributed to the genus *Arion* s. str., and the structure of the reproductive system (a longer in relation to the atrium oviduct and an elongated ligula) differentiates it from other representatives of the subgenus. The presence of the fresh clutches and different ages individuals during the year allows us to speak about the reproduction of the species in Crimea and the potential for its distribution over the territory of the peninsula.

Key words: *Arion vulgaris*, *Arion lusitanicus*, Spanish slug, Crimea.

Поступила в редакцию 07.04.21
Принята к печати 15.04.21

УДК 595.461: 574.43

Сравнение трофического поведения скорпионов *Mesobuthus eupeus*, *Mesobuthus caucasicus*, *Androctonus crassicauda* (Scorpiones, Buthidae)

Новрузов Н. Э.

Институт зоологии НАН Азербайджана
Баку, Азербайджан
niznovzoo@mail.ru

Исследовано питание трёх видов скорпионов семейства Buthidae – пёстрого скорпиона (*Mesobuthus eupeus* (C.L. Koch, 1839), кавказского скорпиона (*Mesobuthus caucasicus* (Nordmann, 1840) и толстохвостого скорпиона (*Androctonus crassicauda* (Oliver, 1807)). Полевые исследования проводились на полупустынной территории в предгорной части юго-восточных склонов Малого Кавказа (в пределах Нахчыванской Автономной Республики Азербайджана), где синтопично обитают все три указанных вида. Таксономический состав и количество съеденных объектов устанавливались по их хитиновым фрагментам, найденным в длительно используемых укрытиях скорпионов и при визуальном обнаружении жертв на хелицерах хищников. Для оценки значимости тех или иных объектов в питании скорпионов вычислялся индекс избирательности (элективности). В составе пищи скорпионов отмечены беспозвоночные шести классов: поясковые черви (Clitellata), брюхоногие моллюски (Gastropoda), ракообразные (Crustacea), паукообразные (Arachnida), губоногие многоножки (Chilopoda) и насекомые (Insecta). Основу рациона всех трёх видов скорпионов составляли насекомые. *Mesobuthus eupeus* имел сравнительно более широкий спектр питания, чем *M. caucasicus* и *A. crassicauda*, уступая им по биомассе съеденных жертв. Для *A. crassicauda*, ведущего преимущественно норный образ жизни, базовой стратегией было выжидание жертвы в засаде внутри укрытия. Кавказский скорпион чаще использовал стратегию случайного поиска на поверхности. Пёстрый скорпион выделялся использованием самого широкого спектра выжидательных и поисковых стратегий. Различия спектров питания скорпионов, предположительно, связаны с разной степенью проявления элективности к определённым группам кормов и особенностями пищедобывательного поведения каждого из рассматриваемых видов, предопределяющего круг их жертв. Основными критериями выбора объектов питания, предположительно, являлись их морфо-экологические параметры (размеры и форма добычи, степень подвижности, вид передвижения).

Ключевые слова: пёстрый скорпион, кавказский скорпион, толстохвостый скорпион, спектр питания, охотничьи стратегии, пищевая избирательность.

ВВЕДЕНИЕ

Семейство Buthidae C.L. Koch, 1837 – наиболее представительное среди 17 семейств отряда Scorpiones, включает 96 родов и 1184 вида (Fet et al., 2000; Soleglad, Fet, 2003). В южном Закавказье обитают представители двух родов этого семейства: *Mesobuthus* Vachon, 1950 – пёстрый скорпион *Mesobuthus eupeus* (C.L. Koch, 1839), кавказский скорпион *Mesobuthus caucasicus* (Nordmann, 1840); и *Androctonus* Ehrenberg, 1828 – толстохвостый скорпион *Androctonus crassicauda* (Oliver, 1807). В Азербайджане пёстрый скорпион (*M. eupeus*) встречается почти повсеместно в аридных и семиаридных ландшафтах, а кавказский (*M. caucasicus*) и толстохвостый (*A. crassicauda*) скорпионы – исключительно на территории Нахчыванской Автономной Республики (Бялыницкий-Бирула, 1917; Тертышников, 1949; Юсубов, 1984b; Гаджиев, 1996).

Вопросы, связанные с питанием этих видов, преимущественно рассматривались в контексте установления таксономического состава их жертв (Рихтер, 1945; Тертышников, 1949; Юсубов, 1978; 1984a; Гусейнов и др., 2004). Сведения о пищедобывательном поведении весьма ограничены, и базируются на наблюдениях, выполненных в инсектариях (Юсубов, 1983; Чеботарев, 2007; Жилин, 2007). Изучение поведенческих аспектов их трофической организации возможно только в естественных или приближенных к ним условиях и могло бы

позволить объективнее рассматривать роль скорпионов в трофических цепях аридных биоценозов.

Цель настоящего исследования заключалась в сравнении трофических спектров скорпионов, выявлении интенсивности питания, основных критериев выбора жертв, оценке эффективности добывания пищи при использовании различных охотничьих стратегий.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В основу статьи легли материалы, собранные в весенне-летний период 2016 и 2018 годов в предгорной части юго-восточных склонов Малого Кавказа в пределах Нахчыванской Автономной Республики Азербайджана. Исследованы естественные и антропогенные, равнинные и предгорные участки территорий двух районов: Джульфинского – окрестности города Джульфы, села Ашагы Яйджи; Ордубадского – окрестности города Ордубад и сёл Даста, Ашагы Айлис, Юхары Айлис.

Объектами исследования были скорпионы трёх видов: *M. eurus*, *M. caucasicus*, *A. crassicauda*. Всего за период исследований было отмечено 439 экз. скорпионов. Из них 271 экз. составляли – *M. eurus*, 114 экз. – *M. caucasicus*, 54 экз. – *A. crassicauda* (табл. 1).

Таблица 1

Количество и некоторые метрические данные исследованного материала

Вид	N	Длина (мм)			
		общая		метасома	
		min–max	m±m	min–max	m±m
<i>Mesobuthus eurus</i>	271	38,55–47,20	42,81±0,35	21,8–27,7	25,80±0,22
<i>Mesobuthus caucasicus</i>	114	41,42–59,44	50,73±0,22	24,6–37,0	31,28±0,16
<i>Androctonus crassicauda</i>	54	65,70–81,45	71,18±0,22	32,8–46,7	42,77±0,12

Исследовано более 1800 укрытий естественного и антропогенного происхождения. В большинстве укрытий, длительно используемых скорпионами, обнаруживались хитиновые фрагменты тел различных членистоногих, большая часть из которых была пригодна для идентификации. Состав и количество съеденных объектов устанавливали по совокупности обнаруженных фрагментов их тел, а также при визуальном обнаружении жертв на хелицерах хищников. Объекты питания в основном определялись до отрядов и семейств, реже до рода и вида. Визуально отмечено 290 случаев поимки и поедания скорпионами случайной (138 экз.) и подсаженной (152 экз.) добычи. Для выяснения интенсивности питания скорпионов объекты исследования взвешивались до и после ночной активности на портативных электронных весах с точностью до 0,01 г. Всего произведено около 300 взвешиваний 140 особей (66 – *M. eurus*, 30 – *M. caucasicus* 12 – *A. crassicauda*). На одинаковых по площади участках исследованной местности устанавливался состав фауны беспозвоночных, учёт которых проводился общепринятыми методами (Фасулати, 1971; Гиляров, 1975).

Проведён полный хронометраж процессов добывания и поедания пищи у 91 особи скорпионов (43 – *M. eurus*, 31 – *M. caucasicus* и 17 – *A. crassicauda*). Проведена дифференцировка по биомассе и линейным размерам, подвижности и способам передвижения наиболее часто встречающихся объектов питания (преимущественно насекомых). Часть наблюдений проведена на опытных площадках полевого стационара и в условиях лаборатории. Для определения ширины ниш рассчитывался индекс полидоминантности Симпсона (Pianka, 1973; Бигон и др., 1989):

$$D = 1 / \sum (p_i^2),$$

где p_i – доля ресурса i в общем спектре используемых видом ресурсов. Сравнение состава пищи скорпионов (перекрывания экологических ниш) проводили по индексу сходства Чекановского – Сёрнсена:

$$I_{CS} = 2a/2a + b + c,$$

где a – число вариантов, общих для обоих сравниваемых списков; b – число вариантов, имеющих только в первом списке; c – число вариантов, имеющих только во втором списке (при сравнении двух списков). Для выяснения значимости тех или иных представителей фауны беспозвоночных в питании скорпионов вычислялся индекс избирательности (элективности) по Ивлеву (Ивлев, 1955):

$$I_E = (r - p)/(r + p),$$

где r – процентное значение объекта в составе пищи; p – процентное содержание объекта в биотопе. Диапазон изменений индекса находился в пределах от -1 до $+1$. Нулевое значение индекса указывало на отсутствие избирательности. Первичные данные обработаны методами вариационной статистики в программе Microsoft Excel 2010.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Спектр питания. В составе пищи скорпионов отмечены беспозвоночные 6 классов: Clitellata, Gastropoda, Crustacea, Arachnida, Chilopoda, Insecta, преимущественно членистоногие (Arthropoda), принадлежавшие к последним четырём классам. Спектр питания *M. eupeus* включал представителей 21 отряда, с преобладанием Isopoda, Aranei, Coleoptera, Lepidoptera, Hemiptera. В спектрах питания *M. caucasicus* и *A. crassicauda* отмечены беспозвоночные 15 и 12 отрядов соответственно, с преобладанием (для обоих видов) – Isopoda, Aranei, Coleoptera, Orthoptera, Blattodea (табл. 2).

Основную роль в питании скорпионов играли представители класса насекомые (Insecta). Доля этого класса составляла в рационе для разных видов примерно 75–80 %. Среди отрядов данного класса предпочтение отдавалось Coleoptera (26–34 %), Lepidoptera (7–13 %), Orthoptera (2–10 %). Из отряда Coleoptera в питании скорпионов преобладали представители семейств Carabidae, Tenebrionidae, Curculionidae, Staphylinidae. Отряд Orthoptera в рационе был представлен семействами Acrididae, Gryllidae, Gryllotalpidae, Tettigonidae. Из отряда Lepidoptera отмечались представители семейств Psychidae, Sphingidae, Noctuidae, Arctiidae и Phycitidae. Положительные значения индекса элективности (I_E) указывали на проявление избирательности в отношении представителей отрядов Isopoda, Aranei, Opiliones, Coleoptera, Lepidoptera, Blattodea, Orthoptera, Dermaptera. Общим для всех трёх видов скорпионов было проявление избирательности в отношении отрядов Coleoptera, Lepidoptera, Blattodea. Ширина трофической ниши по спектру питания у *M. eupeus* (0,04) превалирует над двумя другими видами (0,06 и 0,08). Спектры питания в парах *M. eupeus* – *M. caucasicus* и *M. caucasicus* – *A. crassicauda* перекрывались в меньшей степени (индекс Чекановского-Сёрнсена) – 0,40 и 0,52 соответственно, чем в паре *M. eupeus* – *A. crassicauda* – 0,67.

Стратегия и тактика охотничьего поведения. Скорпионы характеризуются низким уровнем активности на поверхности, проводя большую часть жизни в укрытиях. Большинство видов используют для охоты 20–50 % лимита времени тёмного времени суток и находятся на поверхности в среднем в течение 4 часов (Hadley, Williams, 1968; Koch, 1978; Polis, 1980; Bradley, 1982; Polis, 1990). В процессе эволюции у Scorpionida выработались две базовые стратегии пищевого поведения: поисковая и выжидательная (Polis, 1990). Исследованиями было установлено использование нескольких модификаций этих стратегий: 1) произвольный поиск (использование пространства случайным образом), осуществляемый передвижением по открытой поверхности почвы (running); 2) селективный поиск (выборочное использование

Таблица 2

Встречаемость объектов питания (%) в биотопе и в пище скорпионов *Mesobuthus eupeus*, *Mesobuthus caucasicus*, *Androctonus crassicauda* и индекс элективности (I_E) для каждой группы жертв

Таксон	<i>M. eupeus</i>			<i>M. caucasicus</i>			<i>A. crassicauda</i>		
	Биотоп	Пища	I_E	Биотоп	Пища	I_E	Биотоп	Пища	I_E
Mollusca: Gastropoda									
Pulmonata	11,84	3,11	-0,58	10,63	2,19	-0,65	11,89	1,66	-0,75
Annelida: Clitellata									
Lumbriculida	1,1	0,2	-0,69	2,8	-	-	3,4	-	-
Crustacea									
Isopoda	25,74	28,85	0,05	22,07	11,21	-0,32	21,93	18,35	-0,08
Chilopoda									
Scolopendromorpha	1,25	0,7	-0,28	0,61	-	-	1,31	0,78	-0,25
Lithobiomorpha	1,07	0,001	-0,99	0,6	-	-	1,15	-	-
Geophilomorpha	1,56	0,01	-0,98	1,8	-	-	1,3	0,03	-0,95
Scutigermorpha	0,2	-	-	2,7	0,11	-0,92	0,3	-	-
Arachnida									
Aranei	13,68	14,03	0,01	16,39	7,56	-0,36	12,25	17,83	0,18
Opiliones	0,85	1,02	0,09	0,85	-	-	0,85	-	-
Solifugae	0,48	0,16	-0,50	0,56	0,12	-0,64	0,88	-	-
Scorpiones	1,02	-	-	2,08	0,6	-0,55	1,4	-	-
Insecta									
Coleoptera	16,36	26,67	0,23	11,89	33,65	0,47	19,15	34,93	0,29
Hemiptera	10,43	6,32	-0,24	10,54	5,12	-0,34	9,49	2,81	-0,54
Lepidoptera	6,06	7,11	0,07	7,74	13,65	0,27	8,77	10,0	0,06
Hymenoptera	8,67	3,95	-0,37	11,53	9,51	-0,09	8,95	2,91	-0,50
Blattodea	3,10	3,35	0,03	2,16	6,58	0,50	3,84	5,94	0,21
Orthoptera	4,09	2,56	-0,23	7,02	10,48	0,19	2,88	5,52	0,31
Diptera	8,1	5,3	-0,20	6,7	2,1	-0,52	1,2	-	-
Homoptera	0,85	0,31	-0,46	0,40	-	-	0,09	-	-
Dermaptera	1,46	0,73	-0,33	1,46	1,1	-0,14	1,46	5,1	0,55
Mantodea	0,55	0,09	-0,71	0,47	-	-	0,51	-	-
Neuroptera	2,81	0,97	-0,48	1,10	-	-	0,78	-	-
Zygentoma	3,39	0,01	-0,99	2,3	0,3	-0,76	1,1	-	-

пространства) путём обследования укрытий и укромных мест, где может укрываться добыча (inspection); 3) ожидание жертвы в засаде на поверхности (sit and wait); 4) ожидание жертвы в засаде в укрытии (ambush).

Реализация охотничьего поведения скорпионов начинается с процедуры дистантного обнаружения жертвы. В литературе отмечено, что скорпионы могут регистрировать присутствие жертвы с расстояния до 30 см (Фролов, 2002). Вслед за обнаружением жертвы хищником и короткого её преследования происходит непосредственный контакт с объектом, в процессе которого объективно определяется соответствие данного пищевого объекта предпочитаемым параметрам добычи. Если жертва устраивает хищника, происходит её фиксация одной или обеими клешнями (chela) педипальп. После фиксации наносится укол иглой (aculeus) расположенной на концевом членике метасомы (telson). Представители разных родов семейства Buthidae осуществляют эту процедуру по-разному. Некоторые достаточно крупные виды скорпионов рода *Aristobuthus* наносят серию сильных ударов, способных пробить экзоскелет добычи. Скорпионы рода *Centruroides*, максимально сгибая среднюю часть переднебрюшья (мезосому), стремительно выбрасывают метасому далеко вперед, стараясь поразить жертву с большего расстояния (Жилин, 2007). Более мелкие и

среднего размера виды рода *Mesobuthus* определяют ощупыванием метасомой места сочленения сегментов тела и с осторожностью наносят в них одиночные хирургически точные уколы. Скорпионы рода *Androctonus* после укола не сразу извлекают иглу, оставляя её на некоторое время в теле жертвы, проворачивая чтобы расширить зону воздействия. В зависимости от морфо-экологических данных жертвы процедура укола также проводилась по-разному. Неподвижной и малоподвижной добыче уколы вообще не наносились. Достаточно крупной, но с мягкой кутикулой добыче доставались сильные удары иглой способные пробить её слабый хитин с оставлением на некоторое время иглы в теле жертвы. Добыче поменьше, но с плотным хитиновым покровом наносились точные уколы в места сочленения сегментов их тела, где покровы тоньше. После введения яда часть скорпионов (17 %) сразу приступала к поеданию добычи, не дождавшись полного действия токсина. Но в большинстве случаев скорпионы не приступали к трапезе, пока яд не обездвижит жертву.

