

ISSN 1994-5655

9 (75) • 2024

ИЗВЕСТИЯ

КОМИ НАУЧНОГО ЦЕНТРА
УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

www.izvestia.komisc.ru

Серия
«Эспериментальная биология
и экология»



Научный журнал

Основан в 2010 г.

Выходит девять раз в год.

В 2024 г. вышел дополнительный
специальный выпуск № 8 (74).

Учредитель

Федеральное государственное бюджетное

учреждение науки

Федеральный исследовательский центр

«Коми научный центр Уральского отделения

Российской академии наук»

ИЗВЕСТИЯ

КОМИ НАУЧНОГО ЦЕНТРА
УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

№ 9 (75)

Серия «ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ БИОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ»

2024

Главный редактор – акад. РАН А. М. Асхабов

Зам. главного редактора – чл.-корр. РАН С. В. Дёгтева

Зам. главного редактора – чл.-корр. РАН В. Н. Лаженцев

Ответственный секретарь – к.и.н. Д. В. Милохин

Редакционный совет:

акад. РАН В. В. Алексеев, акад. РАН А. А. Барях, акад. РАН В. И. Бердышев, д.м.н. Е. Р. Бойко,
чл.-корр. РАН И. Н. Болотов, акад. РАН В. Н. Большаков, Ph.D. (Econ.) К. Борисова-Маринова (Болгария),
д.ф.-м.н. Т. М. Бречко (Польша), к.г.-м.н. И. Н. Бурцев, акад. РАН А. Д. Гвишиани, д.ф.-м.н. Н. А. Громов,
д.и.н. И. Л. Жеребцов, д.б.н. В. Г. Зайнуллин, чл.-корр. РАН В. А. Ильин, акад. РАН С. В. Кривовичев,
И. В. Курляк, акад. РАН А. В. Кучин, чл.-корр. РАН Ю. Б. Марин, акад. РАН В. П. Матвеевко,
д.и.н. В. И. Меньковский (Беларусь), акад. РАН Г. А. Месяц, чл.-корр. РАН А. А. Москалёв,
д.э.н. Л. А. Попова, д.г.-м.н. А. М. Пыстин, чл.-корр. РАН И. М. Рощевская, акад. РАН М. П. Рощевский,
д.х.н. С. А. Рубцова, д.и.н. Э. А. Савельева, д.и.н. Т. С. Садыков (Казахстан), чл.-корр. РАН А. Ф. Титов,
д.б.н. С. Н. Харин, к.б.н. И. Ф. Чадин, акад. РАН В. Н. Чарушин, д.т.н. Ю. Я. Чукреев,
д.б.н. Е. В. Шамрикова, акад. РАН В. С. Шацкий, д.э.н. А. Г. Шеломенцев, к.э.н. А. А. Юдин

Редакционная коллегия серии «Экспериментальная биология и экология»:

чл.-корр. РАН А. А. Москалёв (ответственный редактор серии),
к.б.н. Е. А. Юшкова (ответственный секретарь серии),
вед. инж. Л. Я. Огородная (технический секретарь серии),
чл.-корр. РАН И. Н. Болотов, д.б.н. М. Ф. Борисенков, д.б.н. С. А. Гераскин,
д.м.н. А. Н. Гребенюк, д.б.н. А. В. Грибанов, д.б.н. Т. К. Головкин, д.б.н. О. В. Ермакова,
д.б.н. В. Г. Зайнуллин, д.б.н. Н. Г. Колосова, д.б.н. А. Г. Кудяшева, д.б.н. Ф. В. Минибаева,
д.б.н. Л. В. Морозова, д.б.н. А. Н. Осипов, д.б.н. Е. Г. Пасюкова, д.б.н. В. Н. Позолотина,
д.б.н. В. Н. Попов, д.б.н. С. В. Попов, д.б.н. Е. А. Пряхин, д.б.н. А. В. Рубанович,
д.б.н. Л. В. Соколова, д.т.н. Д. А. Субетто, д.б.н. Р. Г. Фархутдинов,
д.б.н. Б. Ю. Филиппов, д.б.н. Е. К. Хлесткина, д.б.н. Л. С. Щеголева

Адрес редакции:

167982, ГСП-2, Республика Коми, г. Сыктывкар,
ул. Коммунистическая, д. 24
ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, каб. 317, 318.
Тел. (8212) 24-47-79
E-mail: journal@frc.komisc.ru
www.izvestia.komisc.ru

ISSN 1994-5655

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору
за соблюдением законодательства в сфере массовых
коммуникаций и охране культурного наследия.

Свид. о регистрации средств массовой информации
ПИ № ФС 77- 26969 от 11 января 2007 г.

Подписной индекс в каталоге «Почта России» 52047

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий ВАК

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«Коми научный центр Уральского отделения
Российской академии наук», 2024

Science Journal

Founded in 2010

Published 9 times a year

In 2024 the additional special issue № 8 (74) was published.

Established by

Federal State Budgetary

Institution of Science

Federal Research Centre

«Komi Science Centre, Ural Branch,

Russian Academy of Sciences»

PROCEEDINGS

OF THE KOMI SCIENCE CENTRE
URAL BRANCH
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

№ 9 (75)

«EXPERIMENTAL BIOLOGY AND ECOLOGY» series

2024

Editor-in-chief – RAS acad. A. M. Askhabov

Deputy editor-in-chief – RAS corresp. member S. V. Degteva

Deputy editor-in-chief – RAS corresp. member V. N. Lazhentsev

Executive secretary – Cand. Sci. (Hist.) D. V. Milokhin

Editorial Council:

RAS acad. V. V. Alekseev, RAS acad. A. A. Baryakh, RAS acad. V. I. Berdyshev, Dr. Sci. (Med.) E. R. Bojko,
RAS corresp. member I. N. Bolotov, RAS acad. V. N. Bolshakov, PhD. (Econ.) K. Borisova-Marinova (Bulgaria),
Dr. Sci. (Phys.-Math.) T. M. Brechko (Poland), Cand. Sci. (Geol.-Mineral.) I. N. Burtsev, RAS acad. A. D. Gvishiani,
Dr. Sci. (Phys.-Math.) N. A. Gromov, Dr. Sci. (Hist.) I. L. Zhrebtsov, Dr. Sci. (Biol.) V. G. Zainullin,
RAS corresp. member V. A. Ilyin, RAS acad. S. V. Krivovichev, I. V. Kurlyak, RAS acad. A. V. Kuchin,
RAS corresp. member Yu. B. Marin, RAS acad. V. P. Matveenko, Dr. Sci. (Hist.) V. I. Men'kovsky (Belarus),
RAS acad. G. A. Mesyats, RAS corresp. member A. A. Moskalev, Dr. Sci. (Econ.) L. A. Popova,
Dr. Sci. (Geol.-Mineral.) A. M. Pystin, RAS corresp. member I. M. Roshchevskaya,
RAS acad. M. P. Roshchevsky, Dr. Sci. (Chem.) S. A. Rubtsova,
Dr. Sci. (Hist.) E. A. Savelyeva, Dr. Sci. (Hist.) T. S. Sadykov (Kazakhstan), RAS corresp. member A. F. Titov,
Dr. Sci. (Biol.) S. N. Kharin, Cand. Sci. (Biol.) I. F. Chadin, RAS acad. V. N. Charushin,
Dr. Sci. (Tech.) Yu. Ya. Chukreev, Dr. Sci. (Biol.) E. V. Shamrikova, RAS acad. V. S. Shatsky,
Dr. Sci. (Econ.) A. G. Shelomentsev, Cand. Sci. (Econ.) A. A. Yudin

Editorial Board of the series «Experimental Biology and Ecology»:

RAS corresp. member A. A. Moskalev (Executive editor),
Cand. Sci. (Biol.) E. A. Yushkova (Executive secretary),
Leading engineer L. Ya. Ogrodovaya (Technical secretary of the series),
RAS corresp. member I. N. Bolotov, Dr. Sci. (Biol.) M. F. Borisenkov,
Dr. Sci. (Biol.) S. A. Geraskin, Dr. Sci. (Med.) A. N. Grebenyuk,
Dr. Sci. (Biol.) A. V. Gribanov, Dr. Sci. (Biol.) T. K. Golovko, Dr. Sci. (Biol.) O. V. Ermakova,
Dr. Sci. (Biol.) V. G. Zainullin, Dr. Sci. (Biol.) N. G. Kolosova, Dr. Sci. (Biol.) A. G. Kudyasheva,
Dr. Sci. (Biol.) F. V. Minibaeva, Dr. Sci. (Biol.) L. V. Morozova, Dr. Sci. (Biol.) A. N. Osipov,
Dr. Sci. (Biol.) E. G. Pasyukova, Dr. Sci. (Biol.) V. N. Pozolotina, Dr. Sci. (Biol.) V. N. Popov,
Dr. Sci. (Biol.) S. V. Popov, Dr. Sci. (Biol.) E. A. Pryakhin, Dr. Sci. (Biol.) A. V. Rubanovich,
Dr. Sci. (Biol.) L. V. Sokolova, Dr. Sci. (Tech.) D. A. Subetto, Dr. Sci. (Biol.) R. G. Farkhutdinov,
Dr. Sci. (Biol.) B. Yu. Filippov, Dr. Sci. (Biol.) E. K. Khlestkina, Dr. Sci. (Biol.) L. S. Shchegoleva

Editorial Office:

Office 317, 318 Komi Science Centre, Ural Branch, RAS
24, Kommunisticheskaya st., GSP-2,
Syktyvkar 167982, Komi Republic
Tel. +7 8212 244779
E-mail: journal@frc.komisc.ru
www.izvestia.komisc.ru

The "Russian Post" catalogue subscription index 52047

*The journal is included in the list of peer-reviewed scientific
publications of the Higher Attestation Commission
of the Russian Federation*

ISSN 1994-5655

Registered by the Russian Federal Surveillance Service
for Compliance with the Law in Mass Communications
and Cultural Heritage Protection.

The certificate of mass media registration -
ПН № ФС 77-26969 dated 11 January, 2007

© Federal State Budgetary Institution of Science
Federal Research Centre "Komi Science Centre, Ural Branch,
Russian Academy of Sciences", 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Т. К. Головкин, М. А. Шелякин Эколого-физиологические исследования фотосинтеза и сопряженных процессов в лишайниках (обзор).....	5
Ф. В. Минибаева, Р. П. Бекетт Роль светозащитных пигментов в стрессовой устойчивости лишайников.....	13
А. Ф. Хайруллина, В. Р. Хабибрахманова, Д. Ф. Рахматуллина, Е. И. Галеева, О. П. Гурьянов, Р. П. Бекетт, Ф. В. Минибаева, Ю. Н. Валитова Изменение фотосинтетической активности и содержания хлорофиллов и каротиноидов в лишайниках <i>Peltigera canina</i> и <i>Peltigera aphthosa</i> при действии повышенной температуры	18
Е. Э. Мучник Созологический анализ как возможный инструмент ведения лишайниковых разделов Красных книг....	30
И. А. Лиханова, Т. Н. Пыстина, Г. В. Железнова, С. В. Денева Лишайники на карьерах южной тундры Северо-Востока европейской части России.....	39
Т. Н. Пыстина, Н. А. Семёнова, Т. А. Парина, О. Д. Леонова Материалы к изучению лишайников природного рекреационного комплекса «Сосновый бор острова Ягры» (Архангельская область)	51
Н. А. Уланов Вторичные древостои в условиях выработанных торфяников Северо-Востока европейской части России.....	61
А. В. Гогонин, Т. Н. Щемелинина, Е. М. Анчугова Потенциал применения микроводорослей.....	67
В. В. Мартынов, Т. Н. Щемелинина, Е. М. Анчугова Валоризация лигноцеллюлозного отхода – кофейной шелухи	75
Д. В. Тарабукин Биоконверсия целлюлозосодержащих фракций упаковочных материалов в простые сахара.....	80
Н. В. Земская, Е. Ю. Платонова, Н. Р. Пакшина, М. В. Шапошников, А. А. Москалёв Экстракт плодов черноплодной рябины (<i>Sorbaronia mitschurini</i>) влияет на выживаемость <i>Drosophila melanogaster</i> с моделью бокового амиотрофического склероза в зависимости от концентрации.....	84
Е. Ю. Платонова, Д. А. Голубев, С. А. Патов, П. С. Некрасова, М. В. Шапошников, А. А. Москалёв Исследование влияния природного антоциана дельфинидина на продолжительность жизни <i>Drosophila melanogaster</i>	92
О. Ю. Минеев, С. К. Кочанов Миграции морянки на европейском Северо-Востоке России	98
Ш. И. Ходжаев, С. Ш. Ходжаев, С. Султонов Влияние минеральных и органических удобрений на снижение токсичности солей и урожайность хлопчатника в условиях засоленных почв южного Таджикистана.....	106
События	
Международная научная конференция «Лишайники: от молекул до экосистем» (Сыктывкар, 1–5 июля 2024 г.).....	113
Юбилей	
Аркадий Леонидович Максимов	116
Юрий Григорьевич Солонин	118

CONTENTS

T. K. Golovko, M. A. Shelyakin Ecological and physiological studies of photosynthesis and associated processes in lichens (review)	5
F. V. Minibayeva, R. P. Beckett The role of light-protective pigments in stress tolerance of lichens.....	13
A. F. Khajrullina, V. R. Khabibrakhmanova, D. F. Rakhmatullina, E. I. Galeeva, O. P. Guryanov, R. P. Beckett, F. V. Minibayeva, J. N. Valitova Changes in the photosynthetic activity and content of chlorophylls and carotenoids in the <i>Peltigera canina</i> and <i>Peltigera aphthosa</i> lichens under the action of elevated temperature.....	18
E. E. Muchnik The sozological analysis as a possible tool for compiling lichenological parts of Red Data Books	30
I. A. Likhanova, T. N. Pystina, G. V. Zheleznova, S. V. Deneva Lichens in quarries of the south tundra subzone of the European North-East of Russia.....	39
T. N. Pystina, N. A. Semenova, T. A. Parinova, O. D. Leonova Materials for the study of lichens of the natural recreational complex "Pine Forest of the Yagry Island" (Arkhangelsk Region)	51
N. A. Ulanov Secondary forest stands on depleted peatlands in the European North-East of Russia.....	61
A. V. Gogonin, T. N. Shchemelinina, E. M. Anchugova Potential applications of microalgae.....	67
V. V. Martynov, T. N. Shchemelinina, E. M. Anchugova Valorization of coffee silverskin lignocellulosic waste.....	75
D. V. Tarabukin Bioconversion of cellulose-containing fractions of packaging materials into simple sugars	80
N. V. Zemskaya, E. Yu. Platonova, N. R. Pakshina, M.V. Shaposhnikov, A.A. Moskalev Black chokeberry (<i>Sorbaronia mitschurinii</i>) fruit extract affects the survival of <i>Drosophila melanogaster</i> with the model of amyotrophic lateral sclerosis depending on the concentration.....	84
E. Yu. Platonova, D. A. Golubev, S. A. Patov, P. S. Nekrasova, M. V. Shaposhnikov, A. A. Moskalev About the influence of the natural anthocyanin delphinidin on the lifespan of <i>Drosophila melanogaster</i>	92
O. Yu. Mineev, S. K. Kochanov Migrations of the Long-tailed Duck in the European North-East of Russia.....	98
Sh. I. Khodzhaev, S. Sh. Khodzhaev, S. Sultonov The influence of mineral and organic fertilizers on reducing the toxicity of salts and cotton yield in saline soils of Southern Tajikistan.....	106
Events	
International Scientific Conference "Lichens: From Molecules to Ecosystems" (Syktyvkar, July 1-5, 2024)	113
Anniversaries	
Arkady Leonidovich Maximov.....	116
Yury Grigoryevich Solonin	118

Эколого-физиологические исследования фотосинтеза и сопряженных процессов в лишайниках (обзор)¹

Т. К. Головкин, М. А. Шелякин

Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
г. Сыктывкар
golovko@ib.komisc.ru

Аннотация

Лишайники – древнейшие симбиотические организмы. Их талломы представляют собой структуру, созданную микобиотом для популяции клеток фотобионта, присутствие которой превращает грибной гетеротрофный организм в автотрофную ассоциацию. В статье обобщены результаты эколого-физиологических исследований лишайников таежной зоны европейского Северо-Востока России. Представлены и проанализированы данные о фотосинтетической активности, влиянии факторов внешней среды на поглощение CO₂ и реакциях, направленных на тонкую настройку функциональной структуры и метаболизма лишайников к условиям обитания. Продемонстрирована значимость типа фотобионта для функционирования всей ассоциации. Показано, что цианобионтные лишайники отличались более высоким содержанием азота и интенсивным метаболизмом по сравнению с хлоролишайниками. У большинства исследованных видов лишайников содержание хлорофилла *a* варьировало в пределах 0,4–0,8 мг/г сухой массы таллома, концентрация каротиноидов была в 2,5–3 раза меньше. Максимум нетто-поглощения CO₂ наблюдался при температуре +15...+20 °C и относительном содержании воды в талломах около 60 %. Насыщение фотосинтеза светом отмечали при плотности потока ФАР в четыре-пять раз меньше полной солнечной. Выявлены эффекты воздействия на талломы УФ-радиации и загрязнения среды бокситовой пылью. Намечены перспективные направления дальнейших исследований лишайнобиоты.

Ключевые слова:

лишайники, биология, физиология, фотосинтез, таежная зона, европейский Северо-Восток России

Введение

Лишайники – древнейшие организмы, они известны с докембрийских времен. Более 200 млн лет назад талломы лишайников уже представляли собой высокоразвитые

¹ По материалам пленарного доклада на Международной конференции «Лишайники: от молекул до экосистем» (Сыктывкар, 1–5 июля, 2024).

¹ Based on the plenary report at the International Conference "Lichens: from Molecules to Ecosystems" (Syktvykar, July 1–5, 2024).

Ecological and physiological studies of photosynthesis and associated processes in lichens (review)¹

T. K. Golovko, M. A. Shelyakin

Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Syktvykar
golovko@ib.komisc.ru

Abstract

Lichens are the oldest symbiotic organisms. Their thallus represents a structure created by a mycobiont for a population of photobiont cells, the presence of which transforms a fungal heterotrophic organism into an autotrophic association. The review article summarizes the results of ecological and physiological studies of lichens in the taiga zone on the European North-East of Russia. The data on the photosynthetic activity, the effects of environmental factors on the thallus photosynthesis, and the reactions aimed at fine-tuning the functional structure and metabolism of lichens to habitat conditions are presented and analyzed. The importance of the photobiont type for the functioning of the entire lichen association is demonstrated. Cyanobiont lichens were found to be characterized by a higher nitrogen content and intensive metabolism, compared with chlorobionts. In most of the studied lichen species, the content of chlorophyll *a* varied within 0.4–0.8 mg/g of the dry mass of thallus, and the concentration of carotenoids was by 2.5–3 times as less. The maximum net uptake of CO₂ in lichens was observed at a temperature of 15–20 °C and a relative water content of about 60 %. The saturation of photosynthesis with light was noted at a photosynthetic photon flux density being by four-five times less than that of the total solar radiation. The effects of exposure of thalli to UV radiation and environmental pollution with bauxite dust have been revealed. Promising directions for further research are outlined.

Keywords:

lichens, biology, physiology, photosynthesis, taiga zone, European North-East of Russia

листоватые и кустистые формы [1]. Известный русский ботаник, один из основоположников отечественной физиологии растений А. С. Фаминцын видел в лишайниках пример происхождения более сложной растительной формы через соединение и взаимодействие более простых [2]. Он фактически положил начало физиологическим исследо-

ваниям этих уникальных фототрофных организмов и получил ценный материал для понимания их биологии.

Согласно современным представлениям, лишайники – устойчивый симбиоз генетически обособленных организмов. Их талломы представляют собой структуру, созданную микобионтом для популяции клеток фотобионта. Присутствие фотобионта превращает грибной гетеротрофный организм в автотрофную ассоциацию. Наиболее распространенными группами лишайниковых фотобионтов являются зеленые водоросли и цианопрокариоты, способные к осуществлению кислородного фотосинтеза [3].

Зеленые водоросли поставляют клеткам микобионта сахароспирты, тогда как цианобактерии – глюкозу и продукты биологической азотфиксации [4, 5]. Благодаря этому талломы цианолишайников содержат больше азота по сравнению с талломами хлоролишайников. По нашим данным [6], концентрация азота в сухой массе талломов цианолишайников составляла в среднем 3,5 %, тогда как у хлоролишайников была в четыре раза меньше. У лишайников с обоими типами фотобионта зеленые водоросли, как правило, осуществляют фотосинтез, а цианобактерии – азотфиксацию. Содержание азота в лишайниках с зеленой водорослью и цианопрокариотами составляет в среднем около 2,3 %. Так, например, у трехкомпонентного лишайника *Lobaria pulmonaria* на долю сахароспиртов приходилось 75 % пула сахаров, а содержание азота было немногим выше 2 % сухой массы таллома [7]. Лишайники с высоким содержанием азота характеризовались повышенным накоплением белковых и свободных аминокислот [8], что коррелировало с их более высокой метаболической активностью и способностью к быстрому росту. Микобионт может регулировать численность популяции клеток фотобионта, стимулировать синтез и выделение продуктов ассимиляции. Однако механизмы такой регуляции доподлинно неизвестны. По некоторым оценкам, микобионт получает 40–50 % всего ассимилированного клетками фотобионта углерода, значительная часть которого используется грибным компонентом для дыхания и синтеза лишайниковых веществ. Лишайниковые вещества концентрируются на поверхности гиф микобионта и могут составлять от 1 до 5 % сухой массы таллома [9].

Фотосинтетический аппарат (далее – ФСА) зеленых водорослей практически идентичен таковому высших растений [10]. Процесс фотосинтеза протекает с участием трех основных компонентов: светособирающей антенны (далее – ССК), фотохимических реакционных центров (далее – РЦ) и электрон-транспортной цепи (далее – ЭТЦ). Фотосинтетическими пигментами водоросли являются хлорофиллы *a* (Хл *a*) и *b* (Хл *b*). Практически весь Хл *b* находится в наружных антеннах фотосистемы II, тогда как большая часть Хл *a* принадлежит РЦ. У цианобактерий функцию Хл *b* в антенных структурах (фикобилисомах) выполняют билиновые пигменты, имеющие, в отличие от циклической структуры Хл, незамкнутую цепь тетрапирролов. Каротиноиды присутствуют у всех фотосинтезирующих организмов.

Диапазон концентраций Хл *a* в талломах исследованных нами двух десятков видов лишайников находился

в пределах от 0,16 до 1,3 мг/г сухой массы [11]. Виды с низким и высоким содержанием хлорофилла были обнаружены как среди хлоро-, так и среди цианолишайников. У большинства лишайников количество Хл *a* составляло 0,4–0,8 мг/г при медианном значении около 0,60 мг/г. Концентрация каротиноидов была в 2,5–3 раза меньше, чем зеленых пигментов. При этом талломы с высоким содержанием хлорофиллов накапливали больше каротиноидов. Между накоплением зеленых и желтых пигментов существует прямая связь ($r=0,96$). Так как подавляющая часть (85–90 %) биомассы талломов представлена гетеротрофными клетками микобионта, то по содержанию фотосинтетических пигментов лишайники сильно уступают листьям высших растений. Например, у лишайника *L. pulmonaria* четко очерченный альгальный слой составлял ~17 % (46 ± 6 мкм) толщины таллома, клетки зеленой водоросли имели в диаметре $4,5 \pm 0,7$ мкм [7].

Лишайники принято относить к фототрофным организмам со сравнительно низкой фотосинтетической активностью. У гидратированных и адаптированных в оптимальных условиях исследованных нами видов лишайников скорость видимого поглощения CO_2 (Фн) варьировала в широких пределах – от 0,5 до 5 мг/г сухой массы ч. При этом лишайники с высоким содержанием азота характеризовались более интенсивным фотосинтезом.

Анализ с использованием метода главных компонент показал, что функциональные параметры исследованных нами 16 видов лишайников группируются относительно двух компонент, которые суммарно описывают 76 % их изменчивости (рис. 1). Результаты анализа свидетельствуют о тесной взаимосвязи между интенсивностью нетто-фотосинтеза, содержанием азота и типом фотобионта (главная компонента 1). Взаимосвязь между содержанием зеленых и желтых пигментов определялась принад-

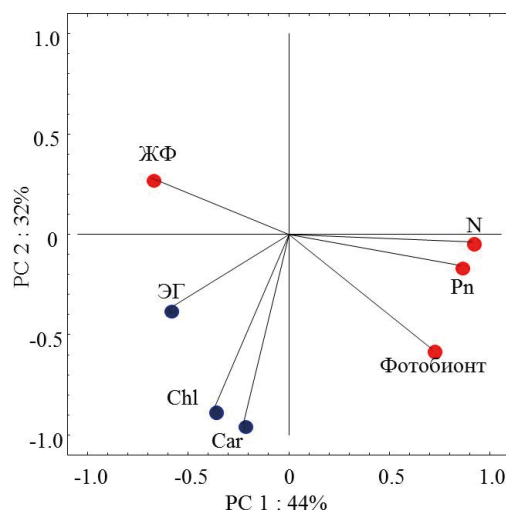


Рисунок 1. Анализ функциональных параметров 16 видов лишайников с использованием метода главных компонент.

Условные обозначения. Pn – нетто-поглощение CO_2 ; N – азот; Chl – хлорофилл; Car – каротиноиды; ЖФ – жизненная форма; ЭГ – экологическая группа; PC1 – главная компонента 1 (●); PC2 – главная компонента 2 (●).
Figure 1. The analysis of functional parameters for 16 lichen species using the method of principal components.

Keys: Pn – CO_2 net uptake; N – nitrogen; Chl – chlorophyll; Car – carotenoids; ЖФ – life form; ЭГ – ecological group; PC1 – principal component 1 (●); PC2 – principal component 2 (●).

лежностью лишайников к экологической группе по типу субстрата (главная компонента 2). Кластерный анализ функциональных параметров (переменных), вносящих основной вклад в главные компоненты, разделил изученные виды на две группы (рис. 2). В первую вошли все цианобактерные виды (1), а вторая группа разделилась еще на два кластера: хлоролишайники (2) и лишайники с двумя типами фотобионтов (3). Эти результаты свидетельствуют об определяющей значимости типа фотобионта для функционирования всей лишайниковой ассоциации.

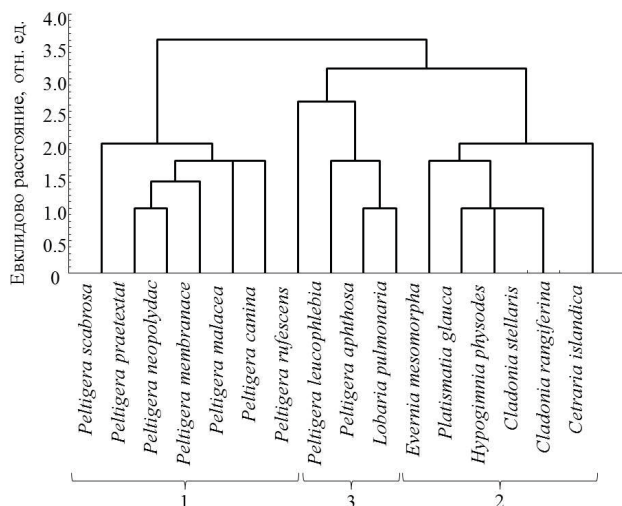


Рисунок 2. Кластерное распределение изученных видов лишайников на основе значений функциональных параметров, вносящих основной вклад в дисперсию при анализе главных компонент (см. рис. 1). Изученные виды подразделились на две группы: первая объединила все цианобактерные виды (1), вторая группа разделилась еще на два кластера: хлоролишайники (2) и лишайники с обоими типами фотобионтов (3).
Figure 2. Cluster distribution of the study lichen species by the values of functional parameters that mainly contribute to dispersion during the principal component analysis (see Figure 1). The study species divided into two groups. The first group unified all cyanobionts (1), the second group subdivided into the further two clusters: chlorolichens (2) and lichens with both types of photobionts (3).

Лишайники являются пойкилогидрическими организмами и устойчивы к действию неблагоприятных факторов [12, 13]. Они доминируют в крайних местообитаниях (Арктика, Антарктида, пустыни, высокогорья), но наиболее благоприятными для обитания лишайников являются леса, о чем свидетельствует высокое биологическое разнообразие лишайников в бореальной зоне [14].

Результаты наших исследований зависимости нетто-поглощения CO_2 от температуры, освещенности и содержания воды в талломах согласуются с отмеченными ранее другими авторами фактами повышения метаболической активности и роста бореальных видов лишайников в весенний и осенний периоды с умеренно теплой и влажной погодой. Летом при высокой температуре и низкой влажности среды талломы быстро теряют влагу и в дневные часы у них часто наблюдается выделение CO_2 , что обусловлено преобладанием дыхания микобионта над ассимиляционной активностью клеток фотобионта. Максимальные величины нетто-поглощения CO_2 были зарегистрированы нами при температуре талломов $+15...+20^\circ\text{C}$, относительном содержании в них воды около 60 % и плот-

ности потока ФАР почти на порядок ниже полной солнечной [15, 16].

Прямой солнечный свет с высокой долей УФ-излучения, особенно в сочетании с повышенной температурой, неблагоприятен для жизнедеятельности лишайников. Для защиты от избыточной радиации лишайники используют целый ряд механизмов, включая синтез защитных пигментов [17–19]. Нами проведено сравнительное изучение влияния УФ-В облучения на про-/антиоксидантный метаболизм трехкомпонентного лишайника *Peltigera aphthosa* и цианолишайника *P. rufescens* [20]. *P. rufescens* – полизональный вид с более широким географическим распространением, чем *P. aphthosa*, являющаяся циркумполярным видом. Талломы *P. rufescens* были отобраны на лугу, где они подвергались действию высокой инсоляции и температуры. В природных местообитаниях талломы *P. rufescens* получали на порядок более высокие дозы УФ-радиации, чем *P. aphthosa*, обитающая в затененных и влажных участках леса. Ежедневное в течение 10 дней облучение лишайников биологически эффективной дозой УФ-В радиации (14 кДж) приводило к накоплению в талломах продуктов перекисного окисления липидов, что является одним из показателей нарушения про-/антиоксидантного баланса клеток и развития окислительного стресса. Следует отметить, что, по сравнению с *P. aphthosa*, талломы *P. rufescens* изначально отличались более высоким содержанием продуктов липопероксидации и накапливали гораздо меньшее их количество с увеличением суммарной дозы УФ-В радиации. Это свидетельствует о более высокой способности *P. rufescens* поддерживать окислительно-восстановительный баланс, что, вероятно, обусловлено адаптацией к более жестким световым температурным условиям обитания. Облучение *P. rufescens* вызывало дозозависимое усиление активности супероксиддисмутазы (далее – СОД), фермента, катализирующего реакцию дисмутации агрессивного супероксидного анион-радикала до молекулярного кислорода и стабильного пероксида водорода. Талломы *P. aphthosa* в контроле и опыте проявляли низкую активность СОД.

У обоих видов лишайников отмечали дозозависимое увеличение активности и повышение доли дыхания по энергетически малоэффективному альтернативному пути (далее – АП). Цитохромное дыхание, функционирование которого сопряжено с образованием энергии, снижалось. При этом эффект УФ-В на дыхание был более выражен у *P. aphthosa*, в талломах которой под влиянием облучения интенсивно накапливались продукты перекисного окисления липидов и не происходило усиления активности СОД. На возможное участие АП дыхания в адаптации лишайников к действию стресса указывали и некоторые другие исследователи [21]. По нашему мнению, вовлечение АП под действием УФ-В радиации может быть обусловлено его функцией в качестве компонента антиоксидантной системы, предотвращающего перевосстановление дыхательной электрон-транспортной цепи и, следовательно, генерацию избыточного количества активных форм кислорода. С другой стороны вовлечение АП может способствовать поддержанию активности цикла ди- и трикар-

боновых кислот как источника образования множества метаболитов, участвующих в различных биосинтезах, связанных с процессами репарации, и защитных экранирующих веществ. Поскольку подавляющая часть массы таллома лишайников приходится на грибной компонент, то изменения в соотношении дыхательных путей под влиянием УФ-В мы связываем с реакцией микобионта. Исследования, выполненные на клетках зеленой водоросли, изолированных после облучения талломов *P. aphthosa*, подтвердили это предположение [22]. Полученные данные прямо указывают на участие антиоксидантной системы и дыхания в формировании устойчивости лишайников к УФ-В излучению и, следовательно, сохранении способности к фотосинтезу.

На примере модельного вида *L. pulmonaria* нами установлены закономерности изменения функциональных параметров ФСА фотобионта и адаптивные реакции энерго-пластического метаболизма лишайника в годичном цикле [23]. Показано, что отобранные в зимний период (январь) образцы проявляли фотохимическую активность и способность ассимилировать CO_2 после кратковременной гидратации и акклимации в комнатных условиях. Уже в первые минуты потенциальный квантовый выход фотосистемы II (F_v/F_m) превышал 0,5 отн. ед., а спустя 1 ч достигал 0,7 отн. ед., что близко к максимальным значениям F_v/F_m , зарегистрированным у хлоробионтных лишайников [24]. Скорость нетто-поглощения CO_2 восстанавливалась медленнее, и только спустя 20 ч с начала акклимации достигала величин, свойственных гидратированным талломам в оптимальных свето-температурных условиях. Полученные результаты свидетельствуют о высокой сохранности ФСА в зимний период и способности к быстрому восстановлению фотосинтеза с наступлением благоприятных условий среды.

Лишайники являются наиболее распространенными объектами биоиндикации [25]. При лишайноиндикации чаще всего оценивают видовое разнообразие, обилие и жизненное состояние лишайников. Снижение численности, встречаемости, репродуктивности, появление некрозов и хлорозов и, наконец, исчезновение лишайников – результат крайнего загрязнения среды. Применение эколого-физиологических методов и подходов позволяет уловить первые признаки нарушения процессов жизнедеятельности еще до появления видимых повреждений талломов. На примере лишайников, обитающих в зоне бокситового рудника, было показано, что содержание в их талломах железа и алюминия превышало фоновые значения в десятки раз. При этом подавляющая часть поллютантов была локализована на поверхности верхнего корового слоя талломов в виде слабозакрепленных твердых пылевых частиц. Относительно небольшая часть проникала в таллом и была ассоциирована с гифами медуллярного слоя микобионта [26]. Оседание твердых частиц бокситовой пыли на поверхности талломов приводило к снижению скорости ассимиляции CO_2 , что, по всей видимости, обусловлено физическим затенением, нежели прямым негативным влиянием поллютантов на клетки фотобионта. Это подтверждается отсутствием

влияния загрязнения на содержание фотосинтетических пигментов и функциональные параметры ФС II. При этом у лишайников в импактной зоне отмечали усиление вовлечения энергетически малоэффективного альтернативного дыхания, накопление продуктов липопероксидации, увеличение содержания пероксида водорода и повышение уровня активности ферментов, участвующих в нейтрализации активных форм кислорода [27, 28]. Такие симптомы можно рассматривать как предупредительный сигнал о негативных изменениях в окружающей среде для лишайнобиоты как важного компонента лесных экосистем. Следовательно, функциональные показатели могут служить чувствительным индикатором стресса и нарушения процессов жизнедеятельности лишайников в условиях антропогенного загрязнения среды задолго до появления видимых повреждений талломов.

Заключение

Полученные нами результаты существенно дополняют информацию об эколого-биологических свойствах и современном состоянии лишайнобиоты таежной зоны, углубляют представления о защитных реакциях лишайников и влиянии факторов среды на функциональную активность компонентов лишайникового симбиоза, свидетельствуют о значимости типа фотобионта для всей ассоциации.

К настоящему времени нашими исследованиями было охвачено немногим более 20 видов лишайников, преимущественно листоватой жизненной формы. Учитывая богатый видовой состав лишайнобиоты, ее роль в растительных сообществах и экосистемах таежной зоны, представляется целесообразным продолжить исследования лишайников, сочетая классические эколого-физиологические методы и подходы с молекулярными. Актуальными, на наш взгляд, являются следующие направления: 1) сравнительное изучение фотосинтеза и сопряженных процессов у лишайников с разным типом фотобионтов; 2) выявление физиологических и молекулярных механизмов адаптации симбионтов и оценка их вклада в формирование устойчивости лишайников; 3) изучение систем сигналинга и взаимодействия между компонентами лишайникового симбиоза; 4) характеристика метаболома и изучение вторичного метаболизма лишайников, выявление роли лишайниковых веществ в поддержании устойчивости симбиоза.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источники и литература

1. Флора лишайников России: биология, экология, разнообразие, распространение и методы изучения лишайников / под ред.: М. П. Андреева и Д. Е. Гимельбрант. – Москва ; Санкт-Петербург : Товарищество научных изданий КМК, 2014. – 392 с.
2. Манойленко, К. В. Академик А. С. Фаминцын: от фундаментальной науки к запросам сельского хозяйства / К. В. Манойленко // Сельскохозяйственная биология. – 2010. – Т. 45, № 1. – С. 117–121.

3. Войцехович, А. А. Фотобионты лишайников. I: Разнообразие, экологические особенности, взаимоотношения и пути совместной эволюции с микобионтом / А. А. Войцехович, Т. И. Михайлюк, Т. М. Дариенко // Альгология. – 2011. – Т. 21. – С. 3–26.
4. Honegger, R. Metabolic interactions at the mycobiont-photobiont interface in lichens / R. Honegger // Plant Relationships / eds. G. C. Carroll, P. Tiudzynsk. – Berlin Heidelberg : Springer, 1997. – P. 209–221.
5. Nash III, T. H. Nitrogen, its metabolism and potential contribution to ecosystems / T. H. Nash III // Lichen biology / ed. T. H. Nash III. – Cambridge Univ. Press, 2008. – P. 216–251.
6. Табаленкова, Г. Н. Элементный состав биомассы некоторых лишайников бореальной зоны на европейском Северо-Востоке / Г. Н. Табаленкова, И. В. Далькэ, Т. К. Головки // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18, № 2. – С. 221–225.
7. Функциональная экология лишайника *Lobaria pulmonaria* (L.) Hoffm. в таежной зоне на европейском северо-востоке России / Т. К. Головки, И. В. Далькэ, О. В. Дымова [и др.] // Известия Коми научного центра УрО РАН. – 2018. – № 3 (35). – С. 23–33. – DOI: 10.19110/1994-5655-2018-3-23-33
8. Табаленкова, Г. Н. Аминокислотный состав биомассы некоторых лишайников таежной зоны на европейском Северо-Востоке / Г. Н. Табаленкова, И. В. Далькэ, И. Г. Захожий // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2017. – Т. 19, № 2 (3). – С. 556–560.
9. Радлане, Т. Особенности вторичного метаболизма и хемотаксиса лишайников / Т. Радлане, А. Саар // Флора лишайников России: биология, экология, разнообразие, распространение и методы изучения лишайников. – Москва ; Санкт-Петербург : Товарищество научных изданий КМК, 2014. – С. 142–160.
10. Blankenship, R. E. Molecular mechanisms of photosynthesis / R. E. Blankenship. – Blackwell Science Ltd., 2002. – 321 p.
11. Фотосинтетические пигменты и азот в талломах лишайников бореальной флоры / Т. К. Головки, О. В. Дымова, Г. Н. Табаленкова [и др.] // Теоретическая и прикладная экология. – 2015. – № 4. – С. 74–80.
12. Oliver, M. J. Desiccation-tolerance of plant tissues: A mechanistic overview / M. J. Oliver, J. D. Bewley // Horticultural Reviews. – John Wiley & Sons, Ltd, 1996. – P. 171–213. – DOI: 10.1002/9780470650608.ch3
13. Kappen, L. Opportunistic growth and desiccation tolerance: the ecological success of poikilohydrous autotrophs / L. Kappen, F. Valladares // Handbook of Functional Plant Ecology / eds. F. Pugnaire, F. Valladares. – New York : Marcel Dekker, Inc., 1999. – P. 9–80.
14. Пыстина, Т. Н. Лишайники таежных лесов европейского Северо-Востока: подзоны южной и средней тайги / Т. Н. Пыстина. – Екатеринбург : Уральское отделение РАН, 2003. – 239 с.
15. Устойчивость лишайников бореальной зоны к воздействию природных и антропогенных факторов / Т. К. Головки, И. Г. Захожий, И. В. Далькэ [и др.] // Биологические аспекты распространения, адаптации и устойчивости растений : материалы Всероссийской научной конференции (с международным участием) (15–18 мая 2016 г., Саранск). – Саранск : Изд-во Мордовского ун-та, 2016. – С. 94–97.
16. Головки, Т. К. Эколого-биологические и функциональные свойства лишайников таежной зоны европейского северо-востока России (обзор) / Т. К. Головки, М. А. Шелякин, Т. Н. Пыстина // Теоретическая и прикладная экология. – 2020. – № 1. – С. 6–13. – DOI: 10.25750/1995-4301-2020-1-006-013
17. Photoprotection in lichens: adaptations of photobionts to high light / R. P. Beckett, F. Minibayeva, K. A. Solhaug, T. Roach // Lichenologist. – 2021. – Vol. 53. – P. 21–33. – DOI: 10.1017/S0024282920000535
18. Beckett, R. P. Adaptations of lichens to fluctuating light – gaps in forest, gaps in our knowledge / R. P. Beckett, F. V. Minibayeva // Лишайники: от молекул до экосистем: материалы докладов Международной конференции (1–5 июля 2024 г., Сыктывкар) [Электронное издание]. – Сыктывкар, 2024. – С. 9–11. – DOI: 10.5281/zenodo.13284771
19. Минибаева, Ф. В. Пигменты лишайников: «цветная» стратегия стрессовой устойчивости / Ф. В. Минибаева // Лишайники: от молекул до экосистем : материалы докладов Международной конференции (1–5 июля 2024 г., Сыктывкар) [Электронное издание]. – Сыктывкар, 2024. – С. 59–61. – DOI: 10.5281/zenodo.13284771
20. Shelyakin, M. A. The effect of UV-B radiation on the antioxidant system in the *Peltigera aphthosa* and *Peltigera rufescens* lichens / M. A. Shelyakin, E. V. Silina, T. K. Golovko // J. Sib. Fed. Univ. Biol. – 2021. – Vol. 14, N 3. – P. 328–338. – DOI: 10.17516/1997-1389-0359
21. Beckett, R. P. Stress physiology and the symbiosis / R. P. Beckett, I. Kranner, F. V. Minibayeva // Lichen biology / ed. T. H. Nash III. – Cambridge : Cambridge University Press, 2008. – P. 134–151.
22. UV-B induced changes in respiration and antioxidant enzyme activity in the foliose lichen *Peltigera aphthosa* (L.) Willd. / M. Shelyakin, R. Malyshev, E. Silina [et al.] // Acta Physiologiae Plantarum. – 2022. – Vol. 44. – P. 116. – DOI: 10.1007/s11738-022-03457-9
23. Photosynthetic and respiratory capacity of foliose lichen *Lobaria pulmonaria* throughout the annual cycle / M. A. Shelyakin, I. G. Zakhochiy, I. V. Dalke [et al.] // Russian Journal of Plant Physiology. – 2021. – Vol. 68, N 6. – P. 1048–1058. – DOI: 10.1134/S1021443721060182
24. Rasche, U. Evaluation of instant light-response curves of chlorophyll fluorescence parameters obtained with a portable chlorophyll fluorometer on site in the field / U. Rascher, M. Liebig, U. Lüttge // Plant Cell Environ. – 2000. – Vol. 23. – P. 1397. – DOI: 10.1046/j.1365-3040.2000.00650.x
25. Бязров, Л. Г. Лишайники в экологическом мониторинге / Л. Г. Бязров. – Москва : Научный мир, 2002. – 336 с.
26. Zakhochiy, I. G. Accumulation and localization of metals in lichen thallus under conditions of dust pollution during open mining of boxite deposits / I. G. Zakhochiy, M. A.

Shelyakin // Russian Journal of Ecology. – 2024. – Vol. 55, N 1. – P. 32–41. – DOI: 10.1134/S106741362401009

27. Effects of dust pollution on photosynthesis and respiration parameters of lichens in the bauxite mine area / M. A. Shelyakin, I. G. Zakhozhiy, I. V. Dalke [et al.] // Russian Journal of Plant Physiology. – 2024. – Vol. 71. – P. 116. – DOI: 10.1134/S1021443724605536
28. Реакция лишайников на загрязнение среды при добыче бокситовой руды в таежной зоне / Т. К. Головкин, М. А. Шелякин, И. Г. Захожий [и др.] // Теоретическая и прикладная экология. – 2018. – № 2. – С. 44–53. – DOI: 10.25750/1995-4301-2018-2-044/2-053/1

References

1. Flora lishaynikov Rossii : biologiya, ekologiya, raznoobrazie, rasprostraneniye i metody izucheniya lishaynikov [Lichen flora of Russia: Biology, ecology, diversity, distribution and methods of studying lichens] / eds. M. P. Andreyev and D. Ye. Gimel'brant. – Moscow ; Saint-Petersburg : Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2014. – 392 p.
2. Manoylenko, K. V. Akademik A. S. Famintsyn: ot fundamentalnoy nauki k zaprosam selskogo khozyaystva [Academician A. S. Famintsyn: from fundamental science to agricultural needs] / K. V. Manoylenko // Selskokhozyaystvennaya biologiya [Agricultural Biology]. – 2010. – Vol. 45, № 1. – P. 117–121.
3. Voytsekhovich, A. A. Fotobionty lishaynikov. I: Raznoobrazie, ekologicheskiye osobennosti, neprinyatiye i put sovmestnoy evolyutsii s mikobiontom [Lichen photobionts. I: Diversity, ecological features, relationships and ways of coevolution with the mycobiont] / A. A. Voytsekhovich, T. I. Mikhaylyuk, T. M. Dariyenko // Algologiya [Algology]. – 2011. – Vol. 21. – P. 3–26.
4. Honegger, R. Metabolic interactions at the mycobiont-photobiont interface in lichens / R. Honegger // Plant Relationships / eds. G. C. Carroll, P. Tiudzynsk. – Berlin Heidelberg : Springer, 1997. – P. 209–221.
5. Nash III, T. H. Nitrogen, its metabolism and potential contribution to ecosystems / T. H. Nash III // Lichen biology / ed. T. H. Nash III. – Cambridge Univ. Press, 2008. – P. 216–251.
6. Tabalenkova, G. N. Elementnyy sostav biomassy nekotorykh lishaynikov boreal'noy zony na Yevropeyskom Severo-Vostoke [Elemental composition of the biomass of some lichens of the boreal zone in the European North-East] / G. N. Tabalenkova, I. V. Dalke, T. K. Golovko // Proceedings of the Samara Science Centre of the Russian Academy of Sciences. – 2016. – Vol. 18, № 2. – P. 221–225.
7. Funktsionalnaya ekologiya lishaynika *Lobaria pulmonaria* (L.) Hoffm. v tayezhnoy zone na yevropeyskom severo-vostoke Rossii [Functional ecology of the lichen *Lobaria pulmonaria* (L.) Hoffm. in the taiga zone in the European North-East of Russia] / T. K. Golovko, I. V. Dalke, O. V. Dymova [et al.] // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. – 2018. – № 3 (35). – P. 23–33.
8. Tabalenkova, G. N. Aminokislотноy sostav biomassy nekotorykh lishaynikov tayezhnoy zony na Yevropeyskom Severo-Vostoke [Amino acid composition of the biomass of some lichens in the taiga zone of the European North-East] / G. N. Tabalenkova, I. V. Dalke, I. G. Zakhozhiy // Proceedings of the Samara Science Centre of the Russian Academy of Sciences. – 2017. – Vol. 19, № 2 (3). – P. 556–560.
9. Randlane, T. Osobennosti vtorichnogo metabolizma i khemosistematika lishaynikov [Features of secondary metabolism and chemosystematics of lichens] / T. Randlane, A. Saag // Flora lishaynikov Rossii: biologiya, ekologiya, raznoobrazie, rasprostraneniye i metody izucheniya lishaynikov [Lichen flora of Russia: biology, ecology, diversity, distribution and methods of studying lichens]. – Moscow ; Saint-Petersburg : Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2014. – P. 142–160.
10. Blankenship, R. E. Molecular mechanisms of photosynthesis / R. E. Blankenship. – Blackwell Science Ltd., 2002. – 321 p.
11. Golovko, T. K. Fotosinteticheskiye pigmenty i azot v talomakh lishaynikov borealnoy flory [Photosynthetic pigments and nitrogen in thalli of boreal flora lichens] / T. K. Golovko, O. V. Dymova, G. N. Tabalenkova, T. N. Pystina // Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya [Theoretical and Applied Ecology]. – 2015. – № 4. – P. 74–80.
12. Oliver, M. J. Desiccation-tolerance of plant tissues: A mechanistic overview / M. J. Oliver, J. D. Bewley // Horticultural Reviews. – John Wiley & Sons, Ltd, 1996. – P. 171–213.
13. Kappen, L. Opportunistic growth and desiccation tolerance: the ecological success of poikilohydrous autotrophs / L. Kappen, F. Valladares // Handbook of Functional Plant Ecology / eds. F. Pugnaire, F. Valladares. – New York : Marcel Dekker, Inc., 1999. – P. 9–80.
14. Pystina, T. N. Lishayniki tayozhnykh lesov Yevropeyskogo Severo-Vostoka: podzony yuzhnoy i sredney taygi [Lichens of taiga forests of the European North-East: sub-zones of the southern and middle taiga] / T. N. Pystina. – Ekaterinburg : Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2003. – 239 p.
15. Golovko, T. K. Ustoychivost lishaynikov borealnoy zony k vozdeystviyu prirodnnykh i antropogennykh faktorov [Resistance of boreal zone lichens to the impact of natural and anthropogenic factors] / T. K. Golovko, I. G. Zakhozhiy, I. V. Dalke [et al.] // Biologicheskiye aspekty rasprostraneniya, adaptatsii i ustoychivosti rasteniy [Biological aspects of distribution, adaptation and resistance of plants]: Materials of the All-Russian (with International Participation) Scientific Conference (May 15–18, 2016, Saransk). – Saransk : Izd-vo Mordovskogo un-ta, 2016. – P. 94–97.
16. Golovko, T. K. Ekologo-biologicheskiye i funktsionalnye svoystva lishaynikov tayezhnoy zony yevropeyskogo severo-vostoka Rossii (obzor) [Ecological, biological and functional properties of lichens of the taiga zone of the European North-East of Russia (review)] / T. K. Golovko, M. A. Shelyakin, T. N. Pystina // Teoreticheskaya i priklad-

- naya ekologiya [Theoretical and Applied Ecology]. – 2020. – № 1. – P. 6–13.
17. Beckett, R. P. Photoprotection in lichens: adaptations of photobionts to high light / R. P. Beckett, F. Minibaeva, K. A. Solhaug, T. Roach / *Lichenologist*. – 2021. – Vol. 53. – P. 21–33.
 18. Beckett, R. P. Adaptations of lichens to fluctuating light – gaps in forest, gaps in our knowledge / R. P. Beckett, F. V. Minibaeva // *Lishayniki: ot molekul do ekosistem* [Lichens: from molecules to ecosystems]: Proceedings of the International Conference (July 1–5, 2024, Syktyvkar) [Electronic book]. – Syktyvkar, 2024. – P. 9–11.
 19. Minibaeva, F. V. Pigmenty lishaynikov: «tsvetnaya» strategiya stressovoy ustoychivosti [Lichen pigments: a “color” strategy of stress resistance] / F. V. Minibaeva // *Lishayniki: ot molekul do ekosistem* [Lichens: from molecules to ecosystems]: Proceedings of the International Conference (July 1–5, 2024, Syktyvkar) [Electronic book]. – Syktyvkar, 2024. – P. 59–61.
 20. Shelyakin, M. A. The effect of UV-B radiation on the antioxidant system in the *Peltigera aphthosa* and *Peltigera rufescens* lichens / M. A. Shelyakin, E. V. Silina, T. K. Golovko // *J. Sib. Fed. Univ. Biol.* – 2021. – Vol. 14, № 3. – P. 328–338.
 21. Beckett, R. P. Stress physiology and the symbiosis / R. P. Beckett, I. Kranner, F. V. Minibaeva // *Lichen biology*. T. H. Nash III (ed). – Cambridge : Cambridge University Press, 2008. – P. 134–151.
 22. Shelyakin, M. UV-B induced changes in respiration and antioxidant enzyme activity in the foliose lichen *Peltigera aphthosa* (L.) Willd. / M. Shelyakin, R. Malyshev, E. Silina [et al.] // *Acta Physiologiae Plantarum*. – 2022. – Vol. 44. – P. 116.
 23. Shelyakin, M. A. Photosynthetic and respiratory capacity of foliose lichen *Lobaria pulmonaria* throughout the annual cycle / M. A. Shelyakin, I. G. Zakhozhiy, I. V. Dalke [et al.] // *Russian Journal of Plant Physiology*. – 2021. – Vol. 68, № 6. – P. 1048–1058.
 24. Rasche, U. Evaluation of instant light-response curves of chlorophyll fluorescence parameters obtained with a portable chlorophyll fluorometer on site in the field / U. Rascher, M. Liebig, U. Lüttge // *Plant Cell Environ.* – 2000. – Vol. 23. – P. 1397.
 25. Byazrov, L. G. Lishayniki v ekologicheskom monitoringe [Lichens in environmental monitoring] / L. G. Byazrov. – Moscow : Nauchnyy mir, 2002. – 336 p.
 26. Zakhozhiy, I. G. Accumulation and localization of metals in lichen thallus under conditions of dust pollution during open mining of bauxite deposits / I. G. Zakhozhiy, M. A. Shelyakin // *Russian Journal of Ecology*. – 2024. – Vol. 55, № 1. – P. 32–41.
 27. Shelyakin, M. A. Effects of dust pollution on photosynthesis and respiration parameters of lichens in the bauxite mine area / M. A. Shelyakin, I. G. Zakhozhiy, I. V. Dalke [et al.] // *Russian Journal of Plant Physiology*. – 2024. – Vol. 71. – P. 116.
 28. Golovko, T. K. Reaktsiya lishaynikov na zagryazneniye srede pri dobyche boksitovoy rudy v tayozhnoy zone [Reaction of lichens to environmental pollution during bauxite ore mining in the taiga zone] / T. K. Golovko, M. A. Shelyakin, I. G. Zakhozhiy [et al.] // *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* [Theoretical and Applied Ecology]. – 2018. – № 2. – P. 44–53.

Благодарность (госзадание):

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Фотосинтез, дыхание и биоэнергетика растений и фототрофных организмов (физиолого-биохимические, молекулярно-генетические и экологические аспекты), номер государственной регистрации 122040600021-4.

Acknowledgements (state task):

The work was performed within the frames of the state task “Photosynthesis, respiration and bioenergetics of plants and phototrophic organisms (physiological-biochemical, molecular-genetic and ecological aspects)”, state registration number 122040600021-4.

Информация об авторах:

Головко Тамара Константиновна – доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; Scopus Author ID: 7004365574; <https://orcid.org/0000-0002-7993-9541> (167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28; e-mail: golovko@ib.komisc.ru).

Шелякин Михаил Анатольевич – кандидат биологических наук, научный сотрудник Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; Scopus Author ID: 56104108400; <https://orcid.org/0000-0001-8537-6995> (167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28; e-mail: shelyakin@ib.komisc.ru).

About the authors:

Tamara K. Golovko – Professor, Doctor of Sciences (Biology), Chief Researcher, Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Science; Scopus Author ID: 7004365574, <https://orcid.org/0000-0002-7993-9541> (28 Kommunisticheskaya st., Syktyvkar, Komi Republic, Russian Federation, 167982; e-mail: golovko@ib.komisc.ru).

Mikhail A. Shelyakin – Candidate of Sciences (Biology), Researcher, Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Science; Scopus Author ID: 56104108400, <https://orcid.org/0000-0001-8537-6995> (28 Kommunisticheskaya st., Syktyvkar, Komi Republic, Russian Federation, 167982; e-mail: shelyakin@ib.komisc.ru).

Для цитирования:

Головко, Т. К. Эколого-физиологические исследования фотосинтеза и сопряженных процессов в лишайниках (обзор) / Т. К. Головко, М. А. Шелякин // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Экспериментальная биология и экология». – 2024. – № 9 (75). – С. 5–12.

For citation:

Golovko, T. K. Ekologo-fiziologicheskie issledovaniya fotosinteza i sopryazhennyh processov v lishajnikah (obzor) [Ecological and physiological studies of photosynthesis and associated processes in lichens (review)] / T. K. Golovko, M. A. Shelyakin // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series “Experimental Biology and Ecology”. – 2024. – № 9 (75). – P. 5–12.

Дата поступления статьи: 21.08.2024

Принято решение о публикации: 19.09.2024

Received: 21.08.2024

Accepted: 19.09.2024

Роль светозащитных пигментов в стрессовой устойчивости лишайников

Ф. В. Минибаева*, Р. П. Бекетт***

* Казанский институт биохимии и биофизики ФИЦ КазНЦ РАН, г. Казань

** Школа наук о жизни, Университет КваЗулу-Натал, г. Скоттсвилл, Южно-Африканская Республика
fminibayeva@gmail.com

Аннотация

Лишайники синтезируют большое количество вторичных метаболитов, в том числе «лишайниковых веществ». Наличие лишайниковых веществ позволяет лишайникам произрастать в разнообразных, зачастую стрессовых, экологических нишах. Среди вторичных метаболитов лишайников особый интерес вызывают светозащитные пигменты. Темно-коричневый пигмент меланин играет значительную роль в защите лишайников от УФ-Б стресса, однако ключевые драйверы меланизации остаются неизученными. Меланины – гидрофобные гетерогенные полимеры, образованные последовательными реакциями окисления фенольных/индольных предшественников и последующей полимеризации промежуточных фенолов и хинонов. Формирование меланинового слоя на поверхности таллома в ответ на УФ воздействие является одним из ключевых механизмов высокой устойчивости лишайников не только к световому стрессу, но и обезвоживанию. Нами показано, что связывание молекул воды с меланином зависит от активности специфических функциональных групп в структуре этого полимера, элементного состава, присутствия ассоциированных соединений, в том числе полисахаридов, и ультраструктуры меланиновых частиц. Антрахинон париедин является доминирующим кортикальным пигментом лишайников *Caloplaca* и *Xanthoria* из семейства *Teloschistaceae*. Наряду с обеспечением защиты таллома от высокой фотосинтетически активной радиации и УФ излучения, париедин обладает антиоксидантными свойствами, способствует защите лишайников от кадмиевой токсичности, обезвоживания. Париедин обеспечивает защиту талломов лишайников от абиотических стрессов благодаря поддержанию стабильности мембран, антиоксидантной защите, формированию структурного барьера и сохранению воды в кортексе талломов лишайника. Уникальные свойства пигментов лишайников делают эти естественные полимеры перспективными объектами для фундаментальных и прикладных исследований, в частности, в медицине, биотехнологии и «зеленой электронике».

Ключевые слова:

лишайники, световой стресс, светозащитные пигменты, устойчивость к обезвоживанию

The role of light-protective pigments in stress tolerance of lichens

F. V. Minibayeva*, R. P. Beckett***

* Kazan Institute of Biochemistry and Biophysics, FRC Kazan Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Kazan

** School of Life Sciences, University of KwaZulu-Natal, Scottsville, Republic of South Africa
fminibayeva@gmail.com

Abstract

Lichens synthesize a large number of secondary metabolites, including “lichen substances”. The presence of lichen substances allows lichens to grow in diverse, often stressful, ecological niches. Among the secondary metabolites of lichens, light-protective pigments are of particular interest. The dark brown pigment melanin plays a significant role in protecting lichens from UV-B stress, but the key drivers of melanization remain unexplored. Melanins are hydrophobic heterogeneous polymers formed by sequential reactions of oxidation of phenolic/indole precursors and subsequent polymerization of intermediate phenols and quinones. The formation of a melanin layer on the surface of the thallus in response to UV exposure is one of the key mechanisms of high tolerance of lichens not only to light stress, but also to desiccation. We showed that the binding of water molecules to melanin depends on the activity of specific functional groups in the structure of this polymer, elemental composition, and the presence of associated compounds, including polysaccharides, and the ultrastructure of melanin particles. The anthraquinone parietin is the dominant cortical pigment of the lichens *Caloplaca* and *Xanthoria* of the family *Teloschistaceae*. Along with providing protection to the thallus from high photosynthetically active radiation and UV radiation, parietin has antioxidant properties and helps to protect lichens from cadmium toxicity and desiccation. Parietin protects lichen thalli from abiotic stress by maintaining membrane stability, providing antioxidant defense, forming a structural barrier, and sustaining water in the cortex of lichen thalli. The unique properties of lichen pigments make these natural polymers promising objects for fundamental and applied research, in particular in medicine, biotechnology and “green electronics”.

Keywords:

lichens, light stress, light-protective pigments, resistance to dehydration

Лишайники – симбиотические ассоциации, состоящие, в основном, из грибов аскомицетов (микобионты) и водорослей и/или цианобактерий (фотобионты). В действительности лишайники представляют собой миниатюрные экосистемы, поскольку, наряду с основными симбионтами, таллом лишайника содержит также весьма специфичную бактериальную микробиоту и паразитирующие лихенофильные грибы. Несмотря на то, что эти древние ассоциации возникли около 450 млн л. н., они являются нашими современниками. Одной из причин такого эволюционного долголетия являются их уникальная устойчивость к действию неблагоприятных факторов и способность выживать в чрезвычайно суровых условиях окружающей среды, таких как засуха, низкие температуры, длительная темнота, избыточная радиация. Среди биохимических механизмов естественной селекции лишайников особое внимание привлекают синтез и накопление в талломе защитных метаболитов. Лишайники производят множество алифатических и ароматических соединений, которые синтезируются в результате первичного или вторичного метаболизма. Первичные метаболиты – это внутриклеточные молекулы, необходимые для выполнения основных функций жизни. Они относятся к различным химическим классам, включая аминокислоты, пептиды, белки, полиолы, моно-, олиго- и полисахариды, липиды, каротиноиды и витамины. Многие из этих первичных метаболитов не являются специфичными только для лишайников и могут быть легко обнаружены в свободноживущих грибах, водорослях, а также высших растениях. В симбиозе лишайников оба партнера – микобионт и фотобионт – несут ответственность за производство этих первичных метаболитов. В отличие от этого, вторичные метаболиты синтезируются, в основном, лихенизированными грибами. Лишайники синтезируют огромное количество вторичных метаболитов, в том числе так называемых «лишайниковых веществ». Первые сообщения о лишайниковых веществах появились в XIX в. В настоящее время в лишайниках идентифицировано более 1050 различных вторичных метаболитов, из них около 700 уникальны для лишайников [1]. В лишайниках известны три основных пути биосинтеза вторичных метаболитов: ацетил-малонатный, шикиматный и мевалонатный. Вторичные метаболиты по биосинтетическому происхождению и химической структуре классифицируются по таким классам соединений, как дибензофураны, депсиды и депсидоны, нафтохиноны, антрахиноны, ксантоны и др. [2]. Количество вторичных метаболитов варьирует обычно от 0,1 до 10 %, а иногда достигает 30 % от сухого веса таллома. Эти соединения широко используются в хемотаксономии и систематике лишайников. Кроме того, благодаря своим физико-химическим характеристикам вторичные метаболиты обеспечивают фиксацию лишайников на определенных субстратах, в том числе чрезвычайно обедненных органическими веществами, таких как камни, скалы, лава. Наличие лишайниковых веществ позволяет лишайникам произрастать в разнообразных, зачастую стрессовых, экологических нишах. Лишайниковые

вещества вовлечены в селективный выбор симбионтов, аллелопатию, они регулируют фотосинтез, дыхание, проявляют защитные свойства, в том числе защиту талломо от световой радиации, патогенных бактерий и грибов. Эти соединения важны также для круговорота металлов и защиты таллома лишайников от химического загрязнения. Одними из интенсивно изучаемых свойств метаболитов лишайников являются их антиоксидантные свойства. Биосинтез разнообразных вторичных метаболитов – это компромисс, которым лишайники «оплачивают» защиту важных метаболических процессов в талломе, таких как фотосинтез и дыхание.