По приверженности к той или иной охотничьей стратегии, исследуемые виды скорпионов отличались. Объединяла их схожесть алгоритмов тактических приёмов контакта и манипулирования жертвой. Для *A. crassicauda*, ведущего преимущественно норный образ жизни, локомоторная активность которого ограничивалась перемещениями в пространстве укрытий, стратегия выжидания в засаде в укрытии (ambush) была базовой (78 %). Скорпионы данного вида, обитающие в норах грызунов, имеющих значительные по протяжённости и сложности ходы, предположительно могут альтернативно использовать стратегию целенаправленного поиска добычи (inspection), обследуя лабиринты нор. Об этом свидетельствовали факты обнаружения при раскопах хитиновых фрагментов их жертв в разных частях норы, дистанцированных друг от друга на расстояние до 3–5 метров. *Androctonus crassicauda* покидают укрытия в исключительных случаях: ювенилы после второй линьки оставляют место своего рождения (нору самки) расселяясь по территории; взрослые самцы с наступлением периода размножения (июнь – июль) отправляются на поиски фертильной самки. Данное предположение основано на том, что в ночные часы на поверхности почвы отмечались исключительно ювенильные особи одной размерной категории и взрослые самцы этого вида. Кавказский скорпион помимо засадной стратегии (ambush) чаще (52 %) использовал стратегию случайного поиска на поверхности (running). Пёстрый скорпион выделялся использованием самого широкого спектра выжидательных и поисковых стратегий: ambush (43 %), sit and wait (22 %), running (25 %), inspection (9 %). Сочетанное использование *M. eupeus* и *M. caucasicus* выжидательной и поисковой стратегий, позволяло осуществлять выбор среди большего разнообразия жертв, чем, видимо, объясняется их более широкий таксономический спектр питания. Спектр питания *A. crassicauda* таксономически почти полностью формировался за счёт представителей норной фауны беспозвоночных и только примерно в 5 % случаев в нём присутствовали случайно проникшие в нору кормовые объекты.

Смена охотничьих стратегий отчасти носила сезонный характер, что вероятно связано с разницей температур на поверхности и в укрытии и сезонной активностью потенциальных жертв. Так, например, в конце апреля – начале мая, когда скорпионы на поверхности ещё не отмечались, в укрытиях обнаруживались питающиеся особи *M. eupeus*, начавшие охотиться, используя стратегию выжидания в засаде в укрытии (ambush). С середины мая отмечались редкие непродолжительные выходы на поверхность *M. eupeus* и *M. caucasicus*, охотничья деятельность которых в это период осуществлялась попеременным использованием двух выжидательных стратегий (ambush и sit and wait). В июне, когда выходы *M. eupeus* и *M. caucasicus* на поверхность становились частыми и более продолжительными по времени, использовались как выжидательные, так и поисковые стратегии. Первые питающиеся особи *A. crassicauda* отмечались в укрытиях со второй декады мая.

Интенсивность питания. По данным литературы интенсивность питания скорпионов отличается у особей разного пола и возраста и может меняться в зависимости от температурных условий, прохождения ими жизненно важных биологических циклов (линька, размножение, гибернация) (Юсубов, 1984b). Большинство скорпионов предпочитают температуры от 18 до 35 °С, но для каждого из видов отмечен свой диапазон температур, при

котором трофическая активность проявляется чаще (Hadley, 1974; Stewart, 2006). Наиболее благоприятный температурный градиент для пищевой активности *M. eupeus*, указанный в литературе составлял 25–30 °С (Юсубов, 1984b). По собственным данным пищевая активность пёстрого скорпиона в естественных условиях проявлялась в более широком диапазоне температур – 12–35 °С достигая своего максимума при температурах 26–28 °С (рис. 1). Кавказский скорпион проявлял трофическую активность в температурных пределах 19–31 °С. *A. crassicauda*, обитающий преимущественно в норах, где микроклиматический режим характеризуется меньшим колебанием температуры и влажности, проявлял трофическую активность в ещё более узком диапазоне температур – 19–26 °С.

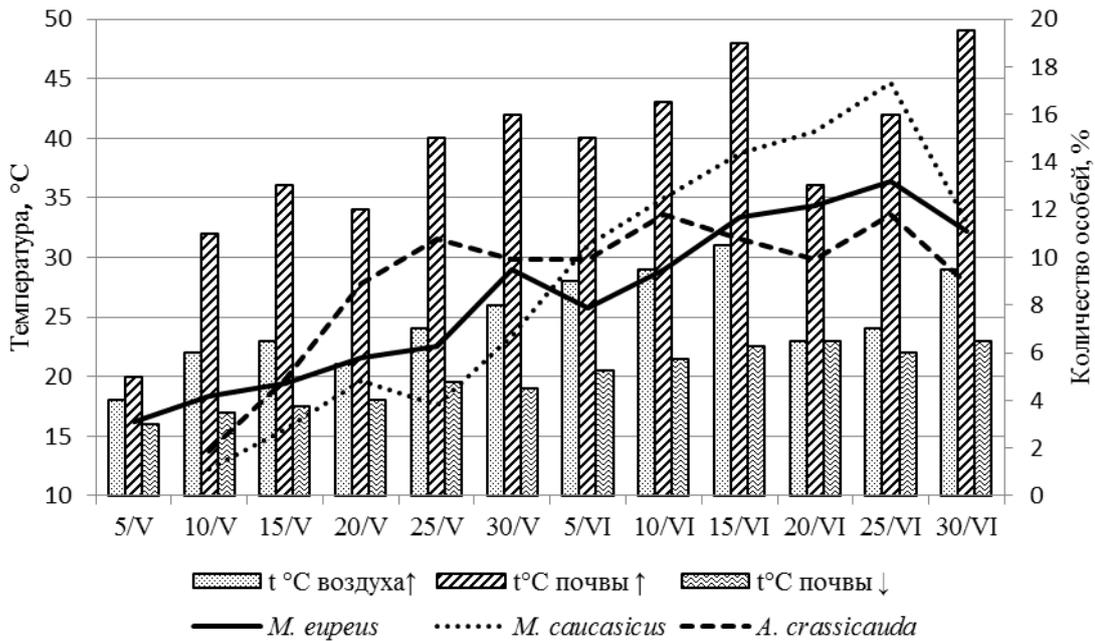


Рис. 1. Динамика температур среды обитания (май – июнь) и пищевая активность скорпионов *Mesobuthus eupeus*, *Mesobuthus caucasicus* и *Androctonus crassicauda*

Интенсивность питания в период линьки также претерпевает изменения. В литературе отмечено, что за несколько дней до линьки и несколько дней после неё скорпионы *Buthus occitanus* (без указания возраста) не проявляют пищевую активность (Berge, 1979). Нами в полевых и лабораторных условиях для *M. eupeus* и *A. crassicauda* получены аналогичные данные, с той лишь оговоркой, что каждая последующая линька увеличивала продолжительность периода отказа от пищи у молодых скорпионов в среднем на 2,5 дня, достигая к последней (6-ой или 7-ой) линьке 21–26 дней. К снижению и даже прекращению пищевой активности могут приводить и такие объективные причины, как отсутствие в пределах досягаемости предпочитаемых пищевых объектов и различные стрессовые факторы (например, сезонный выпас скота). Полное отсутствие охотничьего поведения продолжительностью в 2–3 недели отмечено у самок *M. eupeus* после отрождения потомства, биологический смысл которого, видимо, состоит в том, чтобы исключить случайный инфантицид у самок. Кроме того, отмечено немотивированное снижение интенсивности питания у отдельных взрослых особей *M. eupeus* и *M. caucasicus* (преимущественно самок) предположительно достигших 6-летнего возраста. Есть предположение, что снижением метаболизма особи завершающих стадий онтогенеза воздерживаются от излишнего расхода энергии. При содержании *M. eupeus* в лабораторных условиях было отмечено, что взрослые особи с низкой пищевой активностью почти всегда на год-два переживали своих активно питающихся сверстников. Отметим, что максимальная установленная в условиях

лаборатории продолжительность жизни для *M. eupeus* достигала 7 лет – у самцов и 8 лет – у самок.

По литературным данным, при содержании скорпионов в лабораторных условиях, паукообразные потребляют пищу составляющую от 25,0 % до 37,0 % от массы своего тела (Юсубов, 1978; 1984b). Взвешиванием скорпионов до и после их ночной активности в естественных условиях нами установлено, что *M. eupeus* за сутки потребляют в среднем до 17,6 %, *A. crassicauda* – до 21,1 %. По массе съеденной пищи лидировал *M. caucasicus* в среднем потребляя за сутки до 22,5 % пищи от собственной массы.

Адаптивность трофического поведения. Адаптивность питания скорпионов проявлялась по двум основным направлениям: в избирательности по отношению к объектам питания и в выборе тактики охотничьего поведения. Проявление адаптивности трофического поведения в направлении пищевой избирательности позволяет осуществлять выбор среди множества потенциальных объектов питания преимущественно тех, которые более всего привлекают по своим морфо-экологическим параметрам. Говоря об адаптивности охотничьей стратегии, следует отметить, что всякий раз, пребывая на открытой поверхности почвы в ожидании или во время поиска жертвы, скорпионы не только расходовали определённо большее количество времени и энергии, но и подвергали себя риску получить повреждение во время охоты или даже стать жертвой другого хищника. При использовании скорпионами стратегии активного поиска пищи на поверхности риск самим подвергнуться нападению хищника резко возрастает. В связи с этим, их пищедобывательное поведение часто было сопряжено с элементами защитного поведения (Мак-Фарленд, 1988). Тактика пищедобывательного поведения *M. eupeus* при обнаружении им жертвы длиной более 30 мм предварялась элементами оборонительного поведения: соблюдение безопасной дистанции с объектом, принятие позы угрозы (широко расставленные педипальпы с раскрытыми клешнями и высоко поднятая метасома). При встрече с объектами ещё более крупных размеров скорпионы наносили укол, тотчас дистанцируясь, или вовсе избегали с ними прямого контакта. Не вступали они в контакт и с теми объектами питания, которые оказывали активное сопротивление или изначально вели себя агрессивно. Следовательно, скорпиону в процессе охоты приходится одновременно решать сразу две задачи – добыть пищу и при этом самому не стать жертвой. Как известно, сочетание оборонительной и пищевой мотиваций могут оказывать значительное влияние на процедуру питания в целом, приводя к повышенному и не всегда оправданному расходу энергии (Мантейфель, 1987; Бигон и др., 1989). Первой реакцией хищника на принесённый извне пищевой объект была: 1) защитная – восприятие его как источник опасности (74 %); 2) исследовательски-ознакомительная (14 %); 3) как на возможный объект питания (12 %). Своего рода приспособлением для безопасного добывания пищи можно считать переход скорпионов на добывание малоподвижных и неподвижных объектов – моллюски, куколки насекомых, падаль (*M. eupeus*), а также беспозвоночных, постоянно обитающих или случайно проникших в используемые скорпионами укрытия (*A. crassicauda*). Это, несомненно, приводит к существенному изменению их пищевого спектра (некоторому расширению его у *M. eupeus* и сужению у *A. crassicauda*), в обоих случаях снижая риск и исключая излишний расход энергии. На наш взгляд, именно в этой связи у *A. crassicauda* почти в 100 % случаев, а у *M. eupeus* и *M. caucasicus* в 46 и 35 % случаев соответственно использовалась стратегия ожидания добычи в укрытии. Стратегия охоты в укрытиях позволяет скорпионам с большей продуктивностью и с меньшей долей риска, чем на поверхности добывать себе пищу (Hadley, 1974; Polis, 1990). Поэтому, совершенно очевидно, что разные способы добывания пищи скорпионами почти всегда неравноценны, как с точки зрения общей приспособленности животных к конкретным условиям, так и состояния их энергобаланса, и связаны с распределением кормовых объектов в биотопах и степенью прессинга со стороны потенциальных врагов (McCormick, Polis, 1990).

Оптимальность трофического поведения. Для обретения пищи хищник должен сначала израсходовать определённое время и энергию на поиск своей жертвы, затем на её преследование, поимку и поедание (MacArthur, Pianka, 1966). Полифаги, у которых происходит частая смена объектов питания, затрачивают всегда разное количество энергии и

потому в общей сложности теряют чуть больше энергии на обречение и потребление пищи, чем стенофаги и олигофаги, так как каждый раз дополнительно расходуют некоторую часть энергии на адаптацию к особенностям каждой новой жертвы (Бигон и др., 1989). Для скорпионов, как и других генеральных консументов, проблема выбора объекта питания также заключается в том, что если они предпочитают охотиться только на выгодных им жертв, то на их поиск расходуют слишком много времени и энергии. Если же скорпионы проявляют меньшую селективность, то они, затрачивая на их поиск сравнительно меньше времени, будут преследовать как выгодных, так и невыгодных жертв. Оптимальность питания в обоих случаях заключается в том, что охотящийся хищник своим выбором должен уравнивать все минусы и плюсы своих пищевых предпочтений, чтобы добиться максимального и быстрого получения энергии. Достигается это отчасти благодаря пластичному применению различных тактических приёмов контакта с жертвой.

Поисковая охотничья деятельность скорпионов, как уже отмечалось, представлена двумя составляющими: 1) дистанционное реагирование на объект; 2) контакт с объектом, проходящий по различным сценариям. В зависимости от степени подвижности и внешних параметров добычи скорпионы выбирали наиболее адекватную тактику нападения, быстро реагируя на любые изменения в поведении со стороны жертвы. Так, например, при подсадке к *M. eurus* добычи, вдвое уступающей ему по размерам он, захватив добычу клешнями, почти сразу приступал к её поеданию без применения укола иглой. При подсадке добычи почти равной ему по размерам, способной оказывать сопротивление, скорпионы вначале наносили укол иглой и только затем приступали к поеданию. Если добыча превосходила его по размерам, и её не удавалось парализовать с первой попытки, скорпион после нанесения укола из предосторожности бросал добычу, удалялся от неё на некоторое расстояние и выжидал некоторое время. Дождавшись, когда жертва, ослабев, потеряет подвижность, скорпион вновь приближался к ней, заходя с безопасной стороны, фиксировал клешнями и наносил «контрольные» уколы иглой. В каждом из представленных вариантов сценария чисто гипотетически должно расходоваться разное количество времени и энергии.

Так как затрачиваемое на добывание и поедание однородной добычи количество времени у скорпионов разных видов всегда было различным, его может условно рассматривать как некий критерий эффективности добывания пищи для каждого вида, обозначив его как «время взаимодействия» (interaction time) (табл. 3, 4).

Таблица 3

Вид пищи, масса и время, затрачиваемое на её добывание и потребление у скорпионов *Mesobuthus eurus* (19 экз.), *Mesobuthus caucasicus* (13 экз.), *Androctonus crassicauda* (7 экз.) в естественных условиях

Вид пищи	n	Масса пищи	Время взаимодействия (мин.)		
			<i>M. eurus</i>	<i>M. caucasicus</i>	<i>A. crassicauda</i>
Isopoda	26	0,20±0,01	129±0,79	–	94±1,75
Aranei	39	0,17±0,01	202±1,14	163±1,29	115±1,56
Coleoptera (larvae)	39	0,82±0,02	170±0,74	150±1,27	186±0,74
Coleoptera (imago)	39	0,42±0,02	215±1,52	205±0,65	109±1,46
Diptera (larvae)	39	0,79±0,01	120±0,79	138±0,57	135±0,42
Diptera (imago)	26	0,21±0,02	85±0,96	–	82±2,27
Lepidoptera (larvae)	39	0,24±0,02	105±0,57	109±1,56	110±1,29
Lepidoptera (imago)	39	0,22±0,02	87±0,57	94±2,02	75±1,39
Orthoptera	39	0,78±0,01	246±0,74	207±2,36	220±0,96
Blattodea	39	0,80±0,03	180±0,74	186±0,74	165±0,61

Таблица 4

Скорость добывания и поедания пищи *Mesobuthus eupeus* (24 экз.), *Mesobuthus caucasicus* (18 экз.), *Androctonus crassicauda* (12 экз.) в условиях лаборатории

Длина тела жертвы (мм)	Масса (г)	n	Производимое действие	Время взаимодействия (мин.)		
				M±m		
				<i>M. eupeus</i>	<i>M. caucasicus</i>	<i>A. crassicauda</i>
15–20	0,14–0,19	54	добывание	3,62±0,13	5,68±0,08	2,80±0,10
			манипуляции жертвой	3,32±0,11	8,40±0,09	5,1±0,12
			поедание	241±4,16	222,7±1,03	221,2±3,79
21–25	0,21– 0,25	54	добывание	6,48±0,08	2,41±0,07	3,20±0,14
			манипуляции жертвой	3,53±0,11	5,76±0,08	3,30±0,13
			поедание	373,9±4,98	177,4±1,34	231,8±1,78
26–30	0,27– 0,35	54	добывание	6,56±0,08	6,72±0,09	6,52±0,05
			манипуляции жертвой	8,72±0,09	8,40±0,09	4,11±0,20
			поедание	289,4±2,25	194,1±1,47	208,2±1,59
35–45	0,42– 0,75	54	добывание	6,71±0,18	4,64±0,12	3,80±0,05
			манипуляции жертвой	11,2±0,04	8,6±0,11	4,3±0,11
			поедание	314±3,35	286±1,22	213±1,69

Как видно из табличных данных (табл. 3, 4), разные виды скорпионов (в естественных и лабораторных условиях), при добывании жертвы, расходуют различное количество времени и энергии на то, чтобы поймать и съесть её. Эти энергетические затраты могут компенсироваться двумя путями – выбором энергетически ценной добычи или снижением энергетических затрат на её поиск, поимку и переваривание. Для проверки этого предположения анализировались результаты ночных наблюдений за охотой *M. eupeus* на различные, случайные и подсаженные жертвы в биотопе, на опытной площадке полевого стационара и в условиях лаборатории. В стационаре скорпионам подсаживали объекты, на 90 % состоящие из представителей энтомофауны данного региона. В лабораторных условиях скорпионам в равной степени предлагались как отловленные в природе, так и искусственно культивируемые кормовые насекомые. Все добытые скорпионами объекты питания (с учётом стратегии их добывания) были сгруппированы по биомассе, размерам тела, по степени подвижности и способу передвижения. Было установлено, что в более суровых естественных условиях скорпионы менее разборчивы при выборе жертвы по её подвижности и способам передвижения и, напротив, более требовательны к её размерным параметрам, чем в двух других случаях (рис. 2, 3). В условиях стационара и террариума избирательность была выражена в отношении размеров и подвижности жертв.

Основные критерии выбора жертв. Сравнение селективности каждого из видов скорпионов показало, что морфо-экологические критерии при выборе жертв имеют для них разную степень значимости. Так, например, если у *M. eupeus* проявлялся больший интерес к добыче небольших (10–15 мм) и средних (20–30 мм) размеров, с удлинённой формой тела и мягким хитиновым покровом, то *M. caucasicus* и *A. crassicauda* более всего привлекала добыча средних и крупных размеров (35–50 мм), с различными формами тела и плотностью хитинового покрова. Высокая степень подвижности жертвы ограничивала её выбор у

M. eureus, тогда как для *M. caucasicus* и *A. crassicauda* этот критерий не имел решающего значения. Способ передвижения жертвы как критерий имел значимость только в том случае, когда объекты обладали исключительными локомоторными способностями (Diptera, Orthoptera). В этом случае самой результативной для поимки жертвы оказывалась засадная стратегия на поверхности (sit and wait), не ограничивающая хищника в свободе действий. Охотясь в естественных условиях на подвижную, передвигающуюся по открытой поверхности добычу (мокрицы, жуки чернотелки, тараканы), *M. eureus* успешнее использовали стратегию засады на поверхности, дополняемую тактикой короткого преследования (catching), а *M. caucasicus* – стратегию свободного поиска (табл. 5).

Однако в лабораторных условиях при раздельном содержании в пластиковых террариумах особями всех видов из предлагаемых кормовых насекомых чаще выбирались средние по величине, мало- или среднеподвижные объекты с мягким хитиновым покровом. Крупные объекты (>45 мм) избегались, а слишком мелкие (<10 мм) игнорировались. Имели значение и такие критерии, как форма тела и размах конечностей жертвы. Предпочитались объекты с удлинённой формой тела (42 %) которые легче фиксировались клешнями, и с небольшим размахом конечностей (<20 мм). Стандартная предпочитаемая длина жертвы, установленная для *M. eureus* была 15–20 мм (17,6±0,53), для *M. caucasicus* и *A. crassicauda* – 24,0±1,76 и 30,4±1,91 соответственно.

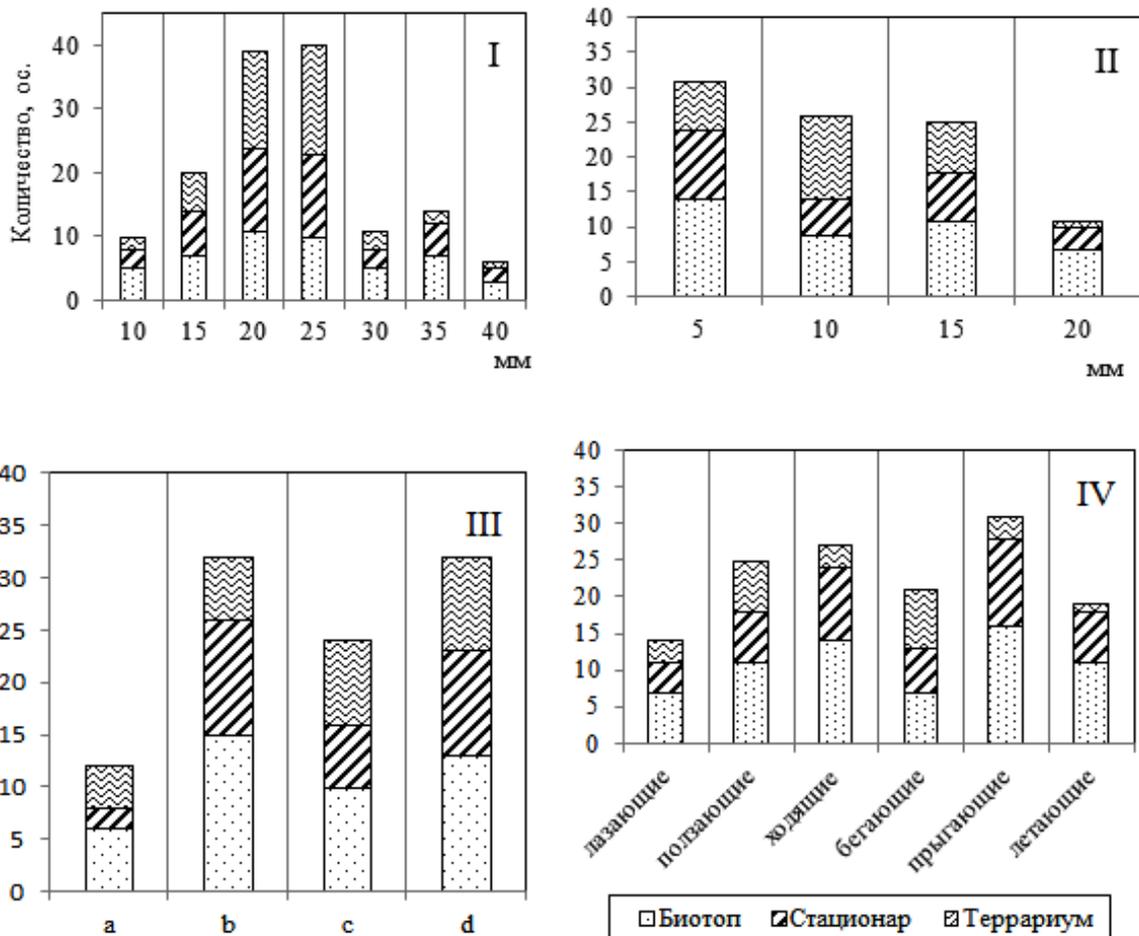


Рис. 2. Избирательное отношение к объектам питания *Mesobuthus eureus* в естественной среде, стационарных и лабораторных условиях по некоторым морфо-экологическим параметрам жертв

I – длина; II – ширина; III – подвижность (а – неподвижные; б – малоподвижные; с – средне подвижные; д – подвижные); IV – способ передвижения жертвы.

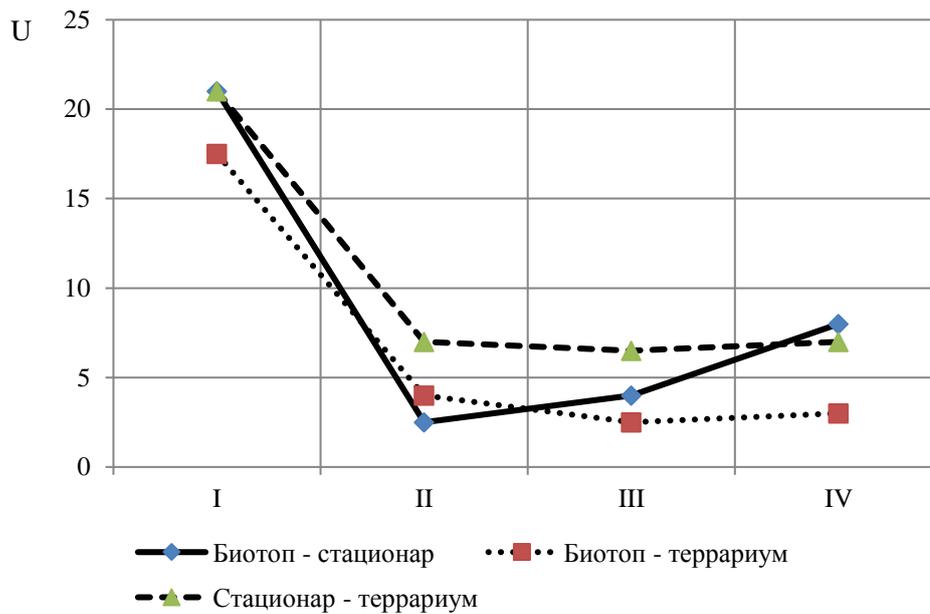


Рис. 3. Попарное сравнение данных проявления избирательности *Mesobuthus eupeus* полученных при разных условиях проведения наблюдений
U – критерий Манна – Уитни: I – IV – параметры жертвы (I – длина; II – ширина; III – подвижность; IV – способ передвижения жертвы).

Таблица 5

Доля жертв (%), добытых скорпионами трех видов (*Mesobuthus eupeus*, *Mesobuthus caucasicus* и *Androctonus crassicauda*) при использовании разных охотничьих стратегий

Тип добычи	<i>M. eupeus</i>			<i>M. caucasicus</i>		<i>A. crassicauda</i>	
	Ambush	Sit and wait	Running	Ambush	Running	Ambush	Inspection
I	32,67	5,88	1,83	0,3	0,34	2,97	6,4
II	5,31	29,9	28,13	6,92	5,82	7,92	7,2
III	0,6	1,96	0,61	5,57	10,95	14,35	12,2
IV	5,31	0,49	0,61	0,15	0,68	0,49	3,5
V	1,06	0,98	0,3	0,6	1,36	1,48	6,5
VI	0,45	1,96	3,66	25,75	32,87	5,44	10,1
VII	3,19	3,43	1,22	6,92	11,64	1,48	17,0
VIII	46,96	50,98	62,69	15,81	8,56	8,41	14,3
IX	2,73	0,98	0,3	21,08	13,35	30,69	18,3
X	0,6	2,94	0,3	10,54	10,27	18,81	4,4
XI	1,06	0,49	0,3	6,32	4,1	7,92	0,1

Примечание к таблице. I – малые размеры; II – средние размеры; III – крупные размеры; IV – неподвижные; V – малоподвижные; VI – подвижные; VII – ползающие; VIII – ходящие; IX – бегающие; X – прыгающие; XI – летающие. Ambush – ожидание жертвы в укрытии; Sit and wait – ожидание жертвы в засаде на поверхности; Running – произвольный поиск; Inspection – обследование укрытий.

Пищевые связи хищных членистоногих могут складываться не только на основе внешнеморфологической приемлемости кормовых объектов для их добычи и питания, но и на основе их биохимического соответствия (Воронцов,1975; Carson, 1995), определяемого

сенсорными органами, роль которых у большинства Arachnida выполняют чувствительные волоски (трихоботрии), щетинки (соленидии) и лироморфные органы (Barth, Wadepuhl, 1975; Barth, Stagl, 1976; Krapf, 1986; Carson, 1995). Следовательно, в зависимости от набора содержащихся в них веществ, в той или иной степени необходимых для жизнедеятельности хищников, одни пищевые объекты могут ими приниматься, другие – отвергаться. Входящие в состав живых кормовых объектов пищевые компоненты, представляют разнообразные по химической природе и пищевой ценности вещества – белки, жиры, углеводы, макро и микроэлементы, витамины и другие (Аликаев и др., 1982; Ткачева, Лифанова, 1997; Jansson, Berggren, 2015). Данные по частоте выбора скорпионами кормовых объектов с обозначением их пищевой и биоэнергетической ценности (по литературным данным) представлены в таблице (табл. 6).

Таблица 6

Пищевая и энергетическая ценность некоторых кормовых насекомых, и частота их выбора скорпионами в качестве жертв

№	Объект питания	Белки, %	Жиры, %	Углеводы, %	Кальций, мг%	Фосфор, мг%	Железо, мг%	Цинк, мг%	Ккал/г	Частота выбора, %		
										I	II	III
1	<i>Lumbricus terrestris</i>	72	19	2,2	0,11	0,1	0,09	0,08	2,1	0,6	0,8	1,1
2	<i>Tenebrio molitor</i> (larvae)	53	33	6	0,11	0,77	0,15	0,16	6,49	9,6	7,1	10,3
3	<i>Tenebrio molitor</i> (imago)	25	3,5	1,2	0,13	0,15	0,09	0,26	1,38	1,6	4,5	3,1
4	<i>Gryllus bimaculatus</i>	23	12	3,06	0,19	0,99	0,05	0,09	2,2	4,1	3,8	8,1
5	<i>Locusta migratoria</i>	33	5,7	2,5	0,5	0,16	0,08	0,08	1,79	4,7	5,6	4,3
6	<i>Calliphora erythrocephala</i>	15,3	5,9	8,4	0,12	0,16	0,17	0,25	3,6	9,5	8,6	7,9
7	<i>Hermetia illucens</i>	18,2	4,3	6,7	0,17	0,23	0,21	0,17	3,2	9,7	5,3	7,8
8	<i>Sitotroga cerealella</i>	68	20	2,5	0,5	0,14	0,07	0,10	1,6	3,6	8,7	2,5
9	<i>Shelfordella tartara</i>	21,8	5,7	5,8	0,1	0,16	0,12	0,19	2,6	7,8	8,2	9,0
10	<i>Acheta domestica</i>	8,5	6,5	4,1	0,32	0,13	0,10	0,14	5,34	7,7	6,6	8,7
11	<i>Chortoicetes terminifera</i>	12,6	5,0	3,2	0,07	0,7	0,20	0,21	4,9	11,8	10,1	9,8
12	<i>Blatta orientalis</i>	14	3,6	2,1	0,14	0,15	0,04	0,10	2,1	4,2	4,6	5,1
13	<i>Galleria mellonella</i> (larvae)	22	2,8	2,0	0,2	0,34	0,20	0,23	7,06	12,4	9,7	11,3
14	<i>Achrola grisella</i> (larvae)	12	3,5	2,3	0,4	0,11	0,23	0,19	2,8	8,4	12,8	8,2
15	<i>Porcellio pruinosus</i>	20	4	3,8	1,1	0,12	0,11	0,13	3,2	4,3	3,6	2,8

Примечание к таблице. I – *Mesobuthus eupeus*, II – *Mesobuthus caucasicus*, III – *Androctonus crassicauda*.

Частота выбора объектов отрицательно коррелировала с их пищевой ценностью (содержанием белков, жиров, углеводов и микроэлементов) и положительно коррелировала с их энергетической ценностью (рис. 4). Причём корреляция между частотой выбора объекта и его энергетической составляющей была сильнее выражена у *M. eupeus* и *A. crassicauda*.

Можно предположить, что скорпион, выбирая добычу, оценивает её по совокупности морфо-экологических, пищевых и биоэнергетических параметров благодаря способностям, возникшим у него в ходе эволюции и отчасти в результате приобретённого опыта. Проще говоря, скорпион из потенциальных жертв, предпочитает выбирать те объекты, которые обеспечивают ему поступление наибольшего количества питательных веществ и энергии, покрывающие затраты на добывание пищи и другие биологические функции. Выяснение механизма этого процесса – тема отдельного исследования.