Изучение вторичных метаболитов лишайников затруднено из-за особенностей, присущих биологии лишайников. Чрезвычайно медленный рост лишайников (от 0,5 до 8 мм в год), тесное взаимодействие между симбионтами, сложности реконструкции симбиоза в лабораторных условиях и химическая сложность вторичных метаболитов затрудняют раскрытие генетических путей, участвующих в биосинтезе этих соединений. Задачи по расшифровке тонких механизмов биосинтеза вовлекают метагеномное секвенирование, культивирование *in vitro* и метаболомный анализ.

Как правило, лишайники устойчивы к световому стрессу, в том числе благодаря наличию фотозащитных вторичных метаболитов. Так, темно-коричневый пигмент меланин играет значительную роль в защите лишайников от УФ-Б стресса, однако ключевые драйверы меланизации остаются неизученными. Меланины – гидрофобные гетерогенные полимеры, образованные последовательными реакциями окисления фенольных/индольных предшественников и последующей полимеризации промежуточных фенолов и хинонов. Мы обнаружили, что УФ-Б индуцирует меланизацию таллома *Lobaria pulmonaria* и некоторых других лишайников и показали, что меланин обеспечивает защиту фотобионта от фотоингибирования, вызванного высокой освещенностью [3]. Транскриптомное профилирование лишайника *L. pulmonaria* продемонстрировало дифференциальную экспрессию генов синтеза нескольких типов меланина и других вторичных метаболитов. Воздействие УФ-Б вызывало значительное потемнение верхнего кортекса таллома, что коррелировало с повышенной экспрессией биосинтетических генных кластеров, участвующих в синтезе эу- и алломеланинов, а также предшественников меланинов [4]. Профили экспрессии общих стресс-ассоциированных генов, в частности, связанных с детоксикацией активных форм кислорода (далее – АФК), защитой белков и восстановлением ДНК, указывают на то, что микобионт является более чувствительным к УФ-Б облучению и восприимчивым партнером в симбиозе лишайников.

С помощью комплекса биохимических и биофизических методов показано, что меланины лишайников обладают антиоксидантными, хелатирующими и парамагнитными свойствами. Выраженная антиоксидантная активность эумеланина, экстрагированного из *L. pulmonaria*, была подтверждена реакциями по тушению радикала DPPH и эффективной способностью к хелатированию Fe^{2+} . Ана-

лиз парамагнитных характеристик меланинов лишайников продемонстрировал, что ЭПР спектр меланина из *L. pulmonaria* имеет типичную картину асимметричного синглета с концентрацией парамагнитных комплексов $0,64 \times 10^{17}$ спин $g-1$ [5]. Похожими антиоксидантными и парамагнитными характеристиками обладают и алломеланины, экстрагированные из лишайников *Cetraria islandica* и *Pseudevernia furfuracea* [6]. Кроме того, нами была обнаружена способность меланина, выделенного из лишайника *L. pulmonaria*, противостоять окислительному стрессу и связанным с ним повреждениям в модельных животных тканях – диафрагме мыши, основной дыхательной мышце. Предварительная обработка мышц меланином заметно снижала УФ-индуцированное увеличение внутриклеточных и внеклеточных АФК, а также опосредованное митохондриальным ингибитором антимицином А увеличение продукции АФК в митохондриях, сопровождающееся перекисным окислением липидов и потерей асимметрии мембран [5]. Кроме того, меланин ослаблял подавление нервно-мышечной передачи и изменения сократительных реакций, спровоцированные экзогенной H_2O_2 . Как известно, избыток АФК нарушает сокращение и нервно-мышечную передачу, вызывая дисфункцию скелетных мышц и утомляемость [7]. Окислительный стресс является одним из основных причинных факторов патологических изменений мышц при различных заболеваниях. Таким образом, полученные нами результаты проливают свет на перспективы применения меланина лишайника в качестве защитного компонента для лечения заболеваний скелетных мышц, которые сопровождаются повышенным производством АФК.

Известно, что меланины – универсальные темные пигменты, встречаются во многих организмах, в том числе и животных. Эндогенный меланин присутствует в коже, волосах, глазах, ушах и нервной системе млекопитающих, где он выполняет функции антиоксиданта, противовоспалительного вещества, светового сенсора и поглотителя токсичных соединений [8]. Однако следует отметить, что меланины также могут проявлять прооксидантные свойства и опосредовать фототоксичность. При УФ-облучении синтетические эумеланины и феомеланины, а также некоторые природные меланины могут генерировать АФК, включая H_2O_2 , супероксидный анион-радикал и даже синглетный кислород [9]. Кроме того, фотореактивность меланина значительно возрастает по мере фотодеградации пигмента и образования интермедиатов радикальной природы, что приводит к снижению антиоксидантной способности меланина.

Еще одним пигментом, поглощающим УФ, является оранжевый пигмент париедин антрахиноновой природы. Париедин является доминирующим кортикальным пигментом лишайников *Caloplaca* и *Xanthoria* из семейства *Teloschistaceae*, он также синтезируется в органах покрытосеменных растений, например, в корнях *Rumex crispus*. Известно, что париедин из *X. parietina* обладает антиоксидантными свойствами, однако его основная защитная роль – это защита таллома от высокой фотосинтетически

активной радиации и УФ-излучения. Существуют данные о роли париедина в защите *X. parietina* от кадмиевой токсичности благодаря снижению Cd-индуцированного окислительного стресса [10]. Интересно, что удаление париедина щадящим способом не влияет на интенсивность фотосинтеза, однако приводит к снижению стабильности мембран микобионта при обезвоживании, вероятно, вследствие повышения уровня перекисного окисления липидов [11]. Биоинформатический анализ показал, что гены, вовлеченные в биосинтез париедина, организованы в биосинтетические генные кластеры. Обезвоживание приводит к повышению уровня экспрессии генов биосинтеза париедина, а также генов, кодирующих осмосенсорные, осмопротекторные и антиоксидантные белки. Анализ талломов *X. parietina* методами биохимии, биофизики и микроскопии свидетельствует о том, наличие париедина вносит вклад в защиту талломов лишайника от абиотических стрессов благодаря поддержанию стабильности мембран, обеспечению антиоксидантной защиты и формированию структурного барьера в кортексе талломов лишайника.

Различные вторичные метаболиты защищают лишайники от света разной длины волны и проявляют синергетические свойства в качестве антиоксидантов для защиты таллома лишайника и фотосистем фотобионта. Это было продемонстрировано для вульпиновой, пинастровой и усниновой кислот в лишайниках *Vulpicida pinastri* и *Letharia vulpina*. Интересно, в системе животных клеток усниновая кислота может проявлять как анти-, так и прооксидантное действие. Так, в высокой концентрации усниновая кислота, выделенная из лишайника *Xanthoparmelia farinosa*, вызывала повреждающий эффект на клеточные мембраны и снижала метаболизм в клеточной линии лимфоцитов человека при действии УФ-облучения. Однако в низких концентрациях и при физиологической интенсивности УФ-излучения усниновая кислота проявляла антиоксидантные свойства [12].

Таким образом, уникальные свойства метаболитов лишайников делают эти естественные полимеры перспективными объектами для фундаментальных и прикладных исследований, в частности, для развития так называемой «зеленой электроники», применения в медицине, биотехнологии и ремедиации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источники и литература/References

- Gill, H. Lichen fungal secondary metabolites: progress in the genomic era toward ecological roles in the interaction / H. Gill, J. L. Sorensen, J. Collemare. – Springer International Publishing : Plant Relationships: Fungal-Plant Interactions, 2022. – P. 185–208.
- Goga, M. Lichen metabolites: an overview of some secondary metabolites and their biological potential / M. Goga, J. Elečko, M. Marcincinová [et al.]. – Springer International Publishing : Reference Series in Phytochemistry, 2020. – P. 175–209.

3. Beckett, R. P. Improved photoprotection in melanized lichens is a result of fungal solar radiation screening rather than photobiont acclimation / R. P. Beckett, K. A. Solhaug, Y. Gauslaa, F. Minibayeva // *The Lichenologist*. – 2019. – Vol. 51. – № 5. – P. 483–491.
4. Leksin, I. Ultraviolet-induced melanisation in lichens: physiological traits and transcriptome profile / I. Leksin, M. Shelyakin, I. Zakhozhiy [et al.] // *Physiologia Plantarum*. – 2024. – Vol. 176. – № 5. – P. e14512.
5. Minibayeva, F. V. Protective properties of melanin from lichen *Lobaria pulmonaria* (L.) Hoffm. in models of oxidative stress in skeletal muscle / F. V. Minibayeva, A. E. Rassabina, G. F. Zakirjanova [et al.] // *Fitoterapia*. – 2024. – Vol. 177. – P. 106127.
6. Rassabina, A. E. Melanin from the lichens *Cetraria islandica* and *Pseudevernia furfuracea*: structural features and physicochemical properties / A. E. Rassabina, O. P. Gurjanov, R. P. Beckett, F. V. Minibayeva // *Biochemistry*. – 2020. – Vol. 85. – P. 623–628.
7. Dogan, S. A. Redox signaling and stress in inherited myopathies / S. A. Dogan, G. Giacchin, E. Zito, C. Viscomi // *Antioxidants & Redox Signaling*. – 2022. – Vol. 37. – № 4–6. – P. 301–323.
8. Korytowski, W. Antioxidant action of neuromelanin: the mechanism of inhibitory effect on lipid peroxidation / W. Korytowski, T. Sarna, M. Zarba // *Archives of Biochemistry and Biophysics*. – 1995. – Vol. 319. – № 1. – P. 142–148.
9. Mokrzyński, K. Photoreactivity and phototoxicity of experimentally photodegraded hair melanosomes from individuals of different skin phototypes / K. Mokrzyński, M. Sarna, T. Sarna // *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. – 2023. – Vol. 243. – P. 112704.
10. Kalinowska, R. Parietin in the tolerant lichen *Xanthoria parietina* (L.) Th. Fr. increases protection of *Trebouxia* photobionts from cadmium excess / R. Kalinowska, M. Bačkor, B. Pawlik-Skowrońska // *Ecological Indicators*. – 2015. – Vol. 58. – P. 132–138.
11. Daminova, A. G. The roles of the anthraquinone parietin in the tolerance to desiccation of the lichen *Xanthoria parietina*: physiology and anatomy of the pale and bright-orange thalli / A. G. Daminova, I. Y. Leksin, V. R. Khabibrahmanova [et al.] // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2024. – Vol. 25. – № 13. – P. 7067.
12. Kohlhardt-Floehr, C. Prooxidant and antioxidant behaviour of usnic acid from lichens under UVB-light irradiation-studies on human cells / C. Kohlhardt-Floehr, F. Boehm, S. Troppens [et al.] // *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. – 2010. – Vol. 101. – № 1. – P. 97–102.

Благодарность (госзадание):

Работа выполнена в рамках реализации государственного задания ФИЦ КазНЦ РАН и поддержана грантом РФФИ № 23-14-00327 (анализ меланина и париетина).

Acknowledgements (state task):

The work was performed within the frames of the state task of the FRC KazSC RAS and financially supported by the RSF grant № 23-14-00327 (melanin and parietin analysis).

Информация об авторах:

Минибаяева Фарида Вилевна – доктор биологических наук, заведующий лабораторией окислительно-восстановительного метаболизма Казанского института биохимии и биофизики ФИЦ КазНЦ РАН, <https://orcid.org/0000-0003-0827-181X>; (420111, Российская Федерация, г. Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31; email: fminibayeva@gmail.com, minibayeva@kibb.knc.ru).

Бекетт Ричард Питер – профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории окислительно-восстановительного метаболизма Казанского института биохимии и биофизики ФИЦ КазНЦ РАН, <https://orcid.org/0000-0002-0530-4244> (420111, Российская Федерация, г. Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31); Школа наук о жизни, Университет КваЗулу-Натал (Южно-Африканская Республика, г. Скоттсвилл, 3209, а/я X01; email: rpbeckett@gmail.com).

About the authors:

Farida V. Minibayeva – Doctor of Sciences (Biology), Head of the Redox Metabolism Laboratory at the Kazan Institute of Biochemistry and Biophysics, FRC Kazan Science Center of the Russian Academy of Sciences, <https://orcid.org/0000-0003-0827-181X> (2/31 Lobachevsky str., 420111 Kazan, Russian Federation, e-mail: fminibayeva@gmail.com, minibayeva@kibb.knc.ru).

Richard Peter Beckett – Professor, Leading Researcher at the Redox Metabolism Laboratory at the Kazan Institute of Biochemistry and Biophysics, Kazan Science Center of the Russian Academy of Sciences, <https://orcid.org/0000-0002-0530-4244> (2/31 Lobachevsky str., 420111 Kazan, Russian Federation, e-mail: rpbeckett@gmail.com); School of Life Sciences, University of KwaZulu-Natal (PBag X01, Scottsville 3209, Republic of South Africa, e-mail: rpbeckett@gmail.com).

Для цитирования:

Минибаева, Ф. В. Роль светозащитных пигментов в стрессовой устойчивости лишайников / Ф. В. Минибаева, Р. П. Бекетт // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Экспериментальная биология и экология». – 2024. – № 9 (75). – С. 13–17.

For citation:

Minibayeva, F. V. Rol svetozaashchitnyh pigmentov v stressovoj ustojchivosti lishajnikov [The role of light-protective pigments in stress tolerance of lichens] / F. V. Minibayeva, R. P. Beckett // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series "Experimental Biology and Ecology". – 2024. – № 9 (75). – P. 13–17.

Дата поступления статьи: 16.09.2024

Прошла рецензирование: 26.09.2024

Принято решение о публикации: 30.09.2024

Received: 16.09.2024

Reviewed: 26.09.2024

Accepted: 30.09.2024

Изменение фотосинтетической активности и содержания хлорофиллов и каротиноидов в лишайниках *Peltigera canina* и *Peltigera aphthosa* при действии повышенной температуры

А. Ф. Хайруллина*, В. Р. Хабибрахманова*,**,
Д. Ф. Рахматуллина*, Е. И. Галеева*,
О. П. Гурьянов*, Р. П. Бекетт***,
Ф. В. Минибаева*,****, Ю. Н. Валитова*

* Казанский институт биохимии и биофизики ФИЦ КазНЦ РАН,
г. Казань,

** Казанский национальный исследовательский
технологический университет,
г. Казань

*** Школа наук о жизни, Университет КваЗулу-Натал,
г. Скоттсвилл, Южно-Африканская Республика

**** Казанский (Приволжский) федеральный университет,
г. Казань

a16280110@gmail.com

Аннотация

Лишайники – древнейшие экстремофильные организмы, представляют собой ассоциации между грибом (микобионт) и водорослями и/или цианобактериями (фотобионты). Фотобионтный состав лишайника может определять специфичность стрессового ответа на действие абиотических факторов, в том числе на действие неблагоприятных температур. В настоящей работе были изучены стресс-индуцированные изменения фотосинтетической активности и содержания хлорофиллов и каротиноидов в близкородственных лишайниках *Peltigera canina* и *Peltigera aphthosa*, различающихся фотобионтным составом, при действии повышенной температуры. Стрессовая обработка приводила к снижению фотохимической активности ФСII обоих лишайников. Анализ стресс-индуцированных изменений в содержании фотосинтетических пигментов в лишайниках показал, что воздействие повышенной температурой на лишайник *P. canina* индуцировало накопление астаксантина, тогда как в лишайнике *P. aphthosa* наблюдалось снижение содержания хлорофилла *a* и ксантофиллов. Выявленные значительные отличия в составе хлорофиллов и каротиноидов у исследуемых лишайников могут свидетельствовать о различных механизмах стрессового ответа на действие повышенной температуры, обусловленных особенностями их фотобионтного состава.

Ключевые слова:

лишайник, температурный стресс, каротиноиды, хлорофиллы, фотосинтетическая активность, фотосистема II

Changes in the photosynthetic activity and content of chlorophylls and carotenoids in the *Peltigera canina* and *Peltigera aphthosa* lichens under the action of elevated temperature

A. F. Khajrullina*, V. R. Khabibrakhmanova*,**,
D. F. Rakhmatullina*, E. I. Galeeva*,
O. P. Guryanov*, R. P. Beckett***,
F. V. Minibayeva*,****, J. N. Valitova*

* Kazan Institute of Biochemistry and Biophysics, Kazan Science
Centre of the Russian Academy of Sciences, Kazan

** Kazan National Research Technological University,
Kazan

*** School of Life Sciences, University of KwaZulu-Natal,
Scottsville, Republic of South Africa

**** Kazan (Volga Region) Federal University,
Kazan

a16280110@gmail.com

Abstract

Lichens are ancient symbiotic organisms that can survive in extreme conditions through unique resistance mechanisms. Lichens are associations between a fungus (mycobiont) and algae and/or cyanobacteria (photobionts). The photobiont composition of lichen can determine the specificity of the stress response to abiotic factors, including unfavorable temperatures. This work analysed stress-induced changes in the photosynthetic activity and content of chlorophylls and carotenoids on the closely related *Peltigera canina* and *Peltigera aphthosa* lichens, which differ by photobiontic composition, under elevated temperature. Stress treatment resulted in a decrease in the photochemical activity of photosystem II (PSII) in both lichens. By the analysis of stress-induced changes in the content of photosynthetic pigments in lichens, the exposure to elevated temperature of the *P. canina* lichen induced astaxanthin accumulation but *P. aphthosa* significantly decreased in the content of chlorophyll *a* and xanthophylls synthesized from β -carotene. Thus, the identified significant differences in the composition of chlorophylls and carotenoids in the studied lichens suggest the involvement of various mechanisms of stress response to the action of elevated temperature due to the specificity of their photobiontic composition.

Keywords:

lichens, temperature stress, carotenoids, chlorophylls, photosynthetic activity, photosystem II

Введение

Растения-экстремофилы, способные выживать в неблагоприятных условиях, давно привлекают внимание исследователей. К таким организмам относятся и лишайники, представляющие собой ассоциации между грибом (микобионт) и водорослями и/или цианобактериями (фотобионты). Несмотря на то, что фотобионт составляет всего лишь около 5 % от общей массы лишайника, он играет важную роль в жизнедеятельности лишайникового симбиоза, осуществляя фотосинтез и снабжая весь организм органическими субстратами. Функциональная активность фотосинтетического аппарата (далее – ФСА) является необходимым условием для поддержания жизнеспособности фотосинтезирующих организмов в стрессовых условиях. Известно, что у растений большой вклад в защиту ФСА вносят каротиноиды: они проявляют антиоксидантную активность, защищают от УФ-лучей, действуя как экранирующие пигменты, повышают устойчивость фотосинтетических мембран, связываясь с белками и липидами [1, 2]. Спектр каротиноидов ряда лишайников изучен достаточно подробно [3, 4], однако роль каротиноидов в стрессовой устойчивости лишайников – недостаточно.

Интересным объектом для изучения стрессовых воздействий являются лишайники рода *Peltigera*, так как они имеют относительно высокое содержание фотобионта и, следовательно, богаты пигментами, а также обладают высокой фотосинтетической активностью [5]. Эти лишайники произрастают преимущественно в умеренном климате и широко распространены по всему миру [6]. Большинство видов *Peltigera* в качестве фотобионта содержат цианобактерии, небольшое число – цианобактерии и зеленые водоросли, и лишь несколько видов – только зеленые водоросли. Особенности в составе фотобионтов у Пельтитеровых лишайников могут определять специфику их стрессового ответа.

Температурный стресс – достаточно обычное явление для лишайников в условиях их произрастания [7]. Высокая устойчивость лишайников к низким температурам, обусловленная наличием криопротекторов, достаточно хорошо изучена, в то время как механизмы, обеспечивающие толерантность лишайников к высоким температурам, остаются недостаточно раскрытыми [8–10]. Известно, что большинство лишайников чрезвычайно устойчивы к высокотемпературному стрессу в состоянии низкой оводненности, тогда как талломы с высоким содержанием влаги очень чувствительны к изменению температур [8, 11]. Показано, что наибольшие изменения при действии неблагоприятных температур наблюдаются именно у фотобионтов [8, 12].

Цель работы – выявление изменений в фотосинтетической активности фотосистемы II (далее – ФСII), и содержании хлорофиллов и каротиноидов у двух близкородственных представителей лишайников рода *Peltigera*, отличающихся по составу фотобионтов, в условиях высокотемпературного стресса.

Полученные данные позволяют установить различия в составе фотосинтетических пигментов у исследуемых

лишайников, выявить пигмент-опосредованную специфичность их стрессового ответа в зависимости от состава фотобионтов на действие повышенной температуры.

Материалы и методы

Лишайник *P. aphthosa* собран в Республике Коми, Россия (55°53' 21.3" с. ш. 48°38' 14.3" в. д.) в мае 2022 г., лишайник *P. canina* – на территории Айшинского лесничества Республики Татарстан, Россия (55°53' 21.3" с. ш. 48°38' 14.3" в. д.) в июне 2023 г.

После предварительной очистки талломы лишайников высушивали при комнатной температуре. Высушенный материал хранили при –20 °С до использования в экспериментах.

Талломы лишайника гидратировали в течение 2 суток при температуре +10 °С. Перед стрессовой обработкой контейнеры с гидратированными талломами оставляли на 2 ч при комнатной температуре и естественном освещении. Оводненность талломов лишайников определяли на анализаторе влажности АВГ-60 (Госметр, Россия).

Температурный стресс создавали выдерживанием гидратированных талломов в климатической камере в течение 3 ч при температуре +40 °С, освещении 45–50 мкмоль фотонов/м²/с и относительной влажности среды 50–60 %. Контролем служили гидратированные талломы лишайников, выдержанные в течение того же времени при комнатной температуре +23 °С, такой же интенсивности освещения и относительной влажности воздуха.

Оценка фотосинтетической активности ФСII. Модулированную флуоресценцию хлорофилла *a* измеряли на флуориметре FMS1+ (Hansatech Instruments, Великобритания). После периода темновой адаптации (10 мин) производили вспышку насыщающего света интенсивностью 9100 мкмоль фотонов/м²/с для измерения максимальной фотохимической эффективности ФСII, обозначаемой как F_v/F_m , где F_m – максимальная флуоресценция и F_v – переменная флуоресценция, или $(F_m - F_0)$, где F_0 – начальная флуоресценция. Затем включали непрерывный действующий свет с интенсивностью потока 105 мкмоль фотонов/м²/с. После снижения эффективности флуоресценции до стационарного уровня F_T включали второй насыщающий импульс для определения максимального выхода флуоресценции F'_m в адаптированном к свету состоянии и для расчета относительной скорости линейного переноса электронов $rETR$ ($rETR = 0.5 \times PAR \times \Phi_{ФСII}$), где PAR – фотосинтетически активное излучение, а $\Phi_{ФСII}$ – действительный квантовый выход фотохимических реакций в ФСII на свету, рассчитываемый как $(F'_m - F_T)/F_m$. Рассчитывали также коэффициент относительного уменьшения флуоресценции Rfd , который также называют коэффициентом жизненности ФСII: $Rfd = (F_m - F_T) / F_T$ [13].

Исследование состава и содержания хлорофиллов и каротиноидов. Пробоподготовку и анализ хлорофиллов и каротиноидов осуществляли согласно работе [4] с небольшими модификациями. Образец лишайника (фрагменты талломов) растирали в жидком азоте, из получен-

ного порошка отбирали навеску массой 0,1 г, переносили в пробирку эппендорф и полностью экстрагировали ацетоном при условиях: соотношение материал : экстрагент 1:10 (m/v), обработка в ультразвуковой ванне (Сапфир, Россия) в течение 5 мин при мощности 60 %, настаивание – 15 мин. Полученный экстракт высушивали на ротаторном испарителе RV 8 (IKA, Германия). Исследование состава и содержания пигментов проводили с помощью высокоэффективной жидкостной хроматографии (далее – ВЭЖХ) на хроматографе LicArt 62 (Лабконцепт, Россия). Для ВЭЖХ использовали: элюент А – смесь ацетонитрила, метанола, дистиллированной воды (75:12:4), элюент В – смесь метанола и этилацетата (68:32). Высушенные экстракты лишайников растворяли в 200 мкл элюента В, центрифугировали 5 мин при 10000 об/мин на микроцентрифуге MiniSpin (Eppendorf, Германия), 20 мкл супернатанта отбирали и хроматографировали на колонке с обращенной фазой Inertsil ODS–3,3 μ m, 4,6×250 mm (GL Sciences, Япония). Соединения хроматографировали при градиентном режиме со следующей последовательностью элюентов: 0 мин А – 100 %; 0–10 мин А – 90 и В – 10; 10–20 мин А – 50 и В – 50; 20–60 мин В – 100 %. Скорость потока элюента составляла 0,5 мл/мин, температура хроматографирования – 25 °C выше 0°. Пигменты детектировали с помощью диодно-матричного детектора DAD–62 (Лабконцепт, Россия). Управление работой хроматографа, прием и обработку полученных данных проводили с помощью специализированной компьютерной программы LicArt WSV. Идентификацию хлорофиллов и каротиноидов осуществляли по времени удерживания и электронным спектром в области 300–700 нм путем сопоставления с аналогичными параметрами веществ-стандартов (β -каротина, лютеина, кантаксантина и зеаксантина (Sigma-Aldrich, США, степень чистоты – не менее 95 %) и данными литературы [4, 5, 14, 15].

Статистическая обработка. Опыты проводили в 3–5 биологических и 3–10 аналитических повторностях. Результаты представлены в виде средних арифметических значений со стандартными ошибками (SE). Все экспериментальные данные имеют нормальное распределение признака. Для проверки значимости и сравнения их средних арифметических значений использовался однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) с оценкой попарных различий с применением критериев Тьюки и Бонферрони.

Результаты и их обсуждение

Основной идеей нашего исследования было проведение сравнительного анализа стресс-индуцированных изменений фотосинтетической активности и содержания хлорофиллов и каротиноидов у двух близкородственных лишайников *P. canina* и *P. aphthosa* при действии повышенной температуры.

Эти виды достаточно широко распространены от арктических до умеренных широт в Северном полушарии и рассеянно – в Южном, относятся к эпигейным листоватым лишайникам с крупными широкими слоевищами.

P. canina – цианолишайник, фотобионтом которого является цианобактерия *Nostoc punctiforme* (Kütz.) Har., а микобионтом – гриб *Peltigera* Willd. (тип *Ascomycota*). *P. aphthosa*, в отличие от *P. canina*, трехкомпонентный лишайник, в его состав, помимо цианобактерии *Nostoc*, входит зеленая водоросль *Coccomyxa* sp. Известно, что у *P. canina* цианобактерии компактно расположены в гонидиальном слое и выполняют как фотосинтезирующую, так и азотфиксирующую функции, тогда как у *P. aphthosa* *Nostoc* находятся в цефалодиях и выполняют азотфиксирующую функцию, а фотосинтетическую функцию выполняет в основном зеленая водоросль *Coccomyxa* sp., расположенная в слоевище лишайника [16, 17].

Фотосинтетическая активность ФСII при действии повышенной температуры. Уровень фотосинтетической активности является важным интегральным физиологическим показателем, который считается маркером жизнеспособности лишайника [13, 18]. В нашем исследовании методом флуориметрии оценивали фотохимическую активность ФСII путем измерения таких параметров, как максимальная квантовая эффективность ФСII (F_v/F_m), начальная флуоресценция (F_0), относительная скорость линейного переноса электронов ($rETR$) и коэффициент жизнеспособности ФСII (Rfd). Показано, что у контрольных образцов исследуемых лишайников F_v/F_m и Rfd у *P. aphthosa* были выше, чем у *P. canina* (рис. 1). Достоверных различий по $rETR$ и F_0 между исследуемыми лишайниками не обнаружено. Ранее установлено, что цианобактерии, в том числе цианолишайники, имеют гораздо более низкие значения F_v/F_m , чем зеленые водоросли, мохообразные, высшие растения [19]. Таким образом, полученные данные свидетельствуют о более развитой фотосинтетической системе у *P. aphthosa* по сравнению с *P. canina*. Очевидно, это связано с различным устройством ФСА у фотобионтов этих лишайников. Светособирающую функцию у цианобактерий выполняют белки фикобилина (также называемые фикобилисомами), образующиеся из светопоглощающего тетрапирролсодержащего фикоцианина и аллофикоцианиновых пигментов, что, по-видимому, имеет место и у цианолишайника *P. canina*. У хлоробионтов (в данном случае, у зеленой водоросли *Coccomyxa* sp.) фикобилисомы в ходе эволюции были функционально заменены светособирающим комплексом (далее – ССК), который представляет собой антенные белки, содержащие каротиноидные и хлорофилльные пигменты [19].

Было предположено, что различия в фотобионтом составе исследуемых лишайников могут определить характерный для каждого лишайника стрессовый ответ при высокотемпературном воздействии. Известно, что температурный оптимум для нормальной работы фотосинтетической системы у большинства лишайников находится в пределах от +10 до +25 °C [20]. Полученные нами данные свидетельствуют о стрессовом состоянии исследуемых лишайников при действии повышенной температуры +40 °C. У обоих видов лишайников снижались значения F_v/F_m и $rETR$, в среднем в 1,2 и 1,5 раза соответственно (рис. 1), что может свидетельствовать о нарушении функционирования

ФСII фотобионтов исследуемых лишайников при высокотемпературном воздействии. В частности, наблюдаемые изменения фотосинтетической активности могут быть обусловлены повреждением D1-белка ФСII, приводящего к инактивации фотосинтетических реакционных центров и повышению образования активных форм кислорода (далее – АФК) [18, 21].

Действие повышенной температуры приводило к увеличению значений F_0 у *P. canina*, но не оказывало влияния на тот же параметр у *P. aphthosa*. Начальная флуоресценция является индикатором энергетических потерь при передаче энергии возбуждения от светособирающих молекул к реакционному центру ФСII. Полученные данные могут свидетельствовать о менее эффективной передаче энергии возбуждения между пигментными молекулами в светособирающем комплексе ФСII в лишайнике *P. canina*. По мнению авторов исследований [19, 22], общее увеличение F_0 , наблюдаемое после теплового стресса, может быть обусловлено отделением светособирающих комплексов от ядра ФСII.

Коэффициент жизнестойкости Rfd при действии повышенной температуры снижался у обоих лишайников, причем более заметно у *P. aphthosa*, что может свидетельство-

вать о более значительном подавлении ассимиляции CO_2 у хлоролишайника при высокотемпературном воздействии [18, 21].

Таким образом, выдерживание лишайников *P. aphthosa* и *P. canina* при повышенной температуре приводит к снижению фотохимической активности ФСII, причем лишайник *P. aphthosa* демонстрирует более сильную стрессовую реакцию.

Изменения состава и содержания хлорофиллов и каротиноидов при действии повышенной температуры. В фотофизических и фотохимических реакциях фотосинтеза центральную роль играют пигменты, которые обеспечивают поглощение, запасание и превращение световой энергии [23]. При изменении температуры окружающей среды меняются пигментный состав и функциональное состояние ФСА [4]. Количественные изменения в содержании хлорофиллов и каротиноидов зачастую рассматриваются как биомаркеры экологического состояния мест произрастания видов [4, 13].

Сравнительный анализ состава и содержания хлорофиллов и каротиноидов в лишайниках *P. canina* и *P. aphthosa* позволил выявить существенные различия в их профиле пигментов, что, с нашей точки зрения, обусловлено в первую очередь различным фотобионтным составом исследуемых лишайников.

В цианолишайнике *P. canina* обнаружен хлорофилл *a* (табл. 1), что согласуется с литературными данными. Показано, что у цианобактерии *Nostoc*, являющейся фотобионтом исследуемого лишайника, функции хлорофилла *b* выполняют фикобилисомы [19, 24]. К производным хлорофилла *a* могут быть отнесены два неидентифицированных хлорофилла со временами выхода 36,2 и 37,9 мин, занимающие около 3 % от суммы пигментов. По спектральным характеристикам они являются эпимерами хлорофилла *a* [15, 24]. Также в составе пигментов лишайника *P. canina* были обнаружены феофитин *a* и предположительно его эпимер (соединение со временем выхода 40,9 мин), имеющие сопоставимое содержание – около 4 % от содержания хлорофилла *a* (табл. 1). Известно, что феофитин *a* отводится важная роль в функционировании ФСА у цианобактерий, где он выполняет функции первичного и вторичного акцепторов [19, 24]. Сопоставимое содержание феофитина *a*, в среднем 3 %, было установлено в пленках цианобактерий рода *Phormidium*, которое возрастало в 20–30 раз после воздействия ионов меди и никеля, при одновременном снижении хлорофилла *a* [25]. В трех разных штаммах свободноживущих цианобактерий *Nostoc*, подвергнутых обезвоживанию, также содержание феофитина *a* и хлорофилла

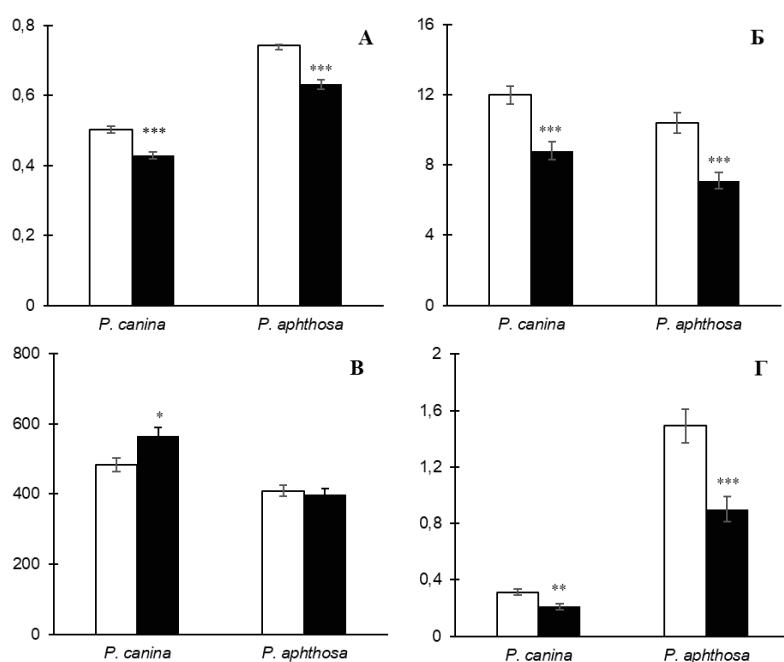


Рисунок 1. Параметры фотосинтетической активности лишайников *P. canina* и *P. aphthosa* после температурного воздействия +40 °C в течение 3 ч.

Условные обозначения. □ – контроль; ■ – опыт; А – максимальная фотохимическая эффективность ФС II (F_v/F_m); Б – относительная скорость линейного переноса электронов ($rETR$); В – начальная флуоресценция (F_0); Г – коэффициент жизнестойкости ФС II (Rfd).

Примечание. Здесь и в табл. 1, 2. Различия с контролем статистически значимы: * – при $p < 0,05$; ** – при $p < 0,01$; *** – при $p < 0,001$. Достоверность различий определяли с помощью однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA).

Figure 1. Photosynthetic activity parameters of *P. canina* and *P. aphthosa* lichens after exposure to temperature +40 °C for 3 h.

Keys: □ – control; ■ – experiment; A – maximum photochemical efficiency of PS II (F_v/F_m); Б – relative electron linear transfer rate ($rETR$); В – initial fluorescence (F_0); Г – vitality factor of PS II (Rfd).

Note. Here and in Tables 1, 2 the differences with control are statistically significant at * – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$; *** – $p < 0,001$. The reliability of differences was determined by the one-factor analysis of variance (ANOVA).

а было почти равным [24]. Имеющиеся данные свидетельствуют о существенном влиянии стрессовых факторов на содержание основных фотосинтетических пигментов в цианобактериях. В настоящем исследовании при действии повышенной температуры на талломы лишайника *P. canina* не установлено изменений в содержании идентифицированных хлорофиллов, а наоборот, даже наблюдалось незначительное увеличение содержания хлорофилла *a*. Сопоставляя полученные данные по профилю хлорофиллов и флуоресценции хлорофилла *a* в лишайнике *P. canina*, можно предположить, что выявленное снижение фотосинтетической активности ФСII у фотобионта при тепловом стрессе, главным образом, обусловлено повреждением ССК, содержащих сложные белки – фикобилисомы (табл. 1, рис. 1).

В лишайнике *P. aphthosa*, имеющем наряду с цианобактериями в качестве фотобионта зеленую водоросль *Coccosuxa*, обнаружены два основных хлорофилла – *a* и *b*, их соотношение составляет 3,6:1 соответственно (табл. 2). Это согласуется с данными литературы по соотношению хлорофиллов у высших растений и большинства зеленых водорослей [26]. Участие этих двух хлорофиллов в ФСА позволяет более эффективно осуществлять фотосинтез, что было подтверждено результатами оценки фотосинтетической активности ФСII исследуемых лишайников (рис. 1). Кроме того, в лишайнике *P. aphthosa*, по сравнению с лишайником *P. canina*, содержание хлорофилла *a* больше в 2,3 раза (табл. 1 и 2), что также способствует более активной фотосинтетической деятельности. Содержание эпимеров хлорофилла *a* и феофетина *a* в лишайнике *P. aphthosa* оказалось ниже, чем в лишайнике *P. canina*, их суммарная доля составляет не более 1% от суммы пигментов (табл. 2).

В условиях высокотемпературного стресса в лишайнике *P. aphthosa* происходит снижение содержания хлорофиллов *a* и *b* в 1,2 раза, что, по-видимому, и привело к понижению его фотосинтетической активности (см. рис. 1). Таким образом, полученные данные указывают на повреждение ФСА фотобионтов лишайни-

ка *P. aphthosa*, главным образом, у водорослевого партнера при действии повышенной температуры. Можно предположить, что это обусловлено морфологией таллома лишайника, альгальный слой которого подвержен сильному нагреву при действии повышенной температуры, поскольку расположен под верхним кортексом, сформированным гифами микобионта [16].

Важными соединениями в защите ФСА являются каротиноиды: они выполняют функцию антиоксидантов, преобразуют излишнюю энергию возбуждения хлорофиллов в тепло, действуют как экранирующие пигменты и защищают от УФ-лучей, связываясь с белками и липидами, повышают устойчивость фотосинтетических мембран. На сегодняшний день известно более 1200 каротиноидов, которые по химическому строению делятся на две группы: каротины, представляющие собой углеводороды, и ксан-

Состав и содержание пигментов в лишайнике *P. canina*

Таблица 1

Composition and pigment content in the *P. canina* lichen

Table 1

Идентифицированные пигменты	Время выхода, мин	Максимумы поглощения в электронных спектрах, нм	Площадь пика, mUA*мин/0,1 г навески	
			Контроль	Опыт
н.и. каротиноид	13,7	415, 463, 507	29±2	24±1*
н.и. каротиноид	17,2	473	177±10	203±1
астаксантин	21,1	413, 476	68±4	82±2*
зеаксантин	24,3	421, 450, 475	140±5	125±9*
кантаксантин	29,2	379, 476	159±20	85±4*
н.и. хлорофилл	36,2	471, 654	77±1	56±4**
н.и. хлорофилл	37,9	419, 434, 476, 487, 641, 665	73±1	68±1***
хлорофилл <i>a</i>	39,6	416, 432, 618, 665	2539±20	2883±16
эхиненон	40,4	354, 474	544±13	480±20
н.и. хлорофилл	40,9	413, 439, 476, 485, 655, 666	93±1	96±10
феофитин <i>a</i>	51,7	409, 476, 496, 536, 609, 666	108±8	39±6**
β-каротин	56,9	412, 457, 476	933±16	1014±49

Условные обозначения. н. и. – не идентифицированный.

Keys: н. и. – not identified.

Состав и содержание пигментов в лишайнике *P. aphthosa*

Таблица 2

Composition and pigment content in the *P. aphthosa* lichen

Table 2

Идентифицированные пигменты	Время выхода, мин	Максимумы поглощения в электронных спектрах, нм	Площадь пика, mUA*мин/0,1 г навески	
			Контроль	Опыт
неоксантин	14,7	414, 441, 463	319±8	182±5***
виолаксантин	17,2	417, 444, 471	609±28	413±16**
лютеин	24,7	421, 448, 474	1921±92	1665±39
зеаксантин	25,2	412, 450, 474	12±1	6±1**
н.и. каротиноид	26,6	412, 423, 473	60±4	38±8
н.и. каротиноид	27,1	412, 423, 473	79±9	60±10
н.и. каротиноид	27,8	412, 423, 473	166±19	121±3
хлорофилл <i>b</i>	36,1	467, 601, 654	1623±19	1385±10
н.и. хлорофилл	36,9	412, 473, 791	47±13	26±1
н.и. хлорофилл	37,7	415, 473, 491	37±4	78±3**
хлорофилл <i>a</i>	39,4	415, 432, 618, 665	5825±33	4599±15*
β-криптоксантин	40,1	412, 450, 473, 485	26±1	9±1***
н.и. хлорофилл	40,5	412, 473, 665	25±3	29±2
α-каротин	54,5	412, 474, 485	32±2	44±3*
β-каротин	55,7	412, 457, 473	276±13	220±8*

тофилы, содержащие в структуре кислородсодержащие функциональные группы [27]. Биосинтез каротиноидов осуществляется по мевалонатному пути, в котором тетра-терпеноиды циклизируются с формированием каротинов (α - и β -каротинов), далее из них в ходе ферментативного окисления образуются различные ксантофиллы [26, 28]. Состав каротиноидов в различных организмах (растениях, мхах, водорослях, грибах и др.) может существенно различаться. Важным аспектом исследования каротиноидов лишайников является не только установление их спектра, но и определение симбиотического партнера, синтезирующего пигменты. На основе имеющихся данных [3, 14, 26, 29] по профилю каротиноидов у водорослей, цианобактерий и аскомицетов была составлена обобщенная схема их биосинтеза (рис. 2).

Установлено, что состав каротиноидов, идентифицированных в лишайниках *P. canina* и *P. aphthosa*, существенно отличается (табл. 1 и 2). В лишайнике *P. canina* обнаружены каротиноиды, характерные для цианолишайников, среди которых преобладает β -каротин (табл. 1). Надо отметить, последний также является основным каротиноидом микобионта [5]. Известно, что у свободноживущих цианобактерий преобладающими являются ксантофиллы – эхиненон и кантаксантин, образующиеся последовательно из β -каротина (рис. 2) [14, 24]. В лишайнике *P. canina* содержание этих ксантофилов, по сравнению с β -каротином, меньше

почти в два и шесть раз соответственно. Астаксантин, синтезируемый из кантаксантина, обнаруженный в лишайнике, практически не встречается в свободноживущих цианобактериях. Этот ксантофилл содержит как кетонные (в положении 4, 4'), так и гидроксильные (в положении 3, 3') группы, что обуславливает его высокую химическую реакционную способность, например, выраженные антиоксидантные свойства. Известно, что астаксантин накапливается в водорослях при стрессовых условиях, в частности, при недостатке питательных веществ, повышенной солености и инсоляции [30]. Также в лишайнике *P. canina* был обнаружен зеаксантин, синтезируемый из β -каротина по другому пути (рис. 2), причем его содержание выше в среднем в 10 раз, чем в свободноживущей цианобактерии *N. commune* NIES-24 [14]. Этот ксантофилл был обнаружен в образцах лишайника *P. canina*, собранных с каменистых холмов, в том числе затененных, сухих лугов, известнякового карьера в Финляндии [3]. Надо отметить, что в них же обнаружен β -каротин, профиль других идентифицированных каротиноидов существенно отличался. Наибольшую долю в исследуемых образцах занимал диатоксантин – ксантофилл, характерный для диатомовых водорослей [26], также в них присутствовал капсохром. Таким образом, видно, что местообитание лишайника *P. canina* определяет специфичность его профиля каротиноидов, однако неизменным является наличие зеаксантина и β -каротина во всех исследуемых образцах лишайника этого вида.

Воздействие повышенной температуры на лишайник *P. canina* не привело к существенным изменениям в профиле каротиноидов. Содержание основного каротиноида β -каротина в лишайнике достоверно не отличается от контрольного варианта (см. табл. 1). При этом были выявлены изменения в содержании ксантофиллов, при одновременном снижении кантаксантина увеличивается содержание астаксантина. Это представляется логичным, так как астаксантин синтезируется из кантаксантина (рис. 2). Ранее уже упоминалось, что астаксантин накапливается при различных стрессовых воздействиях [30]. Этот ксантофилл в лишайнике при температурном стрессе может действовать как антиоксидант, защищающий тилакоидные мембраны от окисления [31] более эффективно, чем его предшественник кантаксантин. О накоплении АБК косвенно свидетельствует небольшое снижение содержания зеаксантина и эхиненона в лишайнике (табл. 1). Известно, что у свободноживущей цианобактерии

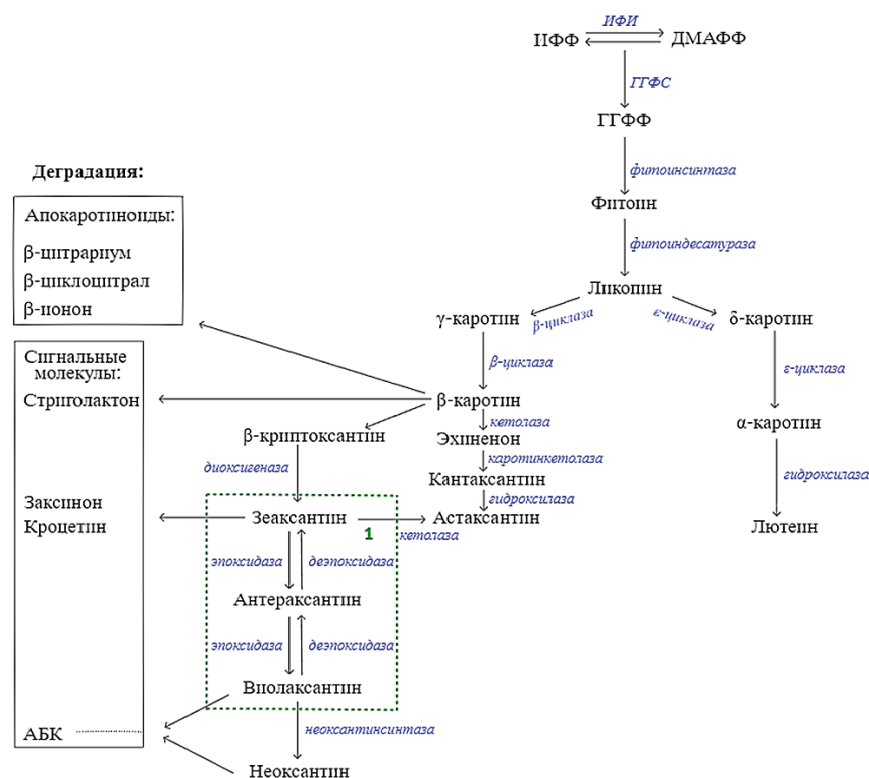


Рисунок 2. Схема биосинтеза каротиноидов.

Условные обозначения. 1 – виолаксантиновый цикл. ИФФ – изопентилдифосфат; ИФИ – изопентилизомеразы; ДМАФФ – диметилаллилдифосфат; ГГФФ – геранилгеранилдифосфат; ГГФС – геранилгеранилдифосфатсинтаза; АБК – абсцизовая кислота.

Figure 2. Scheme of carotenoid biosynthesis.

Keys: 1 – violaxanthin cycle; 2 – lutein-5,6-epoxide cycle. ИФФ – isopentyl diphosphate; ИФИ – isopentyl isomerase; ДМАФФ – dimethylallyl diphosphate; ГГФФ – geranylgeranyl diphosphate; ГГФС – geranylgeranyl diphosphate synthase; АБК – abscisic acid.

Synechococcus дефицит ксантофиллов (зеаксантина, эхинонена) приводил к увеличению АФК и содержания активных форм азота [32].

Таким образом, установлено, что у цианобактерии, ассоциированной с микобиотом, лишайнике *P. canina* выявлен более широкий спектр ксантофиллов по сравнению со свободноживущими. Можно предположить, что это позволяет цианобактерии в лишайнике успешно существовать в симбиотических условиях. Также показано, что воздействие повышенной температуры не привело к сильным изменениям содержания каротиноидов, тем не менее выявлена тенденция к накоплению в лишайнике астаксантина с наиболее выраженными антиоксидантными свойствами.

В лишайнике *P. aphthosa* были обнаружены характерные для водорослевого партнера каротиноиды [5], и не установлено наличие эхинонена и других специфических для цианобактерий каротиноидов (см. табл. 2). Основным каротиноидом в лишайнике является лютеин, синтезируемый из α -каротина (см. рис. 2). На долю этого ксантофилла приходится около 17 % от суммы идентифицированных пигментов (см. табл. 2). Известно, что штаммы зеленой водоросли *Coccomyxa* при культивировании способны накапливать каротиноиды в количестве 10 мг/г сухой массы, из которых до 80 % может занимать лютеин [33, 34]. У двух лишайников *P. aphthosa*, произрастающих в Карелии, лютеин также присутствовал в составе каротиноидов, но не был преобладающим [3]. Наибольшую долю в профиле каротиноидов этих лишайников занимал виолаксантин. В исследуемом нами лишайнике виолаксантин также обнаружен, и по содержанию он является вторым после лютеина (см. табл. 2). Известно, что его основная функция – это перенос энергии на хлорофилл *a* [1, 4]. Надо отметить, что содержание виолаксантина в среднем в 50 раз больше, чем зеаксантина, из которого он синтезируется (см. рис. 2). Антераксантин, являющийся промежуточным продуктом взаимопревращения этих ксантофиллов, нами не обнаружен.

Другим ксантофиллом, идентифицированным в лишайнике *P. aphthosa*, является неоксантин. Он образуется из виолаксантина, и является промежуточным метаболитом в биосинтезе фитогормона – абсцизовой кислоты (далее – АБК) (см. рис. 2). Надо отметить, что неоксантин обнаружен и в других образцах лишайника *P. aphthosa* [3, 5], но нет данных о его содержании в свободноживущих культурах *Coccomyxa* sp. [33, 34]. Можно предположить, что неоксантин – важный метаболит, позволяющий водоросли функционировать в симбиотической ассоциации с грибом.

Действие повышенной температуры привело к снижению содержания в лишайнике *P. aphthosa* всех идентифицированных каротиноидов (см. табл. 2). Несмотря на то, что изменения являются несильно выраженными, они могут вносить вклад в выявленное снижение фотосинтетической активности лишайника в условиях температурного стресса (см. рис. 1). Наибольшее падение в 1,7 раза наблюдается в содержании неоксантина, что может свидетельствовать

об активации синтеза АБК при действии повышенной температуры для замедления метаболизма и экономии энергетических ресурсов [35].

Таким образом, был установлен профиль каротиноидов в лишайнике *P. aphthosa*, подтверждающий, что из двух его фотобионтов именно зеленая водоросль выполняет фотосинтетическую деятельность [16, 17]. Отличием *Coccomyxa* sp. в лишайнике от свободноживущих штаммов является накопление неоксантина, являющегося предшественником АБК. Воздействие повышенной температуры приводит к достоверному снижению в лишайнике *P. aphthosa* содержания β -каротина и последовательно синтезируемых из него зеаксантина, виолаксантина и неоксантина.

На основании полученных данных можно заключить, что несмотря на сходство близкородственных лишайников *P. canina* и *P. aphthosa*, в условиях высокотемпературного стресса они демонстрируют различный пигмент-опосредованный стрессовый ответ. Зеленая водоросль – доминирующий фотобионт *P. aphthosa* – обладает более эффективным фотосинтезом, ввиду большего спектра хлорофиллов и более высокого их содержания, а также благодаря наличию каротиноидов, участвующих в сборе фотосинтетически активной радиации и обеспечивающих защиту ФСА от излишней солнечной энергии. Наличие зеленой водоросли в качестве основного фотобионта дает возможность цианобактерии выполнять роль только азотфиксатора и обеспечивать весь симбиотический организм необходимым количеством азотсодержащих соединений. Тем не менее именно в лишайнике *P. aphthosa* при действии повышенной температуры наблюдались более выраженные изменения в фотосинтетической активности, и содержании хлорофиллов и каротиноидов в отличие от *P. canina*. Можно предположить, что это обусловлено особенностями каротиногенеза цианобактерии в *P. canina*, заключающимися в биосинтезе кантаксантина и астаксантина с высокой антиоксидантной активностью, которые обеспечивают более эффективную защиту ФСА от последствий температурного стресса.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источники и литература

1. Маслова, Т. Г. Функции каротиноидов в листьях высших растений (обзор) / Т. Г. Маслова, Е. Ф. Марковская, Н. Н. Слемнев // Журнал общей биологии. – 2020. – Т. 81, № 4. – С. 297–310. – DOI: 10.31857/S0044459620040065
2. Caferri, R. Assessing photoprotective functions of carotenoids in photosynthetic systems of plants and green algae / R. Caferri, Z. Guardini, R. Bassi, L. Dall'Osto // Methods Enzymology. – 2022. – Vol. 674. – P. 53–84.
3. Czezug, B. Carotenoids from green-algae and cyanobacteria as phyco- and photobionts of *Peltigera* species / B. Czezug, E. Czezug-Semeniuk, O. Vitikainen, T. Ahti // Journal of the Hattori Botanical Laboratory. – 2024. – Vol. 96. – P. 281–290.

4. Дымова, О. В. Пигментный комплекс растений в условиях таежной зоны европейского Северо-Востока (организация и функционирование) : дис. ... д-ра биол. наук / О. В. Дымова – Уфа, 2019. – 46 с.
5. Котлова, Е. Р. Антиокислительные системы лишайников : дис. ... канд. биол. наук / Е. Р. Котлова. – Санкт-Петербург, 2000. – 34 с.
6. Vallese, C. Modelling range dynamics of terricolous lichens of the genus *Peltigera* in the Alps under a climate change scenario / C. Vallese, J. Nascimbene, P. Giordani [et al.] // *Fungal Ecology*. – 2020. – Vol. 49.
7. Tegler, B. Physiological-environmental interactions in lichens. XII. The seasonal variation of the heat stress response of *Cladonia rangiferina* / B. Tegler, K. A. Kershaw // *The New Phytologist*. – 1981. – Vol. 87, № 2. – P. 395–401.
8. Dyakov, M. Yu. Influence of extreme ambient temperatures and anaerobic conditions on *Peltigera aphthosa* (L.) Willd. viability / M. Yu. Dyakov, I. D. Insarova, D. E. Khara-badze [et al.] // *Life Sciences in Space Research*. – 2015. – Vol. 7. – P. 66–72.
9. Beckett, R. P. Stress physiology and the symbiosis / P. R. Beckett, I. Kranner, F. V. Minibayeva // *Lichen Biology*. – 2008. – P. 134–151.
10. Chen, K. Heat tolerance of the mycobionts and phycobionts from three desert lichens / K. Chen, J.-C. Wei // *Mycosystema*. – 2015. – Vol. 34, № 5. – P. 1007–1014.
11. Nascimbene, J. Epiphytic lichen diversity along elevational gradients: biological traits reveal a complex response to water and energy / J. Nascimbene, L. Marini // *Journal of Biogeography*. – Vol. 42. – P. 1222–1232.
12. Phinney, N. Photobiont-dependent humidity threshold for chlorolichen photosystem II activation / N. Phinney, K. A. Solhaug, Y. Gauslaa // *Planta*. – 2019. – Vol. 250.
13. Использование переменной флуоресценции хлорофилла для оценки физиологического состояния фотосинтетического аппарата растений / В. Н. Гольцев, В. Н. Калладжи, М. Паунов [и др.] // *Физиология растений*. – 2016. – Т. 63, № 6. – С. 881–907.
14. Takaichi, S. Unique carotenoids in the terrestrial cyanobacterium *Nostoc commune* NIES-24: 2'-hydroxymyxol 2'-fucoside, nostoxanthin and canthaxanthin / S. Takaichi, T. Maoka, M. Mochimaru // *Current Microbiology*. – 2009. – Vol. 59. – P. 413–419.
15. Rumengan, A. Identification of pigment profiles and antioxidant activity of *Rhizophora mucronata* mangrove leaves origin Lembeh, North Sulawesi, Indonesia / A. Rumengan, E. Mandiangan, W. Tanod [et al.] // *Biodiversitas [Journal of Biological Diversity]*. – 2021. – Vol. 22.
16. *Lichen Biology* / ed. T. H. Nash III. – London : Cambridge University Press, 2008.
17. Chekanov, K. Spatial organization of the three-component lichen *Peltigera aphthosa* in functional terms / K. Chekanov, A. Feoktistov, E. Lobakova // *Physiologia Plantarum*. – 2017. – Vol. 160. – P. 328–338.
18. Goltsev, V. N. Variable chlorophyll fluorescence and its use for assessing physiological condition of photosynthetic apparatus / V. N. Goltsev, P. M. Russ, H. M. Kalaji [et al.] // *Journal of Plant Physiology*. – 2016. – Vol. 6. – P. 869–893.
19. Beckett, R. Photoprotection in lichens: adaptations of photobionts to high light / R. Beckett, F. Minibayeva, K. A. Solhaug, T. Roach // *The Lichenologist*. – 2021. – Vol. 53. – P. 21–33.
20. Голубкова, Н. С. Отношение лишайников к субстрату и другим факторам внешней среды / Н. С. Голубкова. – Москва : Просвещение, 1977. – 487 с.
21. Pokorska, B. Photoinhibition and D1 protein degradation in mesophyll and agranal bundle sheath thylakoids of maize / B. Pokorska, E. Romanowska // *Functional Plant Biology*. – 2007. – Vol. 34. – P. 844–852.
22. Kalaji, H. M. Frequently asked questions about chlorophyll fluorescence, the sequel / H. M. Kalaji, G. Schansker, M. Brestic [et al.] // *Photosynthesis Research*. – 2017. – Vol. 132. – P. 13–66.
23. Фотосинтетические пигменты и азот в талломах лишайников бореальной флоры / Т. К. Головки, О. В. Дымова, Г. Н. Табаленкова [и др.] // *Теоретическая и прикладная экология*. – 2015. – Т. 4. – С. 38–44.
24. Potts, M. Variation in phospholipid ester-linked fatty acids and carotenoids of desiccated *Nostoc commune* (Cyanobacteria) from different geographic locations / M. Potts, J. J. Olie, J. S. Nickels [et al.] // *Applied and Environmental Microbiology*. – 1987. – Vol. 53, № 1. – P. 4–9.
25. Горностаева, Е. А. Влияние ионов меди и никеля на почвенные цианобактерии и цианобактериальные сообщества : дис. ... канд. биол. наук / Е. А. Горностаева. – Москва, 2015. – 189 с.
26. Ладыгин, В. Г. Пути биосинтеза, локализация, метаболизм и функции каротиноидов в хлоропластах различных видов водорослей / В. Г. Ладыгин // *Вопросы современной альгологии*. – Пушино, 2015. – 87 с.
27. Bobzin, K. Influence of residual stresses in hard tool coatings on the cutting performance / K. Bobzin, T. Brögelmann, H. J. Maier [et al.] // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2021. – Vol. 69. – P. 340–350.
28. Matsubara, S. Short- and long-term operation of the lutein-epoxide cycle in light-harvesting antenna complexes / S. Matsubara, T. Morosinotto, C. B. Osmond, R. Bassi // *Plant Physiology*. – 2007. – Vol. 144, № 2. – P. 926–941.
29. Sandmann, G. Carotenoids and their biosynthesis in fungi / G. Sandmann // *Molecules*. – 2022. – Vol. 27, № 4. – 1431 p.
30. Aizpuru, A. Traditional and new trend strategies to enhance pigment contents in microalgae / A. Aizpuru, A. González-Sánchez // *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. – 2024. – Vol. 40, № 9. – 272 p.
31. Domonkos, I. Carotenoids, versatile components of oxygenic photosynthesis / I. Domonkos, M. Kis, Z. Gombos, B. Ughy // *Progress in Lipid Research*. – 2013. – Vol. 52, № 4. – P. 539–561.
32. Yuehui, Z. Roles of xanthophyll carotenoids in protection against photoinhibition and oxidative stress in the cyano-

bacterium *Synechococcus* sp. strain PCC 7002 / Z. Yuehui, E. Joel, M. L. Graham [et al.] // Archives of Biochemistry and Biophysics. – 2010. – Vol. 504, № 1. – P. 86–99.

33. Garbayo, I. Identification and physiological aspects of a novel carotenoid-enriched, metal-resistant microalga isolated from an acidic river in Huelva (Spain) (1) / I. Garbayo, R. Torronteras, E. Forján [et al.] // Journal of Phycology. – 2012. – Vol. 48, № 3. – P. 607–614.
34. Pasqualetti, M. Lutein production by *Coccomyxa* sp. SCCA048 isolated from a heavy metal-polluted river in Sardinia (Italy) / M. Pasqualetti, S. Tempesta, V. Malavasi [et al.] // Journal of Environmental Protection and Ecology. – 2015. – Vol. 16. – P. 1262–1272.
35. Hartung, W. The evolution of abscisic acid (ABA) and ABA function in lower plants, fungi and lichen / W. Hartung, J. Sachsplatz // Functional Plant Biology. – 2010. – Vol. 37, № 9. – P. 806–812.

References

1. Maslova, T. G. Funkcii karotinoidov v listyah vysshih rastenij (obzor) [Functions of carotenoids in leaves of higher plants (review)] / T. G. Maslova, E. F. Markovskaya, N. N. Stennev // Zhurnal obshchei biologii [Journal of General Biology]. – 2020. – Vol. 81, № 4. – P. 297–310.
2. Caferri, R. Assessing photoprotective functions of carotenoids in photosynthetic systems of plants and green algae / R. Caferri, Z. Guardini, R. Bassi, L. Dall'Osto // Methods Enzymology. – 2022. – Vol. 674. – P. 53–84.
3. Czczuga, B. Carotenoids from green-algae and cyanobacteria as phyco- and photobionts of *Peltigera* species / B. Czczuga, E. Czczuga-Semeniuk, O. Vitikainen, T. Ahti // Journal of the Hattori Botanical Laboratory. – 2024. – Vol. 96. – P. 281–290.
4. Dymova, O. V. Pigmentnyj kompleks rastenij v usloviyah tayozhnoj zony evropejskogo Severo-Vostoka (organizaciya i funkcionirovanie) [The pigment complex of plants in the conditions of the taiga zone of the European Northeast (organization and functioning): extended abstract of Doctor's thesis (Biology) / Dymova O. V. – Ufa, 2019. – 46 p.
5. Kotlova, E. R. Antiokislitelnye sistemy lishajnikov [Antioxidant systems of lichens]: extended abstract of Candidate's thesis (Biology) / Kotlova E. R. – Saint-Petersburg, 2000. – 34 p.
6. Vallese, C. Modelling range dynamics of terricolous lichens of the genus *Peltigera* in the Alps under a climate change scenario / C. Vallese, J. Nascimbene, P. Giordani [et al.] // Fungal Ecology. – 2020. – Vol. 49.
7. Tegler, B. Physiological-environmental interactions in lichens. XII. The seasonal variation of the heat stress response of *Cladonia rangiferina* / B. Tegler, K. A. Kershaw // The New Phytologist. – 1981. – Vol. 87, № 2. – P. 395–401.
8. Dyakov, M. Yu. Influence of extreme ambient temperatures and anaerobic conditions on *Peltigera aphthosa* (L.) Willd. viability / M. Yu. Dyakov, I. D. Insarova, D. E. Khara-badze [et al.] // Life Sciences in Space Research. – 2015. – Vol. 7. – P. 66–72.
9. Beckett, R. P. Stress physiology and the symbiosis / P. R. Beckett, I. Kranner, F. V. Minibayeva // Lichen Biology. – 2008. – P. 134–151.
10. Chen, K. Heat tolerance of the mycobionts and phycobionts from three desert lichens / K. Chen, J.-C. Wei // Mycosystema. – 2015. – Vol. 34, № 5. – P. 1007–1014.
11. Nascimbene, J. Epiphytic lichen diversity along elevational gradients: biological traits reveal a complex response to water and energy / J. Nascimbene, L. Marini // Journal of Biogeography. – Vol. 42. – P. 1222–1232.
12. Phinney, N. Photobiont-dependent humidity threshold for chlorolichen photosystem II activation / N. Phinney, K. A. Solhaug, Y. Gauslaa // Planta. – 2019. – Vol. 250.
13. Goltsev, V. N. Ispolzovanie peremennoj fluorescencii hlorofilla dlya ocenki fiziologicheskogo sostoyaniya fotosinteticheskogo apparata rastenij [The use of variable chlorophyll fluorescence for assessments of the physiological state of the photosynthetic apparatus of plants] / V. N. Goltsev, V. N. Kalaji, M. Paunov [et al.] // Plant Physiology. – 2016. – Vol. 63, № 6. – P. 881–907.
14. Takaichi, S. Unique carotenoids in the terrestrial cyanobacterium *Nostoc commune* NIES-24: 2-hydroxymyxol 2'-fucoside, nostoxanthin and canthaxanthin / S. Takaichi, T. Maoka, M. Mochimaru // Current Microbiology. – 2009. – Vol. 59. – P. 413–419.
15. Rumengan, A. Identification of pigment profiles and antioxidant activity of *Rhizophora mucronata* mangrove leaves origin Lembeh, North Sulawesi, Indonesia / A. Rumengan, E. Mandiangan, W. Tanod [et al.] // Biodiversitas [Journal of Biological Diversity]. – 2021. – Vol. 22.
16. Lichen Biology / ed. T. H. Nash III. – London : Cambridge University Press, 2008.
17. Chekanov, K. Spatial organization of the three-component lichen *Peltigera aphthosa* in functional terms / K. Chekanov, A. Feoktistov, E. Lobakova // Physiologia Plantarum. – 2017. – Vol. 160. – P. 328–338.
18. Goltsev, V. N. Variable chlorophyll fluorescence and its use for assessing physiological condition of photosynthetic apparatus / V. N. Goltsev, P. M. Russ, H. M. Kalaji [et al.] // Journal of Plant Physiology. – 2016. – Vol. 6. – P. 869–893.
19. Beckett, R. Photoprotection in lichens: adaptations of photobionts to high light / R. Beckett, F. Minibayeva, K. A. Solhaug, T. Roach // The Lichenologist. – 2021. – Vol. 53. – P. 21–33.
20. Golubkova, N. S. Otnoshenie lishajnikov k substratu i drugim faktoram vneshnej sredy [The relation of lichens to the substrate and other environmental factors] / N. S. Golubkova. – Moscow : Enlightenment, 1977. – 487 p.
21. Pokorska, B. Photoinhibition and D1 protein degradation in mesophyll and agranal bundle sheath thylakoids of maize / B. Pokorska, E. Romanowska // Functional Plant Biology. – 2007. – Vol. 34. – P. 844–852.
22. Kalaji, H. M. Frequently asked questions about chlorophyll fluorescence, the sequel / H. M. Kalaji, G. Schansker, M. Brestic [et al.] // Photosynthesis Research. – 2017. – Vol. 132. – P. 13–66.

23. Golovko, T. K. Fotosinteticheskie pigmenty i azot v tallo-mah лишайников boreal'noj flory [Photosynthetic pigments and nitrogen in the thallomas of lichens of the boreal flora] / T. K. Golovko, O. V. Dymova, G. N. Tabalenkova, T. N. Pystina // Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya [Theoretical and Applied Ecology]. – 2015. – Vol. 4. – P. 38–44.
24. Potts, M. Variation in phospholipid ester-linked fatty acids and carotenoids of desiccated *Nostoc commune* (Cyanobacteria) from different geographic locations / M. Potts, J. J. Olie, J. S. Nickels [et al.] // Applied and Environmental Microbiology. – 1987. – Vol. 53, № 1. – P. 4–9.
25. Gornostaeva, E. A. Vliyaniye ionov medi i nikelya na pochvennyye tsianobakterii i tsianobakterialnyye soobshchestva [The influence of copper and nickel ions on soil cyanobacteria and cyanobacterial communities] : Candidate's thesis (Biology) / Gornostaeva E. A. – Moscow, 2015. – 189 p.
26. Ladygin, V. G. Puti biosintezy, lokalizatsiya, metabolism i funktsii karotinoidov v hloroplastah razlichnykh vidov vodoroslej [Ways of biosynthesis, localization, metabolism and functions of carotenoids in chloroplasts of various types of algae] / V. G. Ladygin // Voprosy sovremen-noy algologii [Issues of Modern Algology]. – Pushchino, 2015. – 87 p.
27. Bobzin, K. Influence of residual stresses in hard tool coatings on the cutting performance / K. Bobzin, T. Brögelmann, H. J. Maier [et al.] // Journal of Manufacturing Processes. – 2021. – Vol. 69. – P. 340–350.
28. Matsubara, S. Short- and long-term operation of the lutein-epoxide cycle in light-harvesting antenna complexes / S. Matsubara, T. Morosinotto, C. B. Osmond, R. Bassi // Plant Physiology. – 2007. – Vol. 144, № 2. – P. 926–941.
29. Sandmann, G. Carotenoids and their biosynthesis in fungi / G. Sandmann // Molecules. – 2022. – Vol. 27, № 4. – 1431 p.
30. Aizpuru, A. Traditional and new trend strategies to enhance pigment contents in microalgae / A. Aizpuru, A. González-Sánchez // World Journal of Microbiology and Biotechnology. – 2024. – Vol. 40, № 9. – 272 p.
31. Domonkos, I. Carotenoids, versatile components of oxygenic photosynthesis / I. Domonkos, M. Kis, Z. Gombos, B. Ughy // Progress in Lipid Research. – 2013. – Vol. 52, № 4. – P. 539–561.
32. Yuehui, Z. Roles of xanthophyll carotenoids in protection against photoinhibition and oxidative stress in the cyanobacterium *Synechococcus* sp. strain PCC 7002 / Z. Yuehui, E. Joel, M. L. Graham [et al.] // Archives of Biochemistry and Biophysics. – 2010. – Vol. 504, № 1. – P. 86–99.
33. Garbayo, I. Identification and physiological aspects of a novel carotenoid-enriched, metal-resistant microalga isolated from an acidic river in Huelva (Spain) (1) / I. Garbayo, R. Torronteras, E. Forján [et al.] // Journal of Phycology. – 2012. – Vol. 48, № 3. – P. 607–614.
34. Pasqualetti, M. Lutein production by *Coccomyxa* sp. SCCA048 isolated from a heavy metal-polluted river in Sardinia (Italy) / M. Pasqualetti, S. Tempesta, V. Malavasi [et al.] // Journal of Environmental Protection and Ecology. – 2015. – Vol. 16. – P. 1262–1272.
35. Hartung, W. The evolution of abscisic acid (ABA) and ABA function in lower plants, fungi and lichen / W. Hartung, J. Sachsplatz // Functional Plant Biology. – 2010. – Vol. 37, № 9. – P. 806–812.

Благодарность (госзадание):

Работа выполнена в рамках выполнения государственного задания ФИЦ Казанского научного центра РАН (оценка фотосинтетической активности лишайников), а также при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 22-14-00362 (рук. Ю. Н. Валитова, идентификация и анализ содержания фотосинтетических пигментов лишайников).

Acknowledgements (state task):

The work was performed within the frames of the state task of the Federal Research Centre, Kazan Science Centre of the Russian Academy of Sciences (assessment of the photosynthetic activity of lichens) and with financial support of the grant of the Russian Science Foundation № 22-14-00362 (supervised by J. N. Valitova, identification and analysis of the content of photosynthetic pigments in lichens).

Информация об авторах:

Хайруллина Айсылу Фаридовна – магистрант, лаборант-исследователь лаборатории окислительно-восстановительно-го метаболизма Казанского института биохимии и биофизики ФИЦ КазНЦ РАН; <https://orcid.org/0009-0009-5349-604X> (420111, Российская Федерация, г. Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31; e-mail: a16280110@gmail.com).

Хабибрахманова Венера Равиловна – кандидат химических наук, доцент кафедры пищевой биотехнологии Казанского национального исследовательского технологического университета (420015, Российская Федерация, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 68), старший научный сотрудник лаборатории окислительно-восстановительного метаболизма Казанского института биохимии и биофизики ФИЦ КазНЦ РАН; <https://orcid.org/0000-0002-0969-7591> (420111, Российская Федерация, г. Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31; e-mail: venerakhabirakhmanova@gmail.com).

Рахматуллина Дания Фаритовна – кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории окислительно-восстановительного метаболизма Казанского института биохимии и биофизики ФИЦ КазНЦ РАН; <https://orcid.org/0000-0002-8237-2929> (420111, Российская Федерация, г. Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31; e-mail: rd137@mail.ru).

Галеева Екатерина Инсафовна – кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории окислительно-восстановительного метаболизма Казанского института биохимии и биофизики ФИЦ КазНЦ РАН; <https://orcid.org/0000-0002-5827-6339> (420111, Российская Федерация, г. Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31; e-mail: kgu@mail.ru).

Гурьянов Олег Петрович – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории окислительно-восстановительного метаболизма Казанского института биохимии и биофизики ФИЦ КазНЦ РАН; <https://orcid.org/0009-0002-9946-9150> (420111, Российская Федерация, г. Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31; e-mail: gurjanov58@gmail.com).

Бекетт Питер Ричард – профессор, PhD, Школа наук о жизни, Университет КваЗулу-Натал (Южно-Африканская Республика, г. Скоттсвилл, 3209, а/я X01; email: rpbeckett@gmail.com).

Минибаяева Фарида Вилевна – доктор биологических наук, заведующий лаборатории окислительно-восстановительного метаболизма Казанского института биохимии и биофизики ФИЦ КазНЦ РАН; <https://orcid.org/0000-0003-0827-181X> (420111, Российская Федерация, г. Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31; e-mail: fminibayeva@gmail.com).

Валитова Юлия Наилевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории окислительно-восстановительного метаболизма Казанского института биохимии и биофизики ФИЦ КазНЦ РАН; <https://orcid.org/0000-0003-3486-9989> (420111, Российская Федерация, г. Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31; e-mail: yulavalitova@mail.ru).

About the authors:

Aisylu F. Khajrullina – Master's Degree Student, Laboratory Researcher at the Laboratory of Redox Metabolism of the Kazan Institute of Biochemistry and Biophysics, Kazan Science Centre of the Russian Academy of Sciences; <https://orcid.org/0009-0009-5349-604X> (2/31 Lobachevsky str., Kazan, 420111, Russian Federation; e-mail: a16280110@gmail.com).

Venera R. Khabibrakhmanova – Candidate of Sciences (Chemistry), Associate Professor at the Department of Food Biotechnology at the Kazan National Research Technological University, Senior Researcher at the Laboratory of Redox Metabolism of the Kazan Institute of Biochemistry and Biophysics, Kazan Science Centre of the Russian Academy of Sciences; <https://orcid.org/0000-0002-0969-7591> (2/31 Lobachevsky str., Kazan, 420111, Russian Federation; e-mail: venerakhabirakhmanova@gmail.com).

Daniya F. Rakhmatullina – Candidate of Sciences (Biology), Researcher at the Laboratory of Redox Metabolism of the Kazan Institute of Biochemistry and Biophysics, Kazan Science Centre of the Russian Academy of Sciences; <https://orcid.org/0000-0002-8237-2929> (2/31 Lobachevsky str., Kazan, 420111, Russian Federation; e-mail: rd137@mail.ru).

Ekaterina I. Galeeva – Candidate of Sciences (Biology), Researcher at the Laboratory of Redox Metabolism of the Kazan Institute of Biochemistry and Biophysics, Kazan Science Centre of the Russian Academy of Sciences; <https://orcid.org/0000-0002-5827-6339> (2/31 Lobachevsky str., Kazan, 420111, Russian Federation; e-mail: kgu@mail.ru).

Oleg P. Guryanov – Candidate of Sciences (Biology), Senior Researcher at the Laboratory of Redox Metabolism of the Kazan Institute of Biochemistry and Biophysics, Kazan Science Centre of the Russian Academy of Sciences; <https://orcid.org/0009-0002-9946-9150> (2/31 Lobachevsky str., Kazan, 420111, Russian Federation; e-mail: gurjanov58@gmail.com).

Richard Peter Beckett – Professor, PhD, School of Life Sciences, University of KwaZulu-Natal, Private Bag X01, Scottsville 3209, Republic of South Africa; <https://orcid.org/0000-0002-0530-4244> (e-mail: rpbeckett@gmail.com).

Farida V. Minibayeva – Doctor of Sciences (Biology), Head of the Laboratory of Redox Metabolism of the Kazan Institute of Biochemistry and Biophysics, FRC Kazan Science Centre of the Russian Academy of Sciences; <https://orcid.org/0000-0003-0827-181X> (2/31 Lobachevsky str., Kazan, 420111, Russian Federation; e-mail: fminibayeva@gmail.com).

Julia N. Valitova – Candidate of Sciences (Biology), Senior Researcher at the Laboratory of Redox Metabolism of the Kazan Institute of Biochemistry and Biophysics, Kazan Science Centre of the Russian Academy of Sciences; <https://orcid.org/0000-0003-3486-9989> (2/31 Lobachevsky str., Kazan, 420111, Russian Federation; e-mail: yulavalitova@mail.ru).

Для цитирования:

Хайруллина, А. Ф. Изменение фотосинтетической активности и содержания хлорофиллов и каротиноидов в лишайниках *Peltigera canina* и *Peltigera aphthosa* при действии повышенной температуры / А. Ф. Хайруллина, В. Р. Хабибрахманова, Д. Ф. Рахматуллина [и др.] // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Экспериментальная биология и экология». – 2024. – № 9 (75). – С. 18–29.

For citation:

Khajrullina, A. F. Izmenenie fotosinteticheskoy aktivnosti i sodержaniya hlorofillov i karotinoidov v lishajnikah *Peltigera canina* i *Peltigera aphthosa* pri dejstvii povyshennoj temperatury [Changes in the photosynthetic activity and content of chlorophylls and carotenoids in the *Peltigera canina* and *Peltigera aphthosa* lichens under the action of elevated temperature] / A. F. Khajrullina, V. R. Khabibrakhmanova, D. F. Rakhmatullina, E. I. Galeeva, O. P. Guryanov [et al.] // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series "Experimental Biology and Ecology". – 2024. – № 9 (75). – P. 18–29.

Дата поступления статьи: 13.09.2024

Прошла рецензирование: 26.09.2024

Принято решение о публикации: 04.10.2024

Received: 13.09.2024

Reviewed: 26.09.2024

Accepted: 04.10.2024

Созологический анализ как возможный инструмент ведения лихенологических разделов Красных книг

Е. Э. Мучник

Институт лесоведения Российской академии наук,
с. Успенское, г. Одинцово, Московская обл.
emuchnik@outlook.com

Аннотация

Разработаны основы созологического анализа лишайников для формирования списков нуждающихся в охране видов, определения их природоохранного статуса и последующего ведения региональных Красных книг. Анализ полезен в случаях недостатка сведений по распространению, количественных показателей и структуре популяций предлагаемых к охране видов. Адаптированная для лишайников созологическая матрица включает биологические, экологические, биогеографические, созологические и экономические (хозяйственные) признаки. В качестве апробации метода произведен расчет созологического индекса для четырех видов лишайников, включенных в новый список охраняемых видов России, и двух обычных, широко распространенных видов. Представлено примерное соотношение показателей комплексной созологической оценки и категорий, принятых в Международной и национальной Красных книгах.

Ключевые слова:

лишайники, охраняемые виды, критерии отбора видов для охраны, созологическая матрица, природоохранная биология

Созология (от греч. *sozo* – охранять) – созологическая экология, созиэкология – отрасль общей экологии, разрабатывающая научные основы охраны экосистем, биоценозов, отдельных видов и популяций растений и животных. Термин был введен в науку польским геологом и экологом W. Goetel в 1966 г. [1]. L. Gawor в статье, посвященной жизни и научным исследованиям В. Гетеля, характеризует это как создание автономной междисциплинарной отрасли науки, связанной с защитой окружающей среды [2]. Суть идеи заключалась в определении предмета предполагаемой отраслевой науки, который включал бы в себя охрану как природной, так и социальной среды, что стало большим прорывом и сегодня является неоспоримой аксиомой экологии, экофилософии, изучения защиты жизни человека в окружающей среде и идеи устойчивого развития. Современным и более всеобщепотребительным аналогом является термин «Природоохранная биология»,

The sozological analysis as a possible tool for compiling lichenological parts of Red Data Books

E. E. Muchnik

Institute of Forest Science of the Russian Academy of Sciences,
Uspenskoe village, Odintsovo town, Moscow region
emuchnik@outlook.com

Abstract

The article highlights the principles of sozological analysis of lichens to form lists of threatened species, determination of their conservation status, and subsequent inclusion into regional Red Data Books. The analysis is useful when we lack information on distribution, quantitative indicators, and population structure of species to be protected. The lichen-adapted sozological matrix includes biological, ecological, biogeographical, sozological and economic characters. To appraise the method, we calculated the sozological index for four lichen species included into the new list of protected species of Russia and two common widespread lichens. The article demonstrates an approximate correlation between the indices of complex sozological assessment and the categories adopted in the International and national Red Data Books.

Keywords:

lichens, protected species, criteria for selecting species for protection, sozological matrix, nature conservation biology

или «Биология охраны природы» (Conservation Biology). Основы науки с этим названием опубликовали М. Е. Soule и В. А. Wilcox в 1980 г. [3], впоследствии она получила широкое признание [4, 5 и др.].

Заметим, что во второй половине XX в. идеи такого рода буквально «витали в воздухе». В 1965 г. эколог G. E. Hutchinson сравнил живую природу с «экологическим театром», на сцене которого происходит «спектакль эволюции» [6]. Эта метафора определяет миссию созологии/природоохранной биологии: «... сохранить актеров в этом спектакле эволюции и экологическую сцену, на которой происходит игра» [4]. В начале 1960-х гг. Международным союзом охраны природы (МСОП, IUSN) учреждена первая Международная Красная книга («The IUSN Red List»), что в дальнейшем инициировало процесс создания Красных книг («редлистинг») от национальных до региональных и даже муниципальных. Первое издание Международной

Красной книги включало только позвоночных животных, в дальнейшем «спектр» предлагаемых к охране организмов постепенно расширялся, включая беспозвоночных животных, сосудистые растения, грибы и др. [7]. Следует отметить, что, по сравнению с первыми выпусками, концепция «The IUSN Red List» существенно изменилась. Если ранее это издание содержало сведения исключительно о видах, находящихся под угрозой исчезновения и нуждающихся в специальных мерах охраны, то на сегодня одной из важнейших задач считается оценка всех существующих ныне видов организмов. Данный факт, а также научно-рекомендательный характер определяет основные отличия «The IUSN Red List» от Красных книг (всех уровней – от федерального до муниципального) в нашей стране.

Лишайник впервые появляется в Международной Красной книге в 2003 г. по предложению С. Scheidegger [8], это вид *Erioderma pedicellatum* (Hue) P. M. Jørg. с категорией CR (Critically Endangered – находящийся под критической угрозой исчезновения). К настоящему моменту «The IUSN Red List» включает 139 видов лишайников, 84 из которых относятся к «угрожаемым» категориям – CR, EN (Endangered – исчезающие) и VU (Vulnerable – уязвимые) [7].

В СССР первое издание Красной книги вышло в 1978 г. [9], но лишайники не были в нем представлены. В количестве 29 видов они появляются во втором издании 1984 г. [10] и те же виды включены в Красную книгу РСФСР 1988 г. [11]. В Красную книгу Российской Федерации 2008 г. [12] занесены 42 вида лишайников, а в планируемом новом издании [13] их число возросло до 75 (рис. 1).



Рисунок 1. Динамика представленности лишайников в Красных книгах СССР и России.

Figure 1. Dynamics of lichen species included in the Red Data Books of the USSR and Russia.

Во всех 89 субъектах Российской Федерации на сегодня разработаны и действуют региональные Красные книги, лихенологический раздел отсутствует только в девяти из них, еще в нескольких регионах списки охраняемых лишайников включают не более пяти видов. Отметим, что большинство имеющихся региональных списков охраняемых видов лишайников базируются на очень разных критериях и принципах, от собственных разработок до критериев МСОП. Применение последних на региональном уровне вполне возможно и целесообразно, в том числе для криптогамных организмов [14], а согласно новому положению о Красной книге Российской Федерации [13], для издания федерального уровня является обязательным.

Однако существует ряд причин, по которым в России применение критериев МСОП для лишайников, особенно на региональном уровне, затруднительно. Объективные: крайне неравномерная изученность в лихенологическом отношении российских регионов, острый недостаток специалистов, а также разница юридического статуса «The IUSN Red List» и Красных книг в России, являющихся федеральным либо региональным (изредка и муниципальным, для городов федерального подчинения) законом, неисполнение которого подразумевает гражданскую/административную и вплоть до уголовной ответственности. Если первые две причины не требуют пояснений, то последняя определяет некоторые административные требования к объектам, включаемым в Красную книгу (в особенности, максимальная узнаваемость и возможность точной идентификации с наименьшими затратами). Кроме того, зачастую специалистам, составляющим списки «угрожаемых» видов, администрации регионов ставят ограничения по количеству включаемых в Красные книги объектов. Это вынуждает заносить в списки охраняемых так называемые «виды-зонтики» – не самые редкие, достаточно крупные и легко узнаваемые в природе макролишайники, как правило, произрастающие в группировках с нуждающимися в охране редкими, но малозаметными микролишайниками, идентификация которых без специалиста-лихенолога сложна либо невозможна.

Субъективные причины: отсутствие единого «общепринятого» мнения лихенологов по определению понятий «индивидуум», или «особь», «половозрелая особь», «популяция», «фрагментация ареала» и др. Все эти понятия фигурируют в критериях МСОП, но их оценка требует не только «договоренности» всех региональных специалистов по определению понятий, но и разработки «общих» методик количественных учетов для видов разных жизненных форм. Популяционная экология лишайников – сравнительно новое, развивающееся около 30 лет направление, за этот период изучены всего нескольких десятков видов, преимущественно кустистых или листоватых экоморф [15–21 и др.]. Большинство исследований относится к наиболее распространенным массовым лишайникам, лишь незначительная часть публикаций [18–20 и др.] касается редких или охраняемых видов из разных стран мира и российских регионов.

Здесь уместно привести цитату из монографии Г. К. Meffe с соавторами [4, цит. по: 22, с. 19, переводной версии 2004 г., ред.: И. Э. Смелянский, И. И. Любечанский]: «У специалистов по биологии охраны природы часто запрашивают информацию различные структуры, которые занимаются такими вопросами, как создание охраняемых территорий, последствия интродукции видов, распространение редких и находящихся под угрозой видов, экологическая экспертиза. Эти вопросы обычно политически и экономически важны, и решения не могут ждать детальных исследований, занимающих месяцы и годы. “Эксперт” должен предоставить быстрые, ясные и точные ответы (что, конечно, обычно невозможно). На него смотрят с неудовольствием, если его ответы не удовлетворяют “заказчика” или противоречат краткосрочной экономической

выгоде. Таким специалистам постоянно приходится балансировать между строгой научной достоверностью, которая добывается ценой порой фатального промедления, или рекомендовать действовать, основываясь на общих соображениях и неполной информации и рискуя своей научной репутацией».

В таких условиях оптимальным решением при подготовке лихенологических разделов региональных Красных книг будет использование комплексного созологического анализа [23, 24], уже апробированного в нескольких регионах для оценки подлежащих охране видов насекомых, птиц, сосудистых растений и водорослей [25–28 и др.]. Данная публикация представляет собой попытку разработки основ созологического анализа лишайников для формирования списков нуждающихся в охране видов, определения их природоохранного статуса и последующего ведения региональных Красных книг. Анализ полезен в случаях недостатка сведений по распространению, количественных показателей и структуре популяций предлагаемых к охране видов.

Изначально авторами методики [23] постулированы общие принципы отбора таксонов для охраны, порядок которых несколько изменен в связи со значимостью и возможностями применения их по отношению к лишайникам, как объектам анализа:

1. Биологический принцип. Характеризует структуру и динамику природных популяций редких таксонов и их репродуктивную возможность. Этот принцип во многом определяет статус сохранности таксона, но ввиду упомянутой выше сложности и недостатка методических разработок в популяционной экологии лишайников, в большинстве случаев будет опираться на данные о количестве местонахождений вида в регионе и комплексный показатель его обилия/встречаемости в типичных экотопах.

2. Экологический принцип. Позволяет оценить степень уязвимости среды обитания таксона (или устойчивость биотопа к различным антропогенным воздействиям) и классифицировать таксоны по специфичности местообитания, эколого-ценотической амплитуде. Качественное состояние среды обитания во многом определяет сохранность вида. Для лишайников, используемых традиционно в экологическом мониторинге, этот принцип исключительно важен и обязателен для применения.

3. Биогеографический (хорологический) принцип. Учитывает структуру и топографию общего ареала таксона. Каждый таксон, рассматриваемый как кандидат в Красную книгу, должен удовлетворять одному из четырех качеств: эндемизм, изолированность от основного ареала, обитание на границе или внутри ареала. Первые три качества (эндемизм, изолированность, граничность) являются предпочтительными при выборе таксонов для охраны.

4. Созологический принцип. Учитывает принадлежность таксона к Красным книгам высшего ранга [7, 13, 29] и регионального уровня (списки охраняемых растений и животных природоохраненных регионов, субъектов Российской Федерации, административных районов), а также к спискам международных Конвенций по охране растений и животных.

5. Хозяйственно-экономический принцип. Учитывает ресурсно-хозяйственную ценность таксона, полезные свойства, а также возможность его практического использования в различных отраслях промышленности, сельского хозяйства, бытовой деятельности человека.

6. Биогенетический принцип. Учитывает принадлежность редкого таксона к одному из биомов: бореальному (таежному), неморальному, лесостепному, степному, пустынному. Значимость таксона возрастает по мере несоответствия условий современного существования таксона и условий его исторического ареала.

7. Филогенетическо-таксономический принцип. Устанавливает положение вида в системе растительного и животного мира (выявление филогенетической древности таксона) и указывает на монотипность или политипность таксона в системе рода, семейства и т. д. Анализ этих сведений позволяет глубже рассмотреть вопросы как филогенетической, так и биогеографической реликтовости и оценить возраст формирования таксона.

Два последних принципа на современном этапе развития лихенологии использовать довольно сложно. Данных о географии лишайников недостаточно, в то же время широкое распространение (и иногда одновременно редкая встречаемость!) многих видов не дает возможности определения наиболее характерного для них биома. Что же касается положения большого числа таксонов лишайников в системе грибов, то этот показатель в последние годы стремительно меняется, результаты таксономического анализа могут устареть даже за время от написания статьи до ее опубликования. Поэтому адаптированная нами для лишайников «матрица Саксонова-Розенберга» (табл. 1) включает биологические, экологические, биогеографические, созологические и экономические (хозяйственные) признаки [30].

Обоснование системы удельных «весов признаков» является наиболее сложным методическим вопросом. Здесь, по аналогии с нумерической таксономией [31], «взвешивание признаков» при построении различных оценочных созологических матриц субъективно и опирается на экспертные оценки. Выразим согласие с мнением А. В. Лагунова, что «установление некоторой градации "веса признака" все же имеет некоторые преимущества перед простым уравниванием всех используемых признаков (что нередко применялось в нумерической таксономии), поскольку интуитивно устанавливает логические отношения между разными по созологической значимости группами критериев, вовлеченных в анализ» [24, с. 71].

Приведем некоторые обоснования присвоенных конкретным признакам «весовых характеристик» в баллах. Поскольку вопрос редкости/обычности по отношению к видам является одним из ключевых при выборе объектов охраны, в первом блоке (позиции 1–2) с максимальным «весом» в 5 баллов размещены признаки, отвечающие биологическому принципу отбора таксонов для охраны: «количество местообитаний в регионе» и «встречаемость/обилие видов в типичных местообитаниях». Здесь следует учитывать то обстоятельство, что редкие виды можно

Шкала созологической оценки видов лишайников (по [22] с изменениями)

Table 1

Scale of sozological assessment of lichen species (according to [22] with modifications)

№	Созологический признак	Вес признака (баллы)	Созологическая оценка признака, баллы			
			1	2	3	4
1	Количество местонахождений в регионе	5	более 25	11–25	4–10	1–3
2	Встречаемость/обилие вида в типичных экотопах	5	доминирует	обычен	редок	очень редок
3	Антропотолерантность	4	очень высокая	высокая	средняя	низкая
4	Эколого-ценотическая амплитуда	4	эвритон	гемизэвритон	гемистенотон	стенотон
5	Биогеографическая значимость	3	вид в пределах сплошного ареала	вид в пределах прерывистого ареала	вид на границе ареала	вид за пределами ареала (анклав, рефугиум)
6	Топография ареала	3	межконтинентальный вид	континентальный вид	эндемик	узколокальный эндемик
7	Официальный природоохранный статус	2	отсутствует	включен в Красные книги сопредельных регионов	включен в Красную книгу РФ	включен в IUCN Red List / The Global Fungal Red List
8	Территориальная защищенность (наличие на ООПТ)	2	на ООПТ федерального уровня с комплексным режимом охраны	на ООПТ регионального уровня с комплексным режимом охраны	на непрофильных ООПТ	отсутствует на ООПТ
9	Возможность трансплантации/культивирования	1	высокая, апробирована	средняя, не апробирована	низкая	отсутствует
10	Хозяйственное/практическое значение	1	отсутствует	низкое	среднее	высокое

условно разделить на две группы. Первая – естественно редкие виды (как правило, с дисперсным распространением), которые благодаря высокой адаптированности к среде обитания могут при низкой численности достаточно долго существовать в природе (статические виды по терминологии В. Е. Флинта и В. Е. Присяжнюка [32]). Вторая – виды с сокращающейся численностью, они более уязвимы при флуктуациях условий жизни, и их исчезновение более вероятно при сравнительно высоких показателях численности (динамические виды [там же]).

Для лишайников, как организмов с отсутствием физиологических механизмов регуляции температуры и влажности, часто очень чувствительных к факторам загрязнения среды или просто изменениям условий обитания, важны и такие показатели, как эколого-ценотическая амплитуда («ширина экологической ниши») и антропотолерантность. Во втором блоке созологической матрицы учтены эти признаки с «весом» 4. Низкая экологическая валентность вида часто приводит к резкому сужению возможности распространения и «изолирует» вид в узком наборе местообитаний (например, многие виды лишайников-индикаторов старовозрастных лесных сообществ). При исчезновении этих местообитаний неизбежно исчезают приуроченные к ним виды. А показатель антропогенной толерантности является важной характеристикой, влияющей на степень устойчивости видов в современных условиях среды, что необходимо учитывать при установлении категории охраны вида [23, 24, 28 и др.].

Третий блок (с «весом» признака 3) содержит ареалогические характеристики. Методы ареалогического анализа традиционно применяются в созологических исследованиях [33, 34, и др.]. Очевидно, что наиболее уязвимы

виды, имеющие узкие ареалы и/или находящиеся в анализируемом регионе на границе ареала либо в рефугиуме.

Расположенный в четвертом блоке (с «весом» признака 2) статус вида в красных списках различного ранга и степень его защищенности федеральной либо региональной сетью ООПТ относятся, с одной стороны, к правовым аспектам охраны видов (Красные книги и особо охраняемые природные территории), с другой – к основному инструменту сохранения видов – территориальной охране.

Наконец, с минимальным «весом» в матрице учтены и другие созологически значимые признаки: возможность трансплантации/культивирования и хозяйственное/практическое значение. Трансплантация как метод хорошо апробирована в целях биомониторинга [35], но опытов по трансплантации редких и охраняемых видов лишайников сравнительно немного [18, 36–38 и др.]. Культивирование, за исключением научных экспериментов, в основном, осуществляется в практических целях – для получения биологически активных веществ [39, 40 и др.]. Возможно, в перспективе такие методы будут использоваться более широко для восстановления популяций редких видов.

В зависимости от уровня изученности лишайнобиоты региона в шкалу можно вводить и другие признаки (с «весом» на усмотрение эксперта), например данные о динамике численности, возрастной структуре, состоянии (жизненности) популяций вовлеченных в анализ видов. Однако все анализируемые виды должны быть оценены по одинаковому количеству признаков.

Для расчета созологического индекса (S_j) вида «вес» каждого признака нужно умножить на его балльную оценку и сложить все полученные значения. В качестве апро-

бации метода нами произведен расчет созологического индекса для четырех аридных видов лишайников, включенных в новый список охраняемых видов России, и двух самых обычных и наиболее распространенных на территории нашей страны (табл. 2).

В результате наибольшим значением S_i характеризуются виды, взятые под охрану на федеральном уровне. Лидирует *Circinaria tominii*, в списке имеющий категорию 1 КР и соответствующий по шкале IUCN категории CR, для остальных трех видов значения S_i распределились по убыванию: *C. esculenta* – 90; *C. affinis* – 84; *Seiophora lacunosa* – 77. Заметим, что все перечисленные виды, согласно критериям IUCN, относятся к категории VU, но *C. esculenta* и *S. lacunosa* в национальном списке имеют категорию 2 У, а *C. affinis* – 3 У, что может быть вызвано как некоторым недостатком данных на этапе подготовки списка, так и субъективностью оценки.

Для сравнения, S_i одного из самых обычных и наиболее распространенных на территории России лишайников – *Hypogymnia physodes* – равен 44, а такого же распространенного, но еще и с более высокой степенью антропо-толерантности *Phaeophyscia orbicularis* – 31, что составляет значительный «отрыв» в баллах от оцененных выше

охраняемых видов. Этот факт косвенно подтверждает объективность предложенной методики.

На следующем этапе созологического анализа интегральные оценки видов могут быть разбиты на три группы с применением равномерной ограниченной шкалы: угрожаемые виды (интервал 90–120 баллов), редкие (60–89) и не угрожаемые виды (менее 60 баллов). Категорию «Редкие виды» дополнительно можно разделить на относительно редкие (оценка в диапазоне 60–74) и очень редкие (75–89). Условно эти оценки можно сопоставить с категориями статуса, применяемыми в Международной Красной книге («The IUSN Red List») [7], а также в национальной [14] и большинстве региональных Красных книг нашей страны (рис. 2).

Поскольку при выделении категорий природоохранного статуса в процессе редлистинга и проведении комплексной созологической оценки используются несколько различные подходы и критерии, приведенное на рис. 2 соотношение показателей является не жестким, а относительным.

В заключение отметим, что созологический анализ – универсальный и гибкий инструмент, использование которого может облегчить работу по формированию списков

Оценочная созологическая матрица нескольких видов, занесенных в Красную книгу Российской Федерации [14], и обычных, широко распространенных видов без охранного статуса

Scoring sozological matrix of several species listed in the Red Data Book of the Russian Federation [14] and common widespread species without conservation status

Вид	Номер созологического признака / «вес» x балльная оценка										S_i
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
<i>Circinaria affinis</i> (Eversm.) Sohrabi	15	10	16	16	9	6	6	2	2	2	84
<i>C. esculenta</i> (Pall.) Sohrabi	15	15	16	16	9	6	6	2	2	2	90
<i>C. tominii</i> (Oxner) Sohrabi	20	20	16	16	4	12	6	8	1	1	104
<i>Seiophora lacunosa</i> (Rupr.) Fröden	10	15	16	16	6	3	6	2	2	1	77
<i>Hypogymnia physodes</i> (L.) Nyl.	5	5	12	8	3	3	2	2	2	3	44
<i>Phaeophyscia orbicularis</i> (Neck.) Moberg	5	5	4	4	3	3	2	2	2	1	31

Таблица 2

Table 2

охраняемых видов и дальнейшему ведению региональных Красных книг применительно не только к лишайникам, но и другим недостаточно изученным во многих российских регионах группам организмов. Необходимо лишь адаптировать исходную созологическую матрицу с учетом биозоологических особенностей каждой группы.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Источники и литература

- Goetel, W. Sozologia – nauka o ochronie przyrody i jej zasobów / W. Goetel // Kosmos. – 1966. – Vol. 15, N. 5. – P. 473–482.
- Gawor, L. Walery Goetel and the idea of sozology / L. Gawor // Problemy ekorozwoju – problems of sustainable development. – 2013. – Vol. 8, N 1. – P. 83–89.
- Soule, M. E. Conservation Biology. An Evolutionary-Ecological Perspective / M. E. Soule, B. A. Wilcox. – Massachusetts : Sinauer Associates, 1980. – 395 p.
- Principles of Conservation Biology / G. K. Meffe, C. R. Carroll [et al.] – Sunderland : Sinauer Associates, 1997. – 729 p.
- Primack, R. B. Essentials of Conservation Biology / R. B. Primack. – Oxford University Press, 2014. – 603 p.
- Hutchinson G. E. The ecological theater and the evolutionary play / G. E. Hutchinson. – New Haven, London : Yale University Press, 1965. – 178 p.
- The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2024-1. – URL: <https://www.iucnredlist.org> (date of access: 06.08.2024)

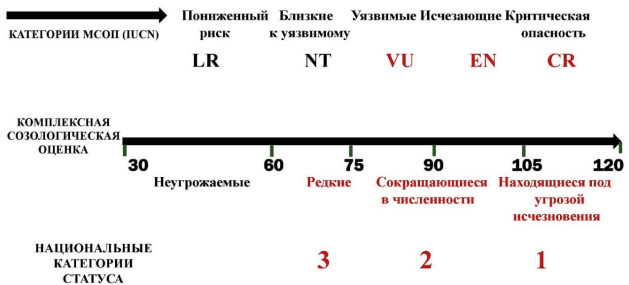


Рисунок 2. Примерное соотношение показателей комплексной созологической оценки и категорий, принятых в Международной [7] и национальной [14] Красных книгах.

Figure 2. Approximate correlation between the complex sozological assessment indicators and categories adopted in the International [7] and national [14] Red Data Books.

8. Scheidegger, C. *Erioderma pedicellatum* / C. Scheidegger // The IUCN Red List of Threatened Species 2003: e.T43995A10839336. – URL: <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2003.RLTS.T43995A10839336.en>. (date of access: 06.08.2024)
9. Красная книга СССР. Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды животных и растений / отв. ред. А. Г. Банников. – Москва : Лесная промышленность, 1978. – 459 с.
10. Красная книга СССР. Т. 2 / отв. ред. А. М. Бородин [и др.]. – Изд. 2-е перераб. и доп. – Москва : Лесная промышленность, 1984. – 480 с.
11. Красная книга РСФСР. Растения / гл. редкол.: А. Л. Тахтаджян (отв. ред.) [и др.]. – Москва : Росагропромиздат, 1988. – 590 с.
12. Красная книга Российской Федерации. Растения и грибы / гл. редкол.: Ю. П. Трутнев (пред.); отв. ред.: Л. В. Бардунов, В. С. Новиков. – Москва : Товарищество научных изданий КМК, 2008. – 855 с.
13. Заварзин, А. А. Возможности применения глобальных категорий и критериев Красного списка Всемирного Союза Охраны Природы на региональном уровне / А. А. Заварзин, Е. Э. Мучник // Ботанический журнал. – 2005. – Т. 90, № 1. – С. 105–118.
14. Об утверждении перечня объектов растительного мира, занесенных в Красную книгу Российской Федерации / Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 23 мая 2023 г. № 320 (зарегистрирован Министерством юстиции Российской Федерации 21 июля 2023 г.).
15. Плюснин, С. Н. Популяционная изменчивость стереокаулона альпийского в тундровых экосистемах (анализ морфометрических данных) : доклад на заседании Президиума Коми научного центра УрО РАН / С. Н. Плюснин. – Сыктывкар, 2003. – 30 с.
16. Суетина, Ю. Г. Популяционный подход в лишеноиндикации / Ю. Г. Суетина // Экологический мониторинг. Методы биологического и физикохимического мониторинга. Часть VI : учебное пособие. – Нижний Новгород : Изд-во ННГУ, 2006. – С. 274–306.
17. Mikhailova, I. N. Populations of epiphytic lichens under stress conditions: survival strategies / I. N. Mikhailova // The Lichenologist. – 2007. – Vol. 39, N 1. – P. 83–89. – DOI:10.1017/S0024282907006305
18. Lidén, M. Restoration of endangered epiphytic lichens in fragmented forest landscapes: the importance of habitat quality and transplantation techniques. PhD Dissertation / M. Lidén. – Department of Forest Ecology and Management Acta Universitatis agriculturae Sueciae. Umeå : SLU, Arkitektkopia, 2009. – 46 p.
19. Суетина, Ю. Г. Онтогенез и морфогенез кустистого лишайника *Usnea florida* (L.) Weber ex F. H. Wigg. / Ю. Г. Суетина, Н. В. Готов // Онтогенез. – 2010. – Т. 41, № 1. – С. 32–40.
20. Ignatenko, R. V. The population structure of the lichen *Lobaria pulmonaria* in the middle boreal forests depends on the time-since-disturbance/ R.V. Ignatenko, V. N. Tarasova // Folia Cryptog. Estonica. – 2017. – Fasc. 54. – P. 83–94. – DOI: 10.12697/fce.2017.54.13
21. Суетина, Ю. Г. Морфологическая пластичность и структура популяции лишайника *Pseudevernia furfuracea* (L.) Zopf в изменяющихся условиях среды / Ю. Г. Суетина // Вестник Оренбургского государственного педагогического университета. – 2021. – № 3 (39). – С. 75–89.
22. Основы природоохранной биологии / Г. Мэффи, Р. Кэрролл [и др.]. – Новосибирск : Сибирский экологический центр, 2004. – 690 с.
23. Саксонов, С. В. Организационные и методические аспекты ведения региональных Красных книг / С. В. Саксонов, Г. С. Розенберг. – Тольятти : Ин-т экологии Волжского бассейна, 2000. – 164 с.
24. Лагунов, А. В. «Краснокнижные» виды в заповедниках и парках. Комплексный созологический анализ – удобный инструмент для локального редлистинга особо охраняемых природных территорий / А. В. Лагунов // Исследование природы лесных растительных сообществ на заповедных территориях Урала : статьи межрегиональной научно-практической конференции : г. Екатеринбург (14–15 ноября 2012 г.). – Екатеринбург, 2012. – С. 69–78.
25. Лагунов, А. В. Редкие чешуекрылые Ильменского заповедника: созологический анализ / А. В. Лагунов // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2009. – № 10, спецвыпуск, Ч. 1. – С. 98–100.
26. Захаров, В. Д. Применение созологического анализа при определении степени уязвимости редких птиц Челябинской области / В. Д. Захаров // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13, № 1 (5). – С. 1102–1105.
27. Лагунов, А. В. Созологический анализ видов рода *Scorzonera* L. Челябинской области / А. В. Лагунов, С. А. Лесина, Е. В. Коротева // Вестник Оренбургского государственного педагогического университета. – 2016. – № 2 (18). – С. 64–71.
28. Кондратьева, Н. В. Первоочередные задачи альгосозологических исследований / Н. В. Кондратьева // Альгология. – 1994. – Т. 4, № 3. – С. 3–15.
29. The Global Fungal Red List. – URL: https://redlist.info/iucn/species_view/106026. (date of access: 06.08.2024).
30. Мучник, Е. Э. Комплексный созологический анализ как возможный инструмент ведения лишенологических разделов Красных книг / Е. Э. Мучник // Лишайники: от молекул до экосистем : материалы докладов Международной конференции (1–5 июля 2024 г., Сыктывкар) [Электронное издание]. – Сыктывкар, 2024. – С. 61–63.
31. Sokal, R. R. Principles of numerical taxonomy / R. R. Sokal, P. H. A. Sneath. – San Francisco ; London : W. H. Freeman and Co., 1963. – 359 p.
32. Флинт, В. Е. Совершенствование методологических основ и методических приемов ведения Красных книг (раздел позвоночные животные) / В. Е. Флинт, В. Е. Присяжнюк // Изучение редких животных в РСФСР (Материалы к Красной книге). – Москва : Изд-во Центральной научно-исследовательской лаборатории

- охотничьего хозяйства и заповедников, 1991. – С. 51–66.
33. Tishkov, A. A. Nature protection and conservation / A. A. Tishkov // The physical geography of Northern Eurasia. – Oxford : Oxford University Press, 2003. – P. 227–245.
 34. Оценка биоразнообразия для выявления природоохранной ценности территорий / В. В. Неронов, Е. Г. Королева, Т. В. Дикарева [и др.] // Вестник Московского ун-та. Серия 5. География. – 2016. – № 5. – С. 33–39.
 35. Бязров, Л. Г. Лишайники в экологическом мониторинге / Л. Г. Бязров. – Москва : Научный мир, 2002. – 336 с.
 36. Scheidegger, C. Transplantation of symbiotic propagules and thallus fragments: Methods for the conservation of threatened epiphytic lichen populations / C. Scheidegger, B. Frey, S. Zoller // Mitteilungen der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft. – 1995. – Vol. 70. – P. 41–62.
 37. Пчелкин, А. В. Кримоконсервация – перспективный метод сохранения биоразнообразия лишайников для трансплантации / А. В. Пчелкин, Т. А. Пчелкина // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отделение Биол. – 2014. – Т. 119, вып. 4. – С. 43–48.
 38. Шаяхметова, З. М. Поддержание численности и создание искусственных популяций охраняемых видов лишайников с использованием метода трансплантации / З. М. Шаяхметова // Вестник Тюменского государственного университета. Серия: Экология и природопользование. – 2015. – Т. 1, № 2 (2). – С. 68–73.
 39. Biotechnological Applications of Lichen / Aftab A., Rizwana K., Shamsul H. [et al.] // Lichen-Derived Products: Extraction and Applications / Editor Mohd Y. – Chapter 9. – Scrivener Publishing LLC, 2020. – P. 203–219. – DOI: 10.1002/9781119593249.ch9
 40. Состояние исследований в биотехнологии лишайников / Л. М. Теплицкая, Э. П. Кириакиди, Е. Ф. Семенова [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. – 2021. – № 6 (108). – URL: <https://research-journal.org/archive/6-108-2021-june/state-of-research-in-lichen-biotechnology> (дата обращения: 15.08.2024). – DOI: 10.23670/IRJ.2021.108.6.043
- ## References
1. Goetel, W. Sozologia – nauka o ochronie przyrody i jej zasobów / W. Goetel // Kosmos. – 1966. – Vol. 15, № 5. – P. 473–482.
 2. Gawor, L. Walery Goetel and the idea of sozology / L. Gawor // Problemy ekorozwoju – problems of sustainable development. – 2013. – Vol. 8, № 1. – P. 83–89.
 3. Soule, M. E. Conservation Biology. An Evolutionary-Ecological Perspective / M. E. Soule, B. A. Wilcox. – Massachusetts : Sinauer Associates, 1980. – 395 p.
 4. Principles of Conservation Biology / G. K. Meffe, C. R. Carroll [et al.]. – Sunderland : Sinauer Associates, 1997. – 729 p.
 5. Primack, R. B. Essentials of Conservation Biology / R. B. Primack. – Oxford University Press, 2014. – 603 p.
 6. Hutchinson, G. E. The ecological theater and the evolutionary play / G. E. Hutchinson. – New Haven, London : Yale University Press, 1965. – 178 p.
 7. The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2024–1. – URL: <https://www.iucnredlist.org> (date of access: 06.08.2024).
 8. Scheidegger, C. *Erioderma pedicellatum* / C. Scheidegger // The IUCN Red List of Threatened Species 2003: e.T43995A10839336. – URL: <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2003.RLTS.T43995A10839336.en> (date of access: 06.08.2024).
 9. Krasnaya kniga SSSR. Redkie i nakhodiashchiesia pod ugrozoi ischeznoveniiia vidy zhivotnykh i rastenii [Red Data Book of the USSR. Rare and endangered species of animals and plants]. – Moscow : Lesnaya promyshlennost, 1978. – 459 p.
 10. Krasnaya kniga SSSR [Red Data Book of the USSR]. Vol. 2. – Moscow : Lesnaya promyshlennost, 1984. – 480 p.
 11. Krasnaia kniga RSFSR. Rasteniya [Red Data Book of the RSFSR. Plants.] – Moscow : Rosagropromizdat, 1988. – 590 p.
 12. Krasnaya kniga Rossiiskoi Federatsii. Rasteniya i griby [Red Data Book of the Russian Federation. Plants and fungi]. – Moscow : Tovarishchestvo nauchnykh izdanii KMK, 2008. – 855 p.
 13. Zavarzin, A. A. Vozmozhnosti primeneniia globalnykh kategorii i kriteriev Krasnogo spiska Vsemirnogo Soiuza Okhrany Prirody na regionalnom urovne [Application of global categories and criteria of the World Conservation Union's Red List at the regional level] / A. A. Zavarzin, E. E. Muchnik // Botanicheskii zhurnal [Botanical Journal]. – 2005. – Vol. 90, № 1. – P. 105–118.
 14. Ob utverzhdenii perechnia obyektov rastitelnogo mira, zanesennykh v Krasnuyu knigu Rossiiskoi Federatsii. Prikaz Ministerstva prirodnnykh resursov i ekologii Rossiiskoi Federatsii ot 23 maia 2023 g. № 320 (zaregistririvan Ministerstvom iustitsii Rossiiskoi Federatsii 21 iuliia 2023 g.) [On approval of the list of plant world objects included into the Red Data Book of the Russian Federation. Order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation № 320 of May 23, 2023 (registered by the Ministry of Justice of the Russian Federation on July 21, 2023)].
 15. Pliusnin, S. N. Populiatsionnaia izmenchivost stereokaulonov alpiiskogo v tundrovnykh ekosistemakh (analiz morfometricheskikh dannykh) [Population variability of Stereocaulon alpinum in tundra ecosystems (analysis of morphometric data)] : Report at the session of the Presidium of the Komi Science Centre of the Ural Branch RAS / S. N. Pliusnin. – Syktyvkar : Komi nauch. tsentr UrO RAN, 2003. – 30 p. (Nauchnye doklady Ros. akad. nauk. Ur. otdnie. Komi nauch. tsentr ; vyp. 455 [Scientific Reports of the Russian Academy of Sciences of the Ural Branch of the Komi Science Centre ; Iss. 455]).
 16. Suetina, Yu. G. Populiatsionnyi podkhod v likhenoidikatsii [Population approach in lichenoidication] / Yu. G. Suetina // Ekologicheskii monitoring. Metody biologicheskogo i fiziko-khimicheskogo monitoringa. Chast VI: Uchebnoe posobie [Ecological monitoring. Methods of biological and physico-chemical monitoring. Part VI: Textbook]. – Nizhnyi Novgorod : Nizhnyi Novgorod State University, 2006. – P. 274–306.

17. Mikhailova, I. N. Populations of epiphytic lichens under stress conditions: survival strategies / I. N. Mikhailova // The Lichenologist. – 2007. – Vol. 39, № 1. – P. 83–89.
18. Lidén, M. Restoration of endangered epiphytic lichens in fragmented forest landscapes: the importance of habitat quality and transplantation techniques. PhD Dissertation / M. Lidén. – Department of Forest Ecology and Management Acta Universitatis agriculturae Sueciae. Umeå : SLU, Arkitektkopia, 2009. – 46 p.
19. Suetina, Yu. G. Ontogenez i morfogenez kustistogo lishainika *Usnea florida* (L.) Weber ex F. H. Wigg. [Ontogenesis and morphogenesis of the fruticose lichen *Usnea florida* (L.) Weber ex F. H. Wigg.] / Yu. G. Suetina, N. V. Glotov // Ontogenez [Ontogenesis]. – 2010. – Vol. 41, № 1. – P. 32–40.
20. Ignatenko, R. V. The population structure of the lichen *Lobaria pulmonaria* in the middle boreal forests depends on the time-since-disturbance / R. V. Ignatenko, V. N. Tarasova // Folia Cryptog. Estonica. – 2017. – Fasc. 54. – P. 83–94.
21. Suetina, Yu. G. Morfologicheskaya plastichnost i struktura populiatsii lishainika *Pseudevernia furfuracea* (L.) Zopf v izmeniaushchikhsia usloviakh sredy [Morphological plasticity and population structure of the lichen *Pseudevernia furfuracea* (L.) Zopf under changing environmental conditions] / Yu. G. Suetina // Bulletin of the Orenburg State Pedagogical University. – 2021. – № 3 (39). – P. 75–89.
22. Osnovy prirodookhrannoi biologii [Principles of conservation biology] / G. K. Meffe, C.R. Carroll [et al.]. – Novosibirsk : Sibirskii ekologicheskii tsentr, 2004. – 690 p.
23. Saksonov, S. V. Organizatsionnye i metodicheskie aspekty vedeniia regionalnykh Krasnykh knig [Organizational and methodical aspects of keeping regional Red Data Books] / S. V. Saksonov, G. S. Rozenberg. – Tolyatti : Institut ekologii Volzhskogo basseina, 2000. – 164 p.
24. Lagunov, A. V. «Krasnoknizhnye» vidy v zapovednikakh i parkakh. Kompleksnyi sozologicheskii analiz – udobnyi instrument dlia lokal'nogo redlistinga osobo okhraniaemykh prirodnykh territorii ["Red-listed" species in reserves and parks. Complex zoological analysis – a convenient tool for local redlisting of protected areas] / A. V. Lagunov // Issledovanie prirody lesnykh rastitelnykh soobshchestv na zapovednykh territoriiakh Urala [Research of the Nature of Forest Plant Communities in Protected Areas of the Urals]. Articles of the Interregional Scientific-Practical Conference. Ekaterinburg (November 14–15, 2012)]. – Ekaterinburg, 2012. – P. 69–78.
25. Lagunov, A. V. Redkie cheshuekrylye IImenskogo zapovednika: sozologicheskii analiz [Rare butterflies of the IImenskiy Reserve: zoological analysis] / A. V. Lagunov // Bulletin of the Orenburg State University. – 2009. – № 10, Special Issue, Part 1. – P. 98–100.
26. Zakharov, V. D. Primenenie sozologicheskogo analiza pri opredelenii stepeni uiazvimosti redkikh ptits Cheliabinskoi oblasti [Application of zoological analysis in determining the degree of vulnerability of rare birds of the Chelyabinsk region] / V. D. Zakharov // Proceedings of the Samara Science Centre of the Russian Academy of Sciences]. – 2011. – Vol. 13, № 1 (5). – P. 1102–1105.
27. Lagunov, A. V. Sozologicheskii analiz vidov roda *Scorzonera* L. Cheliabinskoi oblasti [Zoological analysis of species of the genus *Scorzonera* L. of the Chelyabinsk region] / A. V. Lagunov, S. A. Lesina, E. V. Koroteeva // Bulletin of the Orenburg State Pedagogical University. – 2016. – № 2 (18). – P. 64–71.
28. Kondratyeva, N. V. Pervoocherednye zadachi algosozologicheskikh issledovaniy [Priority tasks of algosociological research] / N. V. Kondratyeva // Algologiya [Algology]. – 1994. – Vol. 4, № 3. – P. 3–15.
29. The Global Fungal Red List. – URL: https://redlist.info/iucn/species_view/106026 (date of access: 06.08.2024).
30. Muchnik, E. E. Kompleksnyi sozologicheskii analiz kak vozmozhnyi instrument vedeniia likhenologicheskikh razdelov Krasnykh knig [Integrated zoological analysis as a possible tool for compiling lichenological parts of Red Data Books] / E. E. Muchnik // Lishainiki: ot molekul do ekosistem [Lichens: from Molecules to Ecosystems]: Proceedings of the International Conference (July 1–5, 2024, Syktyvkar).]. – Syktyvkar, 2024. – P. 61–63.
31. Sokal, R. R. Principles of numerical taxonomy / R. R. Sokal, P. H. A. Sneath. – San Francisco ; London : W. H. Freeman and Co., 1963. – 359 p.
32. Flint, V. E. Sovershenstvovanie metodologicheskikh osnov i metodicheskikh priemov vedeniia Krasnykh knig (razdel pozvonochnye zhivotnye) [Improvement of methodological bases and methodical methods of keeping Red Books (section of vertebrate animals)] / V. E. Flint, V. E. Prusichniuk // Izuchenie redkikh zhivotnykh v RSFSR (Materialy k Krasnoi knige) [Study of Rare Animals in the RSFSR (Materials for the Red Data Book)]. – Moscow : Izdatelstvo Tsentralnoi nauchno-issledovatel'skoi laboratorii okhotnichyego khoziaistva i zapovednikov, 1991. – P. 51–66.
33. Tishkov, A. A. Nature protection and conservation / A. A. Tishkov // The Physical Geography of Northern Eurasia. – Oxford : Oxford University Press, 2003. – P. 227–245.
34. Otsenka bioraznoobraziia dlia vyavleniia prirodookhrannoi tsennosti territorii [Assessment of biodiversity to reveal the nature protection value of territories] / V. V. Neronov, E. G. Koroleva, T. V. Dikareva [et al.] // Bulletin of the Moscow University. Ser. 5. Geography. – 2016. – № 5. – P. 33–39.
35. Biazrov, L. G. Lishainiki v ekologicheskom monitoringe [Lichens in ecological monitoring] / L. G. Biazrov. – Moscow : Nauchnyi mir, 2002. – 336 p.
36. Scheidegger, C. Transplantation of symbiotic propagules and thallus fragments: Methods for the conservation of threatened epiphytic lichen populations / C. Scheidegger, B. Frey, S. Zoller // Mitteilungen der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft. – 1995. – Vol. 70. – P. 41–62.
37. Pchelkin, A. V. Kriokonservatsiia – perspektivnyi metod sokhraneniia bioraznoobraziia lishainikov dlia transplantatsii [Cryopreservation – a promising method of preserving lichen biodiversity for transplantation] / A. V.

- Pchelkin, T. A. Pchelkina // Bulletin of the Moscow Society of Naturalists. – 2014. – Vol. 119, Iss. 4. – P. 43–48.
38. Shayakhmetova, Z. M. Podderzhanie chislennosti i sozдание iskusstvennykh populiatsii okhranyaemykh vidov lichainikov s ispolzovaniem metoda transplantatsii [Maintaining the number and creation of artificial populations of protected species of lichens using the method of transplantation] / Z. M. Shayakhmetova // Bulletin of the Tyumen State University. Series: Ecology and Natural Resource Use. – 2015. – Vol. 1, № 2 (2). – P. 68–73.
39. Biotechnological applications of lichen / Aftab A., Rizwana K., Shamsul H. [et al.] // Lichen-Derived Products: Extraction and Applications / Ed. Y. Mohd. – Chapter 9. – Scrivener Publishing LLC, 2020. – P. 203–219.
40. Teplitskaia, L. M. Sostoianie issledovaniy v biotekhnologii lichainikov [State of research in lichen biotechnology] / L. M. Teplitskaia, E. P. Kiriakidi, E. F. Semenova [et al.] // Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal [International Research Journal]. – 2021. – № 6 (108). – URL: <https://research-journal.org/archive/6-108-2021-june/state-of-research-in-lichen-biotechnology> (date of access: 15.08.2024).

Благодарность (госзадание):

Сердечно благодарю д.б.н. А. Г. Паукова (Уральский Федеральный университет), к.б.н. Е. А. Давыдова (Алтайский государственный университет), к.б.н. А. Б. Исмаилова (Горный ботанический сад ДФИЦ РАН) за сотрудничество в подготовке данных по видам, включенным в Красную книгу Российской Федерации.

Выражаю глубокую признательность к.б.н. А. В. Лагунову (ОГУ «Особо охраняемые территории Челябинской области»), к.б.н. Т. Ю. Светашевой (Тульский государственный педагогический университет имени Л. Н. Толстого) и к.б.н. Ю. Г. Суетиной (Марийский государственный университет, г. Йошкар-Ола) за научные консультации.