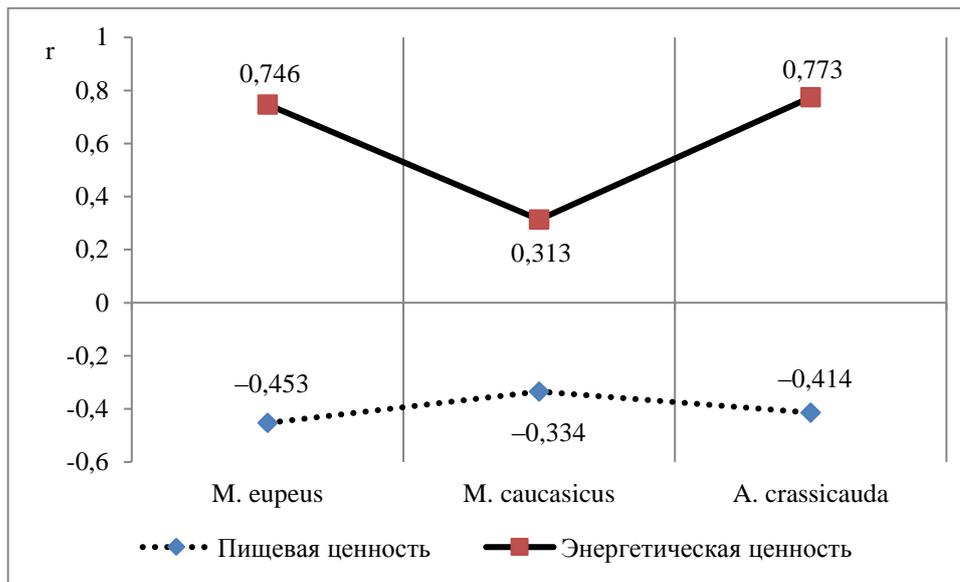


Рис. 4. Корреляционная связь между частотой выбора объектов питания и их пищевой и энергетической ценностью (r – коэффициент корреляции Пирсона)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В составе объектов питания у трёх изученных видов скорпионов отмечены беспозвоночные шести классов: поясковые кольчатые черви (Clitellata), брюхоногие моллюски (Gastropoda), ракообразные (Crustacea), паукообразные (Arachnida), губоногие многоножки (Chilopoda) и насекомые (Insecta). Пёстрый скорпион (*Mesobuthus eupeus*) при сравнении с двумя другими видами (*Mesobuthus caucasicus* и *Androctonus crassicauda*) лидирует по ширине спектра питания, но уступает по биомассе съеденных жертв.

Для *A. crassicauda* базовой стратегией является выжидание жертвы в засаде (ambush). *M. caucasicus* использует две стратегии: выжидание жертвы в засаде и случайный поиск (running). Пёстрый скорпион использует широкий спектр выжидательных и поисковых стратегий.

Отмечена в разной степени выраженная селективность хищников при выборе жертв. Основными критериями при выборе объектов питания являются морфо-динамические параметры (размеры и форма добычи, степень её подвижности, вид передвижения).

Различия спектров питания скорпионов определенно связаны с проявлением элективности к определённым группам кормов и особенностями пищедобывательного поведения каждого из видов.

Список литературы

- Аликаев В. А., Петухова Е. А., Халенева Л. Д., Емелина Т. Н., Бессарабова В. Ф. Справочник по контролю кормления и содержания животных. – М.: Колос, 1982. – 320 с.
- Бигон М., Харпер Дж., Таунсенд К. Экология. Особи, популяции и сообщества: В 2-х томах. Т. I. – М.: Мир, 1989. – 667 с.
- Бялыницкий-Бируля А. А. Членистоногие паукообразные Кавказского края. Часть I. Скорпионы // Записки Кавказского Музея. Серия А. – 1917. – № 5. – 258 с.
- Воронцов А. И. Лесная энтомология. – М.: Высшая школа, 1975. – 368 с.
- Гиляров М. С. Методы почвенно-зоологических исследований. – М.: Наука, 1985. – 280 с.
- Гаджиев А. Т. Скорпионы / Мусаев М. А. (ред.): Животный мир Азербайджана. Том 2. – Баку: Элм, 1996. – 412 с.
- Гусейнов Э. Ф., Алиев Х. А., Топчиева Ш. А., Мусаева Н. Н. Сравнение питания пауков (Araneae) и скорпионов (Scorpiones) // Экология. Философия. Культура. – 2004. – Вып. 38. – С. 25–26.

- Жилин Н. М. Особенности содержания скорпионов семейства Buthidae (Scorpionida) в домашних условиях / Материалы III Международного семинара Беспозвоночные в коллекциях зоопарков. – 2007. – С. 92–95.
- Ивлев В. С. Экспериментальная экология питания рыб. – М.: Пищепромиздат, 1955. – 252 с.
- Макфарленд Д. Поведение животных: психофизиология, этология и эволюция. – М.: Мир, 1988. – 520 с.
- Мантейфель Б. П. Экологические и эволюционные аспекты поведения животных. – М.: Наука, 1987. – 270 с.
- Рихтер А. А. Скорпионы Армении. – Ереван: Издательство Академии Наук Армянской ССР, 1945. – 44 с.
- Тертышников Н. Н. Скорпионы Азербайджана // Труды Естественно-исторического музея имени Г. Зардаби. – 1949. – Том 3. – С. 105–120.
- Ткачева Е. Ю., Лифанова О. Б. Химический состав некоторых нетрадиционных кормов, используемых в зоопарке // Научные исследования в зоологических парках. – 1997. – Вып. 9. – С. 104–111.
- Чеботарев С. О. О содержании азиатских скорпионов: *Mesobuthus caucasicus*, *Mesobuthus eupeus* и *Orthochirus scorobiculosus* (Scorpionida) в экспозициях Ташкентского зоопарка / Материалы III Международного семинара Беспозвоночные в коллекциях зоопарков. – 2007. – С. 210–213.
- Фасулати К. К. Полевое изучение наземных беспозвоночных. – М.: Высшая школа, 1971. – 424 с.
- Фролов Ю. Как скорпион находит жертву // Наука и жизнь. – 2002. – № 5. – С. 23–24.
- Юсубов Э. Б. Питание скорпионов в условиях Азербайджана // Вестник сельскохозяйственной науки. – 1978. – № 2. – С. 60–63.
- Юсубов Э. Б. Материалы по изучению питания скорпионов / Деп. в ВИНТИ. 1984а, № 2 (148). – С. 144.
- Юсубов Э. Б. Скорпионы (Arachnidae, Scorpiones) Азербайджана: дис. ... на соиск. учёной степени канд. биол. наук: спец. 03.00.08 Зоология. – Баку: Азербайджанский государственный университет. – 1984б. – 238 с.
- Barth F.G., Wadepuhl M. Sense organs with a cut on the scorpion's leg (*Androctonus australis* L., Buthidae) // Journal of Morphology. – 1975. – Vol. 145. – P. 209–228.
- Barth F.G., Stagl J. Slit-sensory organs of arachnids // Zoomorphology. – 1976. – Vol. 86. – P. 1–23.
- Berre M.L. Analyse sequentielle du comportement alimentaire du scorpion *Buthus occitanus* (Arachnida, Scorpiones, Buthidae) // Biology Behavior. – 1979. Vol. 4, N 2. – P. 97–122.
- Bradley P. The time of digestion and revival in the desert meadows of the scorpion *Paruroctonus utahensis* (Williams) (Scorpionida, Vaejovidae) // Oecologia. – 1982. – Vol. 55. – P. 316–318.
- Carson A. C. Extra-oral digestion in predaceous terrestrial Arthropoda // Annual Revue Entomology. – 1995. Vol. 40. – P. 85–103.
- Fet V. Ya., Sissom W. D., Lowe G., Braunwalder M. E. Catalog of the scorpions of the world (1758–1998). – New York: The New York Entomological Society, 2000. – 690 p.
- Hadley N. F. Adaptational biology of desert scorpions // Journal of Arachnology. – 1974. – Vol. 2. – P. 11–23.
- Hadley N. F., Williams S. K. Surface activity of some North American scorpions in connection with feeding // Ecology. – 1968. – Vol. 49. – P. 726–734.
- Jansson A., Berggren A. Insects as Food – Something for the Future? – A report from Future Agriculture. Uppsala, Swedish University of Agricultural Sciences (SLU). – 2015. – 36 p.
- Koch L. E. Comparative study of the structure, function, and adaptation to various habitats of burrows in the genus *Scorpions Urodacus* (Scorpionida, Scorpionidae) // Records of the Museum of Western Australia – 1978. – Vol. 6. – P. 119–146.
- Krapf D. Contact Chemoreception of Prey in Hunting Scorpions (Arachnida: Scorpiones) // Zoologischer Anzeiger. – 1986. – Vol. 217. – P. 119–129.
- MacArthur R. H., Pianka E. R. On optimal use of patchy environment // The American Naturalist. – 1966. – Vol. 100, 916. – P. 603–609.
- MacCormick S. J., Polis G. A. Prey, predators and parasites of scorpions. – In The Biology of Scorpions, ed. GA Polis. Stanford, CA: Stanford Univ. Press. – 1990. – 587 p.
- Pianka E. R. The structure of lizard communities // Annual Review of Ecology and Systematics. – 1973. – Vol. 4. – P. 53–74.
- Polis G. A. Seasonal patterns and age-related fluctuations in the surface activity of desert scorpion populations depending on environmental factors // Journal of Animal Ecology. – 1980. – Vol. 49. – P. 1–18.
- Polis G. A. Ecology // The biology of scorpions. Stanford, California: Stanford University Press. – 1990. – P. 247–293.
- Soleglad M. E., Fet V. Ya. High-level systematics and phylogeny of the extant scorpions (Scorpiones: Orthosterni) // Euscorpius. – 2003. – Vol. 11. – P. 1–175.
- Stewart A. K. Observations on prey-capture behavior of *Androctonus crassicauda* (Olivier, 1807) (Scorpiones: Buthidae) in northern Iraq // Euscorpius – Occasional Publications in Scorpology. – 2006. – N 37. – P. 1–9.

Novruzov N. E. Comparison of trophic behavior of scorpions *Mesobuthus eupeus*, *Mesobuthus caucasicus*, *Androctonus crassicauda* (Scorpiones, Buthidae) // Ekosistemy. 2021. Iss. 26. P. 91–105.

The diet of three species of scorpions of the Buthidae family: the mottled scorpion (*Mesobuthus eupeus* (C. L. Koch, 1839), the Caucasian scorpion (*Mesobuthus caucasicus* (Nordmann, 1840), and the fat-tailed scorpion (*Androctonus crassicauda* (Oliver, 1807) was researched. Field research was conducted on a semi-desert territory in the foothills of the South-Eastern slopes of the Lesser Caucasus (within the Nakhchivan Autonomous Republic of Azerbaijan), where all three studied scorpion species live syntopically. The taxonomic composition and number of eaten objects were identified by their chitin fragments found in long-used scorpion shelters, and by visual detection of preys on predator chelicerae. To assess the significance of certain objects in the diet of scorpions, the index of electivity was calculated. Six classes of invertebrates have been recorded in scorpion food: worms, mollusks, crustaceans, arachnids, millipedes and insects. The basis of the diet of all three types of scorpions were insects. *Mesobuthus eupeus* had a relatively wider range of food than *M. caucasicus* and *A. crassicauda*, but it lagged behind them in the biomass of eaten prey. The main hunting strategy for *A. crassicauda* leading a predominantly burrowing lifestyle was to wait for prey in ambush inside the shelter. The *M. caucasicus* more often used the strategy of random search on the surface. The *M. eupeus* was distinguished by using a wide variety of waiting and searching strategies. Differences in the feeding spectra of scorpions are presumably associated with different degrees of electivity to certain groups of food and features of the food-gathering behavior of each of the species under consideration. The main criteria for selecting food items were presumably their morpho-ecology parameters (size and shape of prey, degree of its mobility, type of movement).

Key words: mottled scorpion, Caucasian scorpion, fat-tailed scorpion, spectrum of food, hunting strategies, food selectivity.

Поступила в редакцию 17.12.20

Принята к печати 08.02.21

Морфоструктура щитовидной железы мыши полевой в норме в условиях Красноярской лесостепи

Лютю А. А., Шишикин А. С.

Институт леса имени В. Н. Сукачева Сибирского отделения РАН
Красноярск, Россия
lyuto.aa@ksc.krasn.ru

Проведены региональные исследования зональной ненарушенной (нормальной) морфологии щитовидной железы сеголеток мышей полевых в условиях Красноярской лесостепи и выявлены наиболее важные показатели органа: макроскопически ширина каждой доли 2–2,7 мм, длина 1,5–2 мм, высота 1–2 мм. Ширина перешейка 1,5–2 мм. Цвет железы от красного до темно-красного, четко выделяется на фоне гортани и щитовидного хряща. Щитовидные и парашитовидные железы представляют единый органокомплекс. Видовые особенности строения щитовидной железы у мышей полевых состоят в малом размере органа, тонкой капсуле, встречающимся наличии внутренних добавочных парашитовидных желез, компактно организованной паренхиме, умеренно развитой сосудистой сети. Строма железы развита относительно слабо, в её составе имеется тонкая сеть ретикулярных клеток, небольшого количества макрофагов. Эпителий крупных фолликулов имеет призматическую форму, в средних кубическую, высота тироцитов 6,83 мкм, средняя площадь фолликулов 467,9 мкм²; индекс Брауна 9,7; фолликулярно-коллоидный индекс 3,72; индекс склерозирования 0,81. Мышь полевая, за счет экологических и морфологических особенностей представлена ценным объектом биоиндикации в условиях Красноярской лесостепи для оценки состояния фоновых и техногенных территорий. Биоиндикационные критерии для оценки изменений в случае техногенного воздействия под влиянием поллютантов: размеры железы (с учетом возраста), индекс Брауна, а также высота и форма тироцитов (фолликулярного эпителия).

Ключевые слова: мышь полевая, щитовидная железа, морфология, структура щитовидной железы, критерии биоиндикации.

ВВЕДЕНИЕ

В литературе крайне мало внимания уделено морфологическим особенностям внутренних органов мыши полевой и их показателям патологического анализа для биоиндикации. Отсутствуют многие важные данные о морфологической структуре щитовидной железы, которая может использоваться для экологической оценки биотопов в различных экосистемах.

Мышь полевая (*Apodemus agrarius*, Pallas, 1771), как вид, широко распространена (Карасева и др., 2008), и проявляет факультативную синантропию, а если точнее, то, географически ограниченную синантропию (Кучерюк, 2016).

По данным В. С. Громова, мышь полевая обладает высокой подвижностью и довольно большим индивидуальным участком (0,16–0,18 га) (Громов 1995, 2008), при этом тяготеет к агро- и антропоценозам: крупнотравным участкам среди полей, пустырям, полям (Карасева, Телицына, Жигальский, 2008).

Техногенный биотоп КраЗа и его СЗЗ (55 лет работы) являются уникальными по своей структуре и населению ММ для лесостепной территории Центральной Сибири. Уникальность их состоит в постоянном выбросе поллютантов металлургического производства алюминия. В СЗЗ (за забором) при грубом выравнивании горной породы проходят ранние стадии сукцессии лугового биотопа. За период наблюдений с 2017 по 2019 год на техногенной площадке непосредственно вблизи завода отловлен только один синантропный вид мелких млекопитающих, мышь полевая.

Наличие единственного вида около КраЗа определило его статус маркерного, и вызвало необходимость определить критерии нормальной морфологии внутренних органов эталона отловленных зверьков на фоновом биотопе (агроценозе).

Любой биологический объект экосистемы способный активно реагировать на её изменение и обитающих в достаточном количестве можно использовать как маркерный биоиндикатор. Щитовидная железа как один из важнейших органов внутренней секреции особенно подвержена влиянию поступления химических поллютантов и особенностям техногенных и географических биогеохимических провинций (Рустембекова, 2011). Большинство организмов, заселяющих агрессивные биогеохимические провинции адаптируют к ним свой метаболизм с учетом специфической пропорции химических элементов (Сазонов, 2012). Диспропорция этих элементов в прочих равных условиях может вызвать патологию или гибель животных. Адаптационные показатели и возможности вида в условиях экстремального обитания представляют большой научный интерес.

Воздействие химических поллютантов в газопылевых выбросах КрАЗа на эндокринную систему определило главным объектом научных исследований щитовидную железу. Она отвечает за выработку йодсодержащих гормонов, регулирующих катаболизм (процессы расщепления сложных соединений) и многие физиологические параметры (артериальное давление, пульс, дыхание, температуру). Паращитовидная железа выделяет паратгормон, регулирующий, в свою очередь, работу щитовидной железы, поскольку обе железы представляют собой единый органо-комплекс, то мы дали краткую характеристику на обе этих железы.

Целью проведенных исследований было определение параметров ненарушенной (нормальной) структуры щитовидной железы мышцы полевой, и формирование биоиндикационных критериев для оценки изменений в условиях техногенного воздействия.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Эврибионтность мышцы полевой позволяет выбрать исследовательскую площадку практически в любом объекте мониторинга, но наилучшим биотопом для этой цели будет пустырь либо агроценоз. Оптимальным периодом отлова следует считать август-сентябрь как момент наибольшей годовой численности сеголеток. Предпочтительны для анализа именно сеголетки, так как они обладают примерно одинаковым возрастом, связанным с сезонностью размножения, выработкой адаптивной реакции на специфику обитания, осенний отлов не оказывает существенного влияния на последующую структуру популяции и ее воспроизводственные возможности. В то время как перезимовавшие взрослые особи могут обладать органопатологиями вызванными, помимо воздействия поллютантов, иными причинами (возраст, паразиты, инфекции, внешние неблагоприятные условия по кормам и зимовке), ранний отлов перезимовавших особей может спровоцировать депрессию численности.

Комплексный (почва, растительность, животные) мониторинг Красноярского алюминиевого завода (КрАЗ работает с 1964) организован в 2016 году по трансекте загрязнения юг – север. По рельефу и господствующему ветру преобладает восточное направление переноса поллютантов. Наиболее загрязненный участок расположен непосредственно около забора завода с максимальной пылевой нагрузкой. Эта территория подверглась грубой планировке горной породы и в настоящее время заросла бурьянистой растительностью с преобладанием полыни (*Artemisia vulgaris* Linnaeus, 1753), которая находится на стадии формирования куртин злаков. Для сравнения, на горных отвалах Бородинского угольного разреза смена бурьянистой стадия на злаковую занимает 3–5 лет. Единично произрастает вяз перисто-ветвистый (*Ulmus pinnato-ramosa* Dieck, 1890), что указывает на возможность формирования зеленых насаждений импактной зоны. Мелкие млекопитающие в условиях сильной запыленности испытывают недостаток воды. В поставленные 5-ти литровые бутылки (3 шт.) для сбора жидких осадков и выпадающих летом поллютантов, несмотря на значительную высоту относительно поверхности почвы (10 см), залезло 5 взрослых полевых мышей.

Второй участок расположен на удалении 1 км от завода на территории снесенного (в 2003) поселка «Индустриальный». Для него характерна аллея посадка тополей и селитебный почвогрунтовый покров без нанесения плодородного слоя почвы.

Третий (фоновый) участок удален на 3 км и не испытывает воздействия поллютантов КрАЗа. Он расположен в овраге и окружен сельхозугодьями различного назначения. В связи со смывом почвы в понижения, формируются смешанное высокотравье и березовые колки с шиповником (*Rosa* sp.), характерные для Красноярской лесостепи.

Все три мониторинговых участка объединяются по доминированию травянистой растительности и снижению градиента загрязнения КрАЗом.

Отловы проводили стандартным методом, который используется на других объектах мониторинга (давилками, установленными по схеме 10×10 м в четыре ряда с приманкой из кедрового ореха, выдержанного в не рафинированном подсолнечном масле). В каждом сезоне было установлено 40 ловушек на 3 дня, ежегодно обрабатывалось 120 и средний улов на 100 ловушко-суток, за 2019 год на исследуемом фоновом биотопе составил 12,5 особей, 2018 – 15,0, 2017 – 3,3 и 2016 – 16,6. Наблюдается определенная динамика численности с депрессией в 2017 году, что характерно для большинства мониторинговых объектов от вырубок средней тайги до отвалов Бородинского угольного разреза Канской лесостепи и определяется общими погодными условиями.

В качестве основной гипотезы использовалось морфологическое изменение щитовидной железы в результате воздействия выбросов КрАЗа. За счет активности мыши полевой в вечернее время, проверку ловушек можно проводить раз в сутки (утро), структура органа при этом не изменяется и позволяет исследовать орган без наличия посмертных артефактов. Особенности анатомии исследуемой железы исключают повреждение дужкой давилки, поэтому все отловленные особи подвергались морфологическому анализу. Для анатомо-морфологических исследований, проведено вскрытие, осмотр внутренних органов и взяты пробы для гистологических исследований. Изначально, при поисковых исследованиях для анализа физиологической активности зверьков брали печень и селезенку, а также другие органы (сердце, легкие, почки), но эти данные, ввиду специфики темы и большого объема, не вошли в представленную работу.

Гистологические исследования проводили согласно общепринятых методик (Коржевский, Гиляров 2010). Микроскопию срезов проводили на тринокулярном микроскопе МикМед-6 с насадкой для микрофотографий. Микрофотосъемку и анализ микрофотографий выполняли на фотоаппарате Canon EOS 1100D в программе Altami Studio 3.4. Для математической и статистической обработки использовали программу Statistika 6.0 и пакет программ MS Office. Калибровку оптической части микроскопа и аналитической части программы проводили после фотосъемки объекта микрометра проходящего света ОМП Гост 7513-75. Всего подготовлено 28 проб от зверьков, отловленных в 2018–2019 годах, и изготовлено более 120 микропрепаратов щитовидной железы полевой мыши.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Особенностью исследуемого биотопа (N56°07'31,22 E93°01'20,42) является то, что сам этот биотоп не является естественным с точки зрения геологии, структуры почв, водного баланса растительности и многих других факторов. Это агроценноз представляющий из себя обширное поле с островками леса в 3 километрах к северо-востоку от Красноярского Аллюминиевого завода таким образом исключая газопылевое загрязнение городским смогом и инверсию ветровых выбросов труб КраМЗ. За счет отсутствия выраженного техногенного загрязнения, для дальнейших исследований он будет принят как фоновый. Островки леса в западинах и оврагах, а также вблизи линий ЛЭП, представляющие собой станции переживания для многочисленных видов мелких млекопитающих. Биоразнообразие таких станций в сравнении с другими, рядом расположенными площадками высокое, индексы видового богатства Маргалеха составляют от 0,69(2018) до 1,67(2016), Менхиника от 0,71 (2018) до 1,34 (2016), индексы Уиттекера за период с 2017 по 2019 год менялись от 1,07 до

3,05. Для таких видов стаций характерен смешанный состав, включающий как лесные, луговые так и городские синантропные виды животных и птиц. За счет того, что на небольшой площади пересекаются поле, высокотравный луг и крупнотравный березняк, складываются уникальные условия для укрытия и кормовой базы мышевидных грызунов, и многих других животных и птиц.

В уловах исследованной площадки в составе мелких млекопитающих встречали хомяка обыкновенного (*Cricetus cricetus*, Linnaeus, 1758), крысу серую (*Rattus norvegicus*, Berkenhout, 1769), бурундука сибирского (*Tamias sibiricus*, Laxmann, 1769), полевков серых: обыкновенную (*Microtus arvalis* Pallas, 1778), узкочерепную (*Microtus gregalis*, Pallas 1779), экономку (*Microtus oeconomus*, Pallas 1779); лесных полевков: красную (*Myodes rutilus*, Pallas, 1779) и красно-серую (*Myodes rufocanus*, Sundevall, 1846); насекомоядных: бурозубок обыкновенную (*Sorex araneus* Linnaeus, 1758) и среднюю (*Sorex caecutiens* Laxmann, 1788). (Громов, Ербаева, 1995). Мышь полевая (*Apodemus agrarius* Pallas, 1771) в данном биотопе составляет доминирующий вид.

Численность мыши полевой подвержена сильным (2–8 кратным) сезонным колебаниям. Пик численности является сезонным эффектом, а размножение полевых мышей и не лимитируется плотностью популяции, а зависит от кормовых условий (Громов 2008).

Для получения выборки пригодной для статистического анализа необходимо вести долговременный мониторинг.

Таблица 1

Численный состав уловов мелких млекопитающих за 2016–2019 годы на фоновом биотопе

Виды	2016	2017	2018	2019	Итого
Мышь полевая	7	2	16	12	37
Крыса серая	-	-	-	2	2
Хомяк обыкновенный	-	-	1	-	1
Полевка экономка	-	-	1	1	2
Узкочерепная полевка	1	-	-	-	1
Красная полевка	4	1	-	-	5
Обыкновенная полевка	1	-	-	-	1
Обыкновенная бурозубка	4	1	-	-	5
Средняя бурозубка	1	-	-	-	1
Всего	18	4	18	15	55

В результате мониторинговых исследований исследован долговременный период колебаний численности популяции в момент её наибольшего пика и отловлено в 2018–2019 г. 28 особей мышей полевых, пригодных для проведения морфологического анализа и составления критериев нормального функционирования желез внутренней секреции.

Возрастной состав абсолютного большинства особей, отловленных в 2019 году представлен 12 сеголетками (12), в 2018 году сеголетки были преобладающими, 10 (из которых 8 особей – самцы) к 7 зимовавшим (самки). Средняя масса отловленных сеголеток за 2018–2019 год у самцов составила 18,08 г, в то время как средняя масса самок оказалась ниже и составила 14,74 г. Средняя масса взрослых самцов за 2018–2019 год составила 18,2 г, самок – 32,4.

Три четверти особей попадает в ловушки в первые сутки после установки ловушек остальные попадают на вторые сутки. Третьи сутки по отлову безрезультатны.

Микроструктура щитовидной железы мыши полевой имеет свои особенности, связанные с организацией коллоида, величиной эпителия и собственно размером и формой самой железы.

Анатомически железа мыши полевой представляет собой компактный непарный паренхиматозный орган внутренней секреции, имеет две выраженных доли и тонкий узкий перешеек, хвостатая (центральная) доля в центре не выражена (рис. 1).

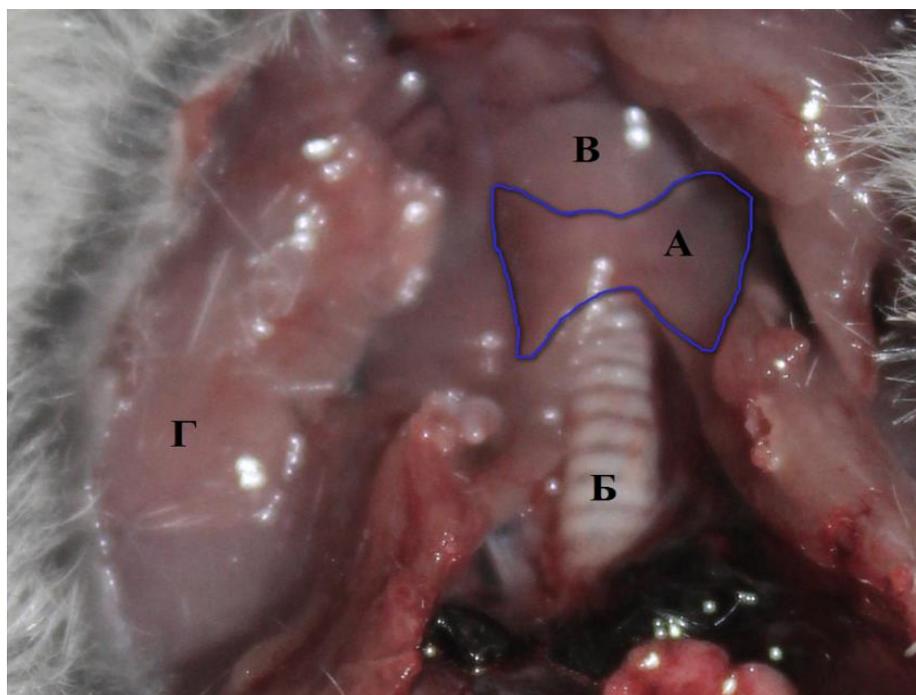


Рис. 1. Топология и макроанатомия щитовидной железы мыши полевой
А – щитовидная железа, расположение и границы (обведены синим); Б –трахея; В-щитовидный хрящ;
Г– пакет нижнечелюстных желез.

От перешейка доли расширяются и округляются, образуя латерально широкие лопасти как основания вытянутых овалов, иногда напоминая при этом крылья бабочки. Ширина каждой доли 2–2,7 мм, длина 1,5–2 мм, высота 1–2 мм. Ширина перешейка 1,5–2 мм. Цвет железы варьирует от красного до темно-красного, четко выделяясь на фоне гортани и щитовидного хряща.

Железа снаружи имеет тонкую капсулу, представленную плоским неороговевающим эпителием, к которому присоединяется рыхлая соединительная ткань. По латеральной части органа в паренхиме ближе к выпуклой части органа в небольших пространствах величиной 9–15 мкм от ткани щитовидной железы в виде округлых или овальных образований можно встретить парашитовидные железы в виде одиночного островка в каждой доле (рис. 2А, общий вид).

Строма железы развита относительно слабо, в её составе имеется тонкая сеть ретикулярных клеток, небольшого количества тканевых макрофагов (1–2 в поле зрения при увеличении объектива $\times 10$, окуляра $\times 16$). Фолликулы часто (примерно треть в поле зрения железы) образуют небольшие дольки, которые одеты сеточкой ретикулярных клеток и опутаны некрупными кровеносными сосудами в виде 1–3 артериол – 2–6 венул и примерно по 1–3 капилляра на один фолликул, которых в поле зрения объектива увеличением $\times 40$ приходится от 10 до 30 штук.

Соединительно-тканый каркас органа-stroma очень хорошо визуализируется при окраске пикрофуксином по методу Ван-Гизон и представлена ретикулярными клетками и коллагеновыми волокнами, окрашенными фуксином в красный цвет (рис. 2Г). Такие окрашенные участки, в виде длинных тонких переплетенных пучков, шириной 1–3 мкм, четко отграничивают дольки железы. Капсула по полюсам плавно утолщаясь переходит в связки и

фасции, вдоль которых часто можно наблюдать крупные сосуды, снабжающие щитовидную железу и рядом лежащие ткани. Коллоид при окраске пикрофуксином приобретает оранжевый цвет с небольшими оттенками в зависимости от его плотности (чем плотнее, тем темнее).

Щитовидные и паращитовидные железы представляют единый органокомплекс. Парные паращитовидные железы имеют небольшой размер (от 0,2 до 1 мм в диаметре), их форма тяготеет к эллипсоидной (бобовидной), но может иметь и иную форму (10–15 % случаев в виде треугольника со скругленными гранями или призмы, что не является признаком патологических изменений, так как функциональная структура при этом сохранена и аналогична железам других форм).

Фолликулы щитовидной железы могут соединяться между собой, образуя в некоторых случаях некрупную сеть из 2–4 сообщающихся цистерн сложной формы (рис 2В). Подобные агрегации отмечали у полевой мыши в четырех пробах (из 28). Считать ли это физиологической нормой в условиях дефицита йода – открытый вопрос, требующий дополнительных исследований.

Основная форма фолликулов на срезе – пятиугольная уплощенная призма (ближе к центру), либо вытянутый овал (периферия органа). Коллоид внутри фолликулов может сильно отличаться по консистенции в пределах одной железы, светооптически в большинстве фолликулов он имеет умеренную плотность, и образует структуру без посторонних пузырьков и включений от светло-розового до интенсивно розового цвета. Разница в структуре коллоида указывает на различную активность участков железы, в данном случае это является нормальным процессом расходования и выработки гормонов. В четверти исследованных фолликулов (коэффициент вариации при этом колеблется в пределах 30–40 %) коллоид незначительно отслоен от эпителия и по периферии более светлый, что при этом не считается патологией.

В срезах с участков вблизи наружной части щитовидной железы встречаются тангенциальные срезы фолликулов, в которых можно при толщине среза более 8 мкм (10–12) увидеть боковую стенку фолликулов чуть глубже коллоида, через который просвечивает эпителий, который дает картинку фолликула без просвета и полностью заполненного эпителиальными клетками. Такие фолликулы при мифрометрических подсчетах не включали в генеральную выборку (однако не следует забывать то, что для индекса склерозирования подсчет площади таких фолликулов проводится и он очень важен), ввиду невозможности точно оценить просвет фолликула, высоту и количество слоев эпителия, соотношение и состояние коллоида. В целом при соблюдении единообразия исследований отсутствие таких фолликулов в выборке не влияет на относительные характеристики железы.

Эпителий фолликулов крупных фолликулов мыши полевой имеет призматическую формы, в зависимости от активности фолликула он может быть уплощен при низкой активности железы или же может быть высоким в случае активной продукции коллоида в мелких фолликулах. Для средних фолликулов тиреоциты (согласно международной гистологической номенклатуре (Семченко и др. 1999), наиболее правильное название фолликулярного эпителия щитовидной железы фолликулярный эндокриноцит – *endocrinocitis follicularis*, однако наиболее часто в клинической практике и литературе применяют равнозначные привычные термины тироцит=тиреоцит, поэтому для избегания путаницы, для соблюдения единообразия терминологии и сокращения объема и повторения громоздких терминов мы в дальнейшем будем использовать в нашей работе термин тироцит) имеют кубическую форму.