Acknowledgements (state task):

I sincerely thank Dr. Sci. (Biol.) A. G. Paukov (Ural Federal University), Cand. Sci. (Biol.) E. A. Davydov (Altai State University), and Cand. Sci. (Biol.) A. B. Ismailov (Mountain Botanical Garden, DFRC RAS) for cooperation in preparing data on species included in the Red Data Book of the Russian Federation.

I express my deep gratitude to Cand. Sci. (Biol.) A. V. Lagunov (OGU "Specially Protected Areas of the Chelyabinsk Region"), Cand. Sci. (Biol.) T. Y. Svetasheva (L. N. Tolstoy Tula State Pedagogical University), and Cand. Sci. (Biol.) Y. G. Suetina (Mari State University, Yoshkar-Ola) for scientific consultations.

Информация об авторе:

Мучник Евгения Эдуардовна – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник Института лесоведения Российской академии наук; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-9150-6044> (143030, Российская Федерация, Московская обл., г. Одинцово, с. Успенское, ул. Советская, д. 21; e-mail: emuchnik@outlook.com).

About the author:

Evgenia E. Muchnik – Doctor of Sciences (Biology), Leading Researcher, Institute of Forest Science of the Russian Academy of Sciences; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9150-6044> (21 Sovetskaya st., Uspenskoye village, Odintsovo town, Moscow Region, 143030 Russian Federation; e-mail: emuchnik@outlook.com).

Для цитирования:

Мучник, Е. Э. Созологический анализ как возможный инструмент ведения лихенологических разделов Красных книг / Е. Э. Мучник // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Экспериментальная биология и экология». – 2024. – № 9 (75). – С. 30–38.

For citation:

Muchnik, E. E. Sozologicheskij analiz kak vozmozhnyj instrument vedeniya lihenologicheskikh razdelov Krasnykh knig [The sozological analysis as a possible tool for compiling lichenological parts of Red Data Books] / E. E. Muchnik // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series "Experimental Biology and Ecology". – 2024. – № 9 (75). – P. 30–38.

Дата поступления статьи: 23.08.2024

Прошла рецензирование: 08.09.2024

Принято решение о публикации: 19.09.2024

Received: 23.08.2024

Reviewed: 08.09.2024

Accepted: 19.09.2024

Лишайники на карьерах южной тундры Северо-Востока европейской части России

И. А. Лиханова, Т. Н. Пыстина,
Г. В. Железнова, С. В. Денева

Институт биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН,
г. Сыктывкар
likhanova@ib.komisc.ru

Аннотация

В работе представлены первые данные о разнообразии лишайников карьеров по добыче строительных материалов окрестностей г. Воркуты (подзона южной кустарниковой тундры). Длительность самовосстановительной сукцессии на карьерах составляет около 40–50 лет. Почвообразующие породы карьеров практически не отличаются от почвообразующих пород фоновых территорий по гранулометрическому составу, но характеризуются повышенной карбонатностью за счет содержания кальцита. На суглинистых, гравийно-песчаных и песчаных отложениях карьеров выявлено 69 таксонов лишайников, из них 66 вида и три подвиды. Видовая насыщенность лишайниками производных сообществ на территории карьеров достигает 33 видов на 100 м², что выше максимального показателя фоновых сообществ (26 видов на 100 м²). Последнее связано со спецификой субстратных условий (наличие карбонатов, гравия), менее плотной упаковкой экологических ниш, отсутствием/низким обилием эдификаторных видов, присутствием видов разных сукцессионных стадий. В производных сообществах карьеров, в отличие от фоновых участков, среди эколого-субстратных групп увеличивается доля эпибриофитов, среди жизненных форм – накипных лишайников. Лихенофлора карьеров характеризуется значительным количеством кальцефильных видов, что придает ей своеобразие по сравнению с фоновыми территориями. На карьерах отмечено шесть видов лишайников, включенных в Красную книгу Республики Коми и Приложение 1 к ней.

Ключевые слова:

лишайники, карьеры, южная тундра, производные сообщества, кальцефилы, нарушенные земли

Введение

В последние десятилетия в связи с увеличением площади техногенно нарушенных территорий Крайнего Севера становятся актуальными исследования закономерностей восстановления почвенно-растительного покрова в данных биоклиматических условиях. Для изучения ре-

Lichens in quarries of the south tundra subzone of the European North-East of Russia

I. A. Likhanova, T. N. Pystina,
G. V. Zheleznova, S. V. Deneva

Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Syktyvkar
likhanova@ib.komisc.ru

Abstract

The paper presents the first data on the diversity of lichens in building-stone quarries in the vicinity of Vorkuta (south dwarf shrub tundra subzone). The self-regenerative succession in quarries lasts for about 40–50 years. The soil-forming rocks in quarries do not actually differ from those in the background territories by texture but were characterized by a high carbonate content due to calcite. 69 lichen taxa were identified on loamy, gravel-sandy and sandy deposits of the quarries, among them 66 species and three subspecies. The species saturation of lichens at key sites of the quarries reaches 33 species per 100 m², which exceeds the background value (26 species per 100 m²). This increase is related to the specificity of soil material conditions (presence of carbonates, gravel), vacant places in ecological niches, absence/low abundance of edificatory species, presence of species at different succession stages. In contrast to the background sites, the secondary quarry communities increase in the proportion of epibryophytes among ecologic-substrate group and scaly lichens among life forms. The lichen flora of quarries includes a significant number of calciphile species that makes it peculiar in comparison with the background areas. The quarries have been found for six lichen species included into the Red Data Book of the Komi Republic and its Annex 1.

Keywords:

lichens, quarries, south tundra, secondary communities, calciphiles, disturbed lands

Характеристика ключевых участков фоновой территории и территории карьеров

Table 1

Description of key sites of the background and quarry territories

Участок	Растительное сообщество	Название почвы по классификации почв России [16]
Территория карьера «Комсомольский-1», суглинистые отложения		
Кс-1	Разнотравное лишайниково-моховое с ивой	Пелозем грубогумусированный потечно-гумусовый глееватый
Кс-2	Разнотравное моховое с ивой	Пелозем грубогумусированный потечно-гумусовый глееватый криотурбированный
Фоновая территория, суглинистые отложения		
ФКс-1	Мелкоерниковая лишайниково-моховая тундра	Глеезем грубогумусированный тиксотропный
ФКс-2	Ерниковая кустарничковая моховая тундра	Торфяно-глеезем потечно-гумусовый тиксотропный мерзлотный
Территория карьера «Комсомольский-1», гравийно-песчаные отложения		
Кгп-1	Разнотравное мохово-лишайниковое с единичными ивами	Псаммозем грубогумусированный гумусовый потечно-гумусовый глееватый
Кгп-2	Разнотравное лишайниково-моховое с ивой	Псаммозем грубогумусированный потечно-гумусовый глееватый
Фоновая территория, гравийно-песчаные отложения		
ФКгп-1	Вороничная лишайниково-моховая тундра	Подбур грубогумусированный глееватый
ФКгп-2	Ерниковая зеленомошная тундра	Торфяно-подбур оподзоленный глееватый
Территория карьера «Заполярный», песчаные отложения		
Зп-1	Мохово-лишайниковое с ивой	Псаммозем гумусовый глееватый
Зп-2	Моховое с ивой	Псаммозем гумусовый грубогумусированный потечно-гумусовый глееватый
Фоновая территория, песчаные отложения		
ФЗп-1	Вороничная лишайниковая тундра	Подзол иллювиально-гумусовый стратифицированный глееватый
ФЗп-2	Ерниковая лишайниково-моховая тундра	Торфяно-подбур глеевый мерзлотный

чественным методом на рентгенофлуоресцентном спектрометре XRF-1800 (Shimadzu, Япония) в ЦКП «Геонаука» при Институте геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН.

Результаты и их обсуждение

Влияние влажности почв на видовое богатство лишайников. На примере сообществ, изученных в ряду возрастания гидроморфизма гравийно-песчаных почв (рис. 2), показано, что лишайниковые синузии на карьерах приурочены к свежим и сухим субстратам (уч. Кгп-1, Кгп-2). На участках Кгп-3 (ивняк осоково-моховой) и Кгп-4 (топянохвощевое сообщество) с застойным увлажнением доминирование в напочвенном покрове переходит ко мхам. Последнее характерно и для фоновых территорий. Так, в ивняках осоковых (уч. ФКгп-3) и осоково-пушицевых моховых сообществах (уч. ФКгп-4) лишайники не зафиксированы. В связи с отмеченным, влияние физико-хими-

ческих свойств субстрата на эпигейный лишайниковый покров было изучено в автоморфных и полугидроморфных условиях.

Особенности почвенного покрова. Субстраты карьеров близки по гранулометрическому составу к почвообразующим породам фоновых территорий (рис. 3). Суглинистые отложения карьеров и фоновых участков характеризуются преобладанием в мелкоземе фракции крупной пыли (40–60 %), количество гравия и гальки не превышает 5–20 %. В гравийно-песчаных отложениях количество гравия и гальки, рассеянное в толще мелкозема, достигает 20–40 %. В мелкоземе преобладают фракции мелкого (около 50–60 %), крупного и среднего (20–40 %) песка. Песчаные отложения характеризуются резким преобладанием фракции мелкого песка (около 80 %).

Почвы карьеров, в отличие от фоновых, содержат кальцит. Содержание валового СаО в фоновых почвах составляет около 1 %. В почвах карьеров на суглинистых отложениях этот показатель увеличивается до 1,5 %, на песчано-гравийных и песчаных – до 2–6 % (рис. 4). Повышенное содержание карбонатов обуславливает нейтральную реакцию среды суглинистых почв карьеров и слабощелочную – песчаных и гравийно-песчаных. Фоновые почвы кислые в верхней части профиля, с глубиной кислотность уменьшается.

В профиле почв карьеров выделяется мало-мощная подстилка, в автоморфных условиях ее мощность составляет менее 1 см, в полугидроморфных – увеличивается до 2 см. В фоновых автоморфных почвах мощность подстилки достигает 4–6 см, в полугидроморфных – более 10 см. В молодых

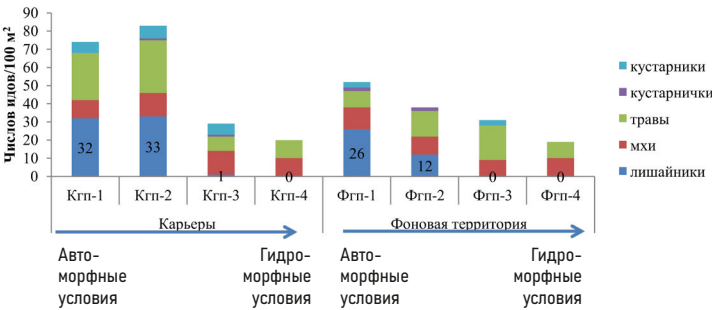


Рисунок 2. Видовое разнообразие фоновых и производных сообществ на гравийно-песчаных отложениях в ряду повышения их влажности (цифрами отмечено число таксонов лишайников).

Figure 2. Species diversity of background and secondary communities on gravel-sandy deposits along with the increasing moisture content (figures indicate number of lichen taxa).

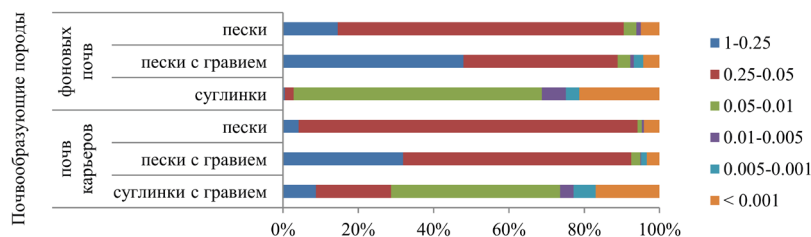


Рисунок 3. Гранулометрический состав мелкозема почвообразующих пород фоновых почв и почв карьеров (размер частиц в мм).

Figure 3. Texture of fine-grained soil-forming rocks of background and quarry soils (particle size in mm).

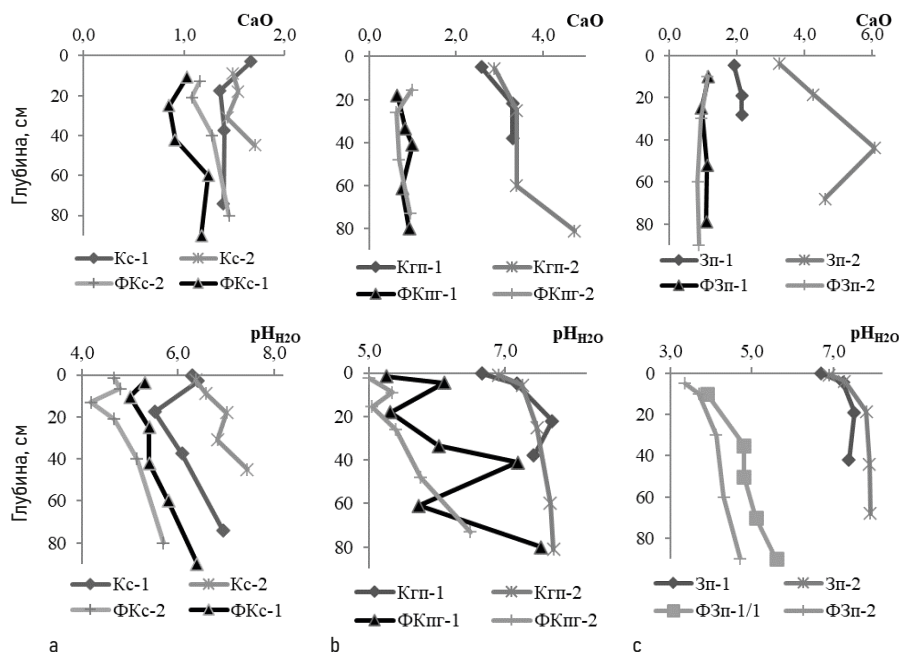


Рисунок 4. Профильное распределение валового содержания СаО (%) и рН_{Н2О} в почвах фоновых участков и карьеров на суглинистых (а), гравийно-песчаных (б) и песчаных (с) отложениях.

Figure 4. Profile distribution of gross CaO content (%) and pH_{H₂O} in soils of background sites and quarries on loamy (a), gravelly-sandy (b), and sandy (c) deposits.

суглинистых почвах содержание $C_{орг}$ в подподстилочном слое, обогащенном потечным гумусом, составляет 0,9 %, уменьшаясь вниз по профилю до 0,4 %. В минеральной части песчаных и гравийно-песчаных почв карьеров содержание $C_{орг}$ ниже – 0,3 и 0,1 % соответственно. Фоновые значения показателя возрастают более чем в два раза.

Характеристика лишайникового покрова фоновых сообществ. В окрестностях карьеров на дренированных вершинах склонов с суглинистыми почвами распространены мелкоерниковые лишайниково-моховые тундры. В лишайниково-моховом ярусе, где доминируют зеленые мхи (*Hylocomium splendens*, *Pleurozium schreberi*, *Racomitrium lanuginosum*) выявлено 26 таксонов лишайников. Максимальное обилие (по 2 балла по шкале Браун-Бланке) отмечено у *Cladonia arbuscula*, *C. rangiferina*, *Flavocetraria nivalis*. Меньшее участие в сложении напочвенного покрова принимают *Alectoria nigricans*, *A. ochroleuca*, *Cetraria islandica* ssp. *islandica*, *C. islandica* ssp. *crispiformis*, *C. laevigata*, *Cladonia amaurocraea*, *C. gracilis*, *C. stellaris*, *C. uncialis*, *Thamnolia vermicularis* и др. (табл. 2). К зарастающим пятнам-медальонам приурочены многие шиловидные и бокальчатые виды рода *Cladonia* (*C. acuminata*, *C. cario-*

sa, *C. fimbriata*, *C. phyllophora*, *C. stricta*, *C. stygia*), накипные лишайники (*Baeomyces placophyllus*, *Dibaeis baeomyces*), пионерные виды рода *Peltigera* (*P. didactyla*, *P. malacea*) и *Stereocaulon* (*S. rivulorum*). Со снижением дренажа в ерниковых зеленомошных тундрах на суглинистых породах количество лишайников снижается до 21 таксона (табл. 2). К преобладающим видам (обилие – по 2 балла) относятся *Cladonia arbuscula*, *C. rangiferina*. Меняется видовой состав видов рода *Peltigera*, среди которых отмечены *P. aphthosa* и *P. scabrosa*. Появляется *Nephroma arcticum*. К зарастающим пятнам-медальонам приурочены *Cladonia grayi*, *C. subulata*, *Stereocaulon paschale*, *S. rivulorum*, *S. tomentosum* и др.

На краевых зонах холмов с выходами гравийно-песчаных отложений формируются вороничные лишайниково-моховые сообщества. Среди мохового покрова из *Racomitrium lanuginosum* отмечено 26 таксонов лишайников. Преобладающие виды: *Flavocetraria cucullata* и *F. nivalis* (по 2 балла). С незначительным обилием (+ – 1 балл) зафиксированы разнообразные кустистые лишайники: *Alectoria ochroleuca*, *Cetraria aculeata*, *C. islandica* ssp. *islandica*, *C. islandica* ssp. *crispiformis*, *C. laevigata*, *Cladonia amaurocraea*, *C. arbuscula*, *C. cervicornis*, *C. chlorophaea* s.l., *C. ectocyna*, *C. fimbriata*, *C. rangiferina*, *C. stygia*, *C. subulata*, *C. uncialis*, *Stereocaulon alpinum*, *S. glareosum*, *Thamnolia vermicularis*. Малообильны листоватые (*Parmelia sulcata*, *Peltigera neckeri*, *P. rufescens*) и накипные (*Placynthiella icmalea*, *P. uliginosa*, *Ochrolechia* sp.) лишайники (табл. 2). На склонах к ложбинам стока описаны ерниковые зеленомошные тундры. Здесь обилие и видовое разнообразие лишайников существенно снижается (табл. 2). Среди лишайников с небольшим обилием (+ – 1 балл) отмечены виды рода *Peltigera* (*P. aphthosa*, *P. canina*, *P. extenuata*, *P. leucophlebia*, *P. rufescens*), *Cladonia* (*C. arbuscula*, *C. ectocyna*, *C. fimbriata*, *C. rangiferina*, *C. stygia*), а также *Cetraria islandica* ssp. *islandica*, *Flavocetraria nivalis*.

На песчаных холмах описаны вороничные лишайниковые тундры, сменяющиеся с повышением увлажнения ерниковыми лишайниково-моховыми сообществами. В лишайниковом покрове зафиксированы 21–25 таксонов. Помимо преобладающих среди лишайников *Flavocetraria cucullata* и *F. nivalis* (по 2–4 балла каждый) отмечены в основном кустистые лишайники: *Alectoria nigricans*, *A. och-*

Таблица 2

Видовой состав и обилие лишайников производных и фоновых сообществ

Table 2

Species composition and abundance of lichens of secondary and background communities

Виды лишайников	Экологическая группа	Тип слоевища	Производные сообщества карьеров						Сообщества фоновой территории					
			Суглинки с гравием		Песок с гравием		Пески		Суглинки		Песок с гравием		Пески	
			Кс-1	Кс-2	Кгп-1	Кгп-2	Зп-1	Зп-2	Фс-1	Фс-2	Фгп-1	Фгп-2	Фп-1	Фп-2
<i>Alectoria nigricans</i> (Ach.) Nyl.	эпигейд	куст.	+	+	+				1				1	1
<i>A. ochroleuca</i> (Hoffm.) A.Massal.	эпигейд	куст.		+					1		+		1	1
<i>Arctocetraria andrejevii</i> (Oxner) Kärnefelt & A.Thell (3)	эпигейд	куст.	1			1								
<i>Baeomyces carneus</i> Flörke	эпигейд	нак.	1		1									
<i>B. placophyllus</i> Ach.	эпигейд	нак.	2	1	1				+				+	
<i>Bilimbia microcarpa</i> (Th.Fr.) Th.Fr.	эпибриофит	нак.	1											
<i>Bryocaulon divergens</i> (Ach.) Kärnefelt	эпигейд	куст.			1				+					
<i>Bryoplaca jungermanniae</i> (Vahl) Sochting et al.	эпибриофит	нак.	1	1										
<i>Bryoria</i> sp.	эпифит	куст.			+									
<i>Cetraria aculeata</i> (Schreb.) Fr.	эпигейд	куст.	+								+			
<i>C. ericetorum</i> Opiz	эпигейд	куст.	1		1									+
<i>C. islandica</i> (L.) Ach. ssp. <i>crispiformis</i> (Räsänen) Kärnefelt	эпигейд	куст.	+	+	1	+	1		1	1	+		1	
<i>C. islandica</i> (L.) Ach. ssp. <i>islandica</i>	эпигейд	куст.			+	+			1		+	+		+
<i>C. laevigata</i> Rass. (3)	эпигейд	куст.		+	+				1		+			+
<i>C. muricata</i> (Ach.) Eckfeldt	эпигейд	куст.											1	
<i>Cetrariella delisei</i> (Bory ex Schaer.) Kärnefelt & A.Thell	эпигейд	куст.		+		1								
<i>Cladonia acuminata</i> (Ach.) Norrl. (2)	эпигейд	куст.	1	+	1	1	+	+	1					
<i>C. amaurocraea</i> (Flörke) Schaer.	эпигейд	куст.							1	+	+			1
<i>C. arbuscula</i> (Wallr.) Flot.	эпигейд	куст.	1		1				2	2	+	+	1	1
<i>C. borealis</i> S.Stenroos	эпигейд	куст.				+	+							
<i>C. cariosa</i> (Ach.) Spreng.	эпигейд	куст.		+	+	+	+	+	1				1	
<i>C. cenotea</i> (Ach.) Schaer.	эпиксил	куст.												+
<i>C. cervicornis</i> (Ach.) Flot.	эпигейд	куст.	1		2						+			
<i>C. chlorophaea</i> (Flörke ex Sommerf.) Spreng. s.l.	эпигейд	куст.	2	+	2	2	+	+			+			
<i>C. coccifera</i> (L.) Willd.	эпигейд	куст.												1
<i>C. coniocraea</i> (Flörke) Spreng.	эпиксил	куст.					+							
<i>C. cornuta</i> (L.) Hoffm.	эпигейд	куст.		+		1	+			1				
<i>C. crispata</i> (Ach.) Flot.	эпигейд	куст.												+
<i>C. cyanipes</i> (Sommerf.) Nyl.	эпигейд	куст.												
<i>C. deformis</i> (L.) Hoffm.	эпигейд	куст.												+
<i>C. ecmocyna</i> Leight.	эпигейд	куст.		+		+				1	+	+		+
<i>C. fimbriata</i> (L.) Fr.	эпиксил	куст.	+		+	1	1	+	+	+	+	+		+
<i>C. furcata</i> (Huds.) Schrad.	эпигейд	куст.												
<i>C. gracilis</i> (L.) Willd. ssp. <i>elongata</i> (Wulfen) Vain.	эпигейд	куст.		+										1
<i>C. gracilis</i> (L.) Willd. ssp. <i>gracilis</i>	эпигейд	куст.				1			1	1				
<i>C. gracilis</i> (L.) Willd. ssp. <i>turbinata</i> (Ach.) Ahti	эпигейд	куст.				1								
<i>C. grayi</i> G.Merr. ex Sandst.	эпигейд	куст.								+				
<i>C. macroceras</i> (Delise) Hav.	эпигейд	куст.					1			1			1	+
<i>C. macrophyllodes</i> Nyl.	эпигейд	куст.			+	1								
<i>C. mitis</i> Sandst.	эпигейд	куст.	1	1	1	1	1			1			1	1
<i>C. phyllophora</i> Hoffm.	эпигейд	куст.				+	1		1					
<i>C. pleurota</i> (Flörke) Schaer.	эпигейд	куст.												+

<i>C. pocillum</i> (Ach.) Grognot	эпигейд	куст.		+	+								1	
<i>C. pyxidata</i> (L.) Hoffm.	эпигейд	куст.				1	1	+					1	+
<i>C. ramulosa</i> (With.) J.R.Laundon	эпигейд	куст.				+	+							
<i>C. rangiferina</i> (L.) F.H.Wigg.	эпигейд	куст.	2	1	1	1	1		2	2	+	+	1	2
<i>C. squamosa</i> Hoffm.	эпиксил	куст.												+
<i>C. stellaris</i> (Opiz) Pouzar & Vězda	эпигейд	куст.							1					
<i>C. stricta</i> (Nyl.) Nyl.	эпигейд	куст.							1					
<i>C. stygia</i> (Fr.) Ruoss	эпигейд	куст.							1	1	+	+		
<i>C. subulata</i> (L.) Weber ex F.H.Wigg.	эпигейд	куст.		+		1	1			+	+		1	
<i>C. sulphurina</i> (Michx.) Fr.	эпиксил	куст.												
<i>C. symphycharpa</i> (Flörke) Fr.	эпигейд	куст.				1								
<i>C. uncialis</i> (L.) Weber ex F.H.Wigg.	эпигейд	куст.		+					1	+	+			
<i>Cladonia</i> sp.	эпигейд	куст.				+								
<i>Dibaeis baeomyces</i> (L.f.) Rambold & Hertel	эпигейд	нак.							+					
<i>Epilichen scabrosus</i> (Ach.) Clem.	паразит	нак.			+									
<i>Flavocetraria cucullata</i> (Bellardi) Kärnefelt & A.Thell	эпигейд	куст.	1	1	1	1	+		1		2		2	2
<i>F. nivalis</i> (L.) Kärnefelt & A.Thell	эпигейд	куст.	1	1	1	1	+		2	1	2	+	4	2
<i>Nephroma arcticum</i> (L.) Torss.	эпигейд	лист.								1				
<i>Ochrolechia androgyna</i> (Hoffm.) Arnold	эпибриофит	нак.												
<i>O. frigida</i> (Sw.) Lynge	эпибриофит	нак.	1	+										
<i>Ochrolechia</i> sp.	эпигейд	нак.			1						+		+	
<i>Parmelia sulcata</i> Taylor	эпифит	лист.									+			
<i>Peltigera aphthosa</i> (L.) Willd.	эпигейд	лист.				+				1		+		
<i>P. canina</i> (L.) Willd.	эпигейд	лист.	+	1								+		
<i>P. didactyla</i> (With.) J.R.Laundon	эпигейд	лист.	2	1	2	2	1	+	1					
<i>P. extenuata</i> (Nyl. ex Vain.) Lojka	эпигейд	лист.		+		1						+	1	
<i>P. leucophlebia</i> (Nyl.) Gyeln.	эпигейд	лист.					1					+		
<i>P. malacea</i> (Ach.) Funck	эпигейд	лист.					1		1					1
<i>P. neckeri</i> Hepp ex Müll.Arg.	эпигейд	лист.	+	+							+			
<i>P. polydactylon</i> (Neck.) Hoffm.	эпигейд	лист.				+	+							
<i>P. ponojensis</i> Gyeln.	эпигейд	лист.	+	+				+						
<i>P. rufescens</i> (Weiss) Humb.	эпигейд	лист.	2	1	2	2	2	+			+	+	1	
<i>P. scabrosa</i> Th.Fr.	эпигейд	лист.								1				1
<i>P. venosa</i> (L.) Hoffm. (бионадзор)	эпигейд	лист.	+											
<i>Pertusaria geminipara</i> (Th.Fr.) C.Knight ex Brodo	эпибриофит	нак.	1											
<i>Placynthiella icmalea</i> (Ach.) Coppins & P.James	эпигейд	нак.									+			
<i>P. uliginosa</i> (Schrad.) Coppins & P.James	эпигейд	нак.	+		1						+			
<i>Protopannaria pezizoides</i> (Weber) P.M.Jörg. & S.Ekman	эпигейд	чеш.	1											
<i>Rinodina mniaroea</i> (Ach.) Körb.	эпибриофит	нак.	1											
<i>Scytinium lichenoides</i> (L.) Otálora et al.	эпигейд	лист.		+									1	
<i>S. tenuissimum</i> (Dicks.) Otálora et al. (3)	эпигейд	лист.			+			+						
<i>Solorina spongiosa</i> (Ach.) Anzi (3)	эпигейд	лист.						+						
<i>Stereocaulon alpinum</i> Laurer	эпигейд	куст.	+	+		+					+			
<i>S. capitellatum</i> H.Magn.	эпигейд	куст.					1							
<i>S. condensatum</i> Hoffm.	эпигейд	куст.					1							
<i>S. glareosum</i> (Savicz) H.Magn.	эпигейд	куст.		1	1	+	1	+			1			
<i>S. paschale</i> (L.) Hoffm.	эпигейд	куст.					1			1				

<i>S. rivulorum</i> H.Magn.	эпигейд	куст.	1		2	1	3		+	+				
<i>S. tomentosum</i> Fr.	эпигейд	куст.	1		1	1				1				
<i>Thamnolia vermicularis</i> (Sw.) Schaer.	эпигейд	куст.			1				1		1		2	1
<i>Toniniopsis bagliettoana</i> (A.Massal. & De Not.) Kistenich & Timdal	эпибриофит	нак.	1	1	1									
Всего таксонов лишайников			33	31	32	33	27	11	26	21	26	12	20	25
Общее проективное покрытие лишайников, %			60	20	60	30	60	>5	35	30	20	>5	90	40

Примечание. Жирным шрифтом выделены редкие в Республике Коми виды, в скобках указан статус их редкости [17].

Условные обозначения. нак. – накипной; куст. – кустистый; лист. – листоватый.

Note. Species being rare in the Komi Republic are bolded with their protection status in the brackets [17].

Keys: нак. – scaly, куст. – fruticose, лист. – foliose.

roleuca, *Cetraria ericetorum*, *C. islandica* ssp. *crispiformis*, *C. laevigata*, *C. muricata*, *Cladonia amaurocraea*, *C. arbuscula*, *C. cariosa*, *C. cenotea*, *C. coccifera*, *C. crispata*, *C. deformis*, *C. ectocyna*, *C. fimbriata*, *C. macroceras*, *C. mitis*, *C. pleurota*, *C. pocillum*, *C. pyxidata*, *C. rangiferina*, *C. squamosa*, *C. subulata*, *Stereocaulon paschale*, *Thamnolia vermicularis*. Накипные лишайники редки – *Baeomyces placophyllus*, *Ochrolechia* sp. Малое обилие (не более 1 балла) зафиксировано у листоватых лишайников: *Peltigera extenuata*, *P. malacea*, *P. rufescens*, *P. scabrosa*, *Scytinium lichenoides*.

Характеристика лишайникового покрова производных сообществ. Наиболее высокие суглинистые останцы карьеров на шестом десятилетии сукцессии заняты разнотравными (*Chamenerion angustifolium*, *Equisetum arvense*) лишайниково-моховыми с ивой (*Salix glauca*, *S. lanata*, *S. phylicifolia*) сообществами. В пестром напочвенном покрове преобладают мхи открытых и засушливых местообитаний (*Polytrichum juniperinum*, *P. piliferum*), а также пионерные (*Ceratodon purpureus*, *Bryum* sp.) и кальцефильные (*Distichium capillaceum*, *Racomitrium canescens*) виды. Среди лишайников помимо обычных для сообществ фоновых территорий (*Alectoria nigricans*, *A. ochroleuca*, *Cetraria islandica* ssp. *islandica*, *Cladonia fimbriata*, *C. mitis*, *C. rangiferina*, *Flavocetraria cucullata*, *F. nivalis* и др.) типичны раннесукцессионные виды (*Cetraria aculeata*, *C. chlorophaea* s.l. и др.), среди которых встречаются кальцефилы (*Cladonia acuminata*, *C. cariosa*, *C. cervicornis*). С обилием 1–2 балла зафиксированы многочисленные накипные лишайники (*Baeomyces carneus*, *B. placophyllus*, *Bryoplaca jungermanniae*, *Ochrolechia frigida*, *O. geminipara*, *Placynthiella uliginosa*, *Rinodina mniaraea*), в том числе приуроченные к основным породам (*Bilimbia microcarpa*, *Toniniopsis bagliettoana*). Характерны виды рода *Peltigera* (*P. didactyla*, *P. neckeri*, *P. ponojensis*), среди которых также есть виды, предпочитающие карбонатные отложения – *P. rufescens* и *P. venosa*. Отмечены виды рода *Stereocaulon* (*S. alpinum*, *S. rivulorum*, *S. tomentosum*) (табл. 2).

На низких, более увлажненных суглинистых останцах формируются разнотравные (*Chamaenerion angustifolium*, *Equisetum arvense*) моховые сообщества с ивой (*Salix glauca*, *S. lanata*, *S. phylicifolia*). В напочвенном покрове начинают преобладать зеленые мхи (*Hylocomium splendens*, *Pleurozium schreberi*). Обилие лишайников уменьша-

ется, но сохраняется довольно высокое разнообразие. Отмечены виды рода *Peltigera* (*P. canina*, *P. didactyla*, *P. extenuata*, *P. neckeri*, *P. ponojensis*, *P. rufescens*), появляются влаголюбивые виды (*Cetrariella delisei*, *Scytinium lichenoides*), характерны обычные для тундровых сообществ лишайники (*Alectoria nigricans*, *Cetraria islandica* ssp. *crispiformis*, *Cladonia cornuta*, *C. ectocyna*, *C. gracilis* ssp. *elongata*, *C. mitis*, *C. rangiferina*, *Flavocetraria cucullata*, *F. nivalis*). На повышенных элементах микрорельефа отмечены синузии из накипных (*Baeomyces placophyllus*, *Bryoplaca jungermanniae*, *Ochrolechia frigida*, *Toniniopsis bagliettoana*) и пионерных (*Cladonia cariosa*, *C. chlorophaea* s.l., *C. pocillum*, *C. subulata*) видов. На суглинистых останцах зафиксированы виды, охраняемые на территории Республики Коми: *Cladonia acuminata*, *Cetraria laevigata* [17].

На песчано-гравийных отложениях в автоморфных условиях формируются разнотравные (*Equisetum arvense*) мохово-лишайниковые, в полугидроморфных – разнотравные (*Chamenerion angustifolium*, *Equisetum arvense*) лишайниково-моховые сообщества с ивами (*Salix glauca*, *S. phylicifolia*). В напочвенном покрове отмечены пионерные (*Bryum* sp., *Ceratodon purpureus*, *Pohlia* sp.) и луговые (*Brachythecium campestre*, *B. salebrosum*) виды мхов. Значительно число и обилие мхов (2 – 3 балла), приуроченных к основным породам: *Bryoerythrophyllum recurvirostre*, *Ditrichum flexicaule*, *Distichium capillaceum*. Среди лишайников на песчано-гравийных отложениях, по сравнению с суглинистыми, увеличивается обилие представителей родов *Stereocaulon* и *Peltigera*. Из зафиксированных видов рода *Stereocaulon* (*S. alpinum*, *S. glareosum*, *S. rivulorum*, *S. tomentosum*) большего обилия (до 2 баллов) достигает *S. rivulorum*, из видов рода *Peltigera* (*P. didactyla*, *P. extenuata*, *P. polydactylon*, *P. rufescens*) – *P. rufescens* и *P. didactyla* (по 2 балла). Обилие и видовое разнообразие накипных видов (*Baeomyces* sp., *Ochrolechia* sp., *Placynthiella* sp.) уменьшается (табл. 2). В пестром напочвенном покрове разнообразны пионерные виды рода *Cladonia* (*Cladonia chlorophaea* s.l., *C. fimbriata*, *C. macrophyllodes*, *C. subulata* и др.), многие из которых предпочитают кальцийсодержащие субстраты (*C. acuminata*, *C. cariosa*, *C. cervicornis*, *C. pocillum*, *C. symphylicarpa*). Разнообразны кустистые лишайники, характерные и для фоновых территорий: *Cetraria ericetorum*, *C. islandica* ssp. *crispiformis*, *Cladonia rangiferina*, *C. mitis*,

Flavocetraria cucullata, *F. nivalis* и др. На песчано-гравийных субстратах карьера произрастают редкие в Республике Коми виды: *Arctocetraria andrejevii*, *Cetraria laevigata*, *Cladonia acuminata* [17].

Песчаные отложения характеризуются неблагоприятными условиями для формирования почвенно-растительного покрова. Склоновый характер дна песчаного карьера, усиливающий дренаж поверхности, подверженность субстрата ветровой и водной эрозиям, незначительное содержание элементов питания обуславливают формирование мохово-лишайниковых и моховых с ивой (*Salix glauca*, *S. viminalis*, *S. phylicifolia*) фитоценозов только по периферии карьера и в понижениях его дна. В мохово-лишайниковых с ивой сообществах преобладают пионерные лишайники *Peltigera rufescens* (2 балла) и *Stereocaulon rivulorum* (3 балла). Доминирование *S. rivulorum* на зарастающих песчаных обнажениях тундры отмечено С. А. Уваровым и др. [18]. Сравнительно высокое обилие *Peltigera rufescens*, по-видимому, связано не только с приуроченностью данного вида к открытым местообитаниям, но и с его кальцефильностью. На песчаном субстрате зафиксировано максимальное видовое разнообразие представителей рода *Stereocaulon* (*S. capitellatum*, *S. condensatum*, *S. glareosum*, *S. paschale*, *S. rivulorum*). *Stereocaulon capitellatum* впервые отмечен на территории Республики Коми. В лишайниковом покрове многочисленны виды пельтигер, кроме *Peltigera rufescens* также отмечены: *P. didactyla*, *P. leucophlebia*, *P. malacea*, *P. ponojensis*, *P. polydactylon*. Помимо лишайников песчаный субстрат закрепляют криптогамные корочки и мхи, характерные для открытых местообитаний (*Bryum* sp., *Ceratodon purpureus*, *Pogonatum urnigerum*, *Pohlia* sp., *Polytrichum juniperinum*, *P. piliferum*, *Racomitrium canescens*). Накипные лишайники на песчаном субстрате не отмечены, хотя на выходах валунных суглинков на бортах карьера они были обильны.

Моховые сообщества с ивой в понижениях дна песчаного карьера характеризуются преобладанием пионерных (*Bryum* sp., *Ceratodon purpureus*, *Dicranella grevilleana*, *Leptobryum pyriforme*, *Pohlia wahlenbergii*) и кальцефильных (*Bryoerythrophyllum recurvirostre*, *Dicranella schreberiana*) видов. Лишайники малообильны (табл. 2). В основном зафиксированы виды, характерные для нарушенных земель (*Cladonia cariosa*, *C. chlorophaea* s.l., *C. fimbriata*, *Peltigera ponojensis*, *P. rufescens*, *Stereocaulon glareosum*). Отмечены охраняемые и редкие на территории Республики Коми виды: *Cladonia acuminata*, *Scytinium tenuissimum*, *Solorina spongiosa* [17].

Особенности биоты лишайников на территории карьеров. Всего в результате исследований на территории карьеров и фоновых территориях зафиксировано 87

видов и три подвида лишайников. Три вида определено до рода. В производных сообществах выявлено 69 таксонов лишайников, из них 66 видов и три подвида. Три вида определено до рода. В исследованных фоновых сообществах видовое богатство лишайников немного ниже: 60 видов и два подвида. Один вид определен до рода.

На пятом-шестом десятилетиях сукцессии видовая насыщенность лишайников в производных сообществах карьеров может быть выше, чем в фоновых (рис. 5). Особенно высокое значение параметра отмечено на песчано-гравийных и суглинистых субстратах. Большая видовая насыщенность лишайников на территории карьеров, по-видимому, связана с менее плотной упаковкой экологических ниш, отсутствием в производных сообществах эдификаторов, наличием видов разных сукцессионных стадий.

Как в фоновых, так и в производных сообществах преобладают кустистые лишайники (рис. 6). Однако, по сравнению с фоновыми, в фитоценозах, сформированных на суглинистых и гравийно-песчаных отложениях карьеров, существенно увеличивается число накипных видов лишайников. Последнее может свидетельствовать об экстремальности условий среды техногенных территорий [19] и начальных этапах сукцессионной динамики лишайникового покрова. В ряду облегчения гранулометрического состава субстратов доля накипных лишайников уменьшается. Последнее, возможно, связано с разной степенью способности к стабилизации у субстратов, различающихся по гранулометрическому составу. Стабилизация нарушенных субстратов часто достигается путем формирования черных криптогамных корочек из почвенных водорослей, цианобактерий, грибов, первичных талломов лишайников и протонемы мохообразных [20, 21], причем стабилизация

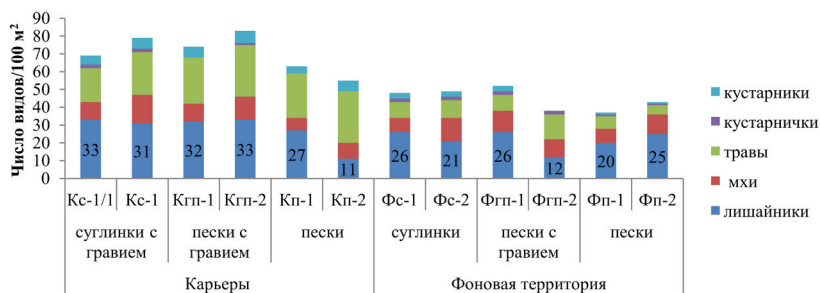


Рисунок 5. Видовая насыщенность фоновых и производных сообществ на отложениях разного гранулометрического состава.
Figure 5. Species diversity of background and secondary communities on different-textured deposits.

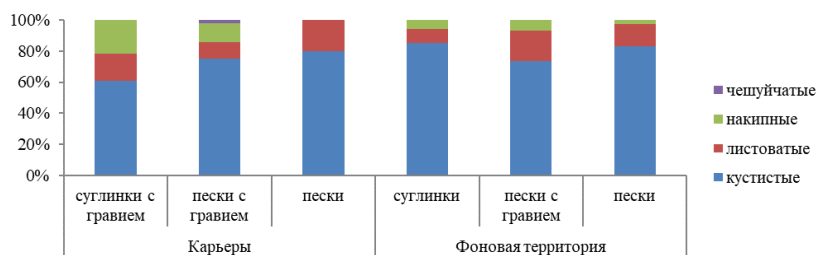


Рисунок 6. Распределение морфологических типов лишайников в производных и фоновых сообществах на разных типах субстратов.
Figure 6. Distribution of lichen morphological types in secondary and background communities on different types of soil material.

песчаных субстратов происходит медленнее из-за их большей подверженности эрозионным процессам.

В фоновых и производных сообществах преобладают эпигейды. На нарушенных территориях, особенно суглинистого состава, увеличивается доля эпибриофитов (рис. 7).

В производных сообществах, по сравнению с фоновыми, увеличивается видовое разнообразие и обилие видов родов *Peltigera*, *Stereocaulon* и *Cladonia*. Специфические субстратные условия (карбонатные почвообразующие породы) определяют высокое видовое богатство кальцефильных видов: *Bilimbia microcarpa*, *Cladonia acuminata*, *C. cariosa*, *C. pocillum*, *C. symphylicarpa*, *Peltigera rufescens*, *P. venosa*, *Scytinium tenuissimum*, *S. teretiusculum*, *Solorina spongiosa*, *Toniniopsis bagliettoana*. Ординационная диаграмма (рис. 8) показывает дифференциацию видового состава лишайников производных и фоновых сообществ. Лишайники сообществ в автоморфных условиях различаются меньше по видовому составу, чем в полугидроморфных.

Своеобразие экотопов на территории карьеров обуславливает внедрение редких видов, охраняемых в Республике Коми. На исследованных карьерах окрестностей г. Воркуты выявлено пять видов лишайников, включенных в региональную Красную книгу: *Arctocetraria andrejevii* (категория статуса редкости вида 3), *Cetraria laevigata* (3), *Cladonia acuminata* (2), *Scytinium tenuissimum* (3), *Solorina spongiosa* (3). Еще один вид *Peltigera venosa* нуждается в биологическом надзоре за его природными популяциями [17]. Обилие редких видов невысокое, обычно фиксировались единичные таломы или их малочисленные группы.

Заключение

Таким образом, лишенофлора карьеров отличается по составу и структуре от фоновых сообществ. В фитоценозах карьеров, в отличие от сообществ фоновых территорий, преобладают пионерные лишайники родов *Cladonia*, *Peltigera* и *Stereocaulon*, увеличиваются доли накипных лишайников и эпибриофитов. В связи с присутствием в субстратах карбонатсодержащих минералов лишенофлора карьеров характеризуется значительным количеством кальцефильных видов.

Видовое богатство лишайников в производных сообществах карьеров может превышать фоновые значения, что связано, прежде всего, со спецификой субстратных условий (наличие карбонатов и гальки) и ослабленной конкуренцией между видами.

Наиболее высокое разнообразие лишайников отмечено на песчано-гравийных отложениях карьеров. Преобладание крупнозернистой фракции песка и наличие гравия и гальки уменьшают подверженность субстрата эрозион-

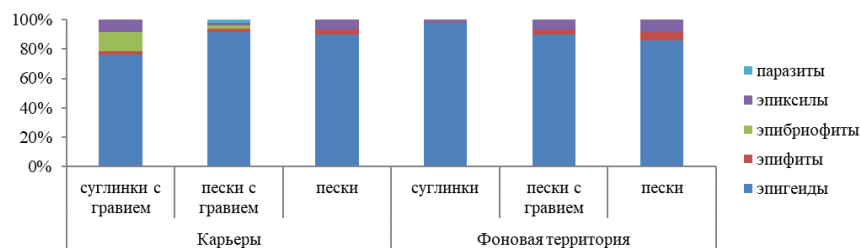


Рисунок 7. Распределение эколого-субстратных групп лишайников в производных и фоновых сообществах на разных типах субстратов.

Figure 7. Distribution of ecological-substrate lichen groups in secondary and background communities on different types of soil material.

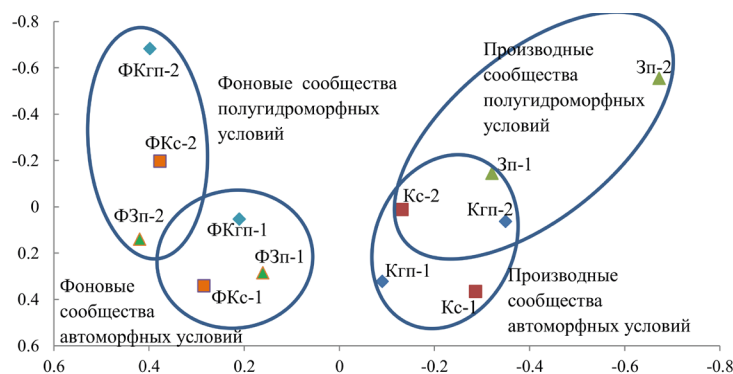


Рисунок 8. NMS-ординация видового состава лишайников фоновых и производных сообществ на суглинистых гравийно-песчаных и песчаных отложениях в автоморфных и полугидроморфных условиях.

Figure 8. NMS-ordination of species composition of lichens from background and secondary communities on loamy gravel-sandy and sandy deposits under automorphic and semi-hydromorphic conditions.

ным процессам. Низкое содержание питательных веществ ограничивает развитие сосудистых растений. Все отмеченное благоприятствует развитию лишайников. На суглинках лишайники, как правило, подавляются активным развитием мохового покрова. Поселению лишайников на мелкозернистых песках препятствует высокая подверженность эрозии данного типа субстрата.

На территории изученных карьеров отмечено шесть видов лишайников, включенных в Красную книгу Республики Коми и Приложение 1 к ней.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

1. Дружинина, О. А. Охрана растительного покрова Крайнего Севера: проблемы и перспективы / О. А. Дружинина, Е. Г. Мяло. – Москва : Агропромиздат, 1990. – 176 с.
2. Сумина, О. И. Формирование растительности на техногенных местообитаниях Крайнего Севера России / О. И. Сумина. – Санкт-Петербург : Информ-Навигатор, 2013. – 340 с.
3. Patova, E. N. Processes of Natural Soil and Vegetation Recovery on a Worked-out Open Pit Coal Mine (Bol'shezemel'skaya Tundra) / E. N. Patova, E. E. Kulyugina, S. V. Deneva // Russian Journal of Ecology. – 2016. – Vol. 47, N 3. – P. 228–233. – DOI: 10.1134/S1067413616020119
4. Walton, David W. H. The effects of cryptogams on mineral substrates. / David W. H. Walton // Primary succession on land. Special publication number 12 of British Ecological

- Society / eds. J. Miles, David W. H. Walton. – London : Blackwell Scientific Publication, 1993. – P. 33–53.
5. Головенко, Е. А. Особенности лишенофлоры гранитных и железорудных карьерно-отвальных комплексов Криворозья / Е. А. Головенко, И. И. Коршиков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2015. – Т. 17, № 4 (5). – С. 994–999.
 6. Harper, K. A. Natural Revegetation on Borrow Pits and Vehicle Tracks in Shrub Tundra, 48 Years Following Construction of the CANOL No. 1 Pipeline, N.W.T., Canada / K. A. Harper, G. P. Kershaw // Arctic and Alpine Research. – 1996. – N 28. – P. 163–171. – DOI: 10.2307/1551756
 7. Растительность Европейской части СССР / отв. ред. С. А. Грибова [и др.]. – Ленинград : Наука, 1980. – 425 с.
 8. Попов, А. И. Отчет о производстве геологической съемки масштаба 1:50 000 в Воркутинском промышленном районе на территории листов Q-41-20 А, Б, В, Г и Q-41-21 А, Б, В, Г (геологическая съемка четвертичных отложений и геоморфологическая съемка) / А. И. Попов. – Москва, 1963.
 9. Полевой определитель почв России. – Москва : почв. ин-т им. В. В. Докучаева, 2008. – 182 с.
 10. Секретарева, Н. А. Сосудистые растения Российской Арктики и сопредельных территорий // Н. А. Секретарева. – Москва : Товарищество научных изданий КМК, 2004. – 131 с.
 11. Ignatov, M. S. Checklist of mosses of East Europe and North Asia / M. S. Ignatov, O. M. Afonina, E. A. Ignatova with contributions on regional floras from: A. Abolina, T. V. Akatova, E. Z. Baisheva, L. V. Bardunov, E. A. Baryakina, O. A. Belkina, A. G. Bezgodov, M. A. Boychuk, V. Ya. Cherdantseva, I. V. Czernyadjeva, G. Ya. Doroshina, A. P. Dyachenko, V. E. Fedosov, I. L. Goldberg, E. I. Ivanova, I. Jukoniene, L. Kannukene, S. G. Kazanovsky, Z. Kh. Kharzinov, L. E. Kurbatova, A. I. Maksimov, U. K. Mamatkulov, V. A. Manakyan, O. M. Maslovsky, M. G. Napreenko, T. N. Otnyukova, L. Ya. Partyka, O. Yu. Pisarenko, N. N. Popova, G. F. Rykovsky, D. Ya. Tubanova, G. V. Zheleznova, V. I. Zolotov // Arctoa. – 2006. – № 15. – P. 1–130. – DOI: 10.15298/arctoa.15.01
 12. Santesson's Checklist of Fennoscandian Lichen-Forming and Lichenicolous Fungi / M. Westberg, R. Moberg, M. Myrdal [et al.] // Uppsala : Uppsala University, 2021. – 933 p.
 13. Braun-Blanquet, J. Pflanzensoziologie. Grundzüge der Vegetationskunde. 3. Aufl. / J. Braun-Blanquet. – Wien ; New York, 1964. – 865 p. – DOI: 10.1007/978-3-7091-8110-2
 14. Новаковский, А. Б. Взаимодействие Excel и статистического пакета R для обработки данных в экологии / А. Б. Новаковский // Вестник Института биологии Коми НЦ УрО РАН. – 2016. – № 3. – С. 26–33.
 15. Вадюнина, А. Ф. Методы исследования физических свойств почв / А. Ф. Вадюнина, З. А. Корчагина. – Москва : Агропромиздат, 1986. – 416 с.
 16. Теория и практика химического анализа почв / отв. ред. Л. А. Воробьева. – Москва : ГЕОС, 2006. – 400 с.
 17. Уваров, С. А. Фитомасса лишайников и зеленых растений в сообществах восточноевропейских тундр / С. А. Уваров, А. М. Лапина, О. В. Лавриненко // Растительные ресурсы. – 2021. – Т. 57, вып. 1. – С. 15–38.
 18. Присяжнюк, С. А. Жизненные формы лишайников субарктических тундр полуострова Ямал. II. Связь с экологическими факторами / С. А. Присяжнюк // Ботанический журнал. – 1996. – Т. 81, № 4. – С. 48–55.
 19. Андреева, В. М. Неподвижные зеленые водоросли (Chlorophyta) из почв правобережья р. Ортины (устье р. Печоры) / В. М. Андреева // Новости систематики низших растений. – 2005. – Т. 38. – С. 3–7.
 20. Milner, A. M. Interactions and Linkages among Ecosystems during Landscape Evolution / A. M. Milner, C. L. Fastie, F. S. Chapin III [et al.] // BioScience. – 2007. – Vol. 57, N 3. – P. 237–247. – DOI: 10.1641/B570307
 21. Красная книга Республики Коми / отв. ред. С. В. Дёгтева. – Сыктывкар, 2019. – 768 с.

References

1. Druzhinina, O. A. Ohrana rastitelnogo pokrova Krajnego Severa: problemy i perspektivy [Protection of the vegetation cover of the Far North: Problems and prospects] / O. A. Druzhinina, E. G. Myalo. – Moscow : Agropromizdat, 1990. – 176 p.
2. Sumina, O. I. Formirovanie rastitelnosti na tekhnogennykh mestoobitaniyakh Krajnego Severa Rossii [Formation of vegetation on technogenic habitats of the Far North of Russia] / O. I. Sumina. – Saint-Petersburg : Inform-Navigator, 2013. – 340 p.
3. Patova, E. N. Processes of natural soil and vegetation recovery on a worked-out open pit coal mine (Bol'shezemel'skaya Tundra) / E. N. Patova, E. E. Kulyugina, S. V. Deneva // Russian Journal of Ecology. – 2016. – Vol. 47, N 3. – P. 228–233. – DOI: 10.1134/S1067413616020119
4. Walton, David W. H. The effects of cryptogams on mineral substrates. / David W. H. Walton // Primary succession on land. Special publication number 12 of British Ecological Society / eds. J. Miles, David W. H. Walton. – London : Blackwell Scientific Publication, 1993. – P. 33–53.
5. Golovenko, E. A. Osobennosti lihenoflory granitnykh i zhelezorudnykh karyerno-otvalnykh kompleksov Krivorozhya [Features of lichenoflora of granite and iron ore quarry-dump complexes of Krivorozhye] / E. A. Golovenko, I. I. Korshikov // Proceedings of the Samara Science Centre of the Russian Academy of Sciences. – 2015. – Vol. 17, № 4 (5). – P. 994–999.
6. Harper, K. A. Natural revegetation on borrow pits and vehicle tracks in shrub tundra, 48 Years following construction of the CANOL No. 1 pipeline, N.W.T., Canada / K. A. Harper, G. P. Kershaw // Arctic and Alpine Research. – 1996. – № 28. – P. 163–171.
7. Rastitelnost Evropejskoj chasti SSSR [Vegetation of the European part of the USSR] / ed. S. A. Gribova [et al.]. – Leningrad : Nauka, 1980. – 425 p.
8. Popov, A. I. Otchet o proizvodstve geologicheskoy syemki masshtaba 1:50000 v Vorkutinskom promyshlennom rajone na territorii listov Q-41-20 A, B, V, G i Q-41-21 A, B, V, G (geologicheskaya syemka chetvertichnykh otlozhenij

- i geomorfologicheskaya syemka) [Report on the production of geological survey on a scale of 1:50000 in the Vorkuta industrial area on the territory of the sheets Q-41-20 A, Б, В, Г and Q-41-21 A, Б, В, Г (geological survey of Quaternary deposits and geomorphological survey)] / A. I. Popov. – Moscow, 1963.
9. Polevoj opredelitel pochv Rossii [Field Soil Manual of Russia]. – Moscow : Soil Institute named after V. V. Dokuchaev, 2008. – 182 p.
 10. Secretareva, N. A. Sosudistye rasteniya Rossijskoj Arktiki i sopredelnyh territorij [Vascular plants of the Russian Arctic and adjacent territories] // N. A. Secretareva. – Moscow : Partnership of Scientific Editions KMK, 2004. – 131 p.
 11. Ignatov, M. S. Checklist of mosses of East Europe and North Asia / M. S. Ignatov, O. M. Afonina, E. A. Ignatova with contributions on regional floras from: A. Abolina, T. V. Akatova, E. Z. Baisheva, L. V. Bardunov, E. A. Baryakina, O. A. Belkina, A. G. Bezgodov, M. A. Boychuk, V. Ya. Cherdantseva, I. V. Czernyadjeva, G. Ya. Doroshina, A. P. Dyachenko, V. E. Fedosov, I. L. Goldberg, E. I. Ivanova, I. Jukoniene, L. Kannukene, S. G. Kazanovsky, Z. Kh. Kharzinov, L. E. Kurbatova, A. I. Maksimov, U. K. Mamatkulov, V. A. Manakyan, O. M. Maslovsky, M. G. Napreenko, T. N. Otnyukova, L. Ya. Partyka, O. Yu. Pisarenko, N. N. Popova, G. F. Rykovsky, D. Ya. Tubanova, G. V. Zheleznova, V. I. Zolotov // *Arctoa*. – 2006. – № 15. – P. 1–130. – DOI: 10.15298/arctoa.15.01
 12. Santesson's checklist of Fennoscandian lichen-forming and lichenicolous fungi / M. Westberg, R. Moberg, M. Myrdal [et al.] // Uppsala : Uppsala University, 2021. – 933 p.
 13. Braun-Blanquet, J. Pflanzensoziologie. Grundzüge der Vegetationskunde. 3. Aufl. / J. Braun-Blanquet. – Wien : New York, 1964. – 865 p. – DOI: 10.1007/978-3-7091-8110-2
 14. Novakovsky, A. B. Vzaimodejstvie Excel i statisticheskogo paketa R dlya obrabotki dannyh v ekologii [Interaction of Excel and statistical package R for data processing in ecology] / A. B. Novakovsky // Bulletin of the Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch RAS. – 2016. – № 3. – P. 26–33.
 15. Vadyunina, A. F. Metody issledovaniya fizicheskikh svoystv pochv [Research methods of soil physical properties] / A. F. Vadyunina, Z. A. Korchagina. – Moscow : Agropromizdat, 1986. – 416 p.
 16. Teoriya i praktika himicheskogo analiza pochv [Theory and practice of soil chemical analysis] / ed. L. A. Vorobyeva. – Moscow : GEOS, 2006. – 400 p.
 17. Uvarov, S. A. Fitomassa lishajnikov i zelenykh rastenij v soobshchestvakh vostochnoevropejskikh tundr [Phytomass of lichens and green plants in communities of East European tundras] / S. A. Uvarov, A. M. Lapina, O. V. Lavrinenko // *Rastitelnye resursy* [Plant Resources]. – 2021. – Vol. 57, iss. 1. – P. 15–38.
 18. Prisyazhnyuk, S. A. Zhiznennye formy lishajnikov subarkticheskikh tundr poluostrova Yamal. II. Svyaz' s ekologicheskimi faktorami [Life forms of subarctic tundra lichens on the Yamal Peninsula. II. Relation with ecological factors] / S. A. Prisyazhnyuk // *Botanichesky zhurnal* [Botanical Journal]. – 1996. – Vol. 81, N 4. – P. 48–55.
 19. Andreeva, V. M. Nepodvizhnye zelenye vodorosli (*Chlorophyta*) iz pochv pravoberezhya r. Ortiny (ustye r. Pechory) [Immobile green algae (Chlorophyta) from soils on the right bank of the Ortina River (mouth of the Pechora River)] / V. M. Andreeva // *Novosti sistematiki nizshikh rastenij* [News of Lower Plant Systematics]. – 2005. – Vol. 38. – P. 3–7.
 20. Milner, A. M. Interactions and linkages among ecosystems during landscape evolution / A. M. Milner, C. L. Fastie, F. S. Chapin III [et al.] // *BioScience*. – 2007. – Vol. 57, N 3. – P. 237–247. – DOI: 10.1641/B570307
 21. Red Data Book of the Komi Republic / ed. S. V. Degteva. – Syktyvkar, 2019. – 768 p.

Благодарность (госзадание):

Работа выполнена в рамках темы НИР «Криогенез как фактор формирования и эволюции почв бореальных и арктических экосистем европейского Северо-Востока в условиях антропогенных воздействий, глобальных и современных региональных климатических трендов», регистрационный номер: 122040600023-8.

Acknowledgements (state task)

This study was carried out within the framework of the research project “Cryogenesis as a factor in the formation and evolution of soils in the Arctic and boreal ecosystems of the European northeast under the conditions of modern anthropogenic impacts, global and regional climate trends,” registration number: 122040600023-8.

Информация об авторах:

Лиханова Ирина Александровна – кандидат биологических наук, научный сотрудник отдела почвоведения Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; Scopus Author ID: 24825147500, <http://orcid.org/0000-0001-8781-4768> (167982, Российская Федерация, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28; e-mail: likhanova@ib.komisc.ru).

Пыстина Татьяна Николаевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник отдела флоры и растительности Севера Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; Scopus Author ID: 25636517000, <http://orchid.org/0000-0003-2215-4724> (167982, Российская Федерация, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28; e-mail: t.pystina@ib.komisc.ru).

Железнова Галина Виссарионовна – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник отдела флоры и растительности Севера Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; Scopus Author ID: 8660450200, <http://orchid.org/0000-0002-8208-0838> (167982, Российская Федерация, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28; e-mail: zheleznova@ib.komisc.ru).

Денева Светлана Валентиновна – кандидат биологических наук, научный сотрудник отдела почвоведения Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; Scopus Author ID: 6505890768, <http://orchid.org/0000-0002-1813-7799> (167982, Российская Федерация, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28; e-mail: deneva@ib.komisc.ru).

About the authors:

Irina A. Likhanova – Candidate of Sciences (Biology), Researcher at the Soil Science Department of the Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; Scopus Author ID: 24825147500, <http://orchid.org/0000-0001-8781-4768> (28 Kommunisticheskaya st., Syktyvkar 167982, Komi Republic, Russian Federation; e-mail: likhanova@ib.komisc.ru).

Tatiana N. Pystina – Candidate of Sciences (Biology), Senior Researcher at the Department of Flora and Vegetation of the North of the Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; Scopus Author ID: 25636517000, <http://orchid.org/0000-0003-2215-4724> (28 Kommunisticheskaya st., Syktyvkar 167982, Komi Republic, Russian Federation; e-mail: t.pystina@ib.komisc.ru).

Galina V. Zheleznova – Doctor of Sciences (Biology), Leading Researcher at the Department of Flora and Vegetation of the North of the Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; Scopus Author ID: 8660450200, <http://orchid.org/0000-0002-8208-0838> (28 Kommunisticheskaya st., Syktyvkar 167982, Komi Republic, Russian Federation; e-mail: zheleznova@ib.komisc.ru).

Svetlana V. Deneva – Candidate of Sciences (Biology), Researcher at the Soil Science Department of the Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; Scopus Author ID: 6505890768, <http://orchid.org/0000-0002-1813-7799> (28 Kommunisticheskaya st., Syktyvkar 167982, Komi Republic, Russian Federation; e-mail: deneva@ib.komisc.ru).

Для цитирования:

Лиханова, И. А. Лишайники на карьерах южной тундры Северо-Востока европейской части России / И. А. Лиханова, Т. Н. Пыстина, Г. В. Железнова [и др.] // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Экспериментальная биология и экология». – 2024. – № 9 (75). – С. 39–50.

For citation:

Likhanova, I. A. Lishainiki na karyerakh yuzhnoi tundry severo-vostoka evropeiskoi chasti Rossii [Lichens in quarries of the south tundra subzone of the European North-East of Russia] / I. A. Likhanova, T. N. Pystina, G. V. Zheleznova, S. V. Deneva // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series "Experimental Biology and Ecology". – 2024. – № 9 (75). – P. 39–50

Дата поступления статьи: 10.09.2024

Прошла рецензирование: 23.09.2024

Принято решение о публикации: 07.10.2024

Received: 10.09.2024

Reviewed: 23.09.2024

Accepted: 07.10.2024

Материалы к изучению лишайников природного рекреационного комплекса «Сосновый бор острова Ягры» (Архангельская область)

Т. Н. Пыстина*, Н. А. Семёнова*, Т. А. Паринава**, О. Д. Леонова**

*Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
г. Сыктывкар
**Северный (Арктический) федеральный университет
имени М. В. Ломоносова,
г. Архангельск
t.pystina@ib.komisc.ru
semenova@ib.komisc.ru
nadeinata@mail.ru
leonova.o@edu.narfu.ru

Аннотация

В работе представлены первые данные о разнообразии лишайников природного рекреационного комплекса «Сосновый бор острова Ягры», на территории которого были обследованы сосновые и березово-сосновые леса, испытывающие разную степень антропогенной нагрузки. Список включает 129 видов и внутривидовых таксонов лишайников и таксономически близких к ним грибов. Установлено, что наиболее посещаемые участки леса испытывают значительный антропогенный пресс, что выражается в смене видового состава лишайников, различных морфологических повреждениях их талломов, поражении лихенофильными грибами. На удаленных от рекреационных объектов участках выявлены виды, характерные для старовозрастных малонарушенных лесов. Впервые для Архангельской области приводятся *Naevia punctiformis* и *Scliciosporum sarothamni*. Для *Bacidina assulata* это вторая находка в Архангельской области.

Ключевые слова:

лишайники, Ягры, дюнные сосняки, нарушенные территории, *Naevia punctiformis*, *Scliciosporum sarothamni*, *Bacidina assulata*

Введение

Ягры – песчаный остров, расположенный в северо-западной части морского края дельты р. Северной Двины. Его мористый берег омывают воды залива Двинской губы Белого моря [1]. Представляет собой чередование пяти протяженных береговых валов (шириной 20–30 м и относительной высотой 2–3 м) и вытянутых заболоченных понижений (шириной 200–700 м) между ними. Вся система субпараллельна современной береговой линии. Береговые

Materials for the study of lichens of the natural recreational complex “Pine Forest of the Yagry Island” (Arkhangelsk Region)

T. N. Pystina*, N. A. Semenova*, T. A. Parinova**, O. D. Leonova**

*Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Syktvykar
**Northern (Arctic) Federal University
named after M. V. Lomonosov,
Arkhangelsk
t.pystina@ib.komisc.ru
semenova@ib.komisc.ru
nadeinata@mail.ru
leonova.o@edu.narfu.ru

Abstract

The paper presents the first data on the diversity of lichens in the natural recreational complex “Pine Forest of the Yagry Island”. We have investigated pine and birch-pine forests growing on its territory and differing by the degree of anthropogenic load. The list includes 129 species and intraspecific taxa of lichens and taxonomically lichen-related fungi. Often-visited forest areas suffer from a significant anthropogenic pressure that has consequences as change in the species composition of lichens, various morphological damage to their thalli, and destruction of lichens by lichenophilic fungi. Sites situated far from the recreational facilities have been identified for the species normally found in old-growth poorly-disturbed forests. Samples of *Naevia punctiformis* and *Scliciosporum sarothamni* are first listed for the Arkhangelsk Region. *Bacidina assulata* is listed for the second time for the Arkhangelsk Region.

Keywords:

lichens, Yagry, dune pine forests, disturbed areas, *Naevia punctiformis*, *Scliciosporum sarothamni*, *Bacidina assulata*

валы местами осложнены авандюнами (высотой до 4–5 м, редко – 10–15 м), которые остаются подвижными с мористой стороны передового вала в зоне морского пляжа [2].

На острове находятся: один из микрорайонов г. Северодвинска, судоремонтное предприятие «Звездочка», воинский мемориальный комплекс, набережная и прогулочные участки. В настоящее время у жителей Архангельска и Северодвинска и туристов это одно из самых популярных мест отдыха [3–5].

На о-ве Ягры решением Муниципального Совета г. Северодвинска № 57 от 30.05.2002 была учреждена особо охраняемая природная территория местного значения «Сосновый бор острова Ягры». В настоящее время она отнесена к категории «Природный рекреационный комплекс» и ее площадь составляет 184,39 га. Особо охраняемая природная территория (далее – ООПТ) располагается на западе острова к северу от г. Северодвинска, между Двинским заливом Белого моря и р. Ягоркой (рис. 1).

Цель создания резервата – сохранение уникального 200-летнего соснового бора и дюнного ландшафта береговой косы Северодвинска для создания условий для отдыха (в том числе массового) и сохранения рекреационных ресурсов.

Сосняк дюнный в Архангельской области является редкой лесной экосистемой и представляет большую экологическую ценность, будучи примером закрепления песков лесами [5]. На охраняемой территории основные экосистемы – это лесные насаждения (из них сосняки составляют 72 %), болота и тростниковые заросли [5–10].

В 2021 г. на территории ООПТ в ходе маршрутов в сосняках (на пакетах с образцами указаны только субстрат и координаты местообитания) была собрана небольшая коллекция лишайников (79 образцов), при определении которой установлено произрастание 44 видов.

В 2023 г. изучение разнообразия лишайников было продолжено на 32 временных пробных площадях (далее – ПП) 20х20 м, заложенных в сосновых лесах, испытывающих рекреационную нагрузку. Степень рекреационной нагрузки оценивали через показатель уплотнения почвы. Для этого на различных участках Ягринского бора (тропы, дороги, сосновые леса) проводили измерение уровня со-

противления почвы к проникновению с помощью современного электронного конусного пенетromетра Field Scout. При сравнении сопротивления почвы между контролем и различными участками Ягринского бора использовали Mann-Whitney U Test. Сравнения осуществляли послойно через 2,5 см на глубину до 30 см. Все исследования провели на 0,05 уровне вероятности. Данные анализировали с помощью программы SPSS 22 и установили участки, испытывающие разную степень антропогенного воздействия (слабую, умеренную, сильную). В итоге, в сосновых лесах с умеренным рекреационным воздействием было заложено 14 ПП, с сильной и слабой нагрузкой – по девять (таблица). На соответствующих участках производили геоботанические описания и сбор образцов лишайников с различных субстратов.

В результате идентификации собранных на ПП в 2023 г. образцов (около 560) составлен список лишайников и таксономически близких к ним грибов, включающий 120 видов. Часть накипных лишайников удалось идентифицировать только до рода, поскольку их апотеции были недоразвиты (имели небольшие размеры, в гимениальном слое не развились сумки или в сумках отсутствовали споры), деформированы или поражены лихенофильными грибами.

Определение образцов проводили по общепринятой в лихенологии методике в отделе флоры и растительности Севера Института биологии Коми НЦ УрО РАН. Образцы хранятся в УНУ «Научный гербарий Института биологии Коми НЦ УрО РАН (SYKO)». Названия видов, упоминающихся в статье, даны согласно сводке М. Westberg et al., 2021 [11].

На сегодняшний день на ООПТ «Сосновый бор острова Ягры» известно 129 видов лишайников и грибов, традиционно включаемых в лихенологические списки. В приведенном ниже аннотированном списке для каждого вида приведены сведения о местообитаниях и субстратах. На основе анализа данных, собранных на ПП и в ходе маршрутов, указана встречаемость: единично – вид известен по 1–2 находкам; редко – 3–10; спорадически – 11–20, часто – 21–30; очень часто – более 30. Описания мест сбора образцов с указанием номера пробной площади (для образцов, отобранных в 2021 г., указаны координаты местообитания) приведены только для единично встреченных видов.

В списке использованы следующие условные обозначения:

- * – лихенофильные грибы;
- + – нелихенизированные сапротрофные грибы, традиционно включаемые в списки лихенологами;
- ! – вид приводится впервые для Архангельской области.

Amandinea punctata (Hoffm.) Coppins & Scheid. – на коре осины (ПП 14). Единично.

Athallia cerinelloides (Erichsen) Arup et al. – на коре осины (ПП 11, 31). Единично.

Athallia pyracea (Ach.) Arup et al. – на коре рябины (ПП 12). Единично.

Bacidina assulata (Körb.) S. Ekman – на коре рябины (ПП 7). Единично.

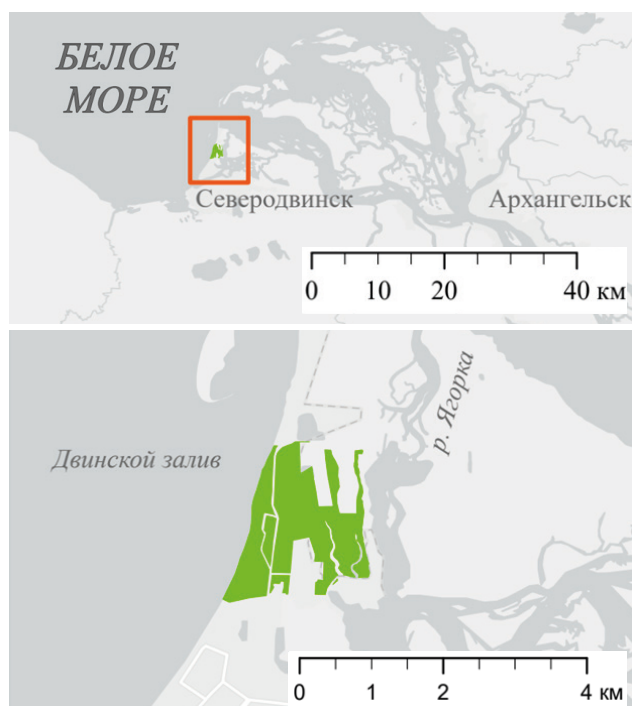


Рисунок 1. Место расположения природного рекреационного комплекса «Сосновый бор острова Ягры».
Figure 1. Location of the natural recreational complex "Pine Forest of the Yagry Island".

**Перечень пробных площадей, заложенных в сосновых лесах ООПТ «Сосновый бор острова Ягры»
с различной степенью рекреационной нагрузки**

**List of sample plots in pine forests of the specially protected natural area "Pine Forest of the Yagry Island"
with different recreational load**

Рекреационная нагрузка	№ ПП	Координаты ПП (WGS 84)	Название растительного сообщества
Слабая	4	64°37'26.2"N, 39°50'27.2"E	Сосняк брусничный с хорошо развитым подлеском из можжевельника вблизи велосипедной трассы
	6	64°37'17.9"N, 39°50'4.7"E	Сосняк чернично-зеленомошный вблизи пешеходной дороги
	15	64°36'47.2"N, 39°50'14.3"E	Сосняк вейниково-брусничный с густым подлеском из рябины вблизи пешеходной и велосипедной дорог
	17	64°37'13.2"N, 39°50'6.4"E	Сосняк чернично-зеленомошный с густым подлеском из рябины, шиповника, можжевельника и ивы козьей, на пологом склоне
	18	64°37'2.6"N, 39°49'31.6"E	Сосняк бруснично-зеленомошный
	19	64°37'11.3"N, 39°49'32"E	Сосняк чернично-зеленомошный
	20	64°37'18.7"N, 39°49'31"E	Сосняк чернично-зеленомошный
	25	64°36'56.2"N, 39°49'10.7"E	Сосняк чернично-зеленомошный с хорошо развитым подлеском и подростом из березы и рябины
	29	64°37'31.8"N, 39°49'8.5"E	Сосняк мелкотравный с березой и густым подлеском из рябины
Умеренная	2	64°37'1.8"N, 39°50'29"E	Сосняк чернично-зеленомошный вблизи стоянки автотранспорта и велосипедной трассы
	7	64°37'1.5"N, 39°50'7.3"E	Сосняк с березой мелкотравно-черничный
	9	64°36'41"N, 39°48'41.2"E	Сосняк мертвопокровный по склону дюны
	10	64°36'48.5"N, 39°48'48"E	Сосняк с березой чернично-зеленомошный вблизи пешеходной тропы
	11	64°36'55.9"N, 39°48'54.8"E	Сосняк с осинкой и ольхой черной кустарничково-разнотравный за гребнем дюны вблизи автостоянки
	13	64°36'43.2"N, 39°48'55.9"E	Сосняк с березой болотно-травяной с развитым подлеском из ивы Гмелина и ольхи серой
	14	64°36'36"N, 39°48'55.2"E	Сосняк с осинкой и березой чернично-зеленомошный
	21	64°37'24.3"N, 39°49'30.1"E	Сосняк с березой чернично-зеленомошный с разреженным подлеском из рябины
	23	64°36'38.7"N, 39°49'6.2"E	Сосняк с осинкой и березой чернично-зеленомошный и подлеском из ольхи серой рядом с автодорогой
	24	64°36'49"N, 39°49'6"E	Сосняк с березой чернично-зеленомошный с густыми ярусами подроста и подлеска из березы, ольхи серой и осины
	26	64°37'2.6"N, 39°49'12.8"E	Сосняк с березой чернично-зеленомошный с густым подлеском и подростом из березы, рябины, ивы козьей, ольхи серой
	27	64°37'18"N, 39°49'5.9"E	Сосняк чернично-зеленомошный
	28	64°37'24.9"N, 39°49'11.5"E	Сосняк с березой и осинкой чернично-зеленомошный
	30	64°37'40.4"N, 39°49'20.3"E	Сосново-березовый лес с осинкой и подлеском из рябины и серой ольхи чернично-зеленомошный
Сильная	1	64°36'47.9"N, 39°50'32.3"E	Сосняк с березой бруснично-разнотравный рядом с гаражным кооперативом
	3	64°37'8.3"N, 39°50'28.9"E	Сосняк чернично-зеленомошный вблизи велосипедной трассы
	5	64°37'32.2"N, 39°50'2"E	Сосняк бруснично-зеленомошный вблизи велосипедной трассы
	8	64°36'33.8"N, 39°48'31.9"E	Сосняк с березой мертвопокровный в зоне пешеходных и велосипедных дорожек
	12	64°37'2"N, 39°48'55"E	Сосняк вороничный в зоне пешеходных и велосипедных дорожек
	16	64°36'54.5"N, 39°50'9.3"E	Сосняк мертвопокровный со следами кострищ, строительным мусором и сильными повреждениями стволов сосен
	22	64°37'35.6"N, 39°49'29.5"E	Сосняк мертвопокровный с наличием кострищ, мусора, поврежденных деревьев
	31	64°37'40.4"N, 39°49'20.3"E	Сосняк с березой мертвопокровный
	32	64°37'22"N, 39°48'59.2"E	Сосняк с березой мелкотравно-клеверный

Biatora beckhausii (Körb.) Tuck. – на коре березы, единично на коре сосны. Редко.

Biatora efflorescens (Hedl.) Räsänen – в основном на коре березы, реже сосны, ивы и рябины. Редко.

Biatora ocelliformis (Nyl.) Arnold – на коре осины (ПП 2) и ивы (64°37'16.9" N, 39°49'3.4" E). Единично.

Biatora pallens (Kullh.) Printzen – на коре березы (ПП 13), на гниющей древесине сосны (ПП 18). Единично.

Bryoria capillaris (Ach.) Brodo & D. Hawksw. – на стволах и ветвях березы и сосны. Редко.

Bryoria furcellata (Fr.) Brodo & D. Hawksw. – преимущественно на стволах и ветвях сосны, реже березы. Редко.

Bryoria fuscescens (Gyeln.) Brodo & D. Hawksw. s.l. – на стволах и ветвях сосны, березы, ивы и рябины. Спорадически.

Bryoria cf. glabra (Motyka) Brodo & D. Hawksw. – на ветвях ивы (64°37'16.9" N, 39°49'3.4" E). Единично.

Bryoria implexa (Hoffm.) Brodo & D. Hawksw. – на стволах и ветвях сосны, реже березы. Редко.

Bryoria nadvornikiana (Gyeln.) Brodo & D. Hawksw. – на стволах и ветвях сосны и ивы. Редко.

Bryoria simplicior (Vain.) Brodo & D. Hawksw. – на стволах и ветвях сосны, реже березы. Редко.

Buellia disciformis (Fr.) Mudd – на коре лиственных деревьев и кустарников. Редко.

- Buellia erubescens* Arnold – на коре ивы (ПП 11). Единично.
- Buellia griseovirens* (Turner & Borrer ex Sm.) Almb. – на коре лиственных деревьев и кустарников. Редко.
- Buellia schaeferi* De Not. – на коре сосны (ПП 8, 12). Единично.
- Calicium glaucellum* Ach. – на древесине ствола березы (ПП 29). Единично.
- Candelariella xanthostigma* (Ach.) Lettau – на древесине высокого пня сосны (ПП 21). Единично.
- Carbonicola anthracophila* (Nyl.) Bendiksbj & Timdal – на обугленной древесине пня сосны в сосняке черничном (ПП 6). Единично.
- Carbonicola myrmecina* (Ach.) Bendiksbj & Timdal – на обугленной древесине пня сосны (ПП 18). Единично.
- Cetraria islandica* (L.) Ach. – на почве и старом валеже сосны. Редко.
- Cetraria sepincola* (Ehrl.) Ach. – на тонких веточках сосны, березы, единично рябины. Редко.
- Chaenotheca chrysocephala* (Turner ex Ach.) Th. Fr. – на древесине пня сосны (ПП 6). Единично.
- Chaenotheca ferruginea* (Turner ex Sm.) Mig. – на древесине пней сосны (ПП 6, 21). Единично.
- Chaenotheca trichialis* (Ach.) Th. Fr. – на древесине пней сосны (ПП 6, 21). Единично.
- **Chaenothecopsis savonica* (Räsänen) Tibell – на древесине валежа сосны (ПП 11). Единично.
- Cladonia bacilliformis* (Nyl.) Glück – на валеже и пнях сосны. Редко.
- Cladonia cenotea* (Ach.) Schaer. – на почве, пнях, валеже и комлях деревьев. Редко.
- Cladonia chlorophaea* (Flörke ex Sommerf.) Spreng. s.l. – на почве, пнях, валеже и комлях деревьев. Редко.
- Cladonia coniocraea* (Flörke) Spreng. – в нижней части стволов деревьев, на валеже, пнях, редко на почве. Очень часто.
- Cladonia cornuta* (L.) Hoffm. – на почве, пнях и валеже. Редко.
- Cladonia crispata* (Ach.) Flot. – на почве (ПП 3, 10). Единично.
- Cladonia deformis* (L.) Hoffm. – на пне сосны (64°36'19.4" N, 39°48'48" E). Единично.
- Cladonia digitata* (L.) Hoffm. – на пнях и валеже сосны и березы. Редко.
- Cladonia fimbriata* (L.) Fr. – в нижней части стволов деревьев, на валеже и пнях. Спорадически.
- Cladonia furcata* (Huds.) Schrad. – на почве и старом замшелом валеже. Редко.
- Cladonia gracilis* ssp. *turbinata* (Ach.) Ahti – на валеже (ПП 21). Единично.
- Cladonia macilenta* Hoffm. – на валеже и пнях. Редко.
- Cladonia ochrochlora* Flörke – на почве (ПП 31). Единично.
- Cladonia phyllophora* Hoffm. – на почве (ПП 2) и пне (ПП 4). Единично.
- Cladonia pleurota* (Flörke) Schaer. – на почве (ПП 3) и гниющей древесине (ПП 16). Единично.
- Cladonia rangiferina* (L.) F.H. Wigg. – на почве, пнях и валеже. Редко.
- Cladonia squamosa* Hoffm. – на пнях, валеже и комлях деревьев сосны. Редко.
- Cladonia stellaris* (Opiz) Pouzar & Vězda – на валеже (ПП 4). Единично.
- Cladonia subulata* (L.) Weber ex F.H. Wigg. – на почве (ПП 3). Единично.
- Cladonia sulphurina* (Michx.) Fr. – на почве, пнях, валеже и комлях деревьев. Редко.
- Cladonia uncialis* (L.) Weber ex F.H. Wigg. – на почве (ПП 2) и валеже (ПП 4). Единично.
- Coenogonium pineti* (Ach.) Lücking & Lumbsch – на гниющей древесине (ПП 30). Единично.
- Evernia mesomorpha* Nyl. – на стволах и ветвях сосны и березы. Редко.
- Frutidella furfuracea* (Anzi) M. Westb. & M. Svensson – на коре березы (ПП 8). Единично.
- Fuscidea pusilla* Tønsberg – на коре различных видов деревьев. Очень часто.
- Gyalecta fagicola* (Hepp ex Arnold) Kremp. – на коре рябины (ПП 7) и березы (64°37'16.9" N, 39°49'3.4" E). Единично.
- Gyalolechia flavorubescens* (Huds.) Söchting et al. – на коре осины (ПП 11). Единично.
- Hertelidea botryosa* (Fr.) Printzen & Kantvilas – на валеже (ПП 11, 22). Единично.
- Hypocnemomysce scalaris* (Ach.) M. Choisy – на коре и древесине сосны. Спорадически.
- Hypogymnia physodes* (L.) Nyl. – на стволах и ветвях различных видов деревьев и кустарников, пнях, валеже. Очень часто.
- Hypogymnia tubulosa* (Schaer.) Havar. – на коре сосны, единично на иве. Редко.
- Imshaugia aleurites* (Ach.) S.L.F. Meyer – на коре и древесине сосны. Редко.
- Japewia subaurifera* Muhr & Tønsberg – на коре, реже древесине деревьев и кустарников. Часто.
- Lecania cyrtella* (Ach.) Th. Fr. – на коре ольхи (ПП 17) и березы (ПП 24). Единично.
- Lecanora aitema* (Ach.) Hepp – на коре ивы (ПП 11) и ольхи (ПП 26). Единично.
- Lecanora albella* (Pers.) Ach. – на коре рябины (ПП 7). Единично.
- Lecanora allophana* Nyl. – на коре осины (ПП 24). Единично.
- Lecanora albellula* (Nyl.) Th. Fr. var. *albellula* – на коре рябины (ПП 12) и березы (64°37'1.3" N, 39°48'53.3" E). Единично.
- Lecanora fuscescens* (Sommerf.) Nyl. – на коре березы (ПП 20) и рябины (64°37'16.9" N, 39°49'3.4" E). Единично.
- Lecanora hypopta* (Ach.) Vain. – на древесине пня сосны (ПП 21). Единично.
- Lecanora populicola* (DC.) Duby – на коре осины. Редко.
- Lecanora pulicaris* (Pers.) Ach. – в основном на коре лиственных деревьев, реже на сосне и древесине. Часто.
- Lecanora septentrionalis* H. Magn. – на коре ивы (64°36'19.4" N, 39°49'31" E). Единично.
- Lecanora subintricata* (Nyl.) Th. Fr. – на коре березы и ольхи, древесине пней и валежа. Редко.

- Lecanora symmicta* (Ach.) Ach. – на коре и древесине кустарников и лиственных деревьев. Спорадически.
- Lecidea albofuscescens* Nyl. – на коре сосны и лиственных деревьев. Спорадически.
- Lecidea erythrophaea* Flörke ex Sommerf. – на коре лиственных деревьев. Редко.
- Lecidea nylanderii* (Anzi) Th.Fr. – на коре сосны, реже березы. Спорадически.
- Lecidea plebeja* Nyl. – на коре сосны (64°36'46.6" N, 39°48'59.1" E). Единично.
- Lecidea turgidula* Fr. – на коре сосны (ПП 5). Единично.
- Lecidella elaeochroma* (Ach.) M. Choisy – на коре осины (ПП 2). Единично.
- Lecidella euphorea* (Flörke) Hertel – на коре осины (ПП 11). Единично.
- Lepraria jackii* Tønsberg – на коре и древесине в комлевой части стволов хвойных и лиственных деревьев. Спорадически.
- +*Leptorhaphis epidermidis* (Ach.) Th. Fr. – на коре березы. Редко.
- Melanohalea exasperata* (De Not.) O. Blanco et al. – на коре березы (ПП 6, 12). Единично.
- Melanohalea olivacea* (L.) O. Blanco et al. – преимущественно на коре лиственных деревьев, реже сосны, древесине валежа и пней. Очень часто.
- Melanohalea septentrionalis* (Lynge) O. Blanco et al. – на коре лиственных деревьев. Редко.
- Micarea denigrata* (Fr.) Hedl. – на древесине сосны. Редко.
- Micarea melaena* (Nyl.) Hedl. – на древесине пней и валежа сосны. Редко.
- Micarea cf. globulosella* (Nyl.) Coppins – в трещине коры старой осины (ПП 11). Единично.
- Micarea prasina* Fr. – на древесине пней и валежа. Редко.
- Mycobilimbia epixanthoides* (Nyl.) Vitik. et. al. – на коре осины (ПП 2, 11). Единично.
- Mycobilimbia tetramera* (De Not.) Vitik. et al. ex Hafellner & Türk – на коре осины (ПП 2). Единично.
- Myriolecis hagenii* (Ach.) Šliwa et al. – на коре и древесине лиственных деревьев и кустарников. Спорадически.
- Naevia punctiformis* (Ach.) A. Massal. – на коре ольхи серой (ПП 4, 13). Единично.
- Ochrolechia alboflavescens* (Wulfen) Zahlbr. – на коре березы (ПП 20). Единично.
- Ochrolechia androgyna* (Hoffm.) Arnold – на коре осины (ПП 2, 23). Единично.
- Ochrolechia microstictoides* Räsänen – на коре березы (ПП 21). Единично.
- Parmelia sulcata* Taylor – на коре лиственных деревьев и кустарников, реже на сосне. Спорадически.
- Parmeliopsis ambigua* (Wulfen) Nyl. – на коре и древесине лиственных и хвойных деревьев, кустарников, пнях и валеже. Очень часто.
- Parmeliopsis hyperopta* (Ach.) Arnold – на коре и древесине лиственных и хвойных деревьев, кустарников, пнях и валеже. Очень часто.
- Peltigera aphthosa* (L.) Willd. – на почве и замшелом валеже. Редко.
- Peltigera canina* (L.) Willd. – на почве (ПП 15). Единично.
- Peltigera didactyla* (With.) J.R. Laundon – на сильно разложившемся валеже (ПП 5) и почве (64°36'19.4" N, 39°49'22.3" E). Единично.
- Peltigera leucophlebia* (Nyl.) Gyeln. – на почве (64°36'19.4" N, 39°49'22.3" E). Единично.
- Peltigera polydactylon* (Neck.) Hoffm. – на почве, старом валеже и комлях стволов деревьев. Редко.
- Peltigera praetextata* (Flörke ex Sommerf.) Zopf – на комле березы (ПП 8). Единично.
- Phlyctis argena* (Spreng.) Flot. – на коре осины (ПП 11, 23). Единично.
- Physcia adscendens* H. Olivier – на коре осины (ПП 23). Единично.
- Physcia aipolia* (Ehrh. ex Humb.) Fűrnr. – на коре осины (64°36'28.6" N, 39°49'6.2" E). Единично.
- Physcia stellaris* (L.) Nyl. – на коре осины, единично ивы. Редко.
- Placynthiella icmalea* (Ach.) Coppins & P. James – на гниющей древесине пней и валежа. Редко.
- Placynthiella uliginosa* (Schrad.) Coppins & P. James – на гниющей древесине и почве. Редко.
- Platismatia glauca* (L.) W.L. Culb. & C.F. Culb. – на коре березы и сосны (ПП 17, 18). Единично.
- Pseudoschismatomma rufescens* (Pers.) Ertz & Tehler – на коре и древесине березы. Редко.
- Psynora sorophora* (Vain.) Hafellner – на древесине сосны (ПП 10). Единично.
- Ramalina dilacerata* (Hoffm.) Hoffm. – на коре березы (ПП 32). Единично.
- Rinodina cf. exigua* (Ach.) Gray – на коре сосны (ПП 24). Единично.
- Rinodina pyrina* (Ach.) Arnold – на коре лиственных деревьев и сосны, на гниющей древесине. Редко.
- Scoliciosporum chlorococcum* (Graewe ex Stenh.) Vězda – на коре, реже древесине деревьев и кустарников. Очень часто.
- Scoliciosporum sarothamni* (Vain.) Vězda – на коре ивы (64°37'16.9" N, 39°49'3.4" E). Единично.
- +*Stenocybe pullatula* (Ach.) Stein – на коре серой ольхи. Редко.
- Toensbergia leucococca* (R. Sant.) Bendiksby & Timdal – на коре березы. Редко.
- Tuckermannopsis chlorophylla* (Willd.) Hale – на коре березы и сосны. Редко.
- Usnea dasopoga* (Ach.) Nyl. – на коре ивы (64°37'16.9" N, 39°49'3.4" E). Единично.
- Usnea hirta* (L.) Weber ex F.H. Wigg. – на коре березы (ПП 17). Единично.
- Vulpicida pinastri* (Scop.) J.-E. Mattsson & M.J. Lai – на коре и древесине лиственных и хвойных деревьев, кустарников, на пнях и валеже. Очень часто.
- Xanthoria parietina* (L.) Th.Fr. – на коре лиственных (осина, рябина, береза) деревьев. Редко.
- Xylopsora caradocensis* (Nyl.) Bendiksby & Timdal – на древесине пней сосны (в том числе горелых) и березы. Редко.

Xylopsora friesii (Ach.) Bendiksby & Timdal – на древесине пня сосны (ПП 18). Единично.

Биота лишайников сосновых лесов природной охраняемой территории «Сосновый бор острова Ягры» представлена в основном типичными для таежных лесов видами. Часто встречались *Cladonia coniocraea*, *C. fimbriata*, *Fuscidia pusilla*, *Hypocenomyce scalaris*, *Hypogymnia physodes*, *Japewia subaurifera*, *Lecanora pulicaris*, *Lecidea nylanderii*, *Melanohalea olivacea*, *Parmelia sulcata*, *Parmeliopsis ambigua*, *P. hyperopta*, *Scoliciosporum chlorococcum*, *Vulpicida pinastri*. Несколько реже – *Bryoria fuscescens*, *Cladonia chlorophaea*, *Lecanora symmicta*, *Lecidea albofuscenscens*, *Lepraria jackii*, *Micarea prasina*, *Myriolecis hagenii*, *Tuckermannopsis chlorophylla* и др. Единичные местообитания отмечены для 36 видов лишайников, в том числе таких обычных в бореальной зоне, как, например, *Biatora pallens*, *Chaenotheca chrysocephala*, *Lecanora fuscescens*, *Phlyctis argena*, *Platismatia glauca*, *Ramalina dilacerata* и – некоторые др.

Впервые для Архангельской области указаны эпифитные накипные лишайники *Naevia punctiformis* и *Scoliciosporum sarothamni*. Ближайшие из известных местонахождений для *Naevia punctiformis* на территории европейской части России расположены в Ленинградской области [12] и Республике Коми [13], для *Scoliciosporum sarothamni* – в Ленинградской [14] и Ярославской [15] областях. Находка *Bacidina assulata* является второй в Архангельской области. Ранее вид приводился для Водлозерского национального парка [16]. Ближайшие известные места произрастания лишайника находятся в Мурманской [17] и – Ленинградской [18] областях.

Редких лишайников, охраняемых в Архангельской области, не выявлено, однако были сделаны интересные находки. К их числу можно отнести такие виды, как *Coenogonium pineti* и *Gyalecta fagicola*, встречающиеся преимущественно во влажных местообитаниях старовозрастных лесов.

Как было указано ранее, на пробных площадях, заложенных в 2023 г., выявлено 120 видов лишайников. Анализ распределения видов по ПП, расположенным в лесах, испытывающих разную степень антропогенного воздействия, показал, что наибольшее количество видов отмечено на участках с умеренной рекреационной нагрузкой. Далее по убыванию количества видов следуют площади со слабым и сильным антропогенным влиянием (рис. 2). Выявленная закономерность вполне объяснима, поскольку фитоценозы, испытывающие умеренную степень нагрузки – переходные, где отмечается смешение видов, постепенно уходящих из сообществ и приходящих им на смену. Не исключено, что более высокое видовое разнообразие лишайников на участках с умеренным антропогенным прессом обусловлено и их большим количеством – 14, в то время как площадок с сильной и слабой нагрузками было заложено по девять штук.

Среднее число видов, выявленных на одной ПП, позволяет оценить видовое богатство

сообществ и косвенно – степень их нарушенности. По этому показателю лидируют слабонарушенные площади, меньше всего видов на участках с умеренным воздействием.

Количество специфических видов (т. е. встречающихся только в данной группе сообществ) выше всего на ПП, заложенных в сосняках с умеренной антропогенной нагрузкой (рис. 2). Здесь найдены сравнительно редкие в бореальных лесах эпифитные лишайники: *Bacidina assulata*, *Coenogonium pineti*, *Gyalecta fagicola*, *Gyalolechia flavorubescens*. На втором месте по количеству специфических видов следуют лесные фитоценозы, испытывающие сильное воздействие. Среди них в данных сообществах высока доля эпигеидов (40 % всего видового состава) из родов *Cladonia* (*C. ochrochlora*, *C. pleurota*, *C. subulata*) и *Peltigera* (*P. didactyla*, *P. polydactylon*, *P. praetextata*). Объясняется это тем, что на часто посещаемых людьми лесных участках травяно-кустарничковый и мохово-лишайниковый ярусы повреждены, выбитые участки почвы заселяют слабоконкурентные виды пионерных лишайников. На ПП со слабой степенью нагрузки число специфических видов не велико – всего 11. Более трети из них составляют представители эпиксильной субстратной группы – *Calicium glaucellum*, *Carbonicola anthracophila*, *C. myrmecina*, *Xylopsora friesii*. Необходимо отметить, что на слабонарушенных участках найдены не часто встречающиеся в таежных лесах лишайники *Calicium glaucellum* и *Ochrolechia alboflavescens*. В основном эти виды приурочены к старовозрастным малонарушенным лесным фитоценозам.

Распределение лишайников по субстратам представлено на рис. 3. Наибольшим разнообразием (93) характеризуются виды, которые растут на живых деревьях и кустарниках. Среди различных видов деревьев и кустарников самое высокое разнообразие эпифитных лишайников отмечено на *Pinus sylvestris* (52) и *Betula pubescens* (41), что вполне закономерно, поскольку это основные лесообразующие породы деревьев на острове. На *Sorbus aucuparia*, *Salix* spp., *Populus tremula* и *Alnus* spp. разнообразие лишайников меньше, на коре *Juniperus commune* найдено всего два вида. Вторую позицию по численности занимают лишайники, колонизирующие различные виды мертвой древесины (валеж, пни, остолопы), – 64 вида. Всех меньше видов на почве (23).

Как уже отмечено выше, часть собранного материала не удалось определить до вида, в отдельных случаях и



Рисунок 2. Общее число видов, среднее число видов на ПП и число специфических видов лишайников в сосновых лесах, испытывающих разную степень антропогенной нагрузки. Figure 2. Total number of species, mean number of species per sample plot, and number of specific species suffering from different recreational load.

до рода. У накипных лишайников наиболее часто регистрировались отсутствие спор в апотециях и поражение лихенофильными грибами, у листоватых и кустистых – изменение типичной окраски таллома, хлороз и некроз верхнего корового слоя, уменьшение размеров и отмирание центральных участков талломов, распадение талломов на соредии у *Vulpicida pinastri* и представителей рода *Parmeliopsis*. Указанные изменения талломов, как правило, наблюдаются у лишайников, находящихся в условиях загрязнения атмосферного воздуха в течение длительного времени, что отмечалось другими исследованиями [19–21].

О значительном уровне загрязнения воздушной среды свидетельствует и высокая частота встречаемости эпифитного лишайника *Scoliciosporum chlorococcum*, предпочитающего антропогенные местообитания [22]. По встречаемости на ПП он занимает второе место после обычного и массового в таежной зоне эпифитного лишайника *Hypogymnia physodes*.

Антропогенная нагрузка на природные ландшафты особо охраняемого резервата «Сосновый бор острова Ягры» возрастает с каждым годом вследствие увеличения числа отдыхающих из городов Северодвинска, Архангельска, жителей ближайших населенных пунктов и туристов. Экосистеме все сложнее поддерживать баланс и восстанавливаться.

Результаты инвентаризации видового разнообразия лишайников ООПТ «Сосновый бор острова Ягры» были использованы при разработке схемы его функционального зонирования в 2023 г. Она является основой для развития ООПТ, поможет организовать грамотное управление территорией и разработать проекты по экореабилитации, которые в первую очередь должны быть направлены на восстановление мохово-лишайникового покрова. Необходимо продолжать исследования лихенобиоты природной охраняемой территории и на регулярной основе проводить мониторинговые работы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

1. Сохранение ценных природных территорий Северо-Запада России. Анализ репрезентативности сети ООПТ Архангельской, Вологодской, Ленинградской и Мурманской областей, Республики Карелии, Санкт-Петербурга / под ред. К. Н. Кобякова. – Санкт-Петербург : Северо-Западный Печатный Двор, 2011. – 506 с.
2. Гвоздецкая, Е. В. Влияние экотуризма на арктические ООПТ Архангельской области / Е. В. Гвоздецкая // Индивидуализм и коллаборации ученых и практиков в эпоху трансформаций : сборник докладов международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург, 2021. – С. 7–13.
3. Особо охраняемая территория «Сосновый бор острова Ягры»: природная ценность / сост. Т. А. Паринава [и др.]. – Архангельск : Кира, 2022. – 44 с.

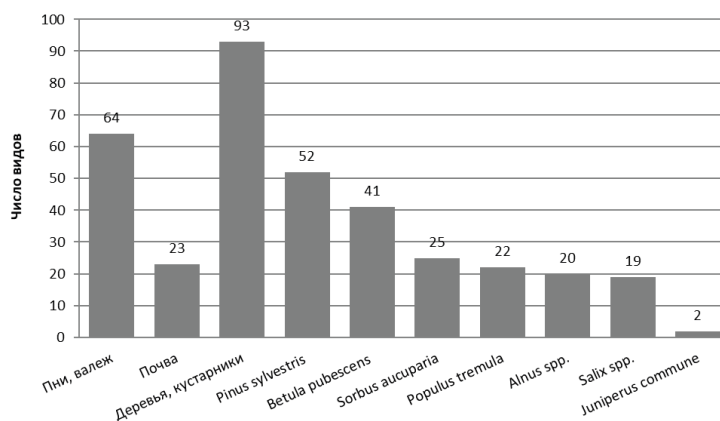


Рисунок 3. Распределение лишайников по субстратам.

Figure 3. Distribution of lichens by substrates.

4. Кадастровый отчет по ООПТ Природный рекреационный комплекс «Сосновый бор острова Ягры» местного значения // ИАС «ООПТ России» : электрон. версия. – URL: file:///C:/Users/User/Downloads/Природный рекреационный комплекс - 1.pdf (дата обращения: 14.09.2023).
5. Токарчук, Т. А. Флористическое разнообразие и экологические условия прибрежных сообществ Белого моря на примере о. Ягры (Белое море, Архангельская область, г. Северодвинск) / Т. А. Токарчук, Т. А. Паринава // Сборник материалов Всероссийской очно-заочной научно-практической конференции «I Пахтусовские чтения: Арктика вчера, сегодня, завтра», посвященной 220-летию со дня рождения выдающегося полярного исследователя Петра Кузьмича Пахтусова. – Архангельск : Кира, 2020. – С. 152–158. – <https://elibrary.ru/item.asp?id=4453950>
6. Геоботаническое районирование Нечерноземья европейской части РСФСР / В. Д. Александрова, С. А. Грибова, Т. И. Исаченко [и др.]. – Ленинград, 1989. – 64 с.
7. Исаченко, Т. И. Ботанико-географическое районирование / Т. И. Исаченко, Е. М. Лавренко // Растительность европейской части СССР. – Ленинград : Наука, 1980. – С. 10–20.
8. Кочерина, Е. В. Сосняки на дюнных песках / Е. В. Кочерина // Ценные природные территории Архангельской области. – Архангельск, 2010. – С. 33–35.
9. Santesson's Checklist of Fennoscandian Lichen-Forming and Lichenicolous Fungi / M. Westberg, R. Moberg, M. Myrdal, A. Nordin, S. Ekman // Uppsala : Uppsala University, 2021. – 933 p.
10. Макаревич, М. Ф. Семейство Arthoniaceae / М. Ф. Макаревич // Определитель лишайников СССР. Вып. 4. – Ленинград, 1977. – С. 290–325.
11. Херманссон, Я. Предварительный список лишайников Республики Коми / Я. Херманссон, Т. Н. Пыстина, Д. И. Кудрявцева. – Сыктывкар, 1998. – 136 с.
12. Степанчикова, И. С. Лишайники Северо-Приморского парка Санкт-Петербурга / И. С. Степанчикова, Д. Е. Гимельбрант, Л. А. Конорева // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 3. – 2008. – Вып. 3. – С. 56–67.
13. Конспект лишайников Дарвинского государственного природного биосферного заповедника (Вологодская

и Ярославская области, Россия) / Е. Э. Мучник, Л. А. Конорева, А. А. Добрыш [и др.] // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Биология и экология. – 2009. – Вып. 14, № 18. – С. 174–194.

14. New records of lichens and allied fungi from Vodlozersky National Park within Arkhangelsk Region (NW Russia) / V. N. Tarasova, T. N. Pystina, V. I. Androsova [et al.] // Folia Cryptogamica Estonica. – 2019. – Vol. 56. – P. 87–98.
15. Cris, C. O. CRIS data set. Version 1.5. / C. O. Cris, A. L. Melechin. – Occurrence dataset, 2019. – URL: <https://doi.org/10.15468/zychiy> (дата обращения: 19.10.2023).
16. ИАС «ООПТ РФ»: информационно-аналитическая система – URL: http://www.oopt.aari.ru/bio/24889?utm_source=yandex.ru&utm_medium=organic&utm_campaign=yandex.ru&utm_referrer=yandex.ru (дата обращения: 19.10.2023).
17. Seaward, M. R. D. Effect of quantitative and qualitative changes in air pollution on the natural ecological and geographical performance of lichens / M. R. D. Seaward // Effects of Atmospheric Pollution on Forest, Wetlands and Agricultural Ecosystems. – 1987. – Vol. 16. – P. 439–450.

References

1. Sohranenie cennyh prirodnyh territorij Severo-Zapada Rossii. Analiz reprezentativnosti seti OOPT Arhangel'skoj, Vologodskoj, Leningradskoj i Murmanskoy oblastej, Respubliki Karelii, Sankt-Peterburga [Conservation of valuable natural areas in the North-West of Russia. Analysis of the representativeness of the network of protected areas in the Arkhangelsk, Vologda, Leningrad and Murmansk Regions, the Republic of Karelia, Saint-Petersburg] / ed. by K. N. Kobayakova. – Saint-Petersburg : Severo-Zapadnyi Pechatnyi Dvor, 2011. – 506 p.
2. Gvozdetskaya, E. V. Vliyaniye ekoturizma na arkticheskie OOPT Arkhangel'skoj oblasti [The impact of ecotourism on arctic protected areas of the Arkhangelsk Region] / E. V. Gvozdetskaya // Individualizm i kollaboracii uchenykh i praktikov v epohu transformacii [Individualism and collaboration of scientists and practitioners in the era of transformations]: Collected reports of the International Scientific and Practical Conference. – Saint-Petersburg, 2021. – P. 7–13.
3. Osobo ohranyaemaya territoriya «Sosnovyj bor ostrova Yagry»: prirodnaya cennost' [Specially protected area "Pine Forest of the Yagry Island": natural value] / comp. T. A. Parinova, I. A. Kuzubov, A. V. Kolpakova [et al.]. – Arkhangelsk : Kira, 2022. – 44 p.
4. Kadaстровый отчет по OOPT Природный рекреационный комплекс «Sosnovyj bor ostrova Yagry» местного значения [Cadastral report on SPNA Natural recreational complex «Pine Forest of Yagry Island» of local significance] // IAS «SPNA of the Russian Federation»: electronic version. – URL: [file:///C:/Users/User/Downloads/Природный рекреационный комплекс -1.pdf](file:///C:/Users/User/Downloads/Природный%20рекреационный%20комплекс%20-1.pdf) (date of the application: 14.09.2023).
5. Tokarchuk, T. A. Floristicheskoe raznoobrazie i ekologicheskie usloviya pribrezhnyh soobshchestv Belogo morya na primere o. Yagry (Beloe more, Arhangel'skaya oblast', g. Severodvinsk) [Floristic diversity and ecological conditions of coastal communities of the White Sea using the example of Yagry Island (White Sea, Arkhangelsk region, Severodvinsk)] / T. A. Tokarchuk, T. A. Parinova // Sbornik materialov Vserossiiskoj ochno-zaochnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «I Pahtusovskie chteniya: Arktika vchera, segodnya, zavtra», posvyashchennoj 220-letiyu so dnya rozhdeniya vydayushchegosya polyarnogo issledovatelya Petra Kuz'micha Pahtusova [A collection of materials of the All-Russian part-time scientific and practical conference «I Pakhtusov Readings: the Arctic Yesterday, Today, Tomorrow», dedicated to the 220th anniversary of the birth of the outstanding polar explorer Petr Kuz'mich Pakhtusov]. – Arkhangelsk : Kira, 2020. – P. 152–158. – <https://elibrary.ru/item.asp?id=4453950>.
6. Geobotanicheskoe rajonirovaniye Nechernozem'ya evropeiskoj chasti RSFSR [Geobotanical division of non-cernozem region of the european part of the RSFSR] / V. D. Aleksandrova, S. A. Gribova, T. I. Isachenko [et al.]. – Leningrad : Nauka, 1989. – 64 p.
7. Isachenko, T. I. Botaniko-geograficheskoe rajonirovaniye [Botanical and geographical regionalization] / T. I. Isachenko, E. M. Lavrenko // Rastitel'nost' evropejskoj chasti SSSR [Vegetation of the European part of the USSR]. – Leningrad : Nauka, 1980. – P. 10–20.
8. Kocherina, E. V. Sosnyaki na dyunnyh peskah [Pine forests on dune sands] / E. V. Kocherina // Cennye prirodnye territorii Arhangel'skoj oblasti [Valuable natural territories of the Arkhangelsk region]. – Arkhangelsk, 2010. – P. 33–35.
9. Santesson's Checklist of Fennoscandian Lichen-Forming and Lichenicolous Fungi / M. Westberg, R. Moberg, M. Myrdal, A. Nordin, S. Ekman // Uppsala : Uppsala University, 2021. – 933 p.
10. Makarevich, M. F. 1977. Semeistvo *Arthoniaceae* [Family *Arthoniaceae*] / M. F. Makarevich // Opredelitel' lishajnikov SSSR. Vyp. 4. [Handbook of the lichens of USSR. Iss. 4]. – Leningrad, 1977. – P. 290–325.
11. Hermansson, J. Predvaritel'nyj spisok lishajnikov Respubliki Komi [Preliminary list of lichens of the Republic of Komi] / J. Hermansson, T. N. Pystina, D. I. Kudryavtseva. – Syktyvkar, 1998. – 136 p.
12. Stepanchikova, I. S. Lishajniki Severo-Primorskogo parka Sankt-Peterburga [Lichens of the Severo-Primorskiy Park of Saint-Peterburg] / I. S. Stepanchikova, D. E. Himelbrant, L. A. Konoreva // Vestnik Sankt-Petersburgskogo universiteta. Seriya 3 [Bulletin of the St. Petersburg University. Series 3]. – 2008. – Vol. 3, № 3. – P. 56–67.
13. Konspekt lishajnikov Darvinskogo gosudarstvennogo prirodnogo biosfernogo zapovednika [Conspect of lichens of the Darwin State Natural Biosphere Reserve] / E. E. Muchnik, L. A. Konoreva, A. A. Dobrysh, I. I. Makarova, A. N. Titov // Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: biologiya i ekologiya [Bulletin of Tver State University. Series: Biology and Ecology]. – 2009. – Vol. 14, № 18. – P. 174–194.

14. New records of lichens and allied fungi from Vodlozersky National Park within Arkhangelsk Region (NW Russia) / V. N. Tarasova, T. N. Pystina, V. I. Androsova [et al.] // *Folia Cryptogamica Estonica*. – 2019. – Vol. 56. – P. 87–98.
15. Cris, C. O. CRIS data set. Version 1.5. L. Occurrence dataset 2019 / C. O. Cris, A. Melechin. – URL: <https://doi.org/10.15468/zychiy> (date of the application: 19.10.2023).
16. IAS «OOPT RF»: informatsionno-analiticheskaya sistema [IAS «SPNA of the Russian Federation»: information and analytical system]: URL: http://www.oopt.aari.ru/bio/24889?utm_source=yandex.ru&utm_medium=organic&utm_campaign=yandex.ru&utm_referrer=yandex.ru (date of the application: 19.10.2023).
17. Seaward, M. R. D. Effect of quantitative and qualitative changes in air pollution on the natural ecological and geographical performance of lichens / M. R. D. Seaward // *Effects of Atmospheric Pollution on Forest, Wetlands and Agricultural Ecosystems*. – 1987. – Vol. 16. – P. 439–450.

Благодарность (госзадание):

Работа выполнена в рамках Муниципального контракта №23-АДМ-127 с ИП Кузубов И. А. Исследования проведены в рамках государственного задания ФИЦ Коми НЦ УрО РАН № 122040600026–9.

Acknowledgements (state task):

The work was fulfilled within the frames of the Local Government Contract №23-АДМ-127 with the individual entrepreneur I. A. Kuzubov. The research was performed within the framework of the state task of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences № 122040600026–9.

Информация об авторах:

Пыстина Татьяна Николаевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник отдела флоры и растительности Севера Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; Scopus Author ID: 25636517000, <http://orchid.org/0000-0003-2215-4724> (167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28; e-mail: t.pystina@ib.komisc.ru).

Семёнова Наталия Анатольевна – младший научный сотрудник отдела флоры и растительности Севера Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; Scopus Author ID: 57219404283, <http://orchid.org/0000-0002-4356-352X> (167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28; e-mail: semenova@ib.komisc.ru).

Паринова Татьяна Александровна – кандидат биологических наук, доцент кафедры биологии, экологии и биотехнологии высшей школы естественных наук и технологий Северного (Арктического) федерального университета имени М. В. Ломоносова; Scopus Author ID: 57200940246, <http://orchid.org/0000-0002-2472-8392> (163000, Российская Федерация, г. Архангельск, Наб. Северной Двины, д. 12; e-mail: nadeinata@mail.ru).

Леонова Ольга Денисовна – студентка третьего курса направления «Биология (Живые системы Арктики и Субарктики)» Северного (Арктического) федерального университета имени М. В. Ломоносова (163000, Российская Федерация, г. Архангельск, Наб. Северной Двины, д. 12; e-mail: leonova.o@edu.narfu.ru).

About the authors:

Tatiana N. Pystina – Candidate of Sciences (Biology), Senior Researcher at the Department of Flora and Vegetation of the North of the Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; Scopus Author ID: 25636517000, <http://orchid.org/0000-0003-2215-4724> (28 Kommunisticheskaya st., Syktyvkar 167982, Komi Republic, Russian Federation; e-mail: t.pystina@ib.komisc.ru).

Natalia A. Semenova – Junior Researcher at the Department of Flora and Vegetation of the North of the Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; Scopus Author ID: 25636517000, <http://orchid.org/0000-0003-2215-4724> (28 Kommunisticheskaya st., Syktyvkar 167982, Komi Republic, Russian Federation; e-mail: semenova@ib.komisc.ru).

Tatiana A. Parinova – Candidate of Sciences (Biology), Associate professor at the Department of Biology, Ecology and Biotechnology of the Higher School of Natural Sciences and Technologies of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov; Scopus Author ID: 57200940246; <http://orchid.org/0000-0002-2472-8392> (17 Severnaya Dvina emb., Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: nadeinata@mail.ru).

Olga D. Leonova – Third-Year Student of Biology (living systems of the Arctic and Subarctic) at the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (17 Severnaya Dvina emb., Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: leonova.o@edu.narfu.ru).

Для цитирования:

Пыстина, Т. Н. Материалы к изучению лишайников природного рекреационного комплекса «Сосновый бор острова Ягры» (Архангельская область) / Т. Н. Пыстина, Н. А. Семёнова, Т. А. Парина [и др.] // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Экспериментальная биология и экология». – 2024. – № 9 (75). – С. 51–60.

For citation:

Pystina, T. N. Materialy k izucheniyu lishainikov prirodnogo rekreatsionnogo kompleksa "Sosnovy bor ostrova Yagry" (Arkhangelskaya oblast) [Materials for the study of lichens of the natural recreational complex "Pine Forest of the Yagry Island" (Arkhangelsk Region)] / T. N. Pystina, N. A. Semenova, T. A. Parinova, O. D. Leonova // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series "Experimental Biology and Ecology". – 2024. – № 9 (75). – P. 51–60.

Дата поступления статьи: 11.03.2024

Прошла рецензирование: 20.03.2024

Принято решение о публикации: 21.10.2024

Received: 11.03.2024

Reviewed: 20.03.2024

Accepted: 21.10.2024

Вторичные древостои в условиях выработанных торфяников Северо-Востока европейской части России

Н. А. Уланов

Кировская лугоболотная опытная станция,
Кировская область, пос. Юбилейный
Вятский государственный агротехнологический университет,
г. Киров

bolotoagro50@mail.ru
info@vgatu.ru

Аннотация

Низинные болота Российской Федерации в основном размещены на территории земель Государственного лесного фонда. По окончании фрезерной уборки торфа вполне логичным направлением использования этих площадей является организация на них искусственных хвойных древостоев, в частности, сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*). Установлено, что наиболее благоприятной средой для этой культуры являются мелкозалежные с высокозольными остаточными древесно-травянистыми торфами хорошо осушенные участки, подстилаемые легкими породами. Запас товарной древесины здесь в 40–50-летнем возрасте достигает 360–415 м³/га. На хорошо оторфованных участках с низкозольными травянисто-моховыми видами остаточного торфа в условиях застойного водного режима формируется изреженный, низкорослый, крайне угнетенный древостой. В аналогичном возрасте запас древесной массы не превышает 0,1–0,2 м³/га. Все это необходимо учитывать при проведении массовых лесопосадочных работ на выработках.

Ключевые слова:

выработанные торфяники, почвенное плодородие, влажность почвы, вторичные древостои, свойства торфа, водный режим, сосна обыкновенная, запас древесины

Введение

Первые разработки торфяных залежей в России были организованы еще в начале XVIII в. по инициативе Петра I. За всю историю использовалось несколько десятков способов торфодобыывания. Среди них – резно-ручной, наливной, рамочно-формовочный, машинно-резной, элеваторный, багерный, экскаваторный, гидравлический, фрезерно-формовочный и др. В 20-х гг. прошлого столетия вводится принципиально новый способ – послейно-фрезерный. В настоящее время эта технология считается наиболее распространенной, поскольку полностью механизирована [1, 2]. В зависимости от мощности залежи и физических свойств торфа весь процесс протекает от

Secondary forest stands on depleted peatlands in the European North- East of Russia

N. A. Ulanov

Kirov Meadow-Swamp Experimental Station, Kirov Region,
Orichevskiy District, Yubileyniy settlement
Vyatka State Agrotechnological University,
Kirov

bolotoagro50@mail.ru
info@vgatu.ru

Abstract

The lowland swamps of the Russian Federation are mainly located on lands of the State Forest Fund. After peat collection with rotary cultivator, it is quite logical to use these depleted areas to plant artificial coniferous forest stands on them, for example Scots pine (*Pinus sylvestris*). The most favorable environment for this forest crop is low-deposit and well-drained areas with high-ash residual woody-grassy peats, underlain by light rocks. The stock of commercial wood in 40–50-year-old stands reaches 360–415 m³/ha. Areas with high peat reserves and low-ash grassy-moss species on residual peat have formed a sparse, stunted, extremely depressed forest stand in conditions of stagnant water regime. At the similar age, the timber stock does not exceed 0.1–0.2 m³/ha. All this situation must be taken into account when carrying out large-scale forest-planting operations on depleted peatlands.

Keywords:

depleted peatlands, soil fertility, soil moisture, secondary forest stands, peat properties, water regime, Scots pine, timber stock

20 до 30 лет. По окончании добычи на выходе остаются внешне ровные, слегка вогнутые к центру прямоугольной формы производственные карты.

Главная почвенно-мелиоративная особенность выбывших площадей – высокая горизонтально-пространственная почвенная пестрота профиля, обусловленная различной мощностью остаточного торфа (0–1,5 м) и крайне неоднородным водным режимом: от десуктивно-выпотного до периодически промывного и застойного [3].

Практика дальнейшего применения выработанных торфяников в производстве чаще всего базируется на использовании их в кормопроизводстве либо лесном

хозяйстве при создании так называемых «вторичных» древостоев. Наиболее широкое распространение лесовосстановительные технологии получили в 70–80-х гг. прошлого столетия на вырубках в Нижегородской, Брянской, Ярославской, Московской и Кировской областях. При восстановлении кустарниково-древесных фитоценозов использовались: смородина черная (*Ribes nigrum*), малина лесная (*Rubus idaeus*), тополь бальзамический (*Populus balsamifera*), вяз обыкновенный (*Ulmus laevis*), береза пушистая (*Betula pubescens*) и повислая (*Betula pendula*), ольха черная (*Alnus glutinosa*), тополь канадский (*Populus canadensis*), кедр сибирский (*Pinus sibirica*), лиственница сибирская (*Larix sibirica*), дуб обыкновенный (*Quercus robur*), ель сибирская (*Picea obovata*) и сосна обыкновенная. В плане приживаемости и динамики формирования биомассы выделялись посадки ели и сосны, высаженные в весенний период [4–8].

Материалы и методы

Объекты исследований – выработанные низинные торфомассивы «Гадовское» и «Зенгинское» Кировской области. Торфодобыча осуществляли послойно-фрезерным способом в период с 1936 по 1965 г., т. е. около 30 лет. По мере выхода отработанных площадей из-под торфодобычи на обоих торфомассивах производили высадку саженцев-двухлеток сосны обыкновенной. Посадку проводили Оричевским межлесхозом вручную под меч Колесова. Следует отметить, что при посадочных работах не всегда учитывали степень сработки залежи и состояние водного режима участков. В результате приживаемость саженцев и динамика их дальнейшего развития очень сильно отличались даже в границах одной производственной площади. На некоторых крайне переувлажненных участках с величиной остаточного торфа более 0,7–1,5 м саженцы погибали практически сразу.

На момент последнего обследования залесенной территории возраст сохранившегося древостоя сосны составлял 40–50 лет. Доля лесопокрываемой территории в структуре образовавшихся лесолуговых постболотных агроландшафтов составила более 30 %.

Чтобы установить влияние выработанной торфяной почвы как среды обитания на состояние древостоев сосны обыкновенной и других внедрившихся видов, на каждом торфомассиве оборудованы постоянные мониторинговые участки и контрольные площадки от 2–3 соток до 5–10 га. Таксацию древостоя осуществляли глазомерно и перечислительно с использованием таксационных инструментов на временных пробных площадях прямоугольной формы и различного размера, в зависимости от густоты древостоя, с оборудованием на них учетных площадок (10 м² каждая) для таксации подроста и подлеска. Участки отличаются мощностью остаточного слоя торфа, типом водного режима и местом расположения в ландшафте.

Для сравнительной оценки из всего количества мониторинговых площадок на залесенной территории было выбрано четыре ключевых участка.

Участок 1. Почва: торфянисто-глеевая остаточная (дегроторфозем остаточного оглеенный); мощность остаточной залежи – 20–30 см; по ботаническому составу торф травянисто-древесный, высокозольный (15 %). Подстилающая порода: среднезернистые аллювиально-делювиальные пески.

Участок 2. Почва: торфяная среднеческая остаточная. Торф осоковый, среднеразложившийся (20–30 %), низкочесный (5–8 %), с повышенной влагоемкостью (510–540 %).

Участок 3. По водно-физическим и морфологическим свойствам остаточного торфа и подстилающей породы, ботаническому составу торфа и большинству агрохимических показателей почва этого участка идентична участку 2 (табл. 1 и 2).

Участок 4. Особенность участка в том, что мелкозалежный, травянисто-древесный, высокозольный торф (14,3 %), подстилаемый средним мергелизованным суглинком, погребен на глубину 30–40 см минеральным субстратом, извлеченным на поверхность при прокладке мелиоративного канала.

Результаты и их обсуждение

Участок 1. По всему профилю отмечен вполне благоприятный кислотный режим. По pH_{сол} почва характеризуется как слабокислая, близкая к нейтральной. Высокая степень насыщенности почвенного поглощающего комплекса (далее – ППК) основаниями (71–97 %) обусловлена высоким содержанием обменного Са и сравнительно невысокой гидролитической кислотностью. Отсутствие закисного железа в большей части профиля свидетельствует о хорошей аэрации (табл. 1).

Участок отличается благоприятным водным режимом и комфортными для лесных культур водно-физическими и морфологическими свойствами. При незначительном диапазоне колебаний уровня грунтовых вод (далее – УГВ) выдерживается экологически безопасный среднегодовой УГВ на уровне 90 см, а влажность корнеобитаемого слоя составляет в среднем 75 % от полной влагоемкости (далее – ПВ) (табл. 2). На практике эти условия могут изменить лишь стремительно расселяющиеся в лесопосадках популяции обыкновенного бобра (*Castor fiber*). Однако при желании ситуацию можно легко контролировать.