При окраске железы красителем толуоидиновым синим на предмет исключения воспалительных реакций не наблюдали каких-либо признаков присутствия тучных клеток (рис. 2Б). В капсуле железы находили единичные (1 клетка на 2–3 поля зрения при увеличении объектива $\times 10$) макрофаги, имевшие метакроматическое окрашивание в виде малиновой зернистости, что в данном случае можно считать нормой.

Согласно данным В. Н. Манского (2018) коэффициент вариации по массе щитовидной железы даже у лабораторных мышей в возрасте от 3 до 6 месяцев достигает 56–61 %.

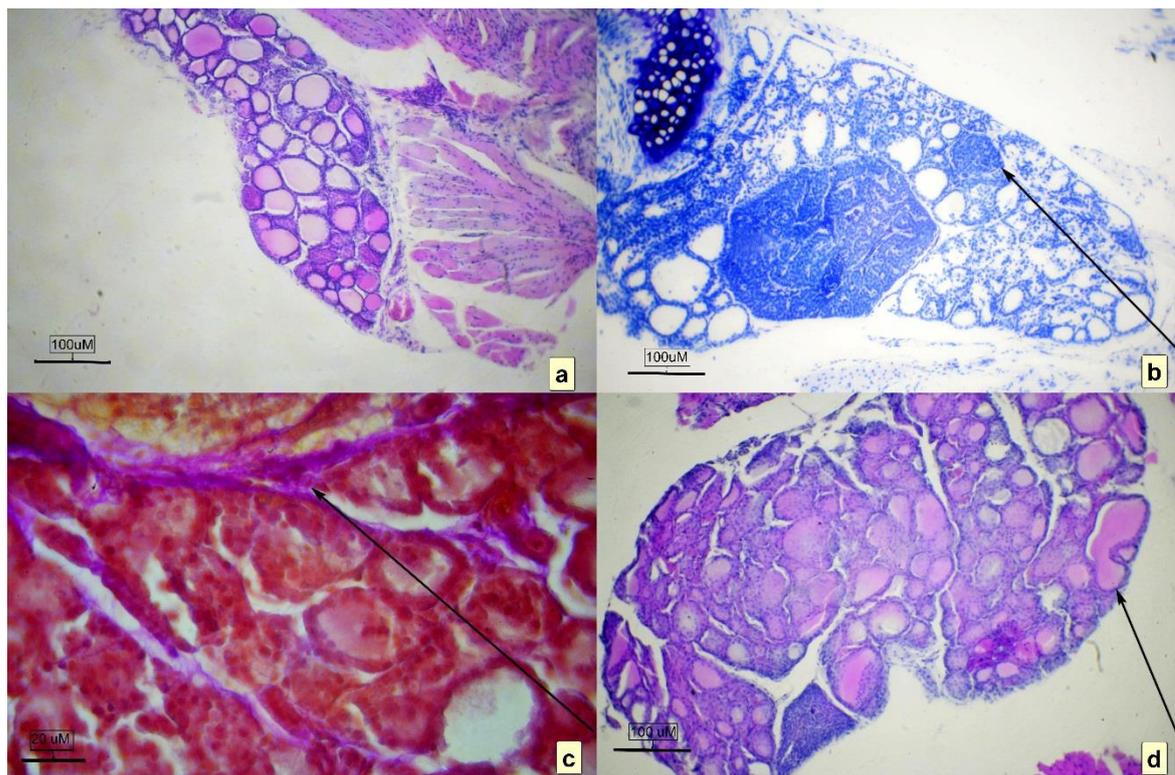


Рис. 2. Щитовидная железа мыши полевой, микрокартина

a – общий план, окраска гематоксилином и эозином; b – общий план, окраска толуоидиновым синим водным (стрелкой указана дополнительная парашитовидная железа) ув. об. $\times 10$; c – морфоструктура соединительнотканых прослоек коллагена в железе (малинового цвета, указана стрелкой) окраска пикрокармином по Ван-Гизон, ув. об. $\times 40$; d – общий план, стрелкой указана сложная цистерна из нескольких объединенных фолликулов, окраска гематоксилином и эозином, ув. об. $\times 10$.

Структура и функции щитовидной железы подразумевают под собой динамичный гуморальный ответ на любой раздражитель, с перестройкой ткани и быстрой адаптацией к сложившимся условиям. Это накладывает отпечаток на морфологию тканей органа-выражающуюся в большой вариабельности массы, структуры коллоида, высоты эпителия, объема, количества и формы фолликулов, входящих в строение железы.

Следует отметить условность абсолютных цифровых данных в исследовании морфометрии макро- и микроструктур, связанных в первую очередь с неизбежными методическими погрешностями в подходе проведения морфологических исследований. Опираясь на коэффициент вариации в средних и минимальных показателях, а также близкие показатели средней площади исследованных желез, пропорции эпителия к площади фолликулов, его высоты и количества самих фолликулов в паренхиме, не смотря на возможную погрешность в абсолютных величинах, постоянны в своих пропорциях, и могут служить достаточным критерием для отделения нормы от патологии в исследованиях, проводимых в других лабораториях с иными производителями реактивов и приборов.

Индексы Брауна, склерозирования и фолликулярно коллоидный, в щитовидной железе в норме не имеют существенных особенностей от прочих мелких млекопитающих (Манских, 2017), при этом максимальные и минимальные значения индексов довольно сильно варьируют, так индекс Брауна в максимальном значении превышает 49 условных единиц (бит), что объясняется максимальными показателями общей выборки (особенности методов учета).

Линейные размеры фолликулов, эпителия и другие показатели приведены в таблице 2.

Таблица 2

Линейные показатели щитовидной железы полевой мыши

Критерий	Площадь, мкм ²	Площадь фолликулов, мкм ²	Количество фолликулов	Площадь паращитовидной железы, мкм ²	Индекс склерозирования	Индекс Брауна	ФКИ
Средняя	488306	467	82	48528	0,81	9,07	3,72
Максимальное значение	629711	1457	101	15239	2,62	49,87	5,79
Минимальное значение	213591	158	62	95115	0,16	3,95	2,05
m	152422	235	18	28957	0,11	1,00	1,30
Cv, %	31	38	22	60	0,13	0,11	0,35

Примечание к таблице. m – стандартное отклонение, Cv – коэффициент вариации.

Морфологически щитовидную железу сеголеток можно описать как орган с высокой продукцией гормонов, при этом для железы можно выделить участки активной продукции секрета фолликулов (обычно каудальная часть железы), так и с относительно спокойными участками, в которых накапливается коллоид разной степени плотности.

Видовые особенности строения щитовидной железы у мышей полевых в отличие от полевок, крыс и лабораторных мышей (Chery, 2014) состоят в малом размере органа, тонкой капсуле, встречающимся наличии внутренних добавочных паращитовидных желез, компактно организованной паренхиме, умеренно развитой сосудистой сети.

Таблица 3

Показатели фолликулов щитовидной железы

Градация фолликулов	Малые			Средние			Крупные		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Показатель	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Средние значения	350,93	6,29	0,68	923,03	6,87	0,44	2429,29	7,30	0,25
M	91,17	1,75	0,06	251,89	1,38	0,03	1342,58	2,16	0,06
Cv, %	26	28	8	27	20	8	55	30	25

Примечание к таблице. 1 – площадь эпителия фолликулов, 2 – высота эпителия; 3 – отношение площади эпителия к площади фолликула. M – стандартное отклонение, Cv – коэффициент вариации.

Среди основных принципиальных показателей морфоструктуры необходимо выделить наиболее важные, на наш взгляд: индекс Брауна – показатель функциональной активности; высота и форма тироцитов (фолликулярного эпителия). Именно эти показатели в первую очередь изменятся при незначительных или непродолжительных поступлениях в физиологический процесс поллютантов и именно на них стоит обратить внимание в случае проведения биоиндикационных исследований и экомониторинга. Индекс склерозирования изменится лишь на поздней стадии развития заболевания, когда произойдут частично обратимые или же вовсе необратимые изменения, в то время как фолликулярно-коллоидный индекс слишком лабилен и может изменяться под воздействием экстремальных температур для

организма, изменении рациона (сезонный или случайный), изменением физиологического статуса (беременность активирует щитовидную железу, старение снижает активность и повышает процент соединительной ткани в железе (Кобозева, Гуркин, 1986; Рустембекова и др., 2011).

В таблице 4 объединены критерии оценки техногенного воздействия, а также возможные изменения и причины возникновения патологии тканей щитовидной железы. В основном изменения носят метрические показатели, которые хорошо определяются при микроморфометрическом анализе. Приобретенная техногенная патология определяется по совокупности обозначенных критериев.

Таблица 4

Диагностические критерии нарушений щитовидной железы мыши полевой при техногенных воздействиях

Критерий оценки	Норма	Изменения	Причины изменений
Форма тироцитов	Призматический\кубический	Плоский	Сниженная продукция гормонов (гипотиреоз), химический или возрастной
		Высокий\столбчатый	Повышенная продукция гормонов (гипертиреоз) химический генез
Высота тироцитов	6,83±1,40 мкм	5 и менее мкм ср	Сниженная продукция гормонов, техногенные или возрастные изменения
		7 и более среднее, значения разброса более 2	Повышенная продукция гормонов
Индекс Брауна	9,7±1,0	11 и выше	Сниженная продукция гормонов
		8 и ниже	Повышенная продукция гормонов
Фолликулярно-коллоидный индекс	3,72±1,30	5	Сниженная продукция гормонов
		2,5 и ниже /	Повышенная продукция гормонов
Индекс склерозирования	0,81±0,11	Более 1	Анаплазия, либо деструкция эпителия, с его заменой соединительной тканью
		Менее 0,6	Гиперплазия эпителия
Интенсивность окраски коллоида	Малиновый цвет, ровная структура без включений и зернистости	Бледно окрашенный коллоид	Сниженная продукция гормонов
		Яркий густой коллоид	Повышенная продукция гормонов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены региональные исследования зональной ненарушенной (нормальной) морфологии щитовидной железы сеголеток мышей полевых в условиях Красноярской лесостепи и выявлены наиболее важные показатели органа: высота тироцитов 6,83 мкм, средняя площадь фолликулов 467,9 мкм², индекс Брауна 9,7, фолликулярно-коллоидный индекс 3,72, индекс склерозирования 0,81, которые закладываются в основу базы данных нормального (зонального, ландшафтного) биоиндикации органов.

Видовые особенности строения щитовидной железы у мышей полевых в отличие от полевок, крыс и лабораторных мышей состоят в малом размере органа, тонкой капсуле,

встречающимся наличию внутренних добавочных парашитовидных желез, компактно организованной паренхиме, умеренно развитой сосудистой сети.

Наиболее важные биоиндикационные критерии для оценки изменений в случае техногенного воздействия под влиянием поллютантов: размеры железы (с учетом возраста), индекс Брауна, а также высота и форма тироцитов (фолликулярного эпителия).

Мышь полевая, за счет экологических и морфологических особенностей, представлена ценным объектом биоиндикации в условиях Красноярской лесостепи для оценки состояния фоновых и техногенных территорий.

На основе полученных сведений о нормальном состоянии щитовидной железы планируется провести исследование влияния выбросов фторидов КрАЗа и других металлургических производств алюминия.

Список литературы

- Громов В. С. Пространственно-этологическая структура популяций грызунов – М.: Товарищество научных изданий КМК. – 2008. – 581 с.
- Громов И. М., Ербаева М. А. Млекопитающие фауны России и сопредельных территорий. Зайцеобразные и грызуны. – СПб, 1995. – 522 с.
- Карасева Е. В. Телицына А. Ю. Жигальский О. А. Методы изучения грызунов в полевых условиях. – М.: ЛКИ, 2008 – 412 с.
- Коржевский Д. Э. Гиляров А. В. Основы гистологической техники. – СПб: СпецЛит, 2010. – 95 с.
- Кобозева Н. В., Гуркин Ю. А. Перинатальная эндокринология. – Руководство для врачей. – Ленинград, 1986. – 312 с.
- Кучерюк В. В. Синантропные грызуны и их значение в передаче инфекций // Вопросы прикладной экологии. – 2016. – № 1 – С. 36–39.
- Манских В. Н. Патоморфология лабораторной мыши. Т. 1. – М.: Вако, 2017. – 208 с.
- Сазонов Н. Н. Охотничьи животные – биоиндикаторы биогеохимических провинций Якутии // Вестник СВФУ. – 2012. – Т. 9, №1. – С. 41–45.
- Семченко В. В. Международная гистологическая номенклатура / [Под ред. В. В. Семченко, Р. П. Самусева, М. В. Моисеева, В. Л. Колосовой]. – Омск: Омская медицинская академия, 1999. – 156 с.
- Рустембекова С. А. Тлиашинова А. М Бурая Т. И. Возрастные особенности структуры и функции щитовидной железы // Новые исследования. – 2011 – С. 65–74.
- Рустембекова С. А. Оценка факторов экологического риска при патологии щитовидной железы (на примере московской агломерации) // Вестник РУДН. Медицина. – 2011. – № 4. – С. 123–128.
- Cheryl L. A Practical Guide to the Histology of the Mouse Scudamore. – Mary Lyon Centre, MRC Harwell, UK Wiley Blackwell, 2014. – P. – 232.

Lyuto A. A., Shishikin A. S. Morphostructure of the field mouse thyroid gland in normal state in the conditions of forest-steppe near Krasnoyarsk // Ekosistemy. 2021. Iss. 26. P. 106–115.

The regional research of the zonal undisturbed (normal) morphology of the thyroid gland of young field mice was carried out in the conditions of forest-steppe near Krasnoyarsk. The most important indicators of the thyroid gland are identified: macroscopically, the width of each lobe is 2-2.7 mm, the length is 1.5-2 mm, the height is 1-2 mm. The width of the isthmus is 1.5-2 mm. The color of the gland ranges from red to dark red and it clearly contrasts with the background of the larynx and thyroid cartilage. The thyroid and parathyroid glands are a single organocomplex. The specific features of the structure of the thyroid gland of field mice are the small size of the organ, a thin capsule, the presence of internal accessory parathyroid glands, a compactly organized parenchyma, and a moderately developed vascular network. The stroma of the gland is relatively poorly developed, it contains a thin network of reticular cells, a small number of macrophages. The epithelium of large follicles has a prismatic shape, although middle size follicles have cubic shaped epithelium. The height of thyrocytes is 6.83 microns, the mean area of follicles is 467.9 microns; Brown index is 9.7; follicular-colloid index is 3.72; the sclerosis index is 0.81. The field mouse, due to its ecological and morphological features, is a valuable object of bioindication for assessment of the state of background and anthropogenic landscape in the conditions of the Krasnoyarsk forest-steppe. The size of the gland (taking into account age of a mouse), the Brown index, as well as the height and shape of thyrocytes (follicular epithelium) are significant bioindication criteria to assess the changes in the case of technogenic exposure influenced by pollutants.

Key words: field mouse, thyroid gland, morphology, thyroid gland structure, bioindication criteria.

Поступила в редакцию 22.07.20

Принята к печати 20.02.21

Оценка биологической активности ризосферы *Sorghum bicolor* (L.) Moench под влиянием микробных препаратов в условиях прямого посева в степной зоне Крыма

Абдурашитова Э. Р., Мельничук Т. Н., Абдурашитов С. Ф.

Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма
Симферополь, Республика Крым, Россия
elvi-jadore@mail.ru

В условиях степной зоны растения часто испытывают недостаток влаги, что отражается на биохимических функциях их развития. Целью работы являлось изучение ферментативной активности почвы ризосферы *Sorghum bicolor* (L.) Moench под влиянием интродуцируемых микроорганизмов условиях технологии прямого посева и дефицита влаги. Период вегетации сорго зернового за 2018–2020 годы проведения исследования характеризовался высокотемпературными и засушливыми условиями, недостаток осадков достигал до 68,5 % в сравнении со среднегодовыми показателями. Установлено влияние условий года и комплекса микробных препаратов (КМП) на изменения ферментативной активности ризосферы сорго зернового на уровне $p \leq 0,05$. По результатам ферментативной активности почвы рассчитан ИПБС (интегральный показатель биологического состояния), значение которого близко к 80 % с КМП, что показывает стабильность чернозема южного ризосферы при прямом посеве. В тоже время в контрольном варианте без предпосевной обработки семян КМП, ИПБС с каждым годом снижался 92,8–61,1 %, что свидетельствует о замедлении биологических процессов. Результаты исследований показали, что адаптация растений сорго к воздействиям абиотических условий окружающей среды осуществляется регулированием ферментативной активности ризосферы путем интродукции микроорганизмов. В связи с этим сделано заключение, что применение микробных препаратов целесообразно при выращивании сорго зернового в условиях прямого посева в степной зоне Крыма.

Ключевые слова: *Sorghum bicolor*, ризосфера, прямой посев, биопрепараты, ферментативная активность, интегральный показатель биологического состояния, степная зона, Крым.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях степной зоны растения испытывают недостаток влаги, что отражается на биохимических функциях их развития. Технология прямого посева (no-till) способствует максимальному сохранению физических свойств почвы, препятствует ее эрозии, а также повышает доступность воды растениям в вегетационный период, накоплению в почве органического вещества, сокращению затрат на обработку почвы (Корчагин и др., 2015; Page et al., 2020). Все больше возрастает количество стран, применяющих no-till, площади под которой составляют около 12,5 % мировых пахотных земель (Kassam et al., 2019; Dang et al., 2020). Широкомасштабное использование системы земледелия прямого посева способствует сокращению всех форм деградации земель и сокращению выбросов парниковых газов в сельском хозяйстве (Горянин и др., 2019; Dang et al., 2020). Однако, следует помнить и о существующих проблемах при ее внедрении: это ухудшение фитосанитарной обстановки – болезни растений, сорняки, накопление пестицидов, вследствие чего происходит замедление биохимических процессов в почве, потеря урожая и снижение его качества (Железова, 2019).

Известно, что биологическая коррекция агрофитоценозов предполагает улучшение обеспеченности питания в системе почва–растение за счет интенсификации биохимических процессов и определяет продуктивность последних в различных почвенно-климатических условиях (Hafez et al., 2020). В результате жизнедеятельности микроорганизмов изменяется активность ферментов почвы, влияющая на стабильность экосистемы и ее плодородие (Smith et al. 1993). Ферментативная активность ризосферы может быть одним из диагностических показателей плодородия почвы (Хазиев, 2005). Ферменты класса оксидоредуктаз участвуют в процессах, как минерализации органического вещества почвы, так и гумусообразования.

Несбалансированность биохимических реакций может вызвать потери газообразного углекислого газа почвой. Засухоустойчивая культура *Sorghum bicolor* (L.) Moench занимает в мировом земледелии 70-75 млн га и находится по посевным площадям на пятом месте после пшеницы, риса, кукурузы и ячменя, что является перспективной для зоны рискованного земледелия (Топари et al., 2020). Сорго зерновое используется как корм для животных как в развитых, так и в развивающихся странах. Проведены исследования по доступности щелочных элементов (Ca, Mg, Na) при выращивании сорго зернового, установлено их повышение под влиянием ассоциативных бактерий и микоризных грибов (Dhawi, Hess, 2017). Применение микробных препаратов в предпосевной инокуляции семян на основе штаммов ассоциативных бактерий могут проявить многостороннее влияние на физиологическом, биохимическом и молекулярном уровнях, положительно воздействовать на рост, развитие и защитные свойства растений (Singh et al., 2020). Поскольку данная культура только набирает обороты выращивания в России, исследования по изучению влияния засушливых условий степной зоны Крыма и подбор эффективных штаммов бактерий в технологии прямого посева для адаптации сорго зернового еще мало изучены. Таким образом, для повышения продуктивности растений необходимо понимание экологии ризосферы.

Цель работы – изучить ферментативную активность почвы ризосферы *S. bicolor* под влиянием интродуцируемых микроорганизмов в условиях дефицита влаги и технологии прямого посева.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Постановка полевого опыта. Определение биологической активности в ризосфере *S. bicolor* проводили в пятипольном севообороте стационарного опыта в 2018–2020 годах. Стационарный опыт заложен в 2015 году в степной зоне чернозема южного на базе ФГБУН «НИИСХ Крыма» (45°31'48.5"N 34°11'47.9"E). Предшественник сорго – озимый ячмень. Культуру выращивали по технологии прямого посева (ПП) с предпосевной обработкой семян комплексом микробных препаратов (КМП) и без обработки (контроль). КМП включает: Биополлицид (основная функция – защита растений от фитопатогенов), Фосфостим (ростстимуляция и фосфатмобилизация), Диазофит (участвует в азотном питании). Биопрепараты производятся на основе штаммов Крымской коллекции микроорганизмов (<http://ckp-rf.ru/usu/507484/>): *Paenibacillus polymyxa* П, *Lelliottia nimipressuralis* 32–3, *Agrobacterium tumefaciens* 204 соответственно. Отбор растительно-почвенных образцов проводили по методу конверта (в пяти точках) в трех кратной повторности в фазу выметывания растений. Лабораторные исследования проводили ризосферной почвы, прилегающей к корню (0–5 мм), размерной фракции 1–2 мм, полученной просеиванием.

Условия проведения опыта. Чернозем южный малогумусный на лессовидных легких глинах характеризовался следующим составом: количество гумуса (по Тюрину) – 2,0–2,2 %, подвижного фосфора и калия (по Мачигину) – 4,0–4,2 мг на 100 г почвы и 40,0 соответственно. В 2018 году до посева сорго зернового сложились довольно жесткие погодные условия. Весна переходила в лето ускоренными темпами. Почва во II декаде апреля прогрелась до 15 °С. В конце весны метеорологи отметили начало опасного метеоявления – почвенная засуха, а в I–II декадах июля – суховежные ветра. За весенний период выпало 42,1 мм осадков, что в 2,4 раза меньше среднемноголетнего показателя. Ливневые дожди прошли в июле (136,8 мм), что способствовало кущению сорго. Посеянное в полусухую почву сорго имело изреженные всходы. Дожди, хотя и довольно поздние, способствовали выравниванию всходов, и к уборке сорго зернового имело нормальную густоту.

В 2019 год влаги в посевном слое было недостаточное количество, за два месяца (март, апрель) до посева выпало всего 38,6 мм осадков, что меньше в 1,5 раза среднемноголетней нормы. В июне и в июле количество осадков превышало среднемноголетние показатели в 2,0 и 1,6 раза соответственно. В остальные месяцы до уборки сорго зерновое сопровождали засушливые условия.

Весна 2020 года по количеству осадков характеризовалась как острозасушливая. До посева в весенний период выпало на 68,5 % осадков меньше среднееголетних показателей, пролил только один хозяйственно-полезный дождь. На протяжении всей вегетации сорго также наблюдали снижение количества осадков на 17,9–66,3 %. Отличился только месяц июнь, в котором количество осадков превысило среднееголетние показатели на 43,4 %.

Биохимические исследования. Определение показателей ферментативной активности чернозема южного ризосферы сорго зернового проводили, используя соответствующие методы (Грицаенко, 2003; Хазиев, 2005). Активность термолабильных каталаз оценивали по скорости распада перекиси водорода при взаимодействии с почвой с газометрической детекцией выделяющегося кислорода. В основе фотометрического определения активности пероксидаз лежит их способность окислять перекись водорода под действием гваякола до тетрагваяколхинона, который окрашивается в красно-коричневый цвет. Оценка активности полифенолоксидаз строится на их способности катализировать реакции окисления дифенолов (пирокатехин) кислородом воздуха в 0-хинон. Интенсивность эмиссии CO₂ исследовали адсорбционным методом (Методические рекомендации, 1981).

Интегральные показатели. Для определения биологической активности ризосферной почвы выбран интегральный показатель биологического состояния (ИПБС) (Казеев, Колесников, 2012). Коэффициент гумификации рассчитывали по отношению активности полифенолоксидаз к активности пероксидаз.

Статистическую обработку проводили в программах Microsoft Excel 2016 и Statistica 10.0, рассчитывая стандартную ошибку средней ($\bar{x} \pm S\bar{x}$). Долю влияния факторов оценивали при $p \leq 0,05$ согласно дисперсионного анализа (Доспехов, 1985). За факторы при выращивании сорго зерновое рассматривали: год исследования и обработка семян биопрепаратами.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ферменты почв осуществляют функциональные связи между компонентами любой экосистемы, в том числе и агроценоза, и отражают работу живых организмов (Хазиев, 2015). Каталаза участвует в разложении токсичной для клеток перекиси водорода, образующейся в процессе жизнедеятельности организмов, и показывает уровень антропогенной нагрузки на почву. Согласно результатам двухфакторного дисперсионного анализа, установлено влияние условий года – 92,4 % на каталазную активность ризосферы сорго (табл. 1). В литературе имеются данные показывающие, что даже незначительное превышение влажности черноземов приводит к перестройке микробных сообществ и тесно связанных с ними окислительно-восстановительных реакций (Турусов и др., 2019). Так, отмечено, что в условиях 2019 года активность каталазы значительно увеличилась в 1,6–2,0 раза под влиянием биопрепаратов и 1,5–1,6 раз в контроле в сравнении с 2018 и 2020 годом.

Таблица 1

Каталазная активность ризосферы сорго зернового в фазу выметывания в условиях прямого посева (чернозем южный, 2018–2020 годы)

Вариант опыта	Активность каталаз, мл O ₂ /минуту/г почвы			Вклад факторов в активность каталаз, %
	2018 г.	2019 г.	2020 г.	
Контроль (без обработки)	22,7±0,2	36,1±2,0	23,9±0,1	<ul style="list-style-type: none"> ■ *год 92,4 ■ обработка 0,1 ■ год-обработка 2,8 ■ ошибка 4,6
Обработка с КМП	20,1±1,6	39,7±0,4	24,5±1,0	

Примечание к таблице. * – различия достоверны при $p \leq 0,05$; ± – стандартная ошибка средних.

Пероксидаза катализирует окисление органических соединений почвы за счет кислорода перекиси водорода и органических перекисей и поступает в ризосферу в виде прижизненных выделений корней растений и микроорганизмов (Хазиев, 2015). Далее образующиеся соединения взаимодействуют с аминокислотами и пептидами, образуя молекулы гумусовых кислот. В наших исследованиях при изучении активности пероксидаз установлены различия (табл. 2), доля вклада факторов в изменение работы ферментов при применении биопрепаратов составила 2 %, но взаимовлияние года исследования и применение биопрепаратов увеличила в 34,1 раза в ризосфере сорго в условиях степной зоны. Первые два года полевых экспериментов показали, что предпосевная обработка семян с КМП способствовало уменьшению активности фермента на 17,1 и 33,4 % соответственно в сравнении с контролем.

Таблица 2

Влияние комплекса микробных препаратов (КМП) на активность пероксидаз ризосферы сорго в фазу выметывания в условиях прямого посева (чернозем южный, 2018–2020 годы)

Вариант опыта	Активность пероксидаз, мкмоль С ₇ Н ₈ О ₂ / 100 г почвы			Вклад факторов в активность пероксидаз, %
	2018 год	2019 год	2020 год	
Контроль (без обработки)	*2,80±0,03	*2,99±0,04	*2,40±0,04	<ul style="list-style-type: none"> ■ *год ■ *обработка ■ *год-обработка ■ ошибка
Обработка с КМП	*2,32±0,03	*1,99±0,04	*4,60±0,04	

Примечание к таблице. * – различия достоверны при $p \leq 0,05$; ± – стандартная ошибка средней.

В условиях 2020 года применение комплекса микробных препаратов способствовало повышению активности ферментов этого класса на 91,7 %. Возможно, это связано с тем, что один хозяйственно-полезный дождь в активной фазе развития растений, способствовал повышению активности интродуцированных в ризосферу микроорганизмов и, как следствие, выделению корневых экссудатов. О. М. Минаевой с соавторами (2019) сделаны предположения, что увеличение активности пероксидаз может быть связано со способностью бактерий положительно влиять на усиление защитных механизмов растений, предотвращающих их окислительное повреждение при неблагоприятных условиях. Зарубежными исследователями проведены эксперименты подтверждающие, что после восстановления благоприятных условий среды у избирательных устойчивых к засухе микроорганизмов происходит регидратация клеток (Manzanera, 2020).

Важную роль в образовании гумусовых веществ, устойчивых к разложению, выполняют полифенолоксидазы. Вклад факторов, согласно дисперсионного анализа показал, что на активность полифенолоксидаз в ризосфере сорго оказывали влияние год, предпосевная бактериализация и их взаимовлияние (табл. 3). В отличие от других ферментов на активность полифенолоксидаз фактор обработки семян биопрепаратами оказал максимальное влияние, превышение которого составляло 1,3–1,8 раза относительно остальных рассматриваемых. Так под воздействием биопрепаратов комплексного действия, установлено увеличение активности полифенолоксидаз в 4,7 (2019 год) и в 2,4 раза (2020 год) в ризосфере сорго (табл. 3). Низкая активность полифенолоксидаз в контроле может быть связана с агрессивностью погодных условий, которые приводят к быстрому исчерпанию доступных субстратов и кислорода (Якушев, 2014).

Таблица 3

Влияние комплекса микробных препаратов (КМП) в условиях прямого посева на активность полифенолоксидаз ризосферы сорго в фазу выметывания (чернозем южный, полевой опыт, 2018–2020 годы)

Вариант опыта	Активность полифенолоксидаз, мл КЮ ₃ / 100 г почвы			Вклад факторов в активность полифенолоксидаз, %
	2018 год	2019 год	2020 год	
Контроль (без обработки)	1,16±0,07	*0,83±0,07	*0,73±0,00	
Обработка с КМП	1,31±0,00	*3,89±0,29	*1,75±0,08	

Примечание к таблице. * – статистическая значимость $p \leq 0,05$; ± – стандартная ошибка средних.

Изучение направленности процессов трансформации органического вещества или образование гумусовых веществ, оценивали по значению условного коэффициента гумификации Кгум (рис. 2). Так, значение Кгум меньше единицы указывает на то, что в почве преобладают минерализационные процессы, больше – гумификации. Усиление гумификации в 2019 год в варианте с применением КМП возможно связано с благоприятствующими погодными условиями для жизнедеятельности интродуцируемых в ризосферу микроорганизмов и активизации процессов, направленных на синтез органического вещества.

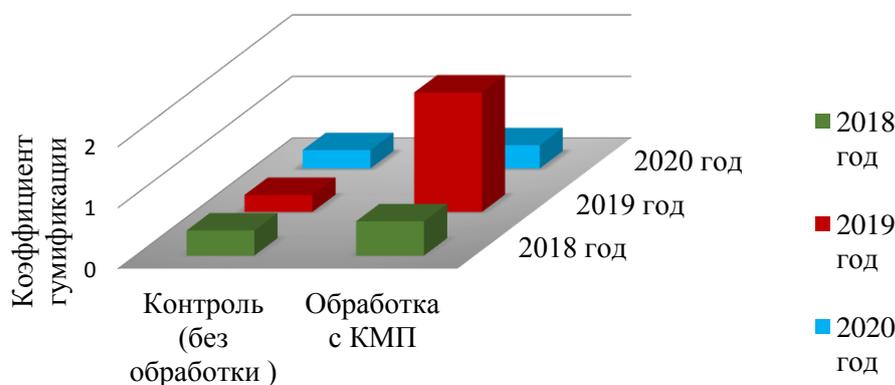
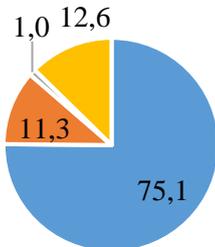


Рис. 2. Влияние комплекса микробных препаратов (КМП) в условиях прямого посева на коэффициент гумификации, в ризосфере сорго в фазу выметывания (чернозем южный, полевой опыт, 2018–2020 годы)

Показатели почвенного дыхания дают представление об активности почвенного микробоценоза, а также позволяют оценить потери органического вещества вследствие процессов минерализации (Пуртова и др., 2013). Анализ данных за 2018–2020 года показал, что угнетение процессов эмиссии CO₂ в ризосфере сорго обеспечивается применением биопрепаратов (11,3 %) и влиянием различных погодных условий (75,1 %) (табл. 4). Так, при использовании КМП выявлены тенденции снижения концентрации углекислого газа в почве на 9,1 % в 2018 год, в 2019 год – 20,8 % и в 2020 год – 8,7 %.

Таблица 4

Влияние комплекса микробных препаратов (КМП) в условиях прямого посева на эмиссию CO₂ в ризосфере сорго в фазу выметывания (чернозем южный, полевой опыт, 2018–2020 годы)

Вариант опыта	Эмиссия CO ₂ , мкг/г почвы			Вклад факторов в эмиссию CO ₂ , %
	2018 г.	2019 г.	2020 г.	
Контроль (без обработки)	160,8±8,4	112,8±5,6	137,4±7,6	
Обработка с КМП	146,2±0,0	89,4±7,4	125,5±4,3	

Примечание к таблице. * – статистическая значимость $p \leq 0,05$; ± – стандартная ошибка средней.