Основная культура в древостое (80 %) – сосна обыкновенная, высаженная в начале 70-х гг. прошлого столетия. Спустя 10–15 лет, в посадки сосны стали активно внедряться березы (повислая, пушистая), а позднее и ель сибирская. Согласно последней оценке, по запасам биомассы некоторые экземпляры берез даже превосходят сосну. Процесс приживания и динамика дальнейшего развития сосны в значительной степени зависят от слоя остаточного торфа и наличия контактно-оглеенных горизонтов. Отмечено, что чем меньше развивается процесс оглеения профиля и чем быстрее центральный корень сосны «зацепится» за подстилающую торф породу, тем скорее начнется активное формирование древесной массы.

В табл. 3 приведены основные показатели таксационной оценки древостоя сосны. Для более полной характе-

Агрохимические свойства выработанной почвы под различными древостоями (2021–2023)

Table 1

Agrochemical properties of depleted soil under different stands (2021–2023)

Объект (древостой)	Глуби- на, см	Золь- ность, %	pH _{сол}	Мг-экв/100 г				V, %	Мг/100 г					Fe ₂ O ₃ / CaO
				Кислотность		Под- вижный Al	Сумма обменных оснований		P ₂ O ₅	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	
				Обменная	Гидролит.									
Сосновый с примесью ели и березы Участок 1	0–20	15,0	5,3	0,51	48,6	0,050	121,6	71	2,3	28,1	628,0	0	3218	0,200
	20–40	98,7	5,4	0,04	0,47	0,005	3,9	89	7,7	3,8	62,8	2,34	213	0,300
	40–60	98,9	5,7	0,02	0,26	0,002	3,7	93	12,5	4,4	42,6	0	157	0,270
	60–80	99,1	6,2	0,03	0,16	0,003	4,0	96	13,8	4,5	40,4	0	136	0,300
	80–100	99,2	6,2	0,03	0,12	0,007	3,5	97	10,0	5,1	28,5	0	157	0,180
Елово-березово- ивовый Участок 2	0–20	8,0	4,3	3,85	74,4	1,490	46,0	38	1,6	31,2	743,0	0	1504	0,490
	20–40	8,1	5,0	0,68	57,0	0,270	96,0	63	0,8	14,1	1010,0	0	3952	0,260
	40–60	5,6	5,1	0,55	43,8	0,210	90,0	67	0,8	14,1	1048,0	63,0	2413	0,430
	60–80	7,1	5,2	0,58	45,0	0,230	64,0	59	0,8	14,5	1022,0	91,8	2588	0,390
	80–100	6,9	5,3	0,58	43,8	0,190	100,0	70	0,9	12,0	959,6	85,0	2623	0,360
Елово-березово- сосновый Участок 3	0–20	6,0	5,1	0,53	43,8	0,130	68,0	61	0,6	11,9	933,6	0	2203	0,420
	20–40	6,2	5,3	0,38	40,8	0,060	66,0	62	1,0	11,4	947,0	11,3	2588	0,360
	40–60	5,9	5,3	0,35	36,6	0,050	76,0	67	0,8	9,7	832,0	90,7	2693	0,310
	60–80	6,1	5,4	0,39	36,6	0,050	78,0	68	0,7	9,2	837,0	115,2	2798	0,300
	80–100	6,0	5,4	0,42	35,4	0,040	70,0	66	0,6	11,9	743,0	111,3	2238	0,330
Полезащитная березово-сосновая лесополоса Участок 4	0–20	89,9	7,8	0,07	0,30	0,008	39,2	99	3,8	3,6	0,5	0	2336	0,002
	30–45	14,3	7,8	0,42	22,20	0,080	164,0	88	4,0	12,2	92,0	9,4	4267	0,020
	45–60	91,6	7,6	0,04	0,70	0,004	26,2	97	2,9	6,8	63,4	0	623	0,100
	60–140	99,4	8,8	0,03	0,20	0,003	3,8	95	10,0	3,0	8,8	0	115	0,080

Таблица 2

Водные, водно-физические и морфологические свойства выработанных участков (2021–2023)

Table 2

Water, water-physical and morphological properties of depleted areas (2021–2023)

Номер участка	Удельная масса	Объемная масса	ПВ, % на сух. навеску	Средний УГВ за год, см	Диапазон УГВ, см	Влажность корнеобитаемого слоя, % от ПВ	Слой остаточного торфа, см	Подстилающая порода
	г/см³							
	0-20 см							
1	1,64	0,26	469	90	33-107	75	20	Песок сред-незернистый
2	1,54	0,17	510	70	40-93	85	100	
3	1,58	0,17	545	30	4-58	92	150	
4	2,48	0,83	70	90	60-120	65	20 (погребен на глубину 30-40 см)	Суглинок мергелизованный

ристки потенциала продуктивности на этом и остальных участках приведено общее количество условных стволов на единицу площади, т. е. с учетом сухостойных. На участке 1 доля сухостоя достигает 25 %.

Из данных табл. 3 следует, что по всем этим и ранее приведенным в табл. 1 и 2 показателям участок 1 можно считать одним из наиболее пригодных для функционирования вторичных древостоев. В 50-летнем возрасте запас древесины сосны обыкновенной без учета внедренных видов здесь составляет 360 м³/га. Из-за большой сомкнутости крон кустарниковый ярус развит слабо. Встречаются отдельные экземпляры рябины обыкновенной (*Sorbus aucuparia*), крушины ломкой (*Frangula alnus*) и жимолости лесной (*Lonicera xylosteum*). В травяно-моховом ярусе доминируют лишайники (*Lichenes*), зеленые мхи (*Bryidae*), майник широколистный (*Maianthemum dilatatum*), кислица

обыкновенная (*Maianthemum dilatatum*) и щитовник мужской (*Dryopteris filix-mas*).

Участок 2. Особенность всего профиля почвы – крайне низкое содержание подвижного фосфора и повышенная кислотность почвенного раствора, обусловленная, прежде всего, высоким содержанием подвижного алюминия. Как результат по всему профилю наблюдается низкая степень насыщенности ППК основаниями

(38–70 %) (табл. 1). В среднем за год УГВ на участке составил около 70 см. В условиях метрового слоя высоко-влажеомого торфа при такой степени осушения влажность корнеобитаемого слоя находилась в пределах 85 % от ПВ, что несколько выше нормальной влагообеспеченности (табл. 2). Однако незначительный избыток влаги в отдельные периоды практически не ограничивал развития древостоев.

Необходимо отметить, что наличие оксидов двухвалентного железа в обводненной части профиля является надежным диагностическим показателем определения зоны кислородного барьера (зоны аэрации) в верхней части этого профиля (табл. 1).

Основу древостоев на участке составили: береза повислая (70 %), ель сибирская (25) и различные виды ивы (*Salix*) (5 %). Из данных табл. 3 (участок 2) видно, что по

Таксационная характеристика древостоев (2023)

Table 3

Bonitet characteristics of tree stands (2023)

Номер участка	Древесные породы основного полога, %	Количество стволов, шт/га	Сумма площадей сечений, м²/га	Макс. глубина распространения корней, см	Запас, м³/га	Диаметр ствола, см		Высота, м		Возраст, лет		Класс бонитета	Полнота относительная
						ср.	макс.	ср.	макс.	ср.	макс.		
1	8С1Б1Е												
	I		39,5	115	360,0	18,1	29,2	20,2	25,3	49	51	I	1,0
	8С2Б	3800											
	II		5,3	75	48,0	11,5	15,3	10,0	11,5	25	28	III	0,2
	10Е	200											
2	7Б2Е1Ив												
	I		22,3	65	155,0	14,5	18,3	15,2	19,2	42	45	III	1,0
	10Б	1960											
	II		13,9	56	80,0	9,0	10,5	8,0	10,0	25	30	IV	0,7
	8Е2Ив	840											
3	4Б3С3Е												
	I		0,09	20	0,2	6,5	10,5	9,5	12,0	40	42	V	0,006
	5Б5С	26											
	II		0,03	10	0,1	4,0	6,0	2,5	4,5	24	28	Va	0,003
	10Е	9											
4	8С1Б1Е												
	I		40,5	125	415	18,6	30,5	22,2	24,0	40	40	Ia	1,0
	8С2Б	3840											
	II		6,0	85	51,0	13,0	17,4	13,0	15,2	24	25	I	0,2
	10Е	210											

ключевым параметрам ивово-елово-березовый древостой несколько уступает древостою из сосны обыкновенной, однако доля сухостоя здесь значительно меньше – не более 7–10 %. Подлесок представлен рябиной обыкновенной, крушиной ломкой и черемухой обыкновенной (*Prunus padus*). В травяном ярусе наибольшее распространение получили: зеленые мхи, кладония бахромчатая (*Cladonia fimbriata*), пушица влагалищная (*Eriophorum vaginatum*), майник широколистный, щитовник мужской, мать-и-мачеха обыкновенная (*Tussilago farfara*).

Участок 3. Главное отличие заключается в особенностях водного режима. Уровень грунтовых вод в круглогодичном и многолетнем режимах не опускается ниже 40–50 см. В периоды обильных осадков грунтовые воды практически выходят на поверхность. Влажность почвы в это время приближается к полной влагоемкости. Зона кислородного барьера здесь формируется в наиболее засушливые периоды сезона и лишь в самом верхнем слое (0–20 см). Эта ситуация наглядно просматривается по распределению в профиле закисного железа (см. табл. 1). В многолетнем цикле здесь доминирует застойный водный режим.

Образовавшаяся среда отражается на состоянии основных и внедрившихся культур начиная с момента посадки. Установлено, что в первые 2 года приживаемость сосны и ели на аналогичных участках в среднем не превышает 30–40% от высаженного посадочного материала. В дальнейшем из этого количества погибает еще около половины в возрасте от 5 до 15 лет, вследствие выжимания, вымокания, засыхания, затенения и других неблагоприятных факторов.

Оставшиеся экземпляры сосны, ели и березы в 40–50-летнем возрасте имеют крайне угнетенную и искривленную форму. Их высота, как правило, не превышает 10–12 м при диаметре стволов 6–8 см. В литературе [9] это состояние называют «тундровым эффектом». Основная часть корневой массы у хвойных и лиственных пород размещается в слое 0–10 см, центральные корни – до глубины 15–20 см. Более 20–30 % боковых корней стелются практически по поверхности на расстояние до 2–3 м. Естественно, что определять запасы товарной древесины на этих объектах не имеет смысла.

Участок 4. Принципиально отличается от остальных уровнем плодородия и экологическим предназначением древостоя, сформировавшегося на нем. Лесной фитоценоз здесь представлен в виде полезащитных лесных полос ажурно-полупродуваемой формы. Основная высаженная средообразующая порода – сосна обыкновенная. На момент последнего обследования ее высота достигала 28–30 м, средний возраст 40 лет, ширина лесополосы – 6–8 м. В составе древостоя около 20 % внедрившихся видов: береза, ольха, ива ломкая (*Salix fragilis*), рябина, черемуха и др. Древостой расположен на одной из сторон мелиоративного канала. Весь профиль выработанной почвы характеризуется благоприятным кислотным режимом и высокой степенью насыщенности почвы основаниями. Отношение $\frac{Fe_2O_3}{CaO}$ здесь самое минимальное, что свидетельствует о низкой ожеженности почвы и высокой ее обеспеченности кальцием (см. табл. 1). При прокладке канала вынутый грунт ровным слоем распределяется по приканавной

территории. Остаточный торф частично перемешивается с подстилающим суглинком, но большая его часть оказывается погребенной под вынутым грунтом на глубине 30–40 см. В результате образуется очень благоприятная среда для всех без исключения кустарниково-древесных видов. В зависимости от уровня дренажно-сбросных вод в канале и УГВ в почве в течение всего года наблюдаются близкая к оптимальной влажность (60–70 % от ПВ) и аэрация (30–40 %) корнеобитаемого слоя. В этих условиях формируется наиболее развитый и самый продуктивный по большинству показателей смешанный лиственно-хвойный древостой (табл. 3, участок 4). В отличие от других участков, в структуре 40-летней лесополосы доля сухостоя не превышает 5–7 %. Следует отметить, что подлесок и травяно-моховой ярус развиты слабо, поэтому именно здесь, под пологом среднеплотного древостоя, весьма активно развиваются и сопутствующие лесные ресурсы: грибные и ягодные.

Заключение

Таким образом, к наиболее значимым факторам, определяющим пригодность выработанных послойно-фрезерным способом торфяников для создания на них вторичных чистых и смешанных древостоев, относятся: мощность остаточного слоя торфа, его ботанический состав, гранулометрический состав подстилающей породы, кислотные свойства и состояние водного режима. Для лучшей приживаемости посадочного материала и дальнейшего роста древесных культур необходимо, прежде всего, использовать хорошо осушенные торфяно-торфянисто-глеевые и полностью сработанные участки, подстилаемые легкими и средним суглинками, мелко- и среднезернистыми песками. По ботаническому составу предпочтение отдается высокозольным (12–20 %) хорошо разложившимся (40–60 %) торфам, $pH_{\text{кон}}$ 5,5–7,0, УГВ 80–120 см, что способствует формированию периодически-промывного водного режима. При планировании и проведении массовых лесопосадочных работ, лесохозяйственным организациям все это необходимо учитывать.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Литература

1. Копенкина, Л. В. История торфяного дела в России / Л. В. Копенкина. – Тверь, 2015. – 228 с.
2. Копенкина, Л. В. Ретроспективный анализ производства торфа в России / Л. В. Копенкина, С. Н. Гамаюнов // Проблемы и перспективы устойчивого развития торфяного дела в России: материалы Международной научно-практической конференции. – Тверь : Триада, 2018. – С. 65–70.
3. Уланов, А. Н. Торфяные и выработанные почвы южной тайги евро-северо-востока России / А. Н. Уланов. – Киров : Дом печати-ВЯТКА, 2005. – 320 с.
4. Каменова, И. Е. Проект «Восстановление торфяных болот в России в целях предотвращения пожаров и смяг-

- чения изменений климата»: опыт реализации и перспективы / И. Е. Каменова, Т. Ю. Минаева // Проблемы и перспективы устойчивого развития торфяного дела в России: материалы Международной научно-практической конференции. – Тверь : Триада, 2018. – С. 59–64.
5. Метелев, Н. Д. Особенности выращивания сосны обыкновенной на выработанных торфяниках торфомассива «Гадовское» Оричевского района, Кировской области / Н. Д. Метелев // Многофункциональное адаптивное кормопроизводство: сборник научных трудов: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию основания Кировской лугоболотной опытной станции. Выпуск 18 (66). – Москва, 2018. – С. 205–210.
 6. Тимофеев, А. Ф. Лесохозяйственное освоение земель после торфоразработок / А. Ф. Тимофеев, П. А. Леснов. – Москва : Лесная промышленность, 1967. – 74 с.
 7. Тимофеев, А. Ф. Комплексное освоение и интенсивное использование земель после торфоразработок / А. Ф. Тимофеев // Освоение экосистем и рациональное природопользование на торфяных почвах: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 85-летию со дня основания ГУП Кировская лугоболотная опытная станция. – Киров : Дом печати-ВЯТКА, 2003. – С. 169–171.
 8. Боч, М. С. Экосистемы болот СССР / М. С. Боч, В. В. Мазинг. – Ленинград : Наука, 1979. – 188 с.

References

1. Kopenkina, L. V. Istoriya torfyanogo dela v Rossii [The history of peat industry in Russia] / L. V. Kopenkina. – Tver, 2015. – 228 p.
2. Kopenkina, L. V. Retrospektivnyy analiz proizvodstva torfa v Rossii [Retrospective analysis of peat production in Russia] / L. V. Kopenkina, S. N. Gamayunov // Problemy i perspektivy ustoychivogo razvitiya torfyanogo dela v Rossii [Problems and Prospects of Sustainable Development of Peat Industry in Russia]: Materials of the International Scientific and Practical Conference. – Tver : Triada, 2018. – P. 65–70.
3. Ulanov, A. N. Torfyanye i vyrabotannye pochvy yuzhnoy taygi evro-severo-vostoka Rossii [Peat and depleted soils of the south taiga of the Euro-North-East of Russia] / A. N. Ulanov. – Kirov : Dom pechati-VYATKA, 2005. – 320 p.
4. Kamenova, I. E. Proekt «Vosstanovlenie torfyanykh bolot v Rossii v tselyakh predotvrashche-niya pozharov i smyagcheniya izmeneniy klimata»: opyt realizatsii i perspektivy [Project on restoring peatlands in Russia for fire prevention and climate change mitigation: experiences, prospects and lessons learnt] / I. E. Kamenova, T. Yu. Minaeva // Problemy i perspektivy ustoychivogo razvitiya torfyanogo dela v Rossii [Problems and Prospects of Sustainable Development of Peat Industry in Russia]: Materials of the International Scientific and Practical Conference. – Tver : Triada, 2018. – P. 59–64.
5. Metelev, N. D. Osobennosti vyrashchivaniya sosny obyknovennoy na vyrabotannykh torfya-nikakh torfomassiva

- «Gadovskoe» Orichevskogo rayona, Kirovskoy oblasti [Features of cultivation of Scots pine on depleted peatlands of the peat massif Gadovskoe, Orichevskiy District, Kirov Region] / N. D. Metelev // *Mnogofunktsionalnoe adaptivnoe kormoproizvodstvo* [Multifunctional adaptive feed production]. Collection of Scientific Papers: Materials of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 100th Anniversary of the Kirov Meadow-Swamp Experimental Station. Issue 18 (66). – Moscow, 2018. – P. 205–210.
6. Timofeev, A. F. Lesokhozyaystvennoe osvoenie zemel posle torforazrabotok [Forestry-based industrial development of lands after peat extraction] / A. F. Timofeev, P. A. Lesnov. – Moscow : Lesnaya promyshlennost, 1967. – 74 p.
 7. Timofeev, A. F. Kompleksnoe osvoenie i intensivnoe ispolzovanie zemel posle tor-forazrabotok [Comprehensive development and intensive use of lands after peat extraction] / A. F. Timofeev // *Osvoenie ekosistem i racionalnoe prirodopolzovanie na torfyanykh pochvakh* [Development of Ecosystems and Sustainable Nature Management on Peat Soils]: Materials of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 85th Anniversary of the Kirov Meadow-Swamp Experimental Station. – Kirov : Dom pečhati-VYATKA, 2003. – P. 169–171.
 8. Boch, M. S. Ekosistemy bolot SSSR [Ecosystems of peatlands of the USSR] / M. S. Boch, V. V. Mazing. – Leningrad : Nauka, 1979. – 188 p.

Информация об авторе:

Уланов Николай Анатольевич – кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник Кировской лугоболотной опытной станции – филиала ФНЦ «ВИК им. В. Р. Вильямса» (612097, Российская Федерация, Кировская область, Оrichevskiy район, пос. Юбилейный, д. 33; e-mail: bolotoagro50@mail.ru); доцент кафедры почвоведения, мелиорации, землеустройства и химии Вятского государственного агротехнологического университета (610017, Российская Федерация, г. Киров, Октябрьский пр-т, д. 133; e-mail: info@vgatu.ru).

About the author:

Nikolay A. Ulanov – Candidate of Sciences (Agriculture), Senior Researcher at the Kirov Meadow-Swamp Experimental Station – Branch of the V. R. Williams Federal Science Centre of Forage Production and Agroecology (33 Yubileyniy settlement, Orichevskiy District, Kirov Region 612097, Russian Federation; e-mail: bolotoagro50@mail.ru); Assistant Professor at the Department of Soil Science, Land Reclamation, Land Management and Chemistry of the Vyatka State Agrotechnological University (133 Oktyabrskiy ave., Kirov 610017, Russian Federation; e-mail: info@vgatu.ru).

Для цитирования:

Уланов, Н. А. Вторичные древостои в условиях выработанных торфяников Северо-Востока европейской части России / Н. А. Уланов // *Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Экспериментальная биология и экология»*. – 2024. – № 9 (75). – С. 61–66.

For citation:

Ulanov, N. A. Vtorichnye drevostoi v usloviyakh vyrabotannykh torfyanikov Severo-Vostoka Evropejskoj chasti Rossii [Secondary forest stands on depleted peatlands in the European North-East of Russia] / N. A. Ulanov // *Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series "Experimental Biology and Ecology"*. – 2024. – № 9 (75). – P. 61–66.

Дата поступления статьи: 14.06.2024

Прошла рецензирование: 02.07.2024

Принято решение о публикации: 30.07.2024

Received: 14.06.2024

Reviewed: 02.07.2024

Accepted: 30.07.2024

Потенциал применения микроводорослей

А. В. Гогонин, Т. Н. Щемелинина, Е. М. Анчугова

Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
г. Сыктывкар
gogonin@ib.komisc.ru
tatyana_komi@mail.ru
anchugova@ib.komisc.ru

Аннотация

Исследована возможность устойчивого производства биомассы консорциума микроводорослей (*Vischeria magna*, *Coelastrum proboscideum*) с высоким содержанием аминокислот на сточной воде лесопромышленного комплекса ОАО «Сыктывкарский ЛПК» с одновременной очисткой сточной воды от основных загрязняющих веществ. Внешение консорциума микроводорослей приводит к снижению содержания кадмия, бария, алюминия, аммонийного и нитритного азота по сравнению с контрольным вариантом. Концентрация накопленных микроводорослями аминокислот в стерильной сточной воде составила 84,98 %, в нестерильной – 46,39 %.

Ключевые слова:

аминокислоты, микроводоросли, стерильная и нестерильная сточная вода, культивирование

Введение

В настоящее время применение микроводорослей (далее – МВ) в различных отраслях биотехнологии и промышленности становится наиболее перспективным в связи с их интенсивным ростом и рентабельностью культивирования некоторых штаммов. Например, *Tetrademus obliquus*, *Chlorella vulgaris*, *Dictyococcus varians* и *Pseudococcomyxa simplex* используются для решения задач во многих отраслях промышленности: энергетика (производство биодизеля), сельское хозяйство, фармацевтика, производство пищевых продуктов и др. [1–3]. В экологической биотехнологии чаще всего культуры микроводорослей применяют для очистки сточных вод [4, 5] или в составе консорциума для рекультивации нефтезагрязненной почвы [6].

Сточная вода, как и природная, является нестабильной и сложной системой, в составе которой содержатся минеральные и органические вещества, биогенные элементы, различные газы [7]. Концентрация перечисленных веществ в некоторых случаях превышает предельно допустимые концентрации (далее – ПДК) в естественных условиях [8]. Сточные воды (далее – СВ) лесопромышленного предприятия цеха биологической очистки сточных вод (ЦБОСВ) ОАО «Сыктывкарский ЛПК», включающие как про-

Potential applications of microalgae

A. V. Gogonin, T. N. Shchemelinina, E.M. Anchugova

Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the
Russian Academy of Sciences,
Syktyvkar
gogonin@ib.komisc.ru
tatyana_komi@mail.ru
anchugova@ib.komisc.ru

Abstract

The paper reviews the possibility for the sustainable production of amino acid-rich microalgal consortium biomass (*Vischeria magna*, *Coelastrum proboscideum*) in wastewater generated by the Syktyvkar timber-processing complex with the simultaneous purification of the wastewater from the main pollutants. The introduction of the microalgal consortium results in a reduction in the concentration of cadmium, barium, aluminium, ammonium, and nitrite nitrogen in comparison to the control. The concentration of amino acids accumulated by microalgae is found to be 84.98 % in sterile wastewater and 46.39 % in non-sterile wastewater.

Keywords:

amino acids, microalgae, sterile and non-sterile wastewater, cultivation

мышленные (210 тыс. м³/сут), так и коммунально-бытовые (81 тыс. м³/сут) стоки, весьма неоднородны по химическому составу и разнообразны по времени [9]. Сброс недостаточно очищенной сточной воды приводит к загрязнению водных ресурсов и угнетению экосистемы водоема.

Доочистка сточных вод с применением микроводорослей снижает содержание загрязнителей в сбрасываемой воде в открытые гидрологические системы [10]. Кроме того, при очистке сточной воды от загрязнителей происходит стремительный рост биомассы микроводорослей с образованием ценных вторичных метаболитов – аминокислот. Свободные аминокислоты участвуют в построении молекул белка, синтезе метаболитов, осуществляют транспорт азота и его ассимиляцию, выполняют антиоксидантную функцию, снижают токсичность ионов тяжелых металлов на организмы [11].

Культивирование МВ на сточной воде лесопромышленного комплекса могло бы быть решением многих задач: доочистка сточной воды от основных загрязнителей, накопление биомассы МВ с образованием аминокислот для использования в различных отраслях промышленности [12].

Цель работы – исследование возможности получения на сточной воде лесопромышленного комплекса ОАО «Сыктывкарский ЛПК» биомассы микроводорослей с высоким содержанием аминокислот с одновременной очисткой сточной воды от основных загрязняющих веществ.

Материалы и методы

Для проведения исследования по одновременной очистке сточной воды и накоплению аминокислот микроводорослями были подобраны следующие штаммы:

– *Vischeria magna* (J. B. Petersen) Kryvenda, Rybalka, Wolf & Friedl – водоросль из отдела Ohrophyta (*Eustigmatos magnus* (J. B. Petersen) D. J. Hibberd (SYKOA E-001-09)). Клетки одиночные, коккоидные, от 14 до 34 мкм в диаметре. Вид встречается в водной и почвенной средах [13]. Водоросль легко культивируется, толерантна к воздействию тяжелых металлов и устойчива к высоким температурам. Верхний предел устойчивости зафиксирован при температуре воды около +66 °C [14].

– *Coelastrum proboscideum* Bohlin – зеленая микроводоросль из отдела Chlorophyta (IPPAS C-2055). Образует ценобии из 4–64 клеток, но встречаются одно- и двуклеточные формы. Клетки от 5 до 30 мкм в диаметре [15]. Вид широко распространен в пресных водоемах с различным уровнем загрязнения поллютантами [16].

Характеристика СВ приведена в табл. 2.

Накопление маточных культур МВ (*V. magna*, *C. proboscideum*) проводили в 250 см³ колбах на питательной среде Тамия в течение 14 сут, отдельно. Далее культуры объединяли. Титр клеток консорциума составлял $4,5 \times 10^8$ кл/см³.

Для эксперимента в емкости на 3 дм³ помещали сточную воду (по схеме: стерильную (далее – ССВ) и нестерильную (далее – НСВ) СВ по 1,5 дм³ и инокулировали консорциумом МВ в количестве 1 % от общего объема. Стерильную воду получали путем автоклавирования в стерилизаторе паровом Tuttnauer 2540 ML. Режим – освещение фитолампой OSRAM L 18W/77 Fluora, световой поток 550 lumen, аэрация компрессором Tetratex APS 400, температура – комнатная (+22–23 °C). Контролем служила СВ, отобранная из вторичных отстойников без внесения инокулята (табл. 1). Продолжительность эксперимента – 24 ч., в трех повторностях.

Химический анализ образцов проводили: рН – потенциометрическим методом [17]; содержание аммиака, аммоний-иона – фотометрическим методом [18], массовую концентрацию элементов – атомно-эмиссионной спектрометрией с индуктивно-связанной плазмой [19], содержание аминокислот – методом жидкостной хроматографии на ионообменных смолах [20].

Результаты и их обсуждение

В системе ЦБОСВ ОАО «Сыктывкарский ЛПК» на последней стадии очистки (вторичных отстойниках) в качестве доочистки можно использовать микроводоросли. Однако состав воды вторичных отстойников предполагает наличие и сторонних микроорганизмов, которые могут либо негативно сказаться на процессе очистки, либо,

Таблица 1
Схема эксперимента
Table 1
Experiment scheme

Обозначение пробы	Наименование
СВ	Контроль
НСВ+МВ	Нестерильная сточная вода с отстойников + консорциум МВ
ССВ+МВ	Стерильная сточная вода с отстойников + консорциум МВ

Таблица 2
Количественное содержание элементов в сточной воде в процессе эксперимента
Table 2
Quantitative content of elements in wastewater during the experiment

Показатели	СВ±Δ	НСВ + МВ±Δ	ССВ + МВ±Δ
рН	8,77±0,2	8,96±0,2	8,78±0,2
Концентрация, мг/дм ³			
NH ₄ ⁺	1,8±0,4	0,62±0,25	0,49±0,4
NO ₂ ⁻	0,044±0,01	0,015±0,006	0,014±0,006
Концентрация, мкг/дм ³			
Cd	0,70±0,25	0,51±0,18	0,35±0,12
Ba	105±21	24±6	30±8
Al	165±40	23±7	22±7

Условное обозначение. ±Δ – границы интервала абсолютной погрешности при $p = 0,95$.

Key. ±Δ – absolute error limits at $p = 0.95$.

напротив, в синергетических отношениях с микроводорослями образовывать ассоциации и повышать эффективность доочистки. Для модельного эксперимента был выбран ранее исследованный консорциум МВ (*V. magna*, *C. proboscideum*) [21], инокулированный в стерильную и нестерильную сточную воду (табл. 2).

Введение в стерильную и нестерильную сточную воду консорциума микроводорослей приводило к снижению содержания кадмия, бария, алюминия, аммонийного и нитритного азота по сравнению с контрольным вариантом (табл. 2).

Азот является важнейшим и лимитирующим элементом в питании фотосинтезирующих микроорганизмов для быстрого роста и накопления первичных и вторичных метаболитов. По распространенности в клетках микроводорослей азот занимает второе место после углерода, так как входит в состав большого количества внутриклеточных компартментов и соединений – пептидов, белков, аминокислот, ферментов [22, 23]. Одним из источников азота в сточных водах и естественных гидросистемах является аммоний. По данным литературы [24], аммоний считается предпочтительнее при культивировании микроводорослей, так как отсутствует необходимость в окислительно-восстановительной реакции. Аммоний в большинстве случаев поступает в природные и искусственные гидросистемы с хозяйственно-бытовыми стоками, отходами производства животноводческих комплексов, сельскохозяйственных предприятий. Эффективность потребления консор-

циумом MB в НСВ и ССВ аммоний-ионов составила 65,5 и 72,8 % и нитрит-ионов – 65,9 и 68,0 % соответственно (см. табл. 2). В конце эксперимента содержание NO_2^- в НСВ и ССВ было ниже уровня ПДК, содержание NH_4^+ в ССВ не превышало ПДК.

Биосорбция клетками микроводорослей ионов тяжелых металлов происходит в два этапа – адсорбция ионов на поверхности клеток микроводорослей с последующим проникновением и накоплением ионов тяжелых металлов в цитоплазме клетки. Накопление ионов металлов в клетках живых организмов является необходимым, вследствие метаболических реакций, роста и развития культуры клеток [25]. В СВ содержание алюминия превышало ПДК. Аккумуляция ионов Al консорциумом MB приводила к снижению его содержания до уровня ПДК (см. табл. 2).

Микроводоросли синтезируют незаменимые и заменимые аминокислоты [26], которые могут быть использованы не только в качестве пролонгированного удобрения, но и очищены и переработаны для питания животных [27]. В табл. 3 приведен сравнительный анализ аминокислотного состава микроводорослей, консорциумов MB, культивированных на сточной воде ЦБОСВ ОАО «Сыктывкарский ЛПК» и сточной воде производства свиного мяса в Бразилии [28]. Во всех вариантах было идентифицировано 18 аминокислот, из которых 11 являются незаменимыми. В составе белка биомассы преобладали глутаминовая, аланиновая и лейциновая кислоты, ответственные за мета-

болизм азотсодержащих биохимических веществ. Состав аминокислот меняется не только в зависимости от штамма MB [29], но и типа сточной воды.

Michelon и др. [28] показали, что концентрации аминокислот, обнаруженных в биомассе *Spirulina maxima*, были сравнительно выше, чем в *Phormidium* sp. и в консорциуме (*Chlorella* sp. и *Scenedesmus* sp.) при культивировании в одних и тех же разбавленных сточных водах свиноводческого комплекса (табл. 3).

Накопление аминокислот в биомассе консорциума MB происходило при культивировании на ССВ и НСВ, при этом на стерильной воде содержание аминокислот было больше в 1,8 раза (табл. 3). Так как культивированные на богатых питательными веществами сточных водах MB улавливают их избыток, биомассу можно использовать в качестве биоудобрений пролонгированного действия, из которых элементы питания поступают в почву в соответствии со скоростью усвоения их растениями на протяжении всего периода вегетации. В этом контексте микроводоросли представляют собой платформу для потенциальной разработки продуктов для улучшения качества почвы, производства и защиты сельскохозяйственных культур, таких как биоудобрения, органические удобрения, биостимуляторы, средства биоконтроля и кондиционеры почвы [30]. Так, серосодержащие аминокислоты, метионин и цистеин являются важными компонентами растворимых в почве органических S и N [31, 32]. В работе Rosa la et al. [33]

Таблица 3

Содержание аминокислот в биомассе микроводорослей, культивированных на сточных водах, %

Table 3

Content of amino acids in biomass of microalgae cultivated in wastewater, %

Аминокислоты, %	Данные исследования			Сточная вода производства свиного мяса в Бразилии [23]		
	Контроль	ССВ+MB	НСВ+MB	<i>Chlorella</i> sp. и <i>Scenedesmus</i> sp.	<i>Spirulina maxima</i>	<i>Phormidium</i> sp.
Незаменимые аминокислоты						
Валин	0,9	5,5	0,49	1,4	4,1	2,1
Изолейцин	0,0	4,4	0,37	0,8	3,3	2,3
Треонин	0,2	1,2	0,11	1,1	4,0	2,6
Метионин	0,1	0,0	0,01	0,5	0,53	0,6
Лейцин	0,5	10,7	0,8	2,0	6,7	4,1
Фенилаланин	0,0	4,4	4,3	1,2	3,4	2,2
Лизин	0,7	7,9	6,0	1,2	4,1	1,8
Пролин	0,6	10,4	5,1	1,3	3,9	1,1
Гистидин	0,0	1,4	1,2	0,2	2,3	0,85
Аргинин	0,0	6,3	4,3	1,1	5,5	2,8
Триптофан	-	-	-	-	0,3	-
Заменимые аминокислоты						
Аспарагин	0,5	9,0	6,7	2,4	7,3	4,7
Серин	0,2	2,1	1,5	1,0	3,9	2,1
Глутамин	0,5	1,28	0,92	3,6	12,3	5,01
Глицин	0,5	7,6	5,4	1,4	4,05	4,4
Аланин	0,2	10,4	6,9	2,3	5,9	3,8
Цистеин	0,0	1,2	1,5	0,3	-	-
Тирозин	0,0	1,2	0,8	0,7	3,2	2,6
Сумма	4,4	84,98	46,39	22,5	74,78	43,06

сообщается о влиянии аминокислот метионина и аргинина на повышенную активность азотфиксирующих и фосформинерализующих бактерий в ризосфере *Agave lechuguilla*. Высокое накопление аргинина отмечено в биомассе консорциума MB на ССВ (табл. 3). Концентрация метионина была нулевой в ССВ+MB и низкой – в НСВ+MB.

Стандартный белковый рацион, используемый в свиноводстве, требует добавления незаменимых аминокислот, таких как лизин, треонин, метионин и триптофан [34], в птицеводстве – глицин, треонин, пролин, а также играют физиологическую и регулирующие роли, помимо синтеза белка, в росте цыплят и яйценоскости занимает значимое место замещающая кислота – глутамин [35, 36]. Дефицит аминокислот может ухудшить рост животных, иммунитет, повышать восприимчивость к инфекционным заболеваниям, а также способствовать возникновению других проблем с пищеварением и репродукцией [37]. Концентрация перечисленных аминокислот, обнаруженных в биомассе микроводорослей, культивированных как на СВ лесопромышленного пред-

приятия, так и СВ свиноводческого комплекса в пределах 0,1–12,3 % (табл. 3), превышает минимальные требования к содержанию аминокислот. Таким образом, МВ, полученные при фиторемедиации сточных вод, могут быть переработаны в качестве источника биоудобрений и пищевых добавок для животных (экономика замкнутого цикла).

Заключение

Технология получения аминокислот из водорослей, ранее использованных для очистки богатых питательными веществами сточных вод, позволит одновременно иметь доступ к получению вторичного сырья для крупномасштабного производства биоудобрений на основе микроводорослей, применяемых в агропромышленном секторе, и уменьшить воздействие промышленных стоков на окружающую среду.

Установлено, что сточная вода вторичных отстойников ЦБОСВ лесопромышленного предприятия ОАО «Сыктывкарский ЛПК» может быть использована как питательная среда для культивирования микроводорослей с целью получения биомассы с высоким содержанием аминокислот. Внесение в сточную воду микроводорослей приводит к снижению основных загрязняющих веществ, содержание которых не превышает ПДК.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источники и литература

1. A multidisciplinary review of *Tetrademus obliquus*: a microalgae suitable for large-scale biomass production and emerging environmental applications / C. Y. B. Oliveira, C. D. L. Oliveira, R. Prasad [et al.] // *Reviews in Aquaculture*. – 2021. – Vol. 13. – P. 1594–1618. – DOI: 10.1111/raq.12536
2. Ahmad, F. The potential of *Chlorella vulgaris* for wastewater treatment and biodiesel production / F. Ahmad, A. U. Khan, A. Yaşar // *Pakistan Journal of Botany*. – 2013. – Vol. 45. – P. 461–465.
3. Бажукова, Н. В. Использование микроводорослей *Eustigmatos magnus*, *Dictyococcus varians* и *Pseudococcomyxa simplex* как объектов перспективных для биотехнологии / Н. В. Бажукова, И. В. Новаковская, Н. В. Матистов // Биотехнология. Взгляд в будущее: тезисы II-й Международной виртуальной интернет-конференции : Казань. – 2013. – С. 11–13. – <http://www.paxgrid.ru/conference/index.php?c=biotech2013&lang=rus>
4. Reuse of effluent water from municipal wastewater treatment plant in microalgae cultivation for biofuel production / S. Cho, T. T. Luong, D. Lee [et al.] // *Bioresource Technology*. – 2011. – Vol. 102. – P. 8639–8645. – DOI: 10.1016/j.biortech.2011.03.037
5. Choi, H.-J. Parametric study of brewery wastewater effluent treatment using *Chlorella vulgaris* microalgae / H.-J. Choi // *Environmental Engineering Research*. – 2016. – Vol. 21, is. 4. – P. 401–408. – DOI: 10.4491/eer.2016.024
6. Щемелинина, Т. Н. Комплексная биотехнология очистки нефтезагрязнённой почвы / Т. Н. Щемелинина, Е. М. Анчугова // *Поволжский экологический журнал*. – 2023. – № 2. – С. 246–256. – DOI: 10.35885/1684-7318-2023-2-246-256
7. Орлова, Т. Н. Химия природных и промышленных вод : учебное пособие / Т. Н. Орлова, Д. А. Базлов, В. Ю. Орлов. – Ярославль : ЯрГУ, 2013. – 120 с.
8. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания : постановление от 28 января 2021 года № 2 Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685–21. – 2021. – 636 с.
9. Гогонин, А. В. Консорциум микроводорослей для очистки сточных вод лесопромышленного комплекса : автореф. ... канд. биол. наук / А. В. Гогонин. – Оболонск, 2023. – 24 с.
10. Гогонин, А. В. Оценка использования сточной воды в качестве питательной среды для накопления биомассы микроводорослей / А. В. Гогонин, Т. Н. Щемелинина, Е. М. Анчугова // *Теоретическая и прикладная экология*. – 2022. – № 2. – С. 68–74. – DOI: 10.25750/1995-4301-2022-2-109-115
11. Rai, V. K. Role of amino acids in plant responses to stresses / V. K. Rai // *Biologia Plantarum*. – 2002. – Vol. 45, iss. 4. – P. 481–487. – DOI: 10.1023/A:1022308229759
12. Composting parameters and compost quality: a literature review / K. Azim, B. Soudi, S. Boukhari [et al.] // *Organic Agriculture*. – 2018. – Vol. 8. – P. 141–158. – DOI: 10.1007/s13165-017-0180-z
13. Давыдов, Д. А. Водоросли и цианопрокариоты на участках самозарастания золошлакоотвалов ТЭЦ города Апатиты (Мурманская область) / Д. А. Давыдов, В. В. Редькина // *Труды Карельского научного центра Российской академии наук*. – 2021. – С. 51–68. – DOI: 10.17076/bg1270
14. Сафиуллина, Л. М. Толерантность почвенных водорослей *Eustigmatos magnus* (B.Petersen) Hibberd (*Eustigmatophyta*) и *Hantzschia amphioxys* (Ehrenberg) Grunow in Cleve et Grunow (*Bacillariophyta*) к воздействию тяжелых металлов / Л. М. Сафиуллина, А. И. Фазлутдинова, Г. Р. Бакиева // *Вестник Оренбургского государственного университета*. – 2009. – С. 42–44.
15. Царенко, П. М. Краткий определитель хлорококковых водорослей Украинской ССР : учебное пособие / П. М. Царенко. – Киев : Изд-во «Наукова Думка», 1990. – 208 с.
16. Топачевский, А. В. Пресноводные водоросли Украинской ССР : учебное пособие / А. В. Топачевский, Н. П. Масюк. – Киев : Вища школа, 1984. – 336 с.
17. Методика выполнения измерений pH в водах потенциометрическим методом. ПНД Ф 14.1:2:3:4.121-97 (ФР.1.31.2007.03794). – Сыктывкар : ИБ Коми НЦ УрО РАН, 2004.
18. Методика измерений массовой концентрации аммиака и аммоний-ионов в питьевых, природных и сточных водах фотометрическим методом с реактивом Несслера. ПНД Ф 14.1:2:4.276-2013, (ФР.1.31.2013.16660). – Сыктывкар : ИБ Коми НЦ УрО РАН, 2013.

19. Методика выполнения измерений массовой концентрации элементов в пробах питьевой, природных, сточных вод и атмосферных осадков методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой. ПНД Ф 14.1:2.4.135-98. – Сыктывкар : ИБ Коми НЦ УрО РАН, 2008.
20. Методика выполнения измерений содержания аминокислот, входящих в состав белков растений, методом жидкостной хроматографии на ионообменных смолах, Методика измерений № 88-17641-97-2010 (АН/1/31/2014/17660). – Сыктывкар : ИБ Коми НЦ УрО РАН, 2010.
21. Гогонин, А. В. Создание консорциума микроводорослей с оптимальным составом и титром клеток / А. В. Гогонин, И. В. Новаковская // Материалы докладов III Всероссийской (XVIII) молодежной научной конференции «Молодежь и наука на Севере» (с элементами научной школы). – Сыктывкар, 2018. – С. 80–81.
22. Markou, G. Microalgal and cyanobacterial cultivation: the supply of nutrients / G. Markou, D. Vandamme, K. Muylaert // Water Research. – 2014. – Vol. 65. – P. 186–202. – DOI: 10.1016/j.watres.2014.07.025
23. Andersen, R. A. The microalgal cell. In A. Richmond & Q. Hu (Eds.) / R. A. Andersen // Handbook of Microalgal Culture : Applied Phycology and Biotechnology. – 2013. – P. 3–20.
24. Barsanti, L. Algae: anatomy, biochemistry, and biotechnology / L. Barsanti, P. Gualtieri // Boca Raton : CRC Press, 2006. – 301 p. – DOI: 10.1002/9781118567166.ch1
25. Priyadarshini, E. Heavy metal resistance in algae and its application for metal nanoparticle synthesis / E. Priyadarshini, S. S. Priyadarshini, N. Pradhan // Applied Microbiology and Biotechnology. – 2019. – Vol. 103. – P. 3297–3316. – DOI: 10.1007/s00253-019-09685-3
26. Microalgae: a potential alternative to health supplementation for humans / A. K. Koyande, K. W. Chew, K. Rambabu [et al.] // Food Science and Human Wellness. – 2019. – Vol. 8. – P. 16–24. – DOI: 10.1016/j.fshw.2019.03.001
27. FAO/WHO. Report of a Joint FAO/WHO Expert Committee. In: Food and Agriculture Organization (ed) Energy and Protein Requirements. 1973.
28. Amino acids, fatty acids, and peptides in microalgae biomass harvested from phycoremediation of swine wastewaters / W. Michelon, M. L. B. da Silva, A. Matthiensen [et al.] // Biomass Conversion and Biorefinery. – 2022. – Vol. 12. – P. 869–880. – DOI: 10.1007/s13399-020-01263-2
29. Chemical composition of cyanobacteria grown in diluted, aerated swine wastewater / R. O. Canizares-Villanueva, A. R. Dominguez, M. S. Cruz, E. Rios-Leal // Bioresource Technology. – 1995. – Vol. 51. – P. 111–116.
30. Microalgae, soil and plants: A critical review of microalgae as renewable resources for agriculture / A. L. Alvarez, S. L. Weyers, H. M. Goemann [et al.] // Algal Research. – 2021. – Vol. 54. – 102200. – DOI: 10.1016/j.algal.2021.102200
31. Effect of elements availability on the decomposition and utilization of S-containing amino acids by microorganisms in soil and soil solutions / Q. Ma, R. Yao, X. Liu [et al.] // Plant and Soil. – 2024. – DOI: 10.1007/s11104-024-06864-8
32. Competition for two sulphur containing amino acids (cysteine and methionine) by soil microbes and maize roots in the rhizosphere / D. Wang, J. Wang, D. R. T. Ge Chadwick, D. L. Jones // Biology and Fertility of Soils. – 2023. – Vol. 59. – P. 697–704. – DOI: 10.1007/s00374-023-01724-6
33. Amino acids in the root exudates of *Agave lechuguilla* Torr. Favor the recruitment and enzymatic activity of nutrient-improvement Rhizobacteria / G. M. la Rosa, F. García-Oliva, C. Ovando-Vázquez [et al.] // Microbial Ecology. – 2023. – Vol. 86. – P. 1176–1188. – DOI: 10.1007/s00248-022-02162-x
34. Protein-restricted diet balanced for lysine, methionine, threonine, and tryptophan for nursery pigs elicits subsequent compensatory growth and has long term effects on protein metabolism and organ development / Y. Sun, T. Teng, G. Bai, [et al.] // Animal Feed Science and Technology. – 2020. – Vol. 270. – 114712. – DOI: 10.1016/j.anifeeds.2020.114712
35. Siegert, W. The relevance of glycine and serine in poultry nutrition: a review / W. Siegert, M. Rodehutschord // British Poultry Science. – 2019. – Vol. 60, N 5. – P. 579–588. – DOI: 10.1080/00071668.2019.1622081
36. He, W. Amino acid nutrition and metabolism in chickens / W. He, P. Li, G. Wu // Advances in Experimental Medicine and Biology. – 2021. – Vol. 1285. – P. 109–131. – DOI: 10.1007/978-3-030-54462-1_7
37. Yang, Z. Physiological effects of dietary amino acids on gut health and functions of swine / Z. Yang, S. F. Liao // Frontiers in Veterinary Science. – 2019. – Vol. 6. – P. 1–13. – DOI: 10.3389/fvets.2019.00169

References

1. A multidisciplinary review of *Tetrademus obliquus*: a microalgae suitable for large-scale biomass production and emerging environmental applications / C. Y. B. Oliveira, C. D. L. Oliveira, R. Prasad [et al.] // Reviews in Aquaculture. – 2021. – Vol. 13. – P. 1594–1618. – DOI: 10.1111/raq.12536
2. Ahmad, F. The potential of *Chlorella vulgaris* for wastewater treatment and biodiesel production / F. Ahmad, A. U. Khan, A. Yaşar // Pakistan Journal of Botany. – 2013. – Vol. 45. – P. 461–465.
3. Bazhukova, N. V. Ispol'zovanie mikrovodoroslej *Eustigmatos magnus*, *Dictyococcus varians* i *Pseudococcomyxa simplex* kak ob"ektov perspektivnyh dlya biotekhnologii [Utilization of microalgae *Eustigmatos magnus*, *Dictyococcus varians* and *Pseudococcomyxa simplex* as objects promising for biotechnology / N. V. Bazhukova, I. V. Novakovskaya, N. V. Matistov // Biotekhnologiya. Vzgl'yad v budushchee: Tez. II-j Mezhdunar. virtual'noj internet konf. [Biotechnology. A View to the Future: Theses of the II Int. Virtual Internet Conf.] – Kazan, 2013. – P. 11–13. – <http://www.paxgrid.ru/conference/index.php?c=biotech2013&lang=rus>

4. Reuse of effluent water from municipal wastewater treatment plant in microalgae cultivation for biofuel production / S. Cho, T. T. Luong, D. Lee [et al.] // *Bioresource Technology*. – 2011. – Vol. 102. – P. 8639–8645. – DOI: 10.1016/j.biortech.2011.03.037
5. Choi, H.-J. Parametric study of brewery wastewater effluent treatment using *Chlorella vulgaris* microalgae / H.-J. Choi // *Environmental Engineering Research*. – 2016. – Vol. 21, iss. 4. – P. 401–408. – DOI: 10.4491/eer.2016.024
6. Shchemelinina, T. N. Kompleksnaya biotekhnologiya ochistki neftezagryaznyonnoj pochvy [Integrated biotechnology for oil-polluted soil cleanup] / T. N. Shchemelinina, E. M. Anchugova // *Povolzhskij ekologicheskij zhurnal* [Povolzhskiy Journal of Ecology]. – 2023. – N 2. – P. 246–256. – DOI: 10.35885/1684-7318-2023-2-246-256
7. Orlova, T. N. Himiya prirodnyh i promyshlennyh vod : uchebnoe posobie [Chemistry of natural and industrial waters : textbook] / T. N. Orlova, D. A. Bazlov, V. Yu. Orlov. – Yaroslavl : Yaroslavskiy State University, 2013. – 120 p.
8. Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya : postanovlenie ot 28 yanvarya 2021 goda № 2 Ob utverzhdenii sanitarnykh pravil i norm SanPiN 1.2.3685-21 [Hygienic norms and requirements to ensure safety and (or) harmlessness to humans of habitat factors: [Resolution dated 28 January 2021 No. 2 On Approval of Sanitary Rules and Norms SanPiN 1.2.3685-21]. – 2021. – 636 p.
9. Gogonin, A. V. Konsorcium mikrovodoroslej dlya ochistki stochnyh vod lesopromyshlennogo kompleksa [Microalgae consortium for the treatment of wastewater from the forestry sector]: abstract of diss ... cand. sci. (Biology) / Gogonin A. V. – Obolensk, 2023. – 24 p.
10. Gogonin, A. V. Ocenka ispol'zovaniya stochnoj vody v kachestve pitatel'noj sredy dlya nakopleniya biomassy mikrovodoroslej [Utilization of wastewaters as a nutrient medium for the accumulation of microalgal biomass] / A. V. Gogonin, T. N. Shchemelinina, E. M. Anchugova // *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* [Theoretical and Applied Ecology]. – 2022. – N 2. – P. 68–74. – DOI: 10.25750/1995-4301-2022-2-109-115
11. Rai, V. K. Role of amino acids in plant responses to stresses / V. K. Rai // *Biologia Plantarum*. – 2002. – Vol. 45, iss. 4. – P. 481–487. – DOI: 10.1023/A:1022308229759
12. Composting parameters and compost quality: a literature review / K. Azim, B. Soudi, S. Boukhari [et al.] // *Organic Agriculture*. – 2018. – Vol. 8. – P. 141–158. – DOI: 10.1007/s13165-017-0180-z
13. Davydov, D. A. Vodorosli i cianoprokarioty na uchastkah samozarastaniya zoloshlakootvalov TEC goroda Apatity (Murmanskaya oblast') [Algae and cyanoprokaryotes on naturally overgrowing ash dumps of the Apatity thermal power station (Murmansk region)] / D. A. Davydov, V. V. Redkina // *Trudy Karelskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk* [Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. – 2021. – P. 51–68. – DOI: 10.17076/bg1270
14. Safiullina, L. M. Tolerantnost' pochvennyh vodoroslej *Eustigmatos magnus* (B.Petersen) Hibberd (*Eustigmatophyta*) i *Hantzschia amphioxys* (Ehrenberg) Grunow in Cleve et Grunow (*Bacillariophyta*) k vozdeystviyu tyazhelykh metallov [Tolerance of the soil algae *Eustigmatos magnus* (B.Petersen) Hibberd (*Eustigmatophyta*) and *Hantzschia amphioxys* (Ehrenberg) Grunow in Cleve et Grunow (*Bacillariophyta*) to heavy metal exposure] / L. M. Safiullina, A. I. Fazludinova, G. R. Bakieva // *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Orenburg State University]. – 2009. – P. 42–44.
15. Tsarenko, P. M. Kratkij opredelitel' hlорokokkovykh vodoroslej Ukrainskoj SSR : uchebnoe posobie [Brief identifier of chlorococcal algae of the Ukrainian SSR : textbook] / P. M. Tsarenko. – Kiev : Naukova Dumka, 1990. – 208 p.
16. Topachevskiy, A. V. Presnovodnye vodorosli Ukrainskoj SSR : uchebnoe posobie [Freshwater algae of the Ukrainian SSR : textbook] / A. V. Topachevskiy, N. P. Masyuk // Kiev : Vishcha shkola, 1984. – 336 p.
17. Metodika vypolneniya izmerenij pH v vodah potenciometricheskim metodom. PND F 14.1.2.3:4.121-97 (FR.1.31.2007.03794) [Methodology for performing measurements of pH in waters by potentiometric method. PND F 14.1.2.3:4.121-97 (FR.1.31.2007.03794)]. – Syktyvkar : Institute of biology of Komi science center of Ural Department of RAS, 2004.
18. Metodika vypolneniya izmerenij pH v vodah potenciometricheskim metodom. PND F 14.1.2.3:4.121-97 (FR.1.31.2007.03794) [Procedure for measuring the mass concentration of ammonia and ammonium ions in drinking, natural and waste waters by photometric method with Nessler's reagent. PND F 14.1.2:4.276-2013, (FR.1.31.2013.16660)] – Syktyvkar : Institute of biology of Komi science center of Ural Department of RAS. – 2013.
19. Metodika vypolneniya izmerenij massovoj koncentracii elementov v probah pit'evoj, prirodnyh, stochnyh vod i atmosferynyh osadkov metodom atomno-emissionnoj spektrometrii s induktivno-svyazannoj plazmoj. PND F 14.1.2:4.135-98 [Methodology for measuring the mass concentration of elements in samples of drinking, natural, waste water and atmospheric precipitation by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry. PND F 14.1.2:4.135-98]. – Syktyvkar : Institute of biology of Komi science center of Ural department of RAS, 2008.
20. Metodika vypolneniya izmerenij massovoj koncentracii elementov v probah pit'evoj, prirodnyh, stochnyh vod i atmosferynyh osadkov metodom atomno-emissionnoj spektrometrii s induktivno-svyazannoj plazmoj. PND F 14.1.2:4.135-98 [Methodology for performing measurements of the amino acid content of plant proteins by liquid chromatography on ion-exchange resins, Measurement Procedure No. 88-17641-97-2010 (AH/1/31/2014/17660)]. – Syktyvkar : Institute of biology of Komi science center of Ural department of RAS, 2010.
21. Gogonin, A. V. Sozdanie konsorciuma mikrovodoroslej s optimal'nym sostavom i titrom kletok [Creating a consortium of microalgae with optimal composition and cell titre] / A. V. Gogonin, I. V. Novakovskaya // *Materialy*

- dokladov III Vserossijskoj (XVIII) molodezhnoj nauchnoj konferencii «Molodezh' i nauka na Severe» (s elementami nauchnoj shkoly). – [Proceedings of the III All-Russian (XVIII) Youth Scientific Conference «Youth and Science in the North» (with elements of the scientific school)]. – Syktyvkar, 2018. – P. 80–81.
22. Markou, G. Microalgal and cyanobacterial cultivation: the supply of nutrients / G. Markou, D. Vandamme, K. Muylaert // *Water Research*. – 2014. – Vol. 65. – P. 186–202. – DOI: 10.1016/j.watres.2014.07.025
 23. Andersen, R. A. The microalgal cell. In A. Richmond & Q. Hu (Eds.) / R. A. Andersen // *Handbook of Microalgal Culture: Applied Phycology and Biotechnology*. – 2013. – P. 3–20.
 24. Barsanti, L. Algae: anatomy, biochemistry, and biotechnology / L. Barsanti, P. Gualtieri // Boca Raton: CRC Press, 2006. – 301 p. – DOI: 10.1002/9781118567166.ch1
 25. Priyadarshini, E. Heavy metal resistance in algae and its application for metal nanoparticle synthesis / E. Priyadarshini, S. S. Priyadarshini, N. Pradhan // *Applied Microbiology and Biotechnology*. – 2019. – Vol. 103. – P. 3297–3316. – DOI: 10.1007/s00253-019-09685-3
 26. Microalgae: a potential alternative to health supplementation for humans / A. K. Koyande, K. W. Chew, K. Rambabu [et al.] // *Food Science and Human Wellness*. – 2019. – Vol. 8. – P. 16–24. – DOI: 10.1016/j.fshw.2019.03.001
 27. FAO/WHO. Report of a Joint FAO/WHO Expert Committee. In: Food and Agriculture Organization (ed) *Energy and Protein Requirements*. 1973.
 28. Amino acids, fatty acids, and peptides in microalgae biomass harvested from phycoremediation of swine wastewaters / W. Michelon, M. L. B. da Silva, A. Matthiensen [et al.] // *Biomass Conversion and Biorefinery*. – 2022. – Vol. 12. – P. 869–880. – DOI: 10.1007/s13399-020-01263-2
 29. Chemical composition of cyanobacteria grown in diluted, aerated swine wastewater / R. O. Canizares-Villanueva, A. R. Dominguez, M. S. Cruz, E. Rios-Leal // *Bioresource Technology*. – 1995. – Vol. 51. – P. 111–116.
 30. Microalgae, soil and plants: A critical review of microalgae as renewable resources for agriculture / A. L. Alvarez, S. L. Weyers, H. M. Goemann [et al.] // *Algal Research*. – 2021. – Vol. 54. – 102200. – DOI: 10.1016/j.algal.2021.102200
 31. Effect of elements availability on the decomposition and utilization of S-containing amino acids by microorganisms in soil and soil solutions / Q. Ma, R. Yao, X. Liu [et al.] // *Plant and Soil*. – 2024. – DOI: 10.1007/s11104-024-06864-8
 32. Competition for two sulphur containing amino acids (cysteine and methionine) by soil microbes and maize roots in the rhizosphere / D. Wang, J. Wang, D. R. T. Ge Chadwick, D. L. Jones // *Biology and Fertility of Soils*. – 2023. – Vol. 59. – P. 697–704. – DOI: 10.1007/s00374-023-01724-6
 33. Amino acids in the root exudates of *Agave lechuguilla* Torr. favor the recruitment and enzymatic activity of nutrient-improvement rhizobacteria / G. M. la Rosa, F. García-Oliva, C. Ovando-Vázquez [et al.] // *Microbial Ecology*. – 2023. – Vol. 86. – P. 1176–1188. – DOI: 10.1007/s00248-022-02162-x
 34. Protein-restricted diet balanced for lysine, methionine, threonine, and tryptophan for nursery pigs elicits subsequent compensatory growth and has long term effects on protein metabolism and organ development / Y. Sun, T. Teng, G. Bai, Sh [et al.] // *Animal Feed Science and Technology*. – 2020. – Vol. 270. – 114712. – DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2020.114712
 35. Siegert, W. The relevance of glycine and serine in poultry nutrition: a review / W. Siegert, M. Rodehutschord // *British Poultry Science*. – 2019. – Vol. 60, N 5. – P. 579–588. – DOI: 10.1080/00071668.2019.1622081
 36. He, W. Amino acid nutrition and metabolism in chickens / W. He, P. Li, G. Wu // *Advances in Experimental Medicine and Biology*. – 2021. – Vol. 1285. – P. 109–131. – DOI: 10.1007/978-3-030-54462-1_7
 37. Yang, Z. Physiological effects of dietary amino acids on gut health and functions of swine / Z. Yang, S. F. Liao // *Frontiers in Veterinary Science*. – 2019. – Vol. 6. – P. 1–13. – DOI: 10.3389/fvets.2019.00169

Благодарность (госзадание):

Работа выполнена при финансировании государственного задания № 1021051101411-4-1.6.23 «Научно-обоснованные биотехнологии для улучшения экологической обстановки и здоровья человека на Севере».

Авторы выражают благодарность сотрудникам экоаналитической лаборатории Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, сотрудникам отдела флоры и растительности Севера Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН к.б.н. Е. Н. Патовой, к.б.н. И. В. Новаковской.

Acknowledgements (state task):

The work was fulfilled in frames of the State Task № 1021051101411-4-1.6.23 “Science-based biotechnologies to improve the environmental situation and human health in the North”.

The authors express their gratitude to the staff of the Ecoanalytical Laboratory at the Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, the members of the Department of Flora and Vegetation of the North at the Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Candidate of Sciences (Biology) E. N. Patova, Candidate of Sciences (Biology) I. V. Novakovskaya.

Информация об авторах:

Гогонин Александр Владимирович – кандидат биологических наук, ведущий инженер лаборатории биохимии и биотехнологии Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; <https://orcid.org/0000-0003-1401-7412> (167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28; e-mail: gogonin@ib.komisc.ru).

Щемелинина Татьяна Николаевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биохимии и биотехнологии Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; Scopus Author ID – 56711948200, <https://orcid.org/0000-0002-4052-6424> (167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28; e-mail: tatyanakomi@mail.ru).

Анчугова Елена Михайловна – младший научный сотрудник лаборатории биохимии и биотехнологии Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; Scopus Author ID – 56711975900, <https://orcid.org/0000-0002-7912-3518> (167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28; e-mail: anchugova@ib.komisc.ru).

About the authors:

Alexander V. Gogonin – Candidate of Sciences (Biology), Leading Engineer at the Laboratory of Biochemistry and Biotechnology; <https://orcid.org/0000-0003-1401-7412> (Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 28 Kommunisticheskaya st., 167982 Syktyvkar, Komi Republic, Russia; e-mail: gogonin@ib.komisc.ru).

Tatiana N. Shchemelinina – Candidate of Sciences (Biology), Senior Researcher at the Laboratory of Biochemistry and Biotechnology; Scopus Author ID 56711948200, <https://orcid.org/0000-0002-4052-6424> (Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 28 Kommunisticheskaya st., 167982 Syktyvkar, Komi Republic, Russia; e-mail: tatyanakomi@mail.ru).

Elena M. Anchugova – Junior Researcher at the Laboratory of Biochemistry and Biotechnology, Scopus Author ID 56711975900, <https://orcid.org/0000-0002-7912-3518> (Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 28 Kommunisticheskaya st., 167982 Syktyvkar, Komi Republic, Russia; e-mail: anchugova@ib.komisc.ru).

Для цитирования:

Гогонин, А. В. Потенциал применения микроводорослей / А. В. Гогонин, Т. Н. Щемелинина, Е. М. Анчугова // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Экспериментальная биология и экология». – 2024. – № 9 (75). – С. 67–74.

For citation:

Gogonin, A. V. Potencial primeneniya mikrovodoroslej [Potential application of microalgae] / A. V. Gogonin, T. N. Shchemelinina, E. M. Anchugova // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series "Biological Sciences". – 2024. – № 9 (75). – P. 67–74.

Дата поступления статьи: 10.09.2024

Прошла рецензирование: 23.09.2024

Принято решение о публикации: 07.10.2024

Received: 10.09.2024

Reviewed: 23.09.2024

Accepted: 07.10.2024

Валоризация лигноцеллюлозного отхода – кофейной шелухи

В. В. Мартынов, Т. Н. Щемелинина, Е. М. Анчугова

Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
г. Сыктывкар
martynov.v.v@ib.komisc.ru
tatyana_komi@mail.ru
anchugova@ib.komisc.ru

Аннотация

Лигноцеллюлозные отходы являются наиболее доступным возобновляемым сырьем в мире. Внедрение принципов экономики замкнутого цикла предполагает максимальное извлечение ценных свойств из вторичных ресурсов. Данное исследование ставит своей целью возможность использования кофейной шелухи, единственного отхода жарки кофе, для глубинного культивирования ксилотрофных базидиомицетов с последующим получением ферментов. При глубинном культивировании на кофейной шелухе выявлены интенсификация ростовых процессов и повышенный биосинтез ферментов у мицелия *Fomitopsis pinicola* и *Rhodofomes roseus* в сравнение с твердофазным культивированием. Штамм *Fomitopsis pinicola* преимущественно накапливает целлобиазы (1800 ед/г) и β -глюканазы (1170 ед/г), тогда как штамм *Rhodofomes roseus* – ксиланазы (более 5000 ед/г). Таким образом, кофейная шелуха рекомендуется в качестве перспективного субстрата для культивирования ксилотрофных базидиомицетов с целью получения ферментных препаратов.

Ключевые слова:

кофейная шелуха, питательная среда, ксилотрофные базидиомицеты, ростовые характеристики, ферментативная активность

Введение

В соответствии с принципами экономики замкнутого цикла кофейная шелуха (далее – КШ) является отходом, перспективным для переработки во вторичное сырье и в продукты с добавленной стоимостью (биополимерные композиты для упаковки, сырье и ингредиенты для приготовления функциональных пищевых и косметических продуктов, для производства биобутанола, удобрение для почвы; в качестве иммуностимулятора в аквакультуре) [1–8].

Лигноцеллюлозные отходы – наиболее распространенное возобновляемое сырье в мире. Их сжигание приводит к потере энергоценного ресурса и наносит огромный ущерб окружающей среде. Экологически чистым и перспективным биотехнологическим процессом утилизации таких отходов является выращивание микро- и макроми-

Valorization of coffee silverskin lignocellulosic waste

V. V. Martynov, T. N. Shchemelinina, E. M. Anchugova

Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Syktyvkar
martynov.v.v@ib.komisc.ru
tatyana_komi@mail.ru
anchugova@ib.komisc.ru

Abstract

Lignocellulosic waste represents the most abundant renewable raw material globally. The principles of a circular economy can be applied by optimizing the utilization of valuable properties from recycled materials. The objective of this study is to assess the potential of utilizing coffee silverskin, the sole by-product of coffee roasting, for submerged cultivation of xylophilic basidiomycetes with subsequent enzyme production. The growth processes of *Fomitopsis pinicola* and *Rhodofomes roseus* became intensified along with the increased biosynthesis of enzymes in their mycelia in case of submerged cultivation on coffee silverskin, not during solid-phase cultivation. The *Fomitopsis pinicola* strain was observed to preferentially accumulate cellobiases (1800 units/g) and β -glucanases (1170 units/g), whereas the *Rhodofomes roseus* strain was found to accumulate xylanases (over 5000 units/g). Therefore, coffee silverskin can be recommended to be used as a promising substrate for the cultivation of xylophilic basidiomycetes for the production of enzyme preparations.

Keywords:

coffee silverskin, nutrient medium, xylophilic basidiomycetes, growth characteristics, enzymatic activity

цетов. Используемые для этих целей в первую очередь рисовая и пшеничная солома, а также остатки кукурузы и сахарного тростника, являются наиболее распространенным возобновляемым сырьем на планете [9]. Кофейная шелуха, богатая питательными веществами, – отход кофейного производства [8, 10], также представляет потенциальную ценность в качестве дешевого источника углерода для культивирования штаммов грибов для получения ферментов, спрос на которые постоянно растет из-за разнообразия их промышленного применения. По оценкам, производство и применение ферментов на различных рынках должны увеличиться до 17,5 млрд дол. в 2024 г. [11].

Цель работы – оценка кофейной шелухи в качестве субстрата для культивирования ксилотрофных базидио-

мицетов (*Fomitopsis pinicola* и *Rhodofomes roseus*): источников получения ферментов.

Материалы и методы

Для утилизации КШ проводили глубинное и твердофазное культивирование ксилотрофных базидиомицетов. В работе использовали два вида: *Fomitopsis pinicola* (Sw.) P. Karst 1881 и *Rhodofomes roseus* (Alb. & Schwein.) Kotl.&Pouzar 1990. Образцы ксилотрофных базидиомицетов были отобраны в окрестностях г. Сыктывкара. Таксономия и номенклатура таксонов грибов приведены в соответствии с рекомендациями ресурса Index Fungorum (2008–2024). В качестве субстрата использовали КШ, образующуюся после обжарки кофейных зерен. В дополнение к КШ в состав среды входили следующие компоненты: источники азота ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ и мочевины) и фосфора (KH_2PO_4), а также микроэлементы ($\text{MgSO}_4 \times 7 \text{H}_2\text{O}$, $\text{ZnSO}_4 \times 7 \text{H}_2\text{O}$, $\text{MnSO}_4 \times 7 \text{H}_2\text{O}$, CaCl_2), необходимые для роста и синтеза ферментов.

Для расчета радиальной скорости роста и ростового коэффициента проводили твердофазное культивирование в чашках Петри в течение 12 суток. Радиальную скорость роста рассчитывали по следующей формуле:

$$VR = \frac{R_1 - R_0}{t_1 - t_0},$$

где VR – средняя скорость радиального роста, мм/сут; R_1 – радиус колонии в конце роста, мм; R_0 – радиус колонии в начале фазы линейного роста, мм; $t_1 - t_0$ – продолжительность линейной фазы роста, сут.

Для расчета ростового коэффициента (далее – РК) в ходе культивирования определяли высоту, плотность и диаметр колонии. Плотность колонии отмечали по трехбалльной системе: 1 – редкая; 2 – средняя; 3 – плотная. Ростовый коэффициент рассчитывали по формуле [12].

$$PK = \frac{D * h * g}{t},$$

где D – диаметр колонии, мм; h – высота колонии, мм; g – плотность колонии, балл; t – возраст колонии, сут.

Глубинное культивирование проводили в орбитальном шейкере-инкубаторе Biosan ЕС-20/60 при температуре 26 °С и 150 об./мин в течение 16 сут. Периодически осуществляли отбор культуральной жидкости для определения активности целлюлолитических и гемицеллюлолитических ферментов (эндо-, экзоглюканаза, целлобиаза, ксиланаза, β -глюканаза) по стандартным методикам, описанным Польшагиной с соавт. [13].

Для проверки нормальности распределения выборок использовали W -критерий Шапиро-Уилка. Достоверность различий определяли используя U -критерий Манна-Уитни. Уровень значимости $\alpha = 0.05$. Статистическую обработку полученных данных проводили с помощью пакета программ STATISTICA 10.0 (StatSoft Inc., OK, USA).

Результаты и их обсуждение

Объем отхода производства ООО «Кофе Плюс» (г. Сыктывкар, Республика Коми) – кофейной шелухи – составляет от 800 до 1200 кг в месяц. По своему составу КШ относится в большей степени к лигноуглеводному материалу, доминирующим структурным компонентом в котором является

целлюлоза, массовая доля – 23,2 %. Массовая доля водорастворимых пектиновых полисахаридов – 9,8 %, щелочерастворимых гемицеллюлоз – 14,8 %. Пентозаны (ксиланы и арабинаны) относятся к гемицеллюлозам, их массовая доля в КШ составляет 10 %. Вторым основным компонентом КШ является полимер ароматической природы – лигнин с массовой долей 22,6 %. Кофейная шелуха содержит значительное количество (15,1 мас. %) белков. Количество низкомолекулярных веществ, экстрагируемых органическими растворителями, в частности этилацетатом, составляет 7,7 мас. %, а минеральных веществ – 6,9 %.

Кофейная шелуха имеет высокое содержание углерода (38,1 %), кислорода (45,4), водорода (6,1) и относительно низкое содержание азота (2,06), серы (0,24) и хлора (0,042 %), что является типичной характеристикой биомассы [14]. Такой состав объясняется преобладающим содержанием лигноуглеводного комплекса и белков в КШ.

Установлено, что в КШ содержится большое количество макроэлементов (%), из них преобладают Ca (49), K (28), Mg (10), S (~5), Na (4), P (менее 1). В составе микроэлементов (мг/кг) КШ обнаружены: Fe (150), Al (69), Mn (57), Ba (51), Sr (48), Cu (38), Zn (9). Остальные микроэлементы присутствовали в следовых количествах.

Таким образом, состав КШ, представленный полимерной (целлюлоза, гемицеллюлоза, лигнин), низкомолекулярной (экстрактивные вещества) и минеральной частями, делает ее наиболее выгодной для использования в качестве субстрата, входящего в питательную среду при культивировании базидиомицетов.

Исследование ферментативной активности базидиомицетов при твердофазном культивировании не целесообразно, поскольку отмечали низкую радиальную скорость роста. Штамм *F. pinicola* формировал очень плотный воздушный мицелий, но медленно колонизировал субстрат (рис. 1 А). Штамм *R. roseus* более активно колонизировал субстрат, но не создавал воздушного мицелия (рис. 1 Б; табл. 1).

При глубинном культивировании отмечали активное разрушение субстрата грибами. Крупные в начале культивирования частицы КШ уже к шестым (*R. roseus*) и восьмым (*F. pinicola*) суткам почти полностью разрушались (рис. 2).

В ходе определения ферментативной активности при культивировании на КШ у *F. pinicola* отмечали высокую целлобиазную активность (1800 ед/г) на восьмые сутки культивирования, а также постепенно возрастающую β -глюканазную активность к 16 сут (1170 ед/г), что согласуется с данными [15]. При этом эндо- и экзоглюканазная активности находились на низком уровне, достигая максимума примерно к восьмым суткам (табл. 2).

При культивировании на КШ *R. roseus* отмечали высокие целлобиазная и β -глюканазная (1660 и 1430 ед/г) и низкие эндо- и экзоглюканазные активности. При этом у *R. roseus* наблюдали очень высокую ксиланазную активность (более 5000 ед/г) на шестые сутки культивирования (табл. 3). Ксиланазы находят свое применение в различных отраслях промышленности. К ним относятся текстильная и бумажная промышленность, производство напитков,

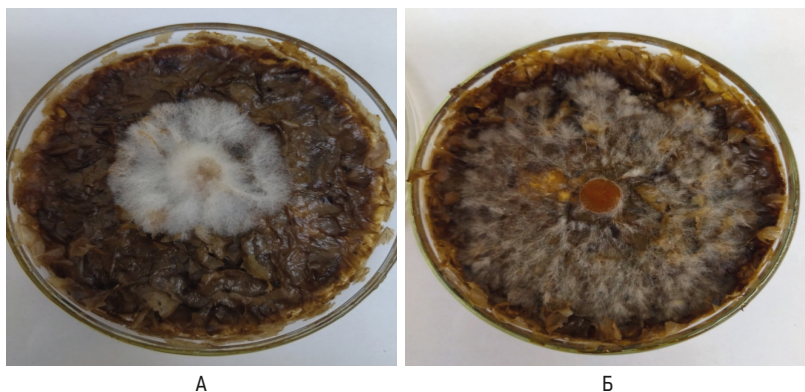


Рисунок 1. Твердофазная ферментация *F. pinicola* (А) и *R. roseus* (Б) на 10-е сутки.
Figure 1. Solid-phase fermentation of *F. pinicola* (A) and *R. roseus* (Б) on cultivation day 10.

Выводы

Выявлено, что активное потребление штаммами *F. pinicola* и *R. roseus* субстрата – кофейной шелухи приводит к накоплению ферментов: штаммом *Fomitopsis pinicola* – целлюlobиазной и β -глюканазной активностей, штаммом *R. roseus* – ксиланазной активности. Таким образом, кофейная шелуха рекомендуется в качестве перспективного субстрата для культивирования ксилотрофных базидиомицетов с целью получения ферментных препаратов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Ростовые характеристики штаммов, культивированных на кофейной шелухе

Таблица 1

Table 1

Growth characteristics of strains cultivated on coffee silverskin

Штаммы /Strains	Радиальная скорость роста, мм/сут	Ростовой коэффициент	Время роста, сут
<i>Fomitopsis pinicola</i>	2,7 $\pm$ 0,41	6,6	12
<i>Rhodofomes roseus</i>	4,4 $\pm$ 0,3	8,5	12

хлебопекарная промышленность, фармацевтическая промышленность, производство биотоплива [16].

Анализируя полученные данные, можно отметить, что при культивировании на КШ оба штамма активно проявляли целлюlobиазную, ксиланазную и β -глюканазную активности. Активность эндо- и экзоглюканазы может быть низкой из-за легкодоступности целлюлозы и гемицеллюлозы, входящих в состав КШ для этих ферментов. Активность данных ферментов направлена на деполимеризацию целлюлозы и увеличение ее доступности для целлюlobиазы, однако возможно, что в ходе обжарки зерен происходит повреждение длинных цепей целлюлозы. Проводимые ранее эксперименты по культивированию данных штаммов грибов на трудноразлагаемом субстрате (кородревесных отходах) выявили более высокую эндоглюканазную активность – 1800 ед/г на восьмые сутки. Однако, при использовании КШ в качестве субстрата общая ферментативная активность культивируемых грибов была выше за меньший период времени.

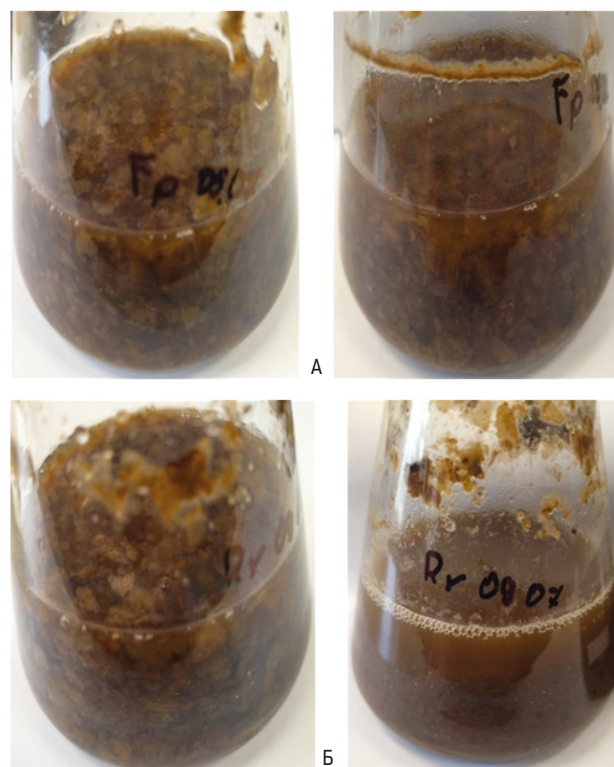


Рисунок 2. Глубинная ферментация *F. pinicola* (А) и *R. roseus* (Б) на вторые и восьмые сутки культивирования.

Figure 2. Submerged fermentation of *F. pinicola* (A) and *R. roseus* (Б) on cultivation days 2 and 8.

Ферментативная активность штамма *F. pinicola*, культивированного на кофейной шелухе

Таблица 2

Enzymatic activity of the *F. pinicola* strain cultivated on coffee silverskin

Table 2

Ферментативная активность, ед/г	Время культивирования, сут					
	2	4	6	8	12	16
Эндоглюканазная	218 $\pm$ 4,8 ^a	346 $\pm$ 6,4 ^b	425 $\pm$ 7,3 ^c	570 $\pm$ 8,9 ^d	210 $\pm$ 1,4 ^a	208 $\pm$ 2,2 ^a
Экзоглюканазная	180 $\pm$ 2,5 ^a	203 $\pm$ 1,6 ^b	120 $\pm$ 1,6 ^c	186 $\pm$ 2,7 ^a	139 $\pm$ 2,4 ^d	131 $\pm$ 3,2 ^e
Целлюlobиазная	821 $\pm$ 33 ^a	1124 $\pm$ 17 ^b	1235 $\pm$ 24 ^c	1841 $\pm$ 38 ^d	1443 $\pm$ 14 ^e	1109 $\pm$ 43 ^b
Ксиланазная	177 $\pm$ 7,2 ^a	191 $\pm$ 3,7 ^b	227 $\pm$ 6,3 ^c	304 $\pm$ 22,7 ^d	578 $\pm$ 6,3 ^e	665 $\pm$ 22 ^f
β -глюканазная	225 $\pm$ 25 ^a	355 $\pm$ 8 ^b	650 $\pm$ 29 ^c	952 $\pm$ 41 ^d	1029 $\pm$ 34 ^d	1176 $\pm$ 39 ^e

Примечание. Здесь и в табл. 3 буквы указывают на значимые различия ферментативной активности на основе теста Манна-Уитни при $p < 0.05$.
Note. Here and in Table 3 different letters indicate significant differences in the enzymatic activity based on the Mann-Whitney test at $p < 0.05$.

Enzymatic activity of the *R. roseus* strain cultivated on coffee silverskin

Ферментативная активность, ед/г	Время культивирования, сутки					
	2	4	6	8	12	16
Эндоглюканазная	294±5 ^a	483±4 ^b	277±3 ^c	276±4 ^c	226±4 ^d	255±6 ^e
Экзоглюканазная	138±4 ^a	224±1,6 ^b	267±2 ^c	284±4 ^d	208±1,2 ^e	213±4 ^e
Целлобиазная	670±29 ^a	754±13 ^b	787±46 ^b	882±31 ^b	980±10 ^c	1666±58 ^d
Ксиланазная	257±10 ^a	607±8 ^b	5070±124 ^c	4049±72 ^d	736±4 ^e	169±10 ^f
β - глюконазная	174±23 ^a	872±8 ^b	1430±44 ^c	971±50 ^b	697±6 ^d	483±9 ^e

Источники и литература/References

- Garcia, C. V. Spent coffee grounds and coffee silverskin as potential materials for packaging: a review / C. V. Garcia, Y. T. Kim // Journal of Polymers and the Environment. – 2021. – P. 2372–2384. – URL: <https://doi.org/10.1007/s10924-021-02067-9>.
- Barbero-López, A. Revalorization of coffee silverskin as a potential feedstock for antifungal chemicals in wood preservation / A. Barbero-López, J. Monzó-Beltrán, V. Virjamo [et al.] // International Biodeterioration & Biodegradation. – 2020. – Vol. 152. – P. 105011. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2020.105011>.
- Gemechu, F. G. Embracing nutritional qualities, biological activities and technological properties of coffee by-products in functional food formulation / F. G. Gemechu // Trends in Food Science & Technology. – 2020. – Vol. 104. – P. 235–261. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.08.005>.
- de Mello, V. Recent patent applications for coffee and coffee by-products as active ingredients in cosmetics / V. de Mello, G. A. de Mesquita Júnior, J. G. E. Alvim [et al.] // International Journal of Cosmetic Science. – 2023. – Vol. 45 (3). – P. 267–287. – URL: <https://doi.org/10.1111/ics.12843>.
- Hijosa-Valsero, M. Biobutanol production from coffee silverskin / M. Hijosa-Valsero, J. Garita-Cambronero, A. I. Paniagua-García, R. Díez-Antolínez // Microbial Cell Factories. – 2018. – Vol. 17. – P. 1–9. – URL: <https://doi.org/10.1186/s12934-018-1002-z>.
- Picca, G. Compositing of coffee silverskin with carbon rich materials leads to high quality soil amendments / G. Picca, C. Plaza, E. Madejón, M. Panettieri // Waste and Biomass Valorization. – 2023. – Vol. 14. – P. 297–307. – URL: <https://doi.org/10.1007/s12649-022-01879-7>.
- Prakash, P. Effect of coffee silverskin enriched diet to enhance the immunological and growth parameters of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) / P. Prakash, H. V. Doan // Archives of Razi Institute. – 2022. – Vol. 77 (3). – P. 1281–1289. – URL: <https://doi.org/10.22092/ARI.2021.356820.1920>.
- Anchugova, A. Biorefinery potential of coffee silverskin: composition and applications / E. Anchugova, E. Udoratina, E. Kazakova [et al.] // International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture. – 2024. – URL: <https://doi.org/10.57647/ijrowa-b5y0-qf23>.
- Saubenova, M. The input of microorganisms to the cultivation of mushrooms on lignocellulosic waste / M. Saubenova, Y. Oleinikova, A. Sadanov [et al.] // AIMS Agriculture and Food. – 2023. – Vol. 8 (1). – P. 239–277. – URL: <https://doi.org/10.3934/agrfood.2023014>.
- Nzekoue, F. K. Coffee silverskin: Characterization of B-vitamins, macronutrients, minerals and phytosterols / F. K. Nzekoue, G. Borsetta, L. Navarini [et al.] // Food Chemistry. – 2022. – Vol. 372. – P. 131188. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131188>.
- Rodrigues, É. F. Production and purification of amylolytic enzymes for saccharification of microalgal biomass / É. F. Rodrigues, A. M. M. Ficanha, R. M. Dallago [et al.] // Biore-source Technology. – 2017. – Vol. 225. – P. 134–141. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.11.047>.
- Bonanomi, G. Water extracts of charred litter cause opposite effects on growth of plants and fungi. / G. Bonanomi, F. Ippolito, M. Senatore [et al.] // Soil Biology and Biochemistry. – 2016. – Vol. 92. – P. 133–141. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.10.003>.
- Полыгалина, Г. В. Определение активности ферментов : Справочник / Г. В. Полыгалина, В. С. Чередниченко, Л. В. Римарева. – Москва : ДеЛи принт, 2003. – 375 с. / Polygalina, G. V. Opredelenie aktivnosti fermentov : Spravochnik [Determination of enzyme activity : Reference book] / G. V. Polygalina, V. S. Cherednichenko, L. V. Rimareva. – Moscow : DeLi print, 2003. – 375 p. [In Russian]
- Mhilu, C. F. Analysis of energy characteristics of rice and coffee husks blends / C. F. Mhilu // International Scholarly Research Notices. – 2014. – Vol. 2014, № 1. – P. 196103. – URL: <https://doi.org/10.1155/2014/196103>.
- Paramjeet, S. Biofuels: Production of fungal-mediated ligninolytic enzymes and the modes of bioprocesses utilizing agro-based residues / S. Paramjeet, P. Manasa, N. Korrapati // Biocatalysis and Agricultural Biotechnology. – 2018. – Vol. 14. – P. 57–71. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2018.02.007>.
- Shahi, N. Xylanase: a promising enzyme / N. Shahi, A. Hasan, S. Akhtar [et al.] // Journal of Chemical and Pharmaceutical Research. – 2016. – Vol. 8. – P. 334–339.

Благодарность (госзадание):

Работа выполнена при финансировании государственного задания № 1021051101411-4-1.6.23 «Научно обоснованные биотехнологии для улучшения экологической обстановки и здоровья человека на Севере».

Авторы выражают благодарность сотрудникам экоаналитической лаборатории Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, ООО «Кофе Плюс».

Acknowledgements (state task):

The authors are grateful to the staff of the Ecoanalytical Laboratory at the Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, ООО "Coffee Plus".

The work was performed within the frames of the state task № 1021051101411-4-1.6.23 "Science-based biotechnologies to improve the environmental situation and human health in the North".

Информация об авторах:

Мартынов Владислав Владимирович – аспирант, инженер лаборатории биохимии и биотехнологии Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; Scopus Author ID – 57218542348, <https://orcid.org/0000-0003-0806-9320> (167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28. e-mail: martynov.v.v@ib.komisc.ru).

Щемелинина Татьяна Николаевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биохимии и биотехнологии Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; Scopus Author ID – 56711948200, <https://orcid.org/0000-0002-4052-6424> (167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28; e-mail: tatyanakomi@mail.ru).

Анчугова Елена Михайловна – младший научный сотрудник лаборатории биохимии и биотехнологии Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; Scopus Author ID – 56711975900, <https://orcid.org/0000-0002-7912-3518> (167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28; e-mail: anchugova@ib.komisc.ru).

About the authors:

Vladislav V. Martynov – Postgraduate Student, Engineer at the Laboratory of Biochemistry and Biotechnology; Scopus Author ID 57218542348, <https://orcid.org/0000-0003-0806-9320> (Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 28 Kommunisticheskaya st., 167982 Syktyvkar, Komi Republic, Russia; e-mail: martynov.v.v@ib.komisc.ru).

Tatiana N. Shchemelinina – Candidate of Sciences (Biology), Senior Researcher at the Laboratory of Biochemistry and Biotechnology; Scopus Author ID 56711948200, <https://orcid.org/0000-0002-4052-6424> (Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 28 Kommunisticheskaya st., 167982 Syktyvkar, Komi Republic, Russia; e-mail: tatyanakomi@mail.ru).

Elena M. Anchugova – Junior Researcher at the Laboratory of Biochemistry and Biotechnology; Scopus Author ID 56711975900, <https://orcid.org/0000-0002-7912-3518> (Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 28 Kommunisticheskaya st., 167982 Syktyvkar, Komi Republic, Russia; e-mail: anchugova@ib.komisc.ru).

Для цитирования:

Мартынов, В. В. Валоризация лигноцеллюлозного отхода – кофейной шелухи / В. В. Мартынов, Т. Н. Щемелинина, Е. М. Анчугова // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Экспериментальная биология и экология». – 2024. – № 9 (75). – С. 75–79.

For citation:

Martynov, V. V. Valorizaciya lignocellyuloznogo othoda – kofejnoj sheluhi [Valorization of coffee silverskin lignocellulosic waste] / V. V. Martynov, T. N. Shchemelinina, E. M. Anchugova // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series "Experimental Biology and Ecology". – 2024. – № 9 (75). – P. 75–79.

Дата поступления статьи: 10.09.2024

Прошла рецензирование: 13.09.2024

Принято решение о публикации: 19.09.2024

Received: 10.09.2024

Reviewed: 13.09.2024

Accepted: 19.09.2024

Биоконверсия целлюлозосодержащих фракций упаковочных материалов в простые сахара

Д. В. Тарабукин

Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
г. Сыктывкар
dim1822@yandex.ru

Аннотация

Проведена оценка эффективности переработки бумажного слоя упаковочных материалов с помощью гидролаз для получения восстанавливающих сахаров. Максимальный выход сахаров достигал 30 % от изначальной массы, в зависимости от типа упаковки и режима переработки. Алюминий и полиэтилен снижали эффективность ферментативного гидролиза. Предложены варианты дальнейшей переработки компонентов упаковок в продукты с высокой добавленной стоимостью.

Ключевые слова:

целлюлозосодержащие отходы, методы утилизации, ферментативный гидролиз, моносахара

Введение

Поиск дешевого сырья для ферментативного получения простых сахаров является одной из основных проблем при планировании крупнотоннажного производства. Некоторые целлюлозосодержащие бытовые отходы, переработка которых затруднена, могут быть использованы в качестве сырья. Источником целлюлозы могут стать упаковочные материалы из серии EloPak, TetraPak, PurePak. Для их производства используется бумажная масса, прошедшая достаточно глубокую химическую переработку, следовательно, лигнин как один из основных факторов снижения производительности ферментативного получения сахаров в значительной степени удален. Однако композитная структура упаковок создает дополнительные трудности биоконверсии целлюлозосодержащих фракций [1].

Для выделения целлюлозы из упаковок, включающих алюминий и полиэтилен, наиболее часто применяют механический размол [2, 3]. Выделенные таким образом целлюлозные волокна могут быть применены в качестве различных композитов, однако требуют дополнительной переработки. В работе [4] для наилучшего разделения компонентов упаковок применяется алкилбензолы или ионные жидкости. При этом требовалась регенерация растворителей. Интенсивное гидропульпирование в соче-

Bioconversion of cellulose-containing fractions of packaging materials into simple sugars

D. V. Tarabukin

Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the
Russian Academy of Sciences,
Syktyvkar
dim1822@yandex.ru

Abstract

The efficiency of processing the paper layer of packaging materials using hydrolases to obtain reducing sugars was assessed. The maximum yield of sugars reached 30 % of the initial weight, depending on the packaging type and processing mode. Aluminum and polyethylene reduced the efficiency of enzymatic hydrolysis. The author proposed the possibilities for the further processing of packaging components into products with a high added value.

Keywords:

cellulose-containing waste, disposal methods, enzymatic hydrolysis, monosaccharides

тении с селективным растворением также эффективно, но может быть энергозатратным и также требует регенерации растворителей [5]. Таким образом, в зависимости от дальнейшего использования, требуется экономически обоснованный подбор технологии переработки упаковок.

Цель работы – оценка возможности переработки целлюлозной фракции из упаковок EloPak и TetraPak с помощью ферментативного гидролиза до простых сахаров.

Материалы и методы

В качестве целлюлозосодержащих материалов были использованы упаковки EloPak и TetraPak. Первые состоят из слоя белой или небеленой целлюлозы, покрытого с обеих сторон полиэтиленом. Упаковка TetraPak, помимо слоев полиэтилена, содержит слой алюминия, поэтому требует более сложного подхода к выделению целлюлозосодержащих слоев. Далее были отработаны несколько вариантов предобработки целлюлозосодержащих субстратов с последующим ферментативным гидролизом для получения восстанавливающих сахаров (далее – ВС) (табл. 1).

Механическая обработка упаковок включала размол на ножевой мельнице или перфорацию. Обработку 1, 10, 20%-ным раствором NaOH при 10 °C осуществляли в тече-

Различные режимы предобработки целлюлозосодержащих упаковок

Таблица 1

Table 1

Various pretreatment modes of cellulose-containing packages

Вид субстрата	Особенности предварительной обработки целлюлозосодержащего субстрата перед ферментативным гидролизом	Условное обозначение
EloPak небеленая	Размол упаковки без отделения полиэтилена	Р
EloPak небеленая	Перфорация упаковки с отделением полиэтилена	П
EloPak небеленая	Размол упаковки без отделения полиэтилена, 10 % NaOH	РЩ10
EloPak небеленая	Размол упаковки без отделения полиэтилена, 10 % NaOH, отделение продуктов гидролиза после 6 ч процесса	РЩ010
EloPak небеленая	Перфорация упаковки с отделением полиэтилена, 20 % NaOH, отделение продуктов гидролиза после 6 ч процесса	ПЩ020
EloPak беленая	Размол упаковки без отделения полиэтилена, замачивание в 1 % NaOH, отделение продуктов гидролиза после 6 ч процесса	РЩ01
EloPak беленая	Размол упаковки без отделения полиэтилена, замачивание в 20 % NaOH, отделение продуктов гидролиза после 6 ч процесса	РЩ020
EloPak беленая	Перфорация упаковки с отделением полиэтилена, 20 % NaOH, отделение продуктов гидролиза после 6 часов процесса	ПЩ020
EloPak (смесь 50/50) беленая и небеленая	Размол упаковки без отделения полиэтилена, 20 % NaOH, отделение продуктов гидролиза после 6 ч процесса	РЩ020
TetraPak небеленая	Размол упаковки без отделения полиэтилена и алюминия, 20% NaOH, отделение продуктов гидролиза после 6 ч процесса	РЩ020
TetraPak небеленая	Перфорация упаковки с отделением полиэтилена и алюминия, 20% NaOH отделение продуктов гидролиза после 6 часов процесса	ПЩ020
Непрогидролизован-ные остатки EloPak	20 % NaOH, отделение продуктов гидролиза после 6 ч процесса	Щ020

ние 12 ч. Далее щелочной раствор удаляли и промывали целлюлозосодержащую суспензию до нейтральной реакции. Ферментативный гидролиз 5%-ной целлюлозосодержащей суспензии осуществляли в термостатируемых сосудах объемом 150 см³ при 55 °С и постоянном перемешивании. В качестве источника целлюлолитических ферментов был использован импортный ферментный препарат на основе селекционного штамма *Thrichoderma reesei* (SanSon, Китай). Общая целлюлазная активность по фильтровальной бумаге (FPA активность) – 1500 ед/г. Единица активности соответствовала 1 микромолю ВС (в пересчете на глюкозу), образующихся за 1 мин реакции.

Ферментативный гидролиз целлюлозосодержащей суспензии, приготовленной из 5 г упаковки, осуществляли в термостатируемых сосудах объемом 150 см³ при 55 °С и постоянном перемешивании. Среда для ферментативного гидролиза – 100 см³ 0,1 М ацетатного буфера (рН 4,7) с добавлением неионогенного поверхностно-активного вещества лаурилглюкозида. Дозировка ферментативного препарата целлюлаз составляла 5 ед на 1 г абсолютно сухой массы субстрата. Дополнительно вносили 10 мг ферментного препарата амилаз Глюколюкс-Ф (Россия) на 1 г субстрата для гидролиза остаточного катионного крахмала. В некоторых вариантах после 6 ч от начала процесса целлюлозосодержащий остаток промывали ацетатным буфером от ВС, готовили новую суспензию из непрогидролизованного остатка и продолжали процесс биоконверсии за счет иммобилизованных на субстрате ферментов. Реакционную способность целлюлозосодержащих образцов оценивали по степени гидролиза за 24 ч, степень конверсии – весовым методом по массе сухого остатка. Концен-

трацию ВС определяли методом Шо-моди-Нельсона [6].

Результаты и их обсуждение

В ходе серии экспериментов выявлено, что важным этапом предобработки сырья является отделение слоя полиэтилена от целлюлозосодержащего слоя, приводящее к большему выходу сахаров (табл. 2). Простой размол приводил к тому, что в целлюлозной суспензии оставалось много балластных компонентов, вызывающих сложности для последующего ферментативного гидролиза и дальнейшей переработки непрогидролизованного остатка. Существенный вклад в общий выход сахаров достигался за счет предварительной обработки сырья раствором щелочи. Вероятно, за счет этого из бумажной массы удаляли наполнители, которые ингибировали гидролазы, а также снижали степень кристалличности самой целлюлозы. Максимальные выходы достигались за счет обработки

20%-ным раствором NaOH. Отделение продуктов ферментативного гидролиза от непрогидролизованного остатка обеспечивало дополнительный выход сахаров. Следует отметить, что беленая целлюлоза из упаковок способствовала большему выходу сахаров, который достигал 25–30 % от массы субстрата за первые сутки. На вторые сутки процесс накопления сахаров был незначителен, поэтому продолжать ферментативный гидролиз после 24 ч было нецелесообразно. Приготовление субстрата из непрогидролизованных остатков давало значительно меньший выход сахаров по сравнению с первичной целлюлозой из упаковок. Следовательно, требовалась более глубокая предобработка либо ориентация на другой продукт. К примеру, одним из вариантов дальнейшей переработки трудногидролизуемого остатка может быть процесс получения нанокристаллов целлюлозы с надмолекулярной структурой I и II кислотным гидролизом [7]. Оставшиеся полиэтилен, алюминий, а также бумажный остаток за счет термических воздействий могут быть преобразованы в биотопливо, нанокompозиты, содержащие оксид алюминия [8]. С другой стороны, высокотемпературная переработка остатков способствует получению высокоэффективных сорбентов, например, мышьяка [9]. Таким образом, сочетание методов механической, химической и биохимической переработки упаковочных материалов позволяет конвертировать значительную часть целлюлозосодержащей фракции в простые сахара. В дальнейшем полученные продукты, не требуя специальной очистки, могут быть применены в составе питательных сред для выращивания целевых микроорганизмов [10].

Таблица 2
Результаты выхода восстанавливающих сахаров
в ходе переработки упаковочных материалов

Table 2

Yield of reducing sugars during processing of packaging materials

Вид упаковки, 5 г	Условное обозначение	Выход ВС через 24 ч гидролиза, г	Масса в.с. остатка после гидролиза, г
EloPak небеленая	Р	0,24	4,6
EloPak небеленая	П	0,41	4,4
EloPak небеленая	РЩ10	0,68	3,6
EloPak небеленая	РЩ010	1,09	3,4
EloPak небеленая	РЩ020	1,15	3,1
EloPak небеленая	ПЩ020	1,27	2,9
EloPak беленая	РЩ01	1,16	3,6
EloPak беленая	РЩ020	1,48	2,8
EloPak беленая	ПЩ020	1,53	2,6
EloPak (смесь 50/50) беленая и небеленая	РЩ020	1,35	3,2
TetraPak небеленая	РЩ020	0,91	-
TetraPak небеленая	ПЩ020	1,15	-
Непрогидролизированные остатки EloPak	Щ020	0,82	2,8

Заключение

Бумажный слой из композитных упаковочных материалов является перспективным сырьем для получения сахаров. Для каждого типа упаковок требуется подбор наиболее оптимальных методов выделения целлюлозосодержащей массы. Предпочтительней делать перфорацию упаковки, так как при дальнейшей переработке в сырье практически нет балластного полиэтилена и алюминия, однако для этого требуется более сложное оборудование. В процессе ферментативной конверсии целлюлозосодержащих слоев основные трудности связаны с наполнителями, ингибированием продуктами гидролиза, а также необходимостью снижения индекса кристалличности целлюлозы.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Литература

1. Davis, G. Biodegradable packaging based on raw materials from crops and their impact on waste management / G. Davis, J. H. Song // *Industrial Crops and Products*. – 2006. – N 23. – P. 147–161.
2. Solvent-targeted recovery of all major materials in beverage carton packaging waste / P. K. Wong, Y. W. Lui, Q. Tao, M. Y. Lui // *Resources, Conservation & Recycling*. – 2024. – N 202 (107367).
3. Recycling of post-consumer multilayer Tetra Pak® packaging with the Selective Dissolution-Precipitation process / I. Georgiopolou, G. D. Pappa, S. N. Vouyiouka, K. Magoulas // *Resources, Conservation & Recycling*. – 2021. – № 16 (105268).
4. Польшалина, Г. В. Определение активностей ферментов: справочник / Г. В. Польшалина, В. С. Череди́нченко, Л. В. Римарева. – Москва : ДеЛи принт, 2003. – 375 с.

5. Dave, A. Solvothermal liquefaction of Tetra Pak waste into biofuels and Al₂O₃-carbon nanocomposite // A. Dave, S. N. Reddy // *Waste Management*. – 2023. – Vol. 171. – P. 642–652.
6. High adsorption performance for As(III) and As(V) onto novel aluminum-enriched biochar derived from abandoned Tetra Paks / Z. Ding, X. Xu, T. Phan, X. Hu, G. Nie // *Chemosphere*. – 2018. – N 208. – P. 800–807.
7. Cellulose I and II nanocrystals produced by sulfuric acid hydrolysis of Tetra pak cellulose I / L. Xing, J. Gu, W. Zhang, D. Tu, C. Hu // *Carbohydrate Polymers*. – 2018. – Vol. 192. – P. 184–192.
8. Sustainable tetra pak recycled cellulose / Poly(Butylene succinate) based woody-like composites for a circular economy / O. Platnieks, A. Barkane, N. Ijudina, G. Gaidukova, V. K. Thakur, S. Gaidukovs // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – N 270 (122321).
9. Recycled cellulose from Tetra Pak packaging as reinforcement of polyester based composites / G. Martínez-Barrera, M. Martínez-López, N. González-Rivas, J. J. del Coz-Díaz, L. Ávila-Córdoba, J. M. Laredo dos Reis, O. Gencel // *Construction and Building Materials*. – 2017. – N 157. – P. 1018–1023.
10. Тарабукин, Д. В. Перспективы глубокой переработки бумажного шлама с применением ферментов, микроводорослей и дрожжей / Д. В. Тарабукин, Е. Н. Патова, И. В. Новаковская // *Известия вузов. Лесной журнал*. – 2024. – № 2. – С. 166–177.

References

1. Davis, G. Biodegradable packaging based on raw materials from crops and their impact on waste management / G. Davis, J. H. Song // *Industrial Crops and Products*. – 2006. – № 23. – P. 147–161.
2. Wong, P. K. Solvent-targeted recovery of all major materials in beverage carton packaging waste / P. K. Wong, Y. W. Lui, Q. Tao, M. Y. Lui // *Resources, Conservation & Recycling*. – 2024. – № 202 (107367).
3. Georgiopolou, I. Recycling of post-consumer multilayer Tetra Pak® packaging with the Selective Dissolution-Precipitation process / I. Georgiopolou, G. D. Pappa, S. N. Vouyiouka, K. Magoulas // *Resources, Conservation & Recycling*. – 2021. – № 6 (105268).
4. Polygalina, G. V. *Opredelenie aktivnostey fermentov. Spravochnik [Determination of enzyme activities. Guide]* / G. V. Polygalina, V. S. Cherednichenko, L. V. Rimareva. – Moscow : DeLi print, 2003. – 375 p.
5. Dave, A. Solvothermal liquefaction of Tetra Pak waste into biofuels and Al₂O₃-carbon nanocomposite // A. Dave, S. N. Reddy // *Waste Management*. – 2023. – Vol. 171. – P. 642–652.
6. Ding, Z. High adsorption performance for As(III) and As(V) onto novel aluminum-enriched biochar derived from abandoned Tetra Paks / Z. Ding, X. Xu, T. Phan, X. Hu, G. Nie // *Chemosphere*. – 2018. – № 208. – P. 800–807.
7. Xing, L. Cellulose I and II nanocrystals produced by sulfu-

- ric acid hydrolysis of Tetra pak cellulose I / L. Xing, J. Gu, W. Zhang, D. Tu, C. Hu // *Carbohydrate Polymers*. – 2018. – Vol. 192. – P. 184–192.
8. Platnieks, O. Sustainable tetra pak recycled cellulose / Poly(Butylene succinate) based woody-like composites for a circular economy / O. Platnieks, A. Barkane, N. Ijudina, G. Gaidukova, V. K. Thakur, S. Gaidukovs // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – № 270 (122321).
 9. Martínez-Barrera, G. Recycled cellulose from Tetra Pak packaging as reinforcement of polyester based composites / G. Martínez-Barrera, M. Martínez-López, N. González-Rivas, J. J. del Coz-Díaz, L. Ávila-Córdoba, J. M. Laredo dos Reis, O. Gencel / *Construction and Building Materials*. – 2017. – № 157. – P. 1018–1023.
 10. Tarabukin, D. V. Perspektivy glubokoy pererabotki bumazhnogo shlama s primeneniem fermentov, mikrovdorosley i drozhzhey [Prospects for deep processing of paper sludge using enzymes, microalgae and yeast] / D. V. Tarabukin. E. N. Patova. I. V. Novakovskaya // *Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal* [News of Universities. Forest Journal]. – 2024. – № 2. – P. 166–177.

Благодарность (госзадание):

Работа выполнена при финансировании государственного задания: 122040600019-1.

Acknowledgements (state task):

The work was carried out in the frames of the state task assignment (№ 122040600019-1).

Информация об авторе:

Тарабукин Дмитрий Валерьянович – кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории биохимии и биотехнологии Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; Scopus AuthorID: 57195565098, ORCID: 0000-0001-8572-4902 (167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28; e-mail: dim1822@yandex.ru).

About the author:

Dmitriy V. Tarabukin – Candidate of Sciences (Biology), Researcher at the Laboratory of Biochemistry and Biotechnology at the Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Scopus AuthorID: 57195565098, ORCID: 0000-0001-8572-4902 (28 Kommunisticheskaya st., 167982 Syktyvkar, Komi Republic, Russian Federation; e-mail: dim1822@yandex.ru).

Для цитирования:

Тарабукин, Д. В. Биоконверсия целлюлозосодержащих фракций упаковочных материалов в простые сахара / Д. В. Тарабукин // *Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Экспериментальная биология и экология»*. – 2024. – № 9 (75). – С. 80–83.

For citation:

Tarabukin, D. V. Biokonversiya cellyulozosoderzhashchih frakcij upakovochnyh materialov v prostye sahara [Bioconversion of cellulose-containing fractions of packaging materials into simple sugars] / D. V. Tarabukin // *Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series "Experimental Biology and Ecology"*. – 2024. – № 9 (75). – P. 80–83.

Дата поступления статьи: 10.06.2024

Прошла рецензирование: 17.06.2024

Принято решение о публикации: 30.07.2024

Received: 10.06.2024

Reviewed: 17.06.2024

Accepted: 30.07.2024

Экстракт плодов черноплодной рябины (**Sorbaronia mitschurinii*) влияет на выживаемость *Drosophila melanogaster* с моделью бокового амиотрофического склероза в зависимости от концентрации

Н. В. Земская*, Е. Ю. Платонова*, Н. Р. Пакшина*,
М. В. Шапошников*, А. А. Москалёв*,**

* Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
г. Сыктывкар

** Институт молекулярной биологии им. В. А. Энгельгардта РАН,
г. Москва
zemskeya@ib.komisc.ru

Аннотация

Боковой амиотрофический склероз – нейродегенеративное заболевание, проявляющееся во взрослом возрасте, характеризуется потерей двигательной активности, дегенерацией двигательных нейронов в головном, спинном мозге и, в конечном счете, остановкой дыхания. В настоящее время заболевание является неизлечимым, и механизмы его воздействия мало изучены, но активно ведутся исследования терапевтических препаратов для дальнейшего снижения осложнений и отсрочивания негативных последствий болезни. Ранее нами был показан геропротекторный потенциал экстракта плодов черноплодной рябины (**Sorbaronia mitschurinii*) на *D. melanogaster* при кратковременном применении, а также наблюдали увеличение медианной продолжительности жизни особей линии *elav[c155]-Gal4>UAS-Aβ42* (модель болезни Альцгеймера у дрозофилы). Нами выдвинута гипотеза о возможном положительном эффекте экстракта черноплодной рябины в концентрациях 0,1, 1, 5 и 10 мг/мл на выживаемость линии *Drosophila* с моделью бокового амиотрофического склероза (с мутацией в гене *Sod1^{ml}*). Установили, что этанольный экстракт ягод в концентрации 0,1 мг/мл увеличивал медианную продолжительность жизни самцов на 22 %. При добавлении экстракта в концентрациях 1 и 5 мг/мл наблюдали снижение медианной и максимальной продолжительности жизни самцов на 14 % и 33 % соответственно. При этом экстракт черноплодной рябины не оказывал статистически значимого воздействия на продолжительность жизни самок. Данные результаты свидетельствуют о потенциальном нейропротекторном эффекте экстракта плодов черноплодной рябины.

Ключевые слова:

боковой амиотрофический склероз, черноплодная рябина, продолжительность жизни, экстракт, *Drosophila melanogaster*

Black chokeberry (**Sorbaronia mitschurinii*) fruit extract affects the survival of *Drosophila melanogaster* with the model of amyotrophic lateral sclerosis depending on the concentration

N. V. Zemskaya*, E. Yu. Platonova*, N. R. Pakshina*,
M. V. Shaposhnikov*, A. A. Moskaliev*,**

* Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Syktyvkar

** V. A. Engelhardt Institute of Molecular Biology of the Russian Academy of Sciences,
Moscow

zemskeya@ib.komisc.ru

Abstract

The modern society takes a keen interest in healthy longevity and possibilities of slowing down the age-related diseases. Amyotrophic lateral sclerosis (ALS) is a neurodegenerative disease that declares itself in adult people (at the age of about 60 years) and is characterized by loss of motor activity, degeneration of motor neurons in brain and spinal cord, and, finally, by respiratory arrest. The disease is currently incurable with its action mechanisms largely understudied but the scientists actively search for therapeutic drugs to further reduce the number of possible complications and delay the negative effects of the disease. Previously, we demonstrated the positive heroprotective potential of black chokeberry (**Sorbaronia mitschurinii*) extract on the wild-type line *Can-ton-S* on short-term application and observed the increase in the median lifespan of males and females of the *elav[c155]-Gal4>UAS-Aβ42* line, which is a model of Alzheimer's disease in *Drosophila*. In the present work, we proposed a hypothesis on a possible positive effect of black chokeberry extract at concentrations of 0.1, 1, 5 and 10 mg/mL on the survival of a *Drosophila* line with the model of amyotrophic lateral sclerosis (with mutation in the *Sod1^{ml}* gene). We found that the ethanolic extract of black chokeberry fruits at a concentration of 0.1 mg/mL increased the median lifespan of males by 22 %. When the extract was added to food at concentrations of 1 and 5 mg/mL, we observed a decrease in median and maximum lifespan of males by 14 and 33 %, respectively. However, the ethanolic extract of black chokeberry at any concentrations studied had no statistically significant effect on the survival of females. These results indicate a potential neuroprotective effect of the extract of black chokeberry fruits.

Keywords:

amyotrophic lateral sclerosis, black chokeberry, lifespan, extract, *Drosophila melanogaster*

Введение

Боковой амиотрофический склероз (далее – БАС) – нейродегенеративное заболевание центральной нервной системы, которое характеризуется прогрессирующей дегенерацией двигательных нейронов в головном и спинном мозге, мышечной слабостью, а также непосредственным старением организма (проявляется примерно в возрасте 60 лет) [1–4]. В конечном итоге прогрессирующая дегенерация приводит к дыхательной недостаточности – основной причине смерти при БАС [1, 5, 6]. Большинство случаев БАС являются спорадическими, но примерно 10 % случаев обусловлены наследственными мутациями в идентифицированных генах [7]. Мутации, вызывающие БАС, были обнаружены более чем в 40 генах, среди них наиболее частыми являются гены *SOD1*, *C9orf72*, *FUS* и TDP-43 (известный как TARBP, или ДНК-связывающий белок TAR) [7–9].

Cu-, Zn-зависимая супероксиддисмутаза 1 (*SOD1*) является первым белком, для которого обнаружена связь с БАС [10]. Функция *SOD1* заключается в катализе преобразования высокоактивного супероксидного радикала ($O_2^{\cdot-}$), вырабатываемого в процессе клеточного дыхания, в молекулярный кислород (O_2) и перекись водорода (H_2O_2) [7, 11]. Многочисленные исследования демонстрируют повышенный уровень окислительного стресса при БАС [12–14]. Установлено, что около 20 % случаев семейного БАС (что составляет 5–10 % всех случаев) вызваны мутациями в гене *SOD1* [15]. Именно поэтому окислительный стресс можно рассматривать в качестве одного из центральных механизмов в патогенезе БАС [16].

На сегодняшний день у человека описано около 200 мутаций *hSOD1*, связанных с БАС [17]. Большинство из них являются миссенс-мутациями [18]. Один из наиболее известных патологических механизмов БАС, связанного с *SOD1*, – это наличие окислительного стресса выше порогового значения, вызванного высоким уровнем недействительных свободных радикалов и образованием реактивных форм кислорода/азота [4, 16]. Таким образом, животные и клеточные культуры с мутациями в гене *SOD1* могут быть использованы в качестве моделей БАС для изучения его механизмов [16]. В настоящее время известны линии *Drosophila melanogaster* с мутациями в гене *SOD1*, включая семейную (*SOD^F*) и спорадическую (*SOD^S*) формы [5, 19]. В ряде исследований показано, что нулевые мутации гена *SOD1* у *Drosophila melanogaster*, такие как делеции или миссенс-мутации, инактивирующие ферментативную активность белка, приводили к развитию характерного фенотипа. При этом у дрозофил была резко (на 85–90 %) сокращена медианная продолжительность жизни, нарушена локомоторная активность и снижена устойчивость к условиям окислительного стресса [18–20].

Плодовая мушка *Drosophila melanogaster* является распространенным генетическим модельным объектом, для которого описаны гены, ассоциированные с болезнями на тканеспецифическом и клеточно-специфическом уровнях. Эти гены можно активировать или подавлять для

выявления патологических поведенческих реакций организма [7]. Кроме того, дрозофила простой в обращении и содержании объект экспериментальной генетики [7]. В настоящее время *Drosophila* активно используется при изучении таких нейродегенеративных заболеваний, как болезни Хантингтона [21], Паркинсона [22], Альцгеймера [23] и боковой амиотрофический склероз [5, 7, 24]. В качестве модели различных заболеваний *Drosophila* является эффективной для выявления возможных генетических механизмов и моделирования фенотипов заболеваний. Кроме того, дрозофилу используют для тестирования потенциальных терапевтических средств [25].

Модель БАС *Drosophila* с мутацией в гене *sod1* характеризуется высоким фенотипическим сходством с пациентами с БАС на разных уровнях функциональной организации, включая двигательные нарушения, дегенерацию моторных нейронов, наличие внутриклеточных включений, митохондриальных нарушений, окислительных повреждений и сниженной выживаемости (ранняя летальность) [4, 5, 26, 27]. Данные особенности позволяют использовать дрозофилу при проведении скрининга предполагаемых нейропротекторных агентов, а также для анализа генетических механизмов и фенотипических признаков БАС [4].

На сегодняшний день БАС является неизлечимым заболеванием, причины которого в большинстве случаев неизвестны, а механизмы повреждения двигательных нейронов сложны и полностью не изучены. В связи с этим ведется активный поиск терапевтических вмешательств, направленных на облегчение симптомов, предотвращения осложнений и замедления прогрессирования заболеваний [4, 8, 16]. Особый интерес представляет разработка новых препаратов на основе природных соединений с антиоксидантной активностью, которые при низком риске возникновения побочных эффектов позволят отсрочить данное заболевание и улучшить качество жизни с возрастом [28].

Черноплодная рябина богата фенольными соединениями, включая процианидины, антоцианы, фенольные кислоты и их аналоги [29–32], являющиеся природными антиоксидантами и противовоспалительными фитохимическими веществами и способны снижать уровень свободных радикалов в организме и за счет этого увеличивать выживаемость в условиях окислительного стресса [33, 34]. Ягоды близкой к черноплодной рябине аронии (*Sorbaronia mitschurini*) также оказывают положительный эффект на продолжительность жизни (далее – ПЖ) плодовых мушек, обладают антипролиферативным, антиоксидантным, противовоспалительным, антимикробным, гастропротекторным эффектом, а также улучшают когнитивное состояние модельных организмов при нейродегенеративных заболеваниях (болезни Альцгеймера и Паркинсона) [35, 36]. Комбинация фитохимических веществ, содержащихся в ягодах черноплодной рябины или аронии, может обеспечить большую пользу для здоровья, чем отдельно используемые антиоксидантные соединения, за счет аддитивного и синергического эффектов [37]. Иско-

для этого, мы предположили, что экстракт черноплодной рябины (*Sorbaronia mitschurinii*) может оказать положительный эффект на выживаемость дрозофил с моделью БАС.

Материалы и методы

Экстракция. Ягоды черноплодной рябины (*Sorbaronia mitschurinii*) были собраны в Ботаническом саду (Научная коллекция живых растений, № 507428) Института биологии Коми НЦ УрО РАН (Северо-Запад России) в осенний период (август–сентябрь). Экстракцию ягод проводили по методике, описанной ранее в работе [29]. Экспериментальные концентрации экстракта ягод черноплодной рябины были приготовлены из полученного этанольного экстракта путем разбавления 96%-ным этанолом.

Линия *Drosophila*. Для проведения экспериментов использовали линию с мутацией в гене супероксиддисмутазы 1 *Sod1^{nl}* (#24492, Bloomington Stock Center, USA), основного цитоплазматического фермента, ответственного за обезвреживание свободных радикалов. Линия *Sod1^{nl}* характеризуется средней продолжительностью жизни гомозигот – около 11 суток [20].

Анализ продолжительности жизни. Контрольные и экспериментальные особи были собраны в течение 24 ч после вылупления имаго. С использованием углекислотного наркоза (Genesee Scientific, США) мух сортировали по полу и рассаживали в пробирки по 30 особей. Самцы и самки жили отдельно. Начиная с первого дня жизни имаго ежедневно вели подсчет числа умерших особей, два раза в неделю мух переносили на свежую среду. Контрольных и опытных мух содержали при температуре +25 °C и 12-часовом режиме освещения. Для поддержания стабильных условий содержания использовали климатические камеры Binder KBF720-ICH (Binder, Германия). Состав питательной среды, на которой содержали контрольных и опытных животных при проведении всех экспериментов, был следующий: вода – 1 л, кукурузная мука – 92 г, сухие дрожжи – 32,1 г, агар-агар – 5,2 г, глюкоза – 136,9 г, раствор 10%-ного нипагина в этаноле – 10 мл, раствор 50%-ной пропионовой кислоты – 10 мл [29].

Экстракт ягод черноплодной рябины в 96%-ном этаноле (30 мкл) наносили на поверхность питательной среды. В качестве контроля использовали среду с добавлением этилового спирта в том же объеме. Изучали экстракт в концентрациях 0,1; 1; 5 и 10 мг/мл. Дрозофил кормили экстрактом на протяжении всей жизни.

Статистический анализ полученных результатов. Значимость различий между кривыми выживаемости оценивали с помощью логрангового теста [38]. Анализ статистических данных выполняли с помощью онлайн приложения для анализа выживаемости OASIS 2 [39].

Результаты и их обсуждение

Старение – неизбежный процесс, который вызывает существенные изменения в экспрессии генов в органах и тканях, включая центральную нервную систему [40–42]. Ряд характерных признаков старения, включая геномную нестабильность, эпигенетические изменения и клеточное старение, связаны с нейродегенерацией, что позволяет рассматривать старение в качестве основного фактора риска развития нейродегенеративных заболеваний, включая БАС [43]. Поскольку риск развития БАС резко возрастает с возрастом, всемирная тенденция к увеличению продолжительности жизни, вероятно, будет способствовать глобальному росту заболеваемости БАС [44].

В настоящей работе в качестве дрозофилиной модели БАС использовали линию с мутацией в гене *Sod1^{nl}*, основного цитоплазматического фермента, ответственного за обезвреживание свободных радикалов. В ходе про-

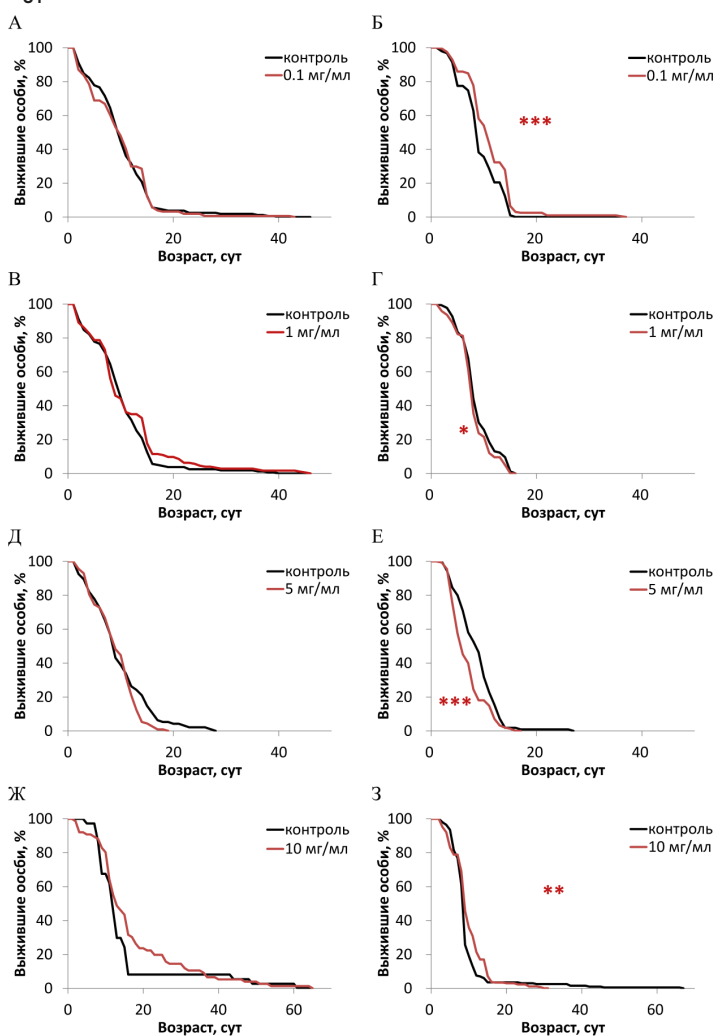


Рисунок. Влияние экстракта ягод черноплодной рябины на продолжительность жизни самцов (А, В, Д, Ж) и самок (Б, Г, Е, З) дрозофил с моделью БАС. Представлены объединенные данные трех-четырёх биологических повторностей.

Примечание. Логранговый критерий: * – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$; *** – $p < 0,001$.

Figure. The effect of black chokeberry fruit extract on the lifespan of male (A, B, D, J) and female (Б, Г, Е, З) *Drosophila* with the ALS model. Summarized data of three – four biological replicates are presented.

Note. Log-rank test: * – $p < 0.05$, ** – $p < 0.01$, *** – $p < 0.001$.

The effect of black chokeberry extract on the lifespan of *Drosophila* with the ALS model

Вариант	N	50%	d50%, %	Фишер	90%	d90%, %	Фишер	ЛР	ЛР _{БФ}
Самцы									
Контроль	186	9	n/a	n/a	15	n/a	n/a	n/a	n/a
0,1 мг/мл	198	11	22	0,0001	15	0	0,0067	0	0
контроль	260	8	n/a	n/a	14	n/a	n/a	n/a	n/a
1 мг/мл	282	8	0	0,053	12	-14	0,0452	0,025	0,025
контроль	110	9	n/a	n/a	13	n/a	n/a	n/a	n/a
5 мг/мл	155	6	-33	0,0041	12	-8	0,1556	0	0
контроль	199	9	n/a	n/a	12	n/a	n/a	n/a	n/a
10 мг/мл	265	9	0	0,000011	15	25	0,1048	0,0037	0,0037
Самки									
Контроль	158	10	n/a	n/a	16	n/a	n/a	n/a	n/a
0,1 мг/мл	154	10	0	0,6499	16	0	1	0,852	1,000
1 мг/мл	174	9	-10	0,9124	19	19	0,0793	0,170	0,341
контроль	95	9	n/a	n/a	17	n/a	n/a	n/a	n/a
5 мг/мл	114	9	0	0,4882	14	-18	0,0141	0,087	0,0871
контроль	37	12	n/a	n/a	16	n/a	n/a	n/a	n/a
10 мг/мл	76	13	8	0,069	36	125	1	0,165	0,165

Условные обозначения. N – количество особей в выборке; 50 % – медианная продолжительность жизни (сут); 90 % – максимальная продолжительность жизни (возраст смертности 90 % выборки, сут); d50 %, d90 % – различия между медианной продолжительностью жизни и возрастом 90 % смертности у контрольных и экспериментальных мух соответственно, %; Фишер – точный критерий Фишера; ЛР – логранговый критерий; ЛР_{БФ} – логранговый критерий с поправкой Бонферрони.