По данным ферментативной активности и эмиссии углекислого газа ризосферы сорго зернового рассчитали интегральный показатель биологического состояния (ИПБС) почвы (рис. 3). ИПБС позволяет оценить степень состояния и функционирования почвы. На основании сравнительного анализа ИПБС опытных вариантов, проводимых на протяжении 2018–2020 годов установлена линейная закономерность ее снижения в контрольном варианте на 31,7 % за три года и стабильность данного показателя с применением предпосевной бактериализации близком к 80 %. Снижение показателя ИПБС в контрольном варианте свидетельствует о замедлении биологических процессов.

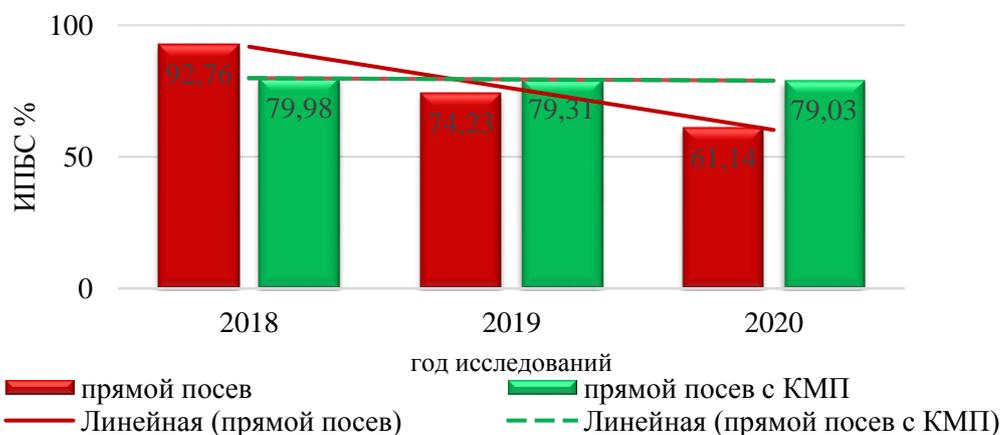


Рис. 3. Влияние комплекса микробных препаратов в условиях прямого посева на ИПБС (%) ризосферы сорго в фазу выметывания (чернозем южный, полевой опыт, 2018–2020 годы)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований (2018–2020 годы) показали, что адаптация растений сорго к воздействиям абиотических условий окружающей среды осуществляется регулированием ферментативной активности ризосферы путем интродукции микроорганизмов. В условиях 2020 года применение комплекса микробных препаратов способствовало повышению активности пероксидаз на 91,7 %, что может быть связано со способностью бактерий положительно влиять на усиление защитных механизмов растений в ответ стресс вызванной засухой. Под воздействием биопрепаратов комплексного действия, установлено увеличение

активности полифенолоксидаз в 4,7 (2019 год) и в 2,4 раза (2020 год) в ризосфере сорго. Низкая активность полифенолоксидаз в контроле может быть связана с агрессивностью погодных условий, которые приводят к быстрому исчерпанию доступных питательных веществ и кислорода. О сокращении потери органического вещества почвы свидетельствует угнетение процессов эмиссии CO₂, что отмечено в ризосфере сорго под влиянием микробных препаратов. Показано, что активный период развития растений сорго зернового 2019 года характеризовался избыточным увлажнением и значительным возрастанием активности каталаз, и снижением эмиссии CO₂ в ризосфере в сравнении с засушливыми годами. Таким образом, в условиях прямого посева при воздействии высоких температур и водного дефицита, сменяющегося переувлажнением, установлено положительное влияние комплекса микробных препаратов на изменение биологической активности ризосферы *S. bicolor*. Выявлено, что значение интегрального показателя биологического состояния ризосферы в условиях прямого посева снижается за годы исследований с 92,8 % до 61,1 %, что свидетельствует о замедлении биохимических процессов и ухудшение экологического состояния почвы. В тоже время применение биопрепаратов комплексного действия способствует снижению неблагоприятного воздействия окружающей среды в системе почва – растение, о чем свидетельствуют стабильные показатели ИПБС на уровне близком к 80 %. В связи с этим, можно сделать заключение, что применение микробных препаратов целесообразно при выращивании культуры сорго зерновое в условиях прямого посева в степной зоне.

Работа выполнена в рамках государственного задания фундаментальных исследований ФГБУН «НИИ СХ Крыма» № 0834-2019-0004 «Экологическое обоснование альтернативных способов улучшения плодородия почвы при разных системах земледелия»

Список литературы

- Горянин О. И., Васин А. В., Щербинина Е. В., Джангабаев Б. Ж., Пронович Л. В., Медведев И. Ф. Эффективное плодородие при прямом посеве яровой пшеницы в Среднем Заволжье // Аграрный научный журнал. 2019. – № 6. – С. 4–9.
- Грицаенко З. М., Грицаенко А. О., Карпенко В. П. Методи біологічних та агрохімічних досліджень рослин та ґрунтів. – К.: ЗАТ «НІЧЛАВА», 2003. – 320 с.
- Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). – М.: Агропромиздат, 1985. – 351 с.
- Железова С. В. Прямой посев и вспашка: десятилетний комплексный мониторинг агрофитоценозов в центре точного земледелия РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева // Сборник научных трудов ГНБС. – 2019. – Т. 148. – С. 60–67.
- Казеев К. Ш., Колесников С. И. Биодиагностика почв: методология и методы исследований. – Ростов-на-Дону. – Издательство Южного федерального университета, 2012. – 260 с.
- Корчагин В. А., Обущенко С. В., Горянин О. И., Джангабаев Б. Ж. Системы обработки почвы в современных ресурсосберегающих технологических комплексах возделывания зерновых культур на черноземных почвах степных районов Среднего Заволжья // Земледелие и растениеводство. – 2015. – С. 546–560.
- Методические рекомендации по оценке токсического действия пестицидов на микрофлору почвы / [Под ред. Ю. В. Круглова]. – Ленинград, 1981. – 43 с.
- Минаева О. М., Акимова Е. Е., Терещенко Н. Н., Зюбанова Т. И. Влияние бактеризации *Aeromonas media* GS4 и *Pseudomonas extremorientalis* PhS1 на проростки пшеницы в различных абиотических условиях // Вестник Томского государственного университета. Биология. – 2019. – № 45. – С. 128–141. DOI: 10.17223/19988591/45/7
- Пуртова Л. Н., Костенков Н. М., Семаль В. А., Комачкова И. В. Эмиссия углекислого газа из почв природных и антропогенных ландшафтов юга Приморья // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 1. – С. 585–589.
- Турусов В. И., Чевурдин Ю. И., Титова Т. В., Беспалов В. А., Гармашова Л. В. Изменение и взаимосвязь физических и микробиологических показателей луговых почв юго-востока ЦЧЗ в результате агрогенеза // Проблемы агрохимии и экологии. – 2019. – № 1. – С. 58–63.
- Хазиев Ф. Х. Методы почвенной энзимологии. – М.: Наука, 2005. – 252 с.
- Хазиев Ф. Х. Функциональная роль ферментов в почвенных процессах // Вестник академии наук Республики Башкортостан. – 2015. – Т. 20, № 2 (78). – С. 14–24
- Якушев А. В., Кузнецова И. Н., Благодатская Е. В., Благодатский С. А. Зависимость активности полифенолоксидаз и полифенолоксидаз в современных и погребенных почвах от температуры // Почвоведение. 2014. – № 5. – С. 590–596.

Awada L., Lindwall C. W., Sonntag B. The development and adoption of conservation tillage systems on the Canadian Prairies // International Soil and Water Conservation Research. – 2014. – Vol. 2, N 1. – P. 47–65.

Dang Ya. P., Page K. L., Dalal R. C., Menzies N. W. No-till Farming Systems for Sustainable Agriculture: An Overview // In book: No-till Farming Systems for Sustainable Agriculture, Challenges and Opportunities. – 2020. – P. 3–20. DOI: 10.1007/978-3-030-46409-7_1

Dhawi F., Hess A. Poor-soil rhizosphere enriched with different microbial activities influence the availability of base elements // Open Journal of Ecology. – 2017. – Vol. 7. – P. 495–502. DOI: 10.4236/oje.2017.78033

Hafez M., Rashad M., Popov A. I. The biological correction of agro-photosynthesis of soil plant productivity // Journal of Plant Nutrition. – 2020. DOI:10.1080/01904167.2020.1799008

Kassam A., Friedrich T., Derpsch R. Global spread of conservation agriculture // International Journal of Environmental Studies – 2019. – Vol. 76, N 1. – P. 29–51. <https://doi.org/10.1080/00207233.2018.1494927>

Manzanera M. Dealing with water stress and microbial preservation // Environmental Microbiology. – 2020. – P. 1462–2920. DOI: 10.1111/1462-2920.15096

Page K. L., Dang Y. P., Dalal R. C. The Ability of Conservation Agriculture to Conserve Soil Organic Carbon and the Subsequent Impact on Soil Physical, Chemical, and Biological Properties and Yield // Frontiers in Sustainable Food Systems. – 2020. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00031>

Singh D. P., Singh, V., Shukla R., Sahu P., Prabha R., Gupta A., Sarma B. K., Gupta V. K. Stage-dependent concomitant microbial fortification improves soil nutrient status, plant growth, antioxidative defense system and gene expression in rice // Microbiological Research. – 2020. – Vol. 239, N 126538. DOI: 10.1016/j.micres.2020.126538

Smith J. L., Papendick R. I., Bezdicek D. F., Lynch J. M. Soil organic matter dynamics and crop residue management // In: Metting F.B. Jr, editor. Soil microbial ecology. New York: Marcel Dekker. – 1993. – P. 65–94. DOI: 10.1080/09064710.2014.896936)

Tonapi V. A., Talwar H. S., Are A. K., Bhat B. V., Reddy Ch. R., Dalton T. J. Sorghum in the 21st Century: Food – Fodder – Feed – Fuel for a Rapidly Changing World (eBook) / Springer. – 2020. – 932 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-8249-3>

Abdurashytova E. R., Melnichuk T. N., Abdurashytov S. F. Evaluation of the biological activity of the rhizosphere *Sorghum bicolor* under the influence of microbial preparations using no-till technology in the Crimean Steppe // Ekosistemy. 2021. Iss. 26. P. 116–123.

In steppe plants regularly lack of moisture and it affects the biochemical functions of their development. The aim of this research was to study the enzymatic activity of the *Sorghum bicolor* (L.) Moench rhizosphere grown by no-till technology under the influence of introduced microorganisms under conditions of moisture deficit. The growing season of *Sorghum bicolor* during the research period (2018–2020) was characterized by high temperature and arid conditions. The lack of precipitation reached 68.5 % in comparison with the average long-term indicators. It was revealed that the influence of the weather conditions of the year and the complex of microbial preparations (CMP) on the changes in the enzymatic activity of the *S. bicolor* rhizosphere was at the level of $p \leq 0.05$. IIBS (integral indicator of biological state) was calculated based on the level of activity of various enzymes in the soil. The value of IIBS with CMP is close to 80 %. It shows that no-till farming using CMP contributes to physiological stability of the rhizosphere. At the same time, the IBPS annually decreased by 61.1–92.8 % in the control variant without pre-sowing treatment of seeds with CMP, which indicates a slowdown of biological processes. The results of the studies proved that the adaptation of sorghum plants to the effects of abiotic environmental conditions is carried out by regulating the enzymatic activity of the rhizosphere by introducing microorganisms. Consequently, the use of microbial preparations is advisable for the cultivation of *S. bicolor* by no-till technology in steppe zone of Crimea.

Key words: *Sorghum bicolor*, rhizosphere, no-till, biological products, enzymatic activity, integral indicator of biological state, steppe zone.

Поступила в редакцию 16.03.21

Принята к печати 30.04.21

СОДЕРЖАНИЕ

Йерена С. А., Курбатова А. И. Оценка сезонной динамики нормализованного дифференциального индекса растительности (NDVI) и его взаимосвязь с климатическими предикторами в водно-болотных угодьях Тембладера (Эквадор).....	5
Гривко Е. В., Глуховская М. Ю., Евстифеева Т. А. Геоэкологические проблемы природно-территориального комплекса в области влияния промышленных предприятий городского округа города Салават Республики Башкортостан.....	12
Егошин А. В. Прогнозирование влияния климатических изменений на пространственное распределение чужеродного компонента флоры юга черноморского побережья Краснодарского края	23
Данчева А. В. Трансформация лесной подстилки сосновых насаждений Казахского мелкосопочника под влиянием антропогенного фактора.....	33
Иванова Е. А., Краснова Е. Д., Воронов Д. А., Тимофеев В. А., Гулин М. Б. Результаты исследования функционального состояния мейобентосной фауны в высокосульфидных биотопах прибрежных озёр-лагунов Кандалакшского залива (Белое море)	44
Ревков Н. К., Болтачева Н. А. Донная фауна юго-западной части Азовского моря: трансформация биоценоза макрозообентоса в начале XXI века.....	51
Головин А. В., Скрыпник Л. Н., Масютин Я. А. Особенности накопления цинка и никеля некоторыми лекарственными растениями, произрастающими на территориях с различной степенью техногенной нагрузки.....	67
Умаров Н. Н., Абдуманонов А., Шукуров Т., Абдулаев С. Ф. Влияние содержания тяжёлых металлов на молекулярную динамику функциональных групп структуры хвойных деревьев	78
Леонов С. В. Первая находка испанского слизня <i>Arion vulgaris</i> (Pulmonata, Arionidae) в Крыму	84
Новрузов Н. Э. Сравнение трофического поведения скорпионов <i>Mesobuthus eupeus</i> , <i>Mesobuthus caucasicus</i> , <i>Androctonus crassicauda</i> (Scorpiones, Buthidae).....	91
Люто А. А., Шишкин А. С. Морфоструктура щитовидной железы мыши полевой в норме в условиях Красноярской лесостепи	106
Абдурашитова Э. Р., Мельничук Т. Н., Абдурашитов С. Ф. Оценка биологической активности ризосферы <i>Sorghum bicolor</i> под влиянием микробных препаратов в условиях прямого посева в степной зоне Крыма	116

CONTENT

Llerena S. A., Kurbatova A. I. Assessment of the seasonal dynamics of the normalized differential vegetation index (NDVI) and its correlation with climate predictors in wetlands “La Tembladera” (Ecuador).....	5
Grivko E. V., Evstifeeva T. A., Glukhovskaya M. Yu. Geoecological problems of natural territorial complexes influenced by large industrial centers (exemplified by the Salavat urban district of the Republic of Bashkortostan)	12
Egoshin A.V. The influence of climate change on the spatial distribution of flora alien component on the southern Black Sea coast of Krasnodar Krai.....	23
Dancheva A. V. Anthropogenic transformation of the forest litter of pine forests of the Kazakh Upland.....	33
Ivanova E. A., Krasnova E. D., Voronov D. A., Timofeev V. A., Gulin M. B. The results of the functional state of the meiobenthic fauna research in high-sulfide biotopes of coastal lakes-lagoons of the Kandalaksha Bay (White Sea).....	43
Revkov N. K., Boltachova N. A. Benthic fauna of the south-western part of the Sea of Azov: transformation of macrozoobenthos biocoenosis at the beginning of the XXI century.....	51
Golovin A. V., Skrypnik L. N., Masyutin Ya. A. Particularities of zinc and nickel accumulation by certain medicinal plants in territories with varying degrees of technological load.....	67
Umarov N. N., Abdumanonov A., Abdullayev S. F., Shukurov T. Influence of Heavy Metal Content on Molecular Dynamics of Functional Groups of Coniferous Trees Structure.....	78
Leonov S. V. The first record of the Spanish slug <i>Arion vulgaris</i> (Pulmonata, Arionidae) in Crimea.....	84
Novruzov N. E. Comparison of trophic behavior of scorpions <i>Mesobuthus eupeus</i> , <i>Mesobuthus caucasicus</i> , <i>Androctonus crassicauda</i> (Scorpiones, Buthidae).....	91
Lyuto A. A., Shishikin A. S. Morphostructure of the field mouse thyroid gland in normal state in the conditions of forest-steppe near Krasnoyarsk.....	106
Abdurashytova E. R., Melnichuk T. N., Abdurashytov S. F. Evaluation of the biological activity of the rhizosphere <i>Sorghum bicolor</i> under the influence of microbial preparations using no-till technology in the Crimean Steppe.....	116