Keys: N – number of flies; 50 % – median lifespan (days); 90 % – maximum lifespan (age of 90 % mortality in the sample, days); d50 %, d90 % – differences between the median lifespan and the age of 90 % mortality in the control and experimental flies, respectively, %; Фишер – Fisher's exact test, ЛР – log-rank test; ЛРБФ – log-rank test with Bonferroni correction.

веденных экспериментов установили, что экстракт ягод черноплодной рябины оказал влияние на статистически значимые изменения показателей ПЖ самцов, но не на ПЖ самок. Так, отмечено снижение ПЖ с увеличением концентрации экстракта. Добавление на среду экстракта в концентрации 0,1 мг/мл приводило к увеличению медианной ПЖ самцов на 22 % ($p < 0,0001$), в то время как добавление экстракта в концентрации 1 мг/мл привело к снижению максимальной ПЖ на 14 % ($p < 0,05$), а добавление в пищу экстракта в концентрации 5 мг/мл – к снижению медианной ПЖ на 33 % ($p < 0,01$) (рисунок, таблица).

С помощью ранее проведенного нами анализа методом высокоэффективной жидкостной хроматографии установлено, что главные составляющие экстракта черноплодной рябины (*Sorbaronia mitschurinii*) – антоцианы дельфинидин и цианидин [29]. Ранее нами было показано, что этанольный экстракт плодов черноплодной рябины в концентрации 10 мг/мл увеличивает медианную ПЖ дрозофил на 2 % у самцов и на 10 % у самок линии *elav[c155]-Gal4>UAS-Aβ42*, которая является моделью болезни Альцгеймера у дрозофилы [36]. В некоторых исследованиях антоцианы также показали эффективность при лечении БАС. Известно, что экстракт аронии (*Aronia melanocarpa*) в концентрации 2,5 мг/мл увеличивает максимальную ПЖ *D. melanogaster* на 9 %, что, вероятно, было обусловлено повышением уровня антиоксидантных ферментов (SOD, CAT и GPx) и экспрессией генов устойчивости к стрессу (*Hsp68*, *l(2)efl* и *Jafract1*) [33]. Обогащенный антоцианами экстракт из клубники и его основной антоциановый ком-

понент, каллистефин, значительно задерживают начало заболевания и увеличивают выживаемость в модели БАС у мышей с мутантным геном *SOD1^{G93A}* при добавлении в пищу до развития симптомов [45]. Также показано, что антоцианы напрямую модулируют пути сигнализации, способствующие выживанию и апоптозу, что еще больше усиливает их нейропротекторные эффекты. Плейотропная природа этих соединений делает их весьма привлекательными в качестве потенциальных терапевтических средств для лечения таких заболеваний, как БАС, которые обладают сложной этиологией и прогрессированием, характеризующимися как окислительным стрессом, так и воспалением [45].

Исследования на дрозофилах позволили в контексте БАС с эктопической экспрессией *hSOD1* легко тестировать различные соединения на предмет их защитного или негативного действия на продолжительность жизни или двигательную активность. Так, α-липоевая кислота (LA), полученная из растений и известная своими различными свойствами, включая антиоксидантный потенциал [46], была протестирована на дрозофилах, экспрессирующих *hSOD1^{G85R}* в мотонейронах. Было показано, что LA смягчает нейротоксичность, увеличивая продолжительность жизни и улучшая двигательную активность у мух *hSOD1^{G85R}* [47]. Таким же методом также тестировался γ-оризанол (Orz), компонент масла рисовых отрубей, известный своей антиоксидантной активностью [48]. В контексте БАС на дрозофилах Orz увеличивал экспрессию HSP70 и смягчал окислительное повреждение [49]. Эти результаты открывают

возможности для других исследований по изучению роли новых препаратов, потенциально нейропротекторных при БАС [7].

Заключение

В проведенном нами исследовании выявлено, что этанольный экстракт плодов черноплодной рябины (*Sorbaronia mitschurinii*) в наименьшей концентрации (0,1 мг/мл) достоверно увеличил медианную продолжительность жизни самцов на 22 %, при этом с увеличением концентраций (1 и 5 мг/мл) снижал как медианную, так и максимальную продолжительность жизни самцов с моделью болезни амиотрофического склероза. Вне зависимости от концентраций (0,1; 1; 5 и 10 мг/мл) экстракт черноплодной рябины не оказывал статистически значимого воздействия на показатели продолжительности жизни самок с моделью болезни амиотрофического склероза.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература/References

1. Feldman, E. L. Amyotrophic lateral sclerosis / E. L. Feldman, S. A. Goutman, S. Petri [et al.] // Lancet. – 2022. – Vol. 400, № 10360. – P. 1363–1380.
2. Grad, L. I. Clinical spectrum of amyotrophic lateral sclerosis (ALS) / L. I. Grad, G. A. Rouleau, J. Ravits [et al.] // Cold Spring Harb Perspect Med. – 2017. – Vol. 7, № 8. – P. a024117.
3. Talbott, E. O. The epidemiology of amyotrophic lateral sclerosis / E. O. Talbott, A. M. Malek, D. Lacomis // Handb Clin Neurol. – 2016. – Vol. 138. – P. 225–238.
4. Liguori, F. Fly for ALS: *Drosophila* modeling on the route to amyotrophic lateral sclerosis modifiers / F. Liguori, S. Amadio, C. Volonté // Cell Mol Life Sci. – 2021. – Vol. 78, № 17–18. – P. 6143–6160.
5. Hegde, K. N. *Drosophila melanogaster* as a tool for Amyotrophic Lateral Sclerosis research / K. N. Hegde, A. Srivastava // J Dev Biol. – 2022. – Vol. 10, № 3. – P. jdb10030036.
6. Zarei, S. A comprehensive review of amyotrophic lateral sclerosis / S. Zarei, K. Carr, L. Reiley [et al.] // Surg Neurol Int. – 2015. – Vol. 6. – P. 171.
7. Layalle, S. Amyotrophic lateral sclerosis genes in *Drosophila melanogaster* / S. Layalle, L. They, S. Ourghani [et al.] // Int J Mol Sci. – 2021. – Vol. 22, № 2. – P. ijms22020904.
8. Ilieva, H. Advances in molecular pathology, diagnosis, and treatment of amyotrophic lateral sclerosis / H. Ilieva, M. Vullaganti, J. Kwan // Bmj. – 2023. – Vol. 383. – P. e075037.
9. Corcia, P. Treatment of hereditary amyotrophic lateral sclerosis / P. Corcia, H. Blasco, S. Beltran [et al.] // Rev Neurol (Paris). – 2023. – Vol. 179, № 1–2. – P. 54–60.
10. Rosen, D. R. Mutations in Cu/Zn superoxide dismutase gene are associated with familial amyotrophic lateral sclerosis / D. R. Rosen // Nature. – 1993. – Vol. 364, № 6435. – P. 362.
11. Fridovich, I. Superoxide anion radical (O₂⁻), superoxide dismutases, and related matters / I. Fridovich // J Biol Chem. – 1997. – Vol. 272, № 30. – P. 18515–18517.
12. Shaw, P. J. Oxidative damage to protein in sporadic motor neuron disease spinal cord / P. J. Shaw, P. G. Ince, G. Falkous, D. Mantle // Ann Neurol. – 1995. – Vol. 38, № 4. – P. 691–695.
13. Abe, K. Induction of nitrotyrosine-like immunoreactivity in the lower motor neuron of amyotrophic lateral sclerosis / K. Abe, L. H. Pan, M. Watanabe [et al.] // Neurosci Lett. – 1995. – Vol. 199, № 2. – P. 152–154.
14. Beal, M. F. Increased 3-nitrotyrosine in both sporadic and familial amyotrophic lateral sclerosis / M. F. Beal, R. J. Ferrante, S. E. Browne [et al.] // Ann Neurol. – 1997. – Vol. 42, № 4. – P. 644–654.
15. Rosen, D. R. Mutations in Cu/Zn superoxide dismutase gene are associated with familial amyotrophic lateral sclerosis / D. R. Rosen, T. Siddique, D. Patterson [et al.] // Nature. – 1993. – Vol. 362, № 6415. – P. 59–62.
16. Barber, S. C. Oxidative stress in ALS: a mechanism of neurodegeneration and a therapeutic target / S. C. Barber, R. J. Mead, P. J. Shaw // Biochim Biophys Acta. – 2006. – Vol. 1762, № 11–12. – P. 1051–1067.
17. Iyer, S. A comparative bioinformatic analysis of C9orf72 / S. Iyer, K. R. Acharya, V. Subramanian // PeerJ. – 2018. – Vol. 6. – P. e4391.
18. Staveley, B. E. Phenotypic consequences of copper-zinc superoxide dismutase overexpression in *Drosophila melanogaster* / B. E. Staveley, J. P. Phillips, A. J. Hilliker // Genome. – 1990. – Vol. 33, № 6. – P. 867–872.
19. Phillips, J. P. Subunit-destabilizing mutations in *Drosophila* copper/zinc superoxide dismutase: neuropathology and a model of dimer dysequilibrium / J. P. Phillips, J. A. Tainer, E. D. Getzoff [et al.] // Proc Natl Acad Sci USA. – 1995. – Vol. 92, № 19. – P. 8574–8578.
20. Phillips, J. P. Null mutation of copper/zinc superoxide dismutase in *Drosophila* confers hypersensitivity to paraquat and reduced longevity / J. P. Phillips, S. D. Campbell, D. Michaud [et al.] // Proc Natl Acad Sci USA. – 1989. – Vol. 86, № 8. – P. 2761–2765.
21. Nopoulos, P. C. Huntington disease: a single-gene degenerative disorder of the striatum / P. C. Nopoulos // Dialogues Clin Neurosci. – 2016. – Vol. 18, № 1. – P. 91–98.
22. Arsac, J. N. Chronic exposure to paraquat induces alpha-synuclein pathogenic modifications in *Drosophila* / J. N. Arsac, M. Sedru, M. Dartiguelongue [et al.] // Int J Mol Sci. – 2021. – Vol. 22, № 21. – P. ijms22211613.
23. Jeon, Y. Genetic dissection of Alzheimer's disease using *Drosophila* models / Y. Jeon, J. H. Lee, B. Choi [et al.] // Int J Mol Sci. – 2020. – Vol. 21, № 3. – P. ijms21030884.
24. Yamaguchi, M. Epigenetic regulation of ALS and CMT: A lesson from *Drosophila* models / M. Yamaguchi, K. Omori, S. Asada, H. Yoshida // Int J Mol Sci. – 2021. – Vol. 22, № 2. – P. ijms22020491.
25. Lu, B. *Drosophila* models of neurodegenerative diseases / B. Lu, H. Vogel // Annu Rev Pathol. – 2009. – Vol. 4. – P. 315–342.

26. Şahin, A. Human SOD1 ALS mutations in a *Drosophila* knock-in model cause severe phenotypes and reveal dosage-sensitive gain- and loss-of-function components / A. Şahin, A. Held, K. Bredvik [et al.] // *Genetics*. – 2017. – Vol. 205, № 2. – P. 707–723.
27. Azuma, Y. Amyotrophic lateral sclerosis model / Y. Azuma, I. Mizuta, T. Tokuda, T. Mizuno // *Adv Exp Med Biol*. – 2018. – Vol. 1076. – P. 79–95.
28. Chia, R. Novel genes associated with amyotrophic lateral sclerosis: diagnostic and clinical implications / R. Chia, A. Chiò, B. J. Traynor // *Lancet Neurol*. – 2018. – Vol. 17, № 1. – P. 94–102.
29. Platonova, E. Y. Geroprotective effects of *Sorbaronia mitschurinii* fruit extract on *Drosophila melanogaster* / E. Y. Platonova, N. V. Zemskaya, M. V. Shaposhnikov [et al.] // *Journal of Berry Research*. – 2022. – Vol. 12, № 1. – P. 73–92.
30. Jurendić, T. *Aronia melanocarpa* products and by-products for health and nutrition: a review / T. Jurendić, M. Ščetar // *Antioxidants (Basel)*. – 2021. – Vol. 10, № 7. – P. antiox10071052.
31. Ren, Y. Potential benefits of black chokeberry (*Aronia melanocarpa*) fruits and their constituents in improving human health / Y. Ren, T. Frank, G. Meyer [et al.] // *Molecules*. – 2022. – Vol. 27, № 22. – P. molecules27227823.
32. Bushmeleva, K. *Aronia melanocarpa* flavonol extract-antiradical and immunomodulating activities analysis / K. Bushmeleva, A. Vyshtakalyuk, D. Terenzhev [et al.] // *Plants (Basel)*. – 2023. – Vol. 12, № 16. – P. plants12162976.
33. Jo, A. R. Effects of aronia extract on lifespan and age-related oxidative stress in *Drosophila melanogaster* / A. R. Jo, J. Y. Imm // *Food Sci Biotechnol*. – 2017. – Vol. 26, № 5. – P. 1399–1406.
34. Rugină, D. Chokeberry anthocyanin extract as pancreatic β -cell protectors in two models of induced oxidative stress / D. Rugină, Z. Diaconeasa, C. Coman [et al.] // *Oxid Med Cell Longev*. – 2015. – Vol. 2015. – P. 429075.
35. Platonova, E. Y. Black chokeberry (*Aronia melanocarpa*) extracts in terms of geroprotector criteria / E. Y. Platonova, M. V. Shaposhnikov, H.-Y. Lee [et al.] // *Trends in Food Science & Technology*. – 2021. – Vol. 114. – P. 57–584.
36. Zemskaya, N. V. Issledovanie nejroprotektornykh svoystv ekstrakta chernoplodnoj ryabiny (*Sorbaronia mitschurinii*) u linii *Drosophila melanogaster*, modeliruyushchej bolezni' Altsgejmery [Study of neuroprotective properties of chokeberry extract (*Sorbaronia mitschurinii*) in a *Drosophila melanogaster* line modeling Alzheimer's disease] / N. V. Zemskaya, N. R. Pakshina, E. Yu. Platonova [et al.] // *Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. – 2023. – Vol. 6, № 64. – P. 86–93. [In Russian]
37. Liu, R. H. Health benefits of fruit and vegetables are from additive and synergistic combinations of phytochemicals / R. H. Liu // *Am J Clin Nutr*. – 2003. – Vol. 78, № 3. – P. 517s–520s.
38. Bland, J. M. The logrank test / J. M. Bland, D. G. Altman // *Bmj*. – 2004. – Vol. 328, № 7447. – P. 1073.
39. Han, S. K. OASIS portable: User-friendly offline suite for secure survival analysis / S. K. Han, H. C. Kwon, J. S. Yang [et al.] // *Mol Cells*. – 2024. – Vol. 47, № 2. – P. 100011.
40. Harries, L. W. Human aging is characterized by focused changes in gene expression and deregulation of alternative splicing / L. W. Harries, D. Hernandez, W. Henley [et al.] // *Aging Cell*. – 2011. – Vol. 10, № 5. – P. 868–878.
41. Dönertaş, H. M. Gene expression reversal toward pre-adult levels in the aging human brain and age-related loss of cellular identity / H. M. Dönertaş, H. İzgi, A. Kamaoğlu [et al.] // *Sci Rep*. – 2017. – Vol. 7, № 1. – P. 5894.
42. Baker, D. J. Cellular senescence in brain aging and neurodegenerative diseases: evidence and perspectives / D. J. Baker, R. C. Petersen // *J Clin Invest*. – 2018. – Vol. 128, № 4. – P. 1208–1216.
43. Hou, Y. Ageing as a risk factor for neurodegenerative disease / Y. Hou, X. Dan, M. Babbar [et al.] // *Nat Rev Neurol*. – 2019. – Vol. 15, № 10. – P. 565–581.
44. Arthur, K. C. Projected increase in amyotrophic lateral sclerosis from 2015 to 2040 / K. C. Arthur, A. Calvo, T. R. Price [et al.] // *Nat Commun*. – 2016. – Vol. 7. – P. 12408.
45. Winter, A. N. An anthocyanin-enriched extract from strawberries delays disease onset and extends survival in the hSOD1(G93A) mouse model of amyotrophic lateral sclerosis / A. N. Winter, E. K. Ross, H. M. Wilkins [et al.] // *Nutr Neurosci*. – 2018. – Vol. 21, № 6. – P. 414–426.
46. Gorąca, A. Lipoic acid – biological activity and therapeutic potential / A. Gorąca, H. Huk-Kolega, A. Piechota [et al.] // *Pharmacol Rep*. – 2011. – Vol. 63, № 4. – P. 849–858.
47. Wang, T. α -Lipoic acid attenuates oxidative stress and neurotoxicity via the ERK/Akt-dependent pathway in the mutant hSOD1 related *Drosophila* model and the NSC34 cell line of amyotrophic lateral sclerosis / T. Wang, J. Cheng, S. Wang [et al.] // *Brain Res Bull*. – 2018. – Vol. 140. – P. 299–310.
48. Juliano, C. Antioxidant activity of gamma-oryzanol: mechanism of action and its effect on oxidative stability of pharmaceutical oils / C. Juliano, M. Cossu, M. C. Alamanni, L. Piu // *Int J Pharm*. – 2005. – Vol. 299, № 1–2. – P. 146–154.
49. Zhang, C. γ -Oryzanol mitigates oxidative stress and prevents mutant SOD1-related neurotoxicity in *Drosophila* and cell models of amyotrophic lateral sclerosis / C. Zhang, W. Liang, H. Wang [et al.] // *Neuropharmacology*. – 2019. – Vol. 160. – P. 107777.

Благодарность (госзадание):

Исследования выполнены в рамках государственного задания Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме «Генетические и функциональные исследования эффектов геропротекторных интервенций на модели *Drosophila melanogaster*» № 122040600022-1.

Acknowledgements (state task):

The research was performed within the framework of the state task of the Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences on the theme "Genetic and functional studies on the effects of heroprotective interventions on the model of *Drosophila melanogaster*" № 122040600022-1.

Информация об авторах:

Земская Надежда Владимировна – младший научный сотрудник Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; Scopus Author ID: 56781497800; <https://orcid.org/0000-0002-8746-0020> (167000, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28; e-mail: zemskaya@ib.komisc.ru).

Платонова Елена Юрьевна – младший научный сотрудник Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; Scopus Author ID: 57217200914; ORCID 0000-0002-4632-2385 (167000, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28; e-mail: platonova.e.u@ib.komisc.ru).

Пакшина Наталья Ришатовна – младший научный сотрудник Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; Scopus Author ID: 57222155424; <https://orcid.org/0000-0003-2076-0755> (167000, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28; e-mail: pakshina.n.r@ib.komisc.ru).

Шапошников Михаил Вячеславович – доцент, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; Scopus Author ID 7004704906; <https://orcid.org/0000-0002-4625-6488> (167000, Российская Федерация, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28; e-mail: shaposhnikov@ib.komisc.ru).

Москалёв Алексей Александрович – доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией геропротекторных и радиопротекторных технологий Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук (167000, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28; e-mail: amoskalev@ib.komisc.ru); ведущий научный сотрудник Института молекулярной биологии им. В. А. Энгельгардта; Scopus Author ID 7003730453; <https://orcid.org/0000-0002-3248-1633> (119991, Российская Федерация, г. Москва, ул. Вавилова, д. 32; e-mail: amoskalev@ib.komisc.ru).

About the authors:

Nadezhda V. Zemskaya – Junior Researcher at the Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; Scopus Author ID: 56781497800; <https://orcid.org/0000-0002-8746-0020> (28 Kommunisticheskaya st., Syktyvkar 167000, Komi Republic, Russian Federation; e-mail: zemskaya@ib.komisc.ru).

Elena Yu. Platonova – Junior Researcher at the Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; Scopus Author ID: 57217200914; <https://orcid.org/0000-0002-4632-2385> (28 Kommunisticheskaya st., Syktyvkar 167000, Komi Republic, Russian Federation; e-mail: platonova.e.u@ib.komisc.ru).

Natalya R. Pakshina – Junior Researcher at the Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; Scopus Author ID: 57222155424; <https://orcid.org/0000-0003-2076-0755> (28 Kommunisticheskaya st., Syktyvkar 167000, Komi Republic, Russian Federation; e-mail: pakshina.n.r@ib.komisc.ru).

Mikhail V. Shaposhnikov – Candidate of Sciences (Biology), Leading Researcher at the Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; Scopus Author ID: 7004704906; <https://orcid.org/0000-0002-4625-6488> (28 Kommunisticheskaya st., Syktyvkar 167000, Komi Republic, Russian Federation; e-mail: shaposhnikov@ib.komisc.ru).

Aleksey A. Moskalev – Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Sciences (Biology), Head of the Laboratory of Geroprotective and Radioprotective Technologies at the Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; Scopus Author ID: 7003730453; <https://orcid.org/0000-0002-3248-1633> (28 Kommunisticheskaya st., Syktyvkar 167000, Komi Republic, Russian Federation; e-mail: amoskalev@ib.komisc.ru).

Для цитирования:

Земская, Н. В. Экстракт плодов черноплодной рябины (**Sorbaronia mitschurinii*) влияет на выживаемость *Drosophila melanogaster* с моделью бокового амиотрофического склероза в зависимости от концентрации / Н. В. Земская, Е. Ю. Платонова, Н. Р. Пакшина [и др.] // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Экспериментальная биология и экология». – 2024. – № 9 (75). – С. 84–91.

For citation:

Zemskaya, N. V. Ekstrakt plodov chernoplodnoj ryabiny (**Sorbaronia mitschurinii*) vliyaet na vyzhivaemost *Drosophila melanogaster* s modelyu bokovogo amiotroficheskogo skleroza v zavisimosti ot koncentracii [Black chokeberry (**Sorbaronia mitschurinii*) fruit extract affects the survival of *Drosophila melanogaster* with the model of amyotrophic lateral sclerosis depending on the concentration] / N. V. Zemskaya, E. Yu. Platonova, N. R. Pakshina, M. V. Shaposhnikov, A. A. Moskalev // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series “Experimental Biology and Ecology”. – 2024. – № 9 (75). – P. 84–91.

Дата поступления статьи: 26.08.2024

Прошла рецензирование: 12.09.2024

Принято решение о публикации: 19.09.2024

Received: 26.08.2024

Reviewed: 12.09.2024

Accepted: 19.09.2024

Исследование влияния природного антоциана дельфинидина на продолжительность жизни *Drosophila melanogaster*

Е. Ю. Платонова*, Д. А. Голубев*, С. А. Патов**,
П. С. Некрасова**, М. В. Шапошников*,
А. А. Москалёв*.*.*

* Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
г. Сыктывкар

** Институт химии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
г. Сыктывкар

*** Институт молекулярной биологии им. В. А. Энгельгардта РАН,
г. Москва

platonova.e.u@ib.komisc.ru
denismeatboy@gmail.com
ser-patov@yandex.ru
polina.nekrasova.98@bk.ru
shaposhnikov@ib.komisc.ru
amoskalev@ib.komisc.ru

Аннотация

Антоцианы – это ярко окрашенные в розовый, красный, синий или фиолетовый цвет пигменты, растворенные в вакуолярном соке эпидермальных тканей цветов, плодов, листьев и стеблей. Дельфинидин – один из наиболее распространенных антоцианов, обладающий геропротекторным потенциалом. В данной работе мы изучили влияние дельфинидина на продолжительность жизни особей обоих полов *Drosophila melanogaster*. Наши результаты показали, что концентрация дельфинидина в 10 мкМ приводит к статистически значимому снижению медианной продолжительности жизни самцов *Drosophila melanogaster* на 5 %, в то время как у самок наблюдается увеличение медианной продолжительности жизни на 4 %. Однако механизм воздействия дельфинидина на организм еще недостаточно изучен, что ограничивает наше понимание его геропротекторных свойств. В этом контексте изучение эффектов дельфинидина на стрессоустойчивость, показатели жизнеспособности и уровень экспрессии, связанных со старением генов у *Drosophila melanogaster*, представляется перспективным направлением для дальнейшего изучения. Такие исследования способны пролить свет на механизмы геропротекции и старения, а также на то, как природные антоцианы, такие как дельфинидин, могут быть использованы для улучшения здоровья и продолжительности жизни человека.

Ключевые слова:

антоцианы, дельфинидин, геропротекторы, *Drosophila melanogaster*, продолжительность жизни

About the influence of the natural anthocyanin delphinidin on the lifespan of *Drosophila melanogaster*

E. Yu. Platonova*, D. A. Golubev*, S. A. Patov**,
P. S. Nekrasova**, M. V. Shaposhnikov*,
A. A. Moskalev*.*.*

* Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of
the Russian Academy of Sciences,
Syktyvkar

** Institute of Chemistry, Komi Science Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,
Syktyvkar

*** V. A. Engelhardt Institute of Molecular Biology of the Russian
Academy of Sciences,
Moscow

platonova.e.u@ib.komisc.ru
denismeatboy@gmail.com
ser-patov@yandex.ru
polina.nekrasova.98@bk.ru
shaposhnikov@ib.komisc.ru
amoskalev@ib.komisc.ru

Abstract

Anthocyanins are vividly colored pigments that appear pink, red, blue, or violet and are dissolved in the vacuolar sap of the epidermal tissues of flowers, fruits, leaves, and stems. Delphinidin is one of the most common anthocyanins with the heroprotective potential. In this study, we examined the effect of delphinidin on the lifespan of both male and female *Drosophila melanogaster*. Our results showed that delphinidin concentration of 10 μ M causes a statistically significant decrease in the median lifespan of male *Drosophila melanogaster* by 5% and an increase in median lifespan of females by 4%. However, the mechanism of action of delphinidin on the organism is still understudied that limits our understanding of its heroprotective properties. In this context, studying the effects of delphinidin on the stress resistance, viability indicators, and the expression levels of aging-related genes in *Drosophila melanogaster* appears to be a promising direction. Such studies would discover the mechanisms of heroprotection and aging, as well as answer the question how natural anthocyanins like delphinidin can be used to improve human health and enlarge lifespan.

Keywords:

anthocyanins, delphinidin, geroprotectors, *Drosophila melanogaster*, lifespan

Введение

Антоцианы – это водорастворимые гликозиды из класса флавоноидов, которые ответственны за красный, фиолетовый и синий цвета многих растений, фруктов, овощей и цветов [1, 2]. Помимо их участия в регуляции роста и развития растений, антоцианы обладают биологическими свойствами, влияющими на клетки живых организмов. Они проявляют мощные антиоксидантные свойства, что помогает защищать клетки от окислительного стресса и повреждения, вызванного свободными радикалами [1]. Это, в свою очередь, может снизить риск развития различных заболеваний, таких как рак, сердечно-сосудистые и нейродегенеративные заболевания [1]. Антоцианы также способствуют улучшению зрения, поддерживают здоровье сосудов и обладают противовоспалительным действием [2]. Основными представителями антоцианов являются цианидин, дельфинидин, пеларгонидин, пеонидин, петунидин и мальвидин [2, 3].

Как известно, экстракты многих плодовых растений содержат большое количество биологически активных веществ (полифенолы, фенольные кислоты, флавоноиды, антоцианы и проантоцианидины), которые обладают герпротекторным потенциалом [4]. Наибольшее количество антоцианов содержится в таких ягодах, как черноплодная рябина (*Aronia melanocarpa*) [5], черника (*Vaccinium ashei*) [6], ежевика (*Rubus fruticosus* L.), вишня (*Prunus cerasus* L.), черешня (*Prunus avium* L.), бузина (*Sambucus nigra* L.) [7], виноград (*Vitis spp.*), черная смородина (*Ribes nigrum*), слива (*Prunus spp.*), жимолость (*Lonicera caerulea*), клюква (*Vaccinium macrocarpon*), клубника (*Fragaria spp.*) [1, 8, 9], клубнях картофеля (*Solanum tuberosum*) и батата (*Ipomoea batatas* L.), корнеплоде черной моркови (*Daucus carota* L. ssp. *sativus* var. *atrorubens* Alef.) [10], а также в томатах (*Solanum lycopersicum*) [11] и черных соевых бобах (*Glycine max* (L.) Merr) [12].

Например, антоциановый экстракт клюквы (*V. macrocarpon* Ait.) в концентрации 20 мг/мл увеличивал среднюю продолжительность жизни *Drosophila melanogaster* на 10 % [13]. Экстракт терпкой вишни (*Prunus cerasus*), добавляемый в пищу с третьего дня жизни червей N2 дикого типа *Caenorhabditis elegans*, на протяжении всей жизни в концентрациях 6 и 12 мкг/мл увеличивал среднюю продолжительность жизни [14]. Экстракт пурпурного сладкого батата (*Ipomoea batatas* L.) в концентрации 0,5 мг/мл увеличивал среднюю продолжительность жизни самцов *D. melanogaster* на 2,8 %, а 2,0 мг/мл – на 14,5 % [15]. Добавление в питательную среду взрослым (с четвертой по шестую недели) мухам *D. melanogaster* этанольного экстракта черноплодной рябины (*Sorbaronia mitschurinii*) в концентрациях 0,1 и 5 мг/мл увеличивало максимальную продолжительность жизни самцов на 9 % [16]. Ацетоновый экстракт аронии черноплодной (*Aronia melanocarpa*) в концентрации 2,5 мг/мл увеличил на 18 % среднюю продолжительность жизни самцов *D. melanogaster* [17]. Метанольный экстракт пурпурной пшеницы (*Triticum aestivum*), богатый антоцианами, продлил среднюю продолжительность жизни *C. elegans* на 10,5 % [18]. Сок красной капусты (*Brassica oleracea* L. var. *capitata* L. f. *Rubra*) в различных концентрациях: 1 % (5 %), 2 (8), 3 (9) и 5 % (21 %) увеличива-

ет среднюю продолжительность жизни *C. elegans* [19]. Экстракт черники (*Vaccinium spp.*) увеличил среднюю и максимальную продолжительность жизни самцов дрозофил дикого типа *Oregon-RC* на 5 % [20].

Более того, исследования показали, что отдельные биологически активные вещества, содержащиеся в растениях, также могут оказывать положительное влияние на продолжительность жизни модельных организмов. Например, антоциан цианидин-3-глюкозид (C3G) в концентрациях 10 и 100 мкМ увеличивает максимальную продолжительность жизни самцов на 3 и 8 % соответственно у *D. melanogaster* [21]. Пеонидин-3-глюкозид в концентрации 50 мкг/мл увеличивал продолжительность жизни *C. elegans* на 14 %. Кроме того, этот антоциан повышал устойчивость червя к неблагоприятным условиям внешней среды, таким как ультрафиолетовое излучение (UVA), гипертермия и перекись водорода. При воздействии UVA и термическом стрессе устойчивость червя повышалась на 25 %, а при окислительном стрессе – на 48 % [22].

Антоцианы представляют собой большой класс соединений, которые мы регулярно употребляем с пищей, и изучение вызываемых ими биологических эффектов является важным шагом для определения потенциальных герпротекторов, которые могут быть использованы для разработки целевых стратегий улучшения здоровья и продления жизни. В настоящем исследовании мы предложили гипотезу о том, что природный антоциан дельфинидин обладает высоким потенциальным герпротекторным эффектом, и проверили ее в исследовании на модельном организме *Drosophila melanogaster*.

Материалы и методы

Выделение природного антоциана из плодов. Выделение дельфинидина-3-О-глюкозида проводили из плодов жимолости Палласа (*Lonicera pallacii* L.). Для получения экстракта жимолости Палласа 10 г размороженных ягод были раздавлены стеклянной палочкой и помещены в коническую колбу объемом 250 мл. Далее к ним был добавлен раствор 10%-ной соляной кислоты с 5%-ным этиловым спиртом (100 мл). Экстракцию сырья осуществляли три раза, обрабатывая ягодную массу раствором 10%-ной соляной кислоты в соотношении 10 частей раствора на 1 часть сырья. Экстракцию проводили в темном месте при температуре +25 °C в течение суток. Полученные элюаты отфильтровывали, объединяли и упаривали на ротаторном испарителе (Heidolph, Германия) при температуре 35–40 °C до консистенции густого сиропа, после чего лиофильно высушивали. Полученный сухой экстракт представлял аморфное порошкообразное вещество темно-красного цвета.

Получение дельфинидин-3-О-глюкозида. Для разделения суммарного экстракта антоцианов жимолости колонку, заполненную сорбентом с обращенной фазой Диасорб 130C16T, промывали начальным элюентом – 10%-ным раствором дегазированной муравьиной кислоты. После чего вносили экстракт массой 1 г, растворенный в 10%-ном растворе муравьиной кислоты, и проводили хроматографическое разделение на фракции растворами ацетонитрила в воде (10%-ный раствор муравьиной кислоты) в соотношениях 0:100, 2:98, 4:96, 6:94, 8:92, 10:90, 12:88. В ходе

разделения суммарного экстракта получены: дельфинидин-3-О-глюкозид. Структуры выделенных веществ были доказаны физико-химическими методами исследования (ЯМР, ВЭЖХ-МС). Полученный дельфинидин был передан для биохимического испытания. В дальнейших экспериментах с применением дельфинидина-3-О-глюкозида и его различных концентраций в качестве разбавителя использовали дистиллированную воду.

Условия содержания *Drosophila melanogaster*. В экспериментах использовали линию *Drosophila melanogaster* дикого типа *Canton-S* (#64349, Блумингтон, США). Мух содержали в камере постоянного климата Binder KBF720-ICH (Binder, Германия) при температуре +25 °C и относительной влажности 60 %, с режимом освещения 12 ч свет: 12 ч темнота. Питательная среда, на которой жили мухи, содержала воду – 1 л, кукурузную муку – 92 г, сухие дрожжи – 32,1 г, агар-агар – 5,2 г, глюкозу – 136,9 г. Для предотвращения роста плесени и бактерий на 1 л среды добавляли 10 мл 10%-ного раствора нипагина (метил 4-гидроксibenзоат, Merck, США) в этаноле и 10 мл 50%-ной пропионовой кислоты (Merck, США). Водные растворы дельфинидина в концентрациях 1, 10 и 100 мкМ наносили непосредственно на поверхность свежей застывшей питательной среды в объеме 30 мкл. На поверхность питательной среды контрольных вариантов наносили 30 мкл воды. Далее поверхность среды просушивали под вентилятором.

Анализ продолжительности жизни. Для анализа продолжительности жизни (далее – ПЖ) имаго разделяли по полу, на каждый вариант эксперимента отбирали по 150 особей, помещая по 30 особей в каждую пробирку. Самцов и самок содержали отдельно. Эксперименты проводили в двух независимых повторностях. Рассчитывали медианную и максимальную (возраст 90 % смертности особей) продолжительность жизни.

Статистический анализ полученных результатов. Для анализа статистических различий в функциях выживаемости между контрольной и экспериментальной группой использовали модифицированный критерий Колмогорова-Смирнова. Критерии Гехана-Бреслоу-Вилкоксона и Манта-Хан-Кокс применяли для анализа статистической значимости различий по медианной продолжительности жизни. Для оценки различий в возрасте 90 % смертности использовали тест Ванг-Эллисона [23]. Статистический анализ данных был выполнен с использованием программного обеспечения R, версии 2.15.1 (The R Foundation, США), Excel (Microsoft, США) и OASIS 2 (Online Application for Survival Analysis 2) [24].

Результаты и их обсуждение

Известно, что старение происходит планомерно, но при воздействии различных неблагоприятных факторов продолжительность жизни может резко сократиться за счет активации внутренних воспалительных процессов и накопления повреждений ДНК, приводящих к усугублению разнообразных заболеваний [25]. Поэтому для улучшения и продления здорового состояния организма применяют биологически активные вещества, обладающие геропротекторным потенциалом (<http://geroprotectors.org/>). К основным критериям геропротекторов относят: положи-

тельный эффект на продолжительность жизни модельных организмов, улучшение биомаркеров старения и качества жизни, низкую токсичность и минимальные побочные эффекты [26]. В качестве дополнительных критериев геропротекторов рассматривают эволюционно консервативные механизмы эффектов, воспроизводимые на различных моделях, способность отсрочивать развитие возрастных заболеваний и повышать устойчивость организма к неблагоприятным факторам окружающей среды [26].

Нами установлено, что природный антоциан дельфинидин вызывает статистически значимое снижение медианной продолжительности жизни самцов на 5 и 4 % при концентрациях 10 и 100 мкМ соответственно, что отображается сдвигом кривых влево по отношению к контрольной линии (рисунок А, таблица). При этом, дельфинидин в концентрации 10 мкМ увеличивал медианную продолжительность жизни самок на 4 %, в подтверждение этому отмечен сдвиг кривой смертности данного варианта эксперимента вправо по отношению к контрольной кривой (рисунок Б, таблица).

Ранее обнаружено, что дельфинидин-3-глюкозид увеличивает среднюю продолжительность жизни и улучшает состояние здоровья (увеличение средней скорости сокращений глоточного насоса) *C. elegans*, даже в условиях окислительного стресса, вызванного H_2O_2 [27]. А также выявлено, что дельфинидин-3-рутинозид, выделенный из плодов черной смородины (*Ribes nigrum*), облегчает расслабление цилиарной мышцы, тем самым отсрочивая

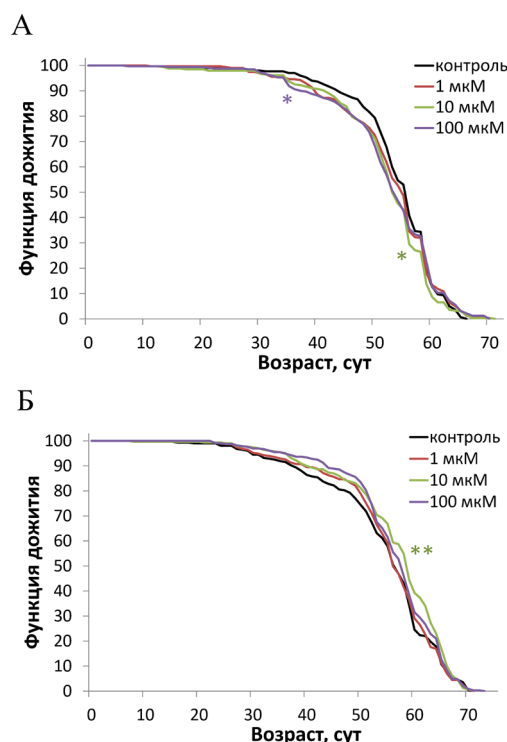


Рисунок. Влияние природного антоциана дельфинидина на продолжительность жизни самцов (А) и самок (Б) *Drosophila melanogaster*. Условные обозначения. Критерий Колмогорова-Смирнова для кривых выживаемости: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$.

Figure. Influence of the natural anthocyanin delphinidin on the lifespan of male (А) and female (Б) *Drosophila melanogaster*. Keys: the Kolmogorov-Smirnov criterion for survival curves at * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$.

Influence of the natural anthocyanin delphinidin on the lifespan of *Drosophila melanogaster*

Концентрация	Пол	М сут	dM %	90% сут	d90 %	пол	М сут	dM %	90% сут	d90 %
Контроль	♂	56		61		♀	57		66	
1 мкМ	♂	55	-1.8	63	3.3	♀	56	-1.8	66	0
10 мкМ	♂	54	-4.5*#	60	-1.6	♀	59	3.5*#	67	1.5
100 мкМ	♂	54	-3.6*#	63	-3.3	♀	58	1.8	66	0

Условные обозначения. М – медианная продолжительность жизни; 90 % – возраст 90 % смертности (максимальная продолжительность жизни); dM – разница в медианной продолжительности жизни; d90 % – разница смертности в возрасте 90 %; ♂ – самцы; ♀ – самки; * $p < 0.05$ критерий Мантеля-Кокса; # $p < 0.05$ критерий Гехана-Бреслоу-Вилкоксона для медианной ПЖ.

Keys: M – median lifespan; 90 % – 90 % mortality age (maximum lifespan); dM – difference in median lifespan; d90 % – difference in mortality at 90 % age; ♂ – males; ♀ – females. * $p < 0.05$ – the Mantel-Cox criterion; # $p < 0.05$ – the Gehan-Breslow-Wilcoxon criterion for median lifespan.

развитие близорукости у крупного рогатого скота [28]. У мышей, получавших диету с высоким содержанием жиров одновременно с цианидином и дельфинидином в дозе 40 мг/кг в условиях окислительного стресса, повышались уровни экспрессии белков, участвующих в регуляции процессов воспаления (NF-κB), апоптоза (JNK) и метаболизма (PTP1B). Кроме того, у самцов мышей цианидин и дельфинидин улучшали показатели дислипидемии и инсулинорезистентности на диете с высоким содержанием жиров [29]. Дельфинидин и цианидин оказывали цитотоксическое действие на клетки линий колоректального рака LoVo и LoVo/ADR. При этом дельфинидин вызывал незначительное повышение, а цианидин – снижение количества активных форм кислорода (далее – АФК) в клетках [30]. Было показано, что дельфинидин оказывает антипролиферативное действие в отношении различных видов рака (простаты, колоректального рака, рака яичников, кожи, молочной железы, мочевого пузыря, первичной опухоли головного мозга и остеосаркомы) [31].

Перечисленные, а также полученные нами результаты подчеркивают необходимость дальнейших исследований для понимания механизмов, лежащих в основе различных биологических эффектов дельфинидина и выяснения возможностей его потенциального применения в терапии возраст-зависимых заболеваний.

Заключение

Таким образом, в нашем исследовании мы обнаружили достоверный разнонаправленный эффект природного антоциана дельфинидина на медианную продолжительность жизни особей обоих полов *Drosophila melanogaster*.

Наблюдаемое у самок дрозофил увеличение продолжительности жизни после кормления дельфинидин-3-глюкозидом подчеркивает его потенциал в качестве натуральной добавки для замедления старения. Однако необходимы дальнейшие исследования влияния дельфинидина на связанные со старением параметры жизнеспособности организма, такие как стрессоустойчивость и двигательная активность на модели *Drosophila melanogaster*. Также необходимо провести анализ изменения экспрессии генов (таких как *Sirt1*, *Keap1*, *NRF2*, *Sod1*, *HIF1*, *Clk*, *per*), чтобы выяснить молекулярные механизмы, лежащие в основе наблюдаемых эффектов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература/References

- Chemistry, pharmacology and health benefits of anthocyanins / A. Smeriglio [et al.]. – Phytotherapy Research. – 2016. – № 30 (8). – P. 1265–86.
- Anthocyanins: promising natural products with diverse pharmacological activities / J. Liu [et al.]. – Molecules. – 2021. – № 26 (13).
- Anthocyanins: a comprehensive review of their chemical properties and health effects on cardiovascular and neurodegenerative diseases / R. Mattioli [et al.]. – Molecules. – 2020. – № 25 (17).
- Polyphenols as potential geroprotectors / E. Proshkina [et al.]. – Antioxidants & Redox Signaling. – 2024. – № 40 (7–9). – P. 564–593.
- Kulling, S. E. Chokeberry (*Aronia melanocarpa*) – a review on the characteristic components and potential health effects / S. E. Kulling, H. M. Rawel. – Planta Medica. – 2008. – № 74 (13). – P. 1625–34.
- Optimization and application of HPLC for simultaneous separation of six well-known major anthocyanins in blueberry / Y. Zhou [et al.]. – Preparative Biochemistry and Biotechnology. – 2021. – № 51 (10). – P. 961–970.
- Total content of phenols and anthocyanins in edible fruits from Bosnia / Z. Rimpapa [et al.]. – Bosnian Journal of Basic Medical Sciences. – 2007. – № 7 (2). – P. 117–20.
- Classification of fruits based on anthocyanin types and relevance to their health effects / J. Fang. – Nutrition. – 2015. – № 31 (11–12). – P. 1301–6.
- Berry derived constituents in suppressing viral infection: potential avenues for viral pandemic management / P. Shahagadkar [et al.]. – Clinical Nutrition ESPEN. – 2021. – № 46. – P. 14–20.
- Zaim, M. Black carrot anthocyanins exhibit neuroprotective effects against MPP+ induced cell death and cytotoxicity via inhibition of oxidative stress mediated apoptosis / M. Zaim, I. Kara, A. Muduroglu. – Cytotechnology. – 2021. – № 73 (6). – P. 827–840.
- Anthocyanin-rich vegetables for human consumption – focus on potato, sweetpotato and tomato / A. K. Mattoo [et al.]. – International Journal of Molecular Sciences. – 2022. – № 23 (5). – P. 2634.
- Cyanidin-3-glucoside derived from black soybeans ameliorate type 2 diabetes through the induction of differentiation of preadipocytes into smaller and insulin-sensitive

- adipocytes / T. Matsukawa [et al.]. – The Journal of Nutritional Biochemistry. – 2015. – № 26 (8). – P. 860–7.
13. Cranberry anthocyanin extract prolongs lifespan of fruit flies / L. Wang [et al.]. – Experimental Gerontology. – 2015. – № 69. – P. 189–95.
 14. Tart cherry increases lifespan in *Caenorhabditis elegans* by altering metabolic signaling pathways / S. Jayarathne [et al.]. – Nutrients. – 2020. – № 12 (5).
 15. Purple sweet potato extract extends lifespan by activating autophagy pathway in male *Drosophila melanogaster* / Y. Han [et al.]. – Experimental Gerontology. – 2021. – № 144. – P. 111190.
 16. Geroprotective effects of *Sorbaronia mitschurinii* fruit extract on *Drosophila melanogaster* / E. Platonova [et al.]. – Journal of Berry Research. – 2021. – № 12. – P. 1–19.
 17. Effects of aronia extract on lifespan and age-related oxidative stress in *Drosophila melanogaster* / A. R. Jo, J. Y. Imm. – Food Science and Biotechnology. – 2017. – № 26 (5). – P. 1399–1406.
 18. Anthocyanin-rich purple wheat prolongs the life span of *Caenorhabditis elegans* probably by activating the DAF-16/FOXO transcription factor / W. Chen [et al.]. – Journal of Agricultural and Food Chemistry. – 2013. – № 61 (12). – P. 3047–53.
 19. Red cabbage rather than green cabbage increases stress resistance and extends the lifespan of *Caenorhabditis elegans* / N. Zhang, S. Jiao, P. Jing. – Antioxidants (Basel). – 2021. – № 10 (6).
 20. Blueberry extract prolongs lifespan of *Drosophila melanogaster* / C. Peng [et al.]. – Experimental Gerontology. – 2012. – № 47 (2). – P. 170–8.
 21. Honeysuckle extract (*Lonicera pallasii* L.) exerts antioxidant properties and extends the lifespan and healthspan of *Drosophila melanogaster* / D. Golubev [et al.]. – Biogerontology. – 2022. – № 23 (2). – P. 215–235.
 22. Nas, J. S. Peonidin-3-glucoside extends the lifespan of *Caenorhabditis elegans* and enhances its tolerance to heat, UV, and oxidative stresses / J. S. Nas, R. V. Manalo, P. M. Medina. – ScienceAsia. – 2021. – № 47. – P. 457.
 23. Exploring the neuroprotective effects of chokeberry (*Sorbaronia mitschurinii*) extract on *Drosophila melanogaster* model of Alzheimer's disease / N. V. Zemskaya [et al.]. – Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Division of the Russian Academy of Sciences. – 2023. – № (0). – P. 7.
 24. OASIS portable: user-friendly offline suite for secure survival analysis / S. K. Han [et al.]. – Molecules and Cells. – 2024. – № 47 (2). – P. 100011.
 25. Nutrient-response pathways in healthspan and lifespan regulation / A. Dabrowska, J. Kumar, C. Rallisю – Cells. – 2022. – № 11 (9).
 26. Developing criteria for evaluation of geroprotectors as a key stage toward translation to the clinic / A. Moskalev [et al.]. – Aging Cell. – 2016. – № 15 (3). – P. 407–415.
 27. Nas, J. S. Delphinidin-3-glucoside prolongs lifespan and healthspan in *Caenorhabditis elegans* with and without environmental stress / J. S. Nas, P. Medina. – Journal of Applied Pharmaceutical Science. – 2023.
 28. Delphinidin-3-rutinoside relaxes the bovine ciliary smooth muscle through activation of ETB receptor and NO/cGMP pathway / H. Matsumoto [et al.]. – Experimental Eye Research. – 2005. – № 80 (3). – P. 313–22.
 29. Cyanidin and delphinidin modulate inflammation and altered redox signaling improving insulin resistance in high fat-fed mice / E. Daveri [et al.]. – Redox Biology. – 2018. – № 18. – P. 16–24.
 30. Oxidative stress-based cytotoxicity of delphinidin and cyanidin in colon cancer cells / J. Cvorovic [et al.]. – Archives of Biochemistry and Biophysics. – 2010. – № 501 (1). – P. 151–7.
 31. Delphinidin and its glycosides' war on cancer: preclinical perspectives / A. Sharma [et al.]. – International Journal of Molecular Sciences. – 2021. – № 22 (21).

Благодарность (госзадание):

Исследования выполнены в рамках государственного задания Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме «Генетические и функциональные исследования эффектов геропротекторных интервенций на модели *Drosophila melanogaster*» (№ 122040600022-1).

Acknowledgements (state task):

The research was performed within the framework of the state task of the Institute of Biology FRC Komi SC UB RAS under the theme "Genetic and functional studies of the effects of heroprotective interventions on *Drosophila melanogaster* model" (№ 122040600022-1).

Информация об авторах:

Платонова Елена Юрьевна – младший научный сотрудник Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; Scopus Author ID: 57217200914; ORCID 0000-0002-4632-2385 (167000, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28; e-mail: platonova.e.u@ib.komisc.ru).

Голубев Денис Анатольевич – младший научный сотрудник Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; Scopus Author ID: 57223300036; ORCID 0000-0003-0570-8211 (167000, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28; e-mail: denismeatboy@gmail.com).

Патов Сергей Александрович – кандидат химических наук, научный сотрудник Института химии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук (167000, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 48; e-mail: ser-patov@yandex.ru).

Некрасова Полина Сергеевна – младший научный сотрудник Института химии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук (167000, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 48; e-mail: nekrasova.polina@bk.ru).

Шапошников Михаил Вячеславович – доцент, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; Scopus Author ID: 7004704906; ORCID 0000-0002-4625-6488 (167000, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28; e-mail: shaposhnikov@ib.komisc.ru).

Москалёв Алексей Александрович – доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией геропротекторных и радиопротекторных технологий Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук (167000, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28; e-mail: amoskalev@ib.komisc.ru); ведущий научный сотрудник Института молекулярной биологии им. В. А. Энгельгардта; Scopus Author ID 7003730453, <https://orcid.org/0000-0002-3248-1633> (119991, Российская Федерация, г. Москва, ул. Вавилова, д. 32; e-mail: amoskalev@ib.komisc.ru).

About the authors:

Elena Yu. Platonova – Junior Researcher at the Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Scopus Author ID: 57217200914, ORCID 0000-0002-4632-2385 (28 Kommunisticheskaya st., Syktyvkar, Komi Republic, 167982 Russian Federation; e-mail: platonova.e.u@ib.komisc.ru).

Denis A. Golubev – Junior Researcher at the Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Scopus Author ID: 57223300036, ORCID 0000-0003-0570-8211 (28 Kommunisticheskaya st., Syktyvkar, Komi Republic, 167982 Russian Federation; e-mail: denismeatboy@gmail.com).

Sergey A. Patov – Candidate of Sciences (Chemistry), Researcher at the Institute of Chemistry, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (48 Pervomayskaya st., Syktyvkar, Komi Republic, 167000 Russian Federation; e-mail: ser-patov@yandex.ru).

Polina S. Nekrasova – Junior Researcher at the Institute of Chemistry, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (48 Pervomayskaya st., Syktyvkar, Komi Republic, 167000 Russian Federation; e-mail: nekrasova.polina@bk.ru).

Mikhail V. Shaposhnikov – Candidate of Sciences (Biology), Associate Professor, Leading Researcher at the Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Scopus Author ID: 7004704906, ORCID 0000-0002-4625-6488 (28 Kommunisticheskaya st., Syktyvkar, Komi Republic, 167982 Russian Federation; e-mail: shaposhnikov@ib.komisc.ru).

Aleksey A. Moskalev – Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Sciences (Biology), Head of the Laboratory of Geroprotective and Radioprotective Technologies at the Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; Scopus Author ID: 7003730453; <https://orcid.org/0000-0002-3248-1633> (28 Kommunisticheskaya st., Syktyvkar 167000, Komi Republic, Russian Federation; e-mail: amoskalev@ib.komisc.ru).

Для цитирования:

Платонова, Е. Ю. Исследование влияния природного антоциана дельфинидина на продолжительность жизни *Drosophila melanogaster* / Е. Ю. Платонова, Д. А. Голубев, С. А. Патов [и др.] // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Экспериментальная биология и экология». – 2024. – № 9 (75). – С. 92–97.

For citation:

Platonova, E. Yu. Issledovanie vliyaniya prirodnogo antociana delfinidina na prodolzhitel'nost zhizni *Drosophila melanogaster* [About the influence of the natural anthocyanin delphinidin on the lifespan of *Drosophila melanogaster*] / E. Yu. Platonova, D. A. Golubev, S. A. Patov, P. S. Nekrasova, M. V. Shaposhnikov, A. A. Moskalev // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series "Experimental Biology and Ecology". – 2024. – № 9 (75). – P. 92–97.

Дата поступления статьи: 14.06.2024

Прошла рецензирование: 16.07.2024

Принято решение о публикации: 20.08.2024

Received: 14.06.2024

Reviewed: 16.07.2024

Accepted: 20.08.2024

Migrations of the Long-tailed Duck in the European North-East of Russia

O. Y. Mineev, S. K. Kochanov

Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Syktyvkar

mineev@ib.komisc.ru
kochanov@ib.komisc.ru

Abstract

Arctic Russia is home to more than 90 % of all Long-tailed Ducks in the *Clangula hyemalis* species from the Western Siberia/Northern Europe population. The main wintering grounds of Long-tailed Ducks are situated in the Baltic Sea. The principal migratory routes of the Long-tailed Duck between the breeding and wintering grounds are relatively well-studied and follow the so-called Norwegian route along the Barents Sea coastline via the Pomorskiy Strait, over the Kolguyev Island, the Kaninskiy Peninsula and the White Sea. The secondary migration routes are still understudied. It has been determined that a portion of the population regularly migrates through the eastern part of Ukraine and European Russia, including the Komi Republic, the Kirov Region, the Nizhny Novgorod and Perm Regions, and the Republics of Udmurtia, Mari El, and Bashkortostan. Thus, a portion of the population utilises the «Volga-Caspian» migration route. This migration route is not as massive and covers a broad area. Long-tailed Ducks migrate in flocks of 4 to 56 individuals. Sometimes, there may be a higher intensity of migration. It is highly likely that the wintering grounds of these birds are located in the Caspian and Black Seas, where 4-5 thousand Long-tailed Ducks were counted within a relatively small area. A detailed study of all relevant ecological aspects is needed to contribute to the conservation of the Long-tailed Duck.

Ключевые слова:

secondary flyways, southern wintering sites, southernmost breeding area, Komi Republic

Introduction

The Long-tailed Duck breeds predominantly in Arctic tundra habitats, moving to marine areas for the non-breeding season. The species has a high Arctic circumpolar breeding distribution, and within the Eurasian region, it breeds predominantly in Russia, with smaller populations in Finland, Sweden, Norway, Iceland, and Greenland [1]. The key breeding sites are located in the Arctic freshwater habitats between the Kaninskiy and Yugorskiy Peninsulas [2, 3].

The Long-tailed Duck breeds in the European North-East of Russia, occupying the tundra, forest-tundra zones, and

Миграции морянки на европейском Северо-Востоке России

О. Ю. Минеев, С. К. Кочанов

Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
г. Сыктывкар

mineev@ib.komisc.ru
kochanov@ib.komisc.ru

Аннотация

В Российской Арктике обитает более 90 % популяции морянки *Clangula hyemalis*, гнездящейся в Западной Сибири/Северной Европе. Главные места зимовки морянок находятся на Балтийском море. Их основные миграционные пути между местами гнездования и зимовки изучены относительно хорошо и проходят по так называемому «норвежскому миграционному маршруту» вдоль побережья Баренцева моря через Поморский пролив, остров Колгуев, Канинский полуостров и Белое море. Второстепенные пути миграции изучены недостаточно полно. Установлено, что часть популяции регулярно мигрирует через восточную часть Украины и Европейской России, включая Республику Коми, Кировскую область, Нижегородскую и Пермскую области, а также Республики Удмуртия, Марий Эл и Башкортостан. Таким образом, часть популяции использует «Волго-Каспийский» миграционный путь. Этот миграционный путь не столь массовый и охватывает обширную территорию. Морянки мигрируют стаями от 4 до 56 особей. Иногда может наблюдаться более высокая интенсивность миграции. Весьма вероятно, что места зимовки этих птиц находятся в Каспийском и Черном морях, где на сравнительно небольшой территории было учтено 4-5 тыс. морянок. Детальное изучение всех соответствующих аспектов экологии морянки необходимо для сохранения этого вида.

Keywords:

второстепенные миграционные пути, южные районы зимовок, крайне южные места размножения, Республика Коми

extreme-north taiga subzone. It is highly abundant in tundra habitats, where it occupies all water bodies, from puddle-lakes to large lakes, rivers, channels, coastal sea areas, and bays. The Long-tailed Duck is best suited to habitats in coastal tundra areas and large lake systems with tundra areas that are overgrown with small and large dwarf Arctic birch [2, 3, 4].

During the breeding season, Long-tailed Ducks can be found in lakes of various sizes within the extreme-north taiga subzone, as well as in large and medium-sized peat-

lands. Our data shows that the southernmost nesting sites of these birds are located in the Usinsk and Inta Regions of the Komi Republic. On June 11-12, 2006, breeding pairs of ducks were repeatedly observed in Usinsk peatland. The meetings will take place at the following geographical coordinates: 65°45'38" N; 57°00'58" E and 65°51'46" N; 57°57'50" E. On July 9, 2017, a pair of ducks exhibiting breeding behaviour were observed in the lower course of the Sharyu River (66°09'37"N; 58°23'06"E). Long-tailed Ducks were observed on lakes in the Inta City area from June 24 to August 31, 1986 (66°03'40" N; 60°09'04" E). Nesting pairs were noted among them, and on June 29, separate broods of 5 and 6 ducklings were observed. During the period of August 11 to 31, joint broods of 5, 65, 41, 18, and 45 ducklings were observed. On June 30, 2007, pair of Long-tailed Ducks were shot in Lake Pagaty, located in the foothills of the Polar Urals at 66°23'36"N; 62°44'44"E. The female had an egg in its oviduct and the male had hypertrophied gonads. On June 25, 2007, a group of nine ducks were observed spending their summer on a mountain lake located in the upper reaches of the Paga River (66°22'12"N; 63°16'48"E). Ducks spending their summer were also recorded in the middle taiga zone of the Komi Republic (64°20'N) in the Shchugor River basin. Long-tailed Ducks were observed nesting in the taiga zone of the Semzha River basin at latitude 66°N in the Arkhangelsk Region in the 1950s [5]. In Churchill, Manitoba, Canada, this species inhabits the forest zone at latitude 58°N with a high population density [6].

The majority of the Long-tailed Ducks belonging to the North European/West Siberian population overwinter in the Baltic Sea [7, 8]. Recent studies, using genetic markers [9] and geolocator tracking [10, 11], confirmed that the Baltic Sea is the main wintering area for Long-tailed Ducks breeding in the tundra zone of European Russia and Western Siberia. The breeding population in European Russia was estimated to be about 5 million birds in the 1960s [12] but decreased to 1 million birds today [4]. Due to the large decline in the number of ducks wintering in the Baltic Sea since the mid-1990s (equivalent to a 59% decline in the global population over three generations), the Long-tailed Duck was classified as 'Vulnerable' on the International Union for Conservation of Nature (IUCN) Red List in 2012 [13]. The decline in the Long-tailed Duck population could be attributed to various anthropogenic and natural factors in both breeding and non-breeding areas. [13, 4]. The redistribution of wintering sites may be a contributing factor for this species.

The Long-tailed Duck is a long-distance migrant. The main migration routes of the species along the Barents Sea coast are well-studied, but alternative migration routes in the European North-East of Russia are poorly covered in the existing literature. The main objective of this study was to examine the migration patterns of the Long-tailed Duck, a species that has declined in Europe [14] and North America [15, 16]. The study focused on the Volga-Caspian flyway and aimed to assess the significance of this route for the entire population of the species. Obtaining data on the annual movements and key breeding, molting, wintering, and stopover sites of the Long-tailed Duck during migrations would help to better understand the reasons for the popula-

tion decline. The study results will serve to provide a reliable assessment of the status of this globally threatened species.

Methods and study areas

This study is based on our own published [2-4; 17-19] and unpublished data, as well as other literature sources. Field material on the migrations of Long-tailed Ducks was collected in the Nenets Autonomous District of the Arkhangelskaya Region (from the Kaninskij Peninsula in the west to the Yugorsky Peninsula in the east) and in the Komi Republic (Figure 1) in May-October from 1973 to 2022. Long-tailed duck movements were observed stationary during targeted waterfowl surveys, as well as on pedestrian and boating routes.



Figure 1. Study site – the Komi Republic and the Nenets Autonomous District where migrating Long-tailed Ducks were observed.

Рисунок 1. Район исследований – Республика Коми и Ненецкий автономный округ. Где наблюдались мигрирующие морянки

Migrations of the Long-tailed Duck

Migrations of the Long-tailed Duck in tundra of the European North-East of Russia

Spring migrations. The Long-tailed Duck's main direction of spring migration route follows along the sea coast and over the sea area of the Barents Sea (Figure 2). Some parts of duck winters annually on sea polynyas (open water areas in sea ice) in the vicinity of the Kolguyev Island and the Khaipudyrskaya Bay [2, 3, 10, 11]. Therefore, estimating the exact start of the spring migration of Long-tailed Ducks on the seashore is difficult. Long-tailed Ducks were observed on April 28 near the mouth of the Velt River. It is likely that these birds were wintering in ice-free areas of the Barents Sea [20]. Migratory birds were first observed on the laidas (coastal lowland marshes) of the lower course of the Velt River on May 25, and on May 27th a mass arrival began here, which continued until the end of the month [20, 21]. In the Sengeisky Island area, numerous flocks of Long-tailed Ducks migrated eastward along the Barents Sea coast on May 15-17, and intensive migration continued from May 22 until 26th in 1979 [2]. On June 9, the first ducks were recorded on the Shchuchaya River in the continental part of the Malozemel'skaya tundra [22]. Long-tailed Ducks appear in the Pechora delta when unfrozen patches of water appear on river wa-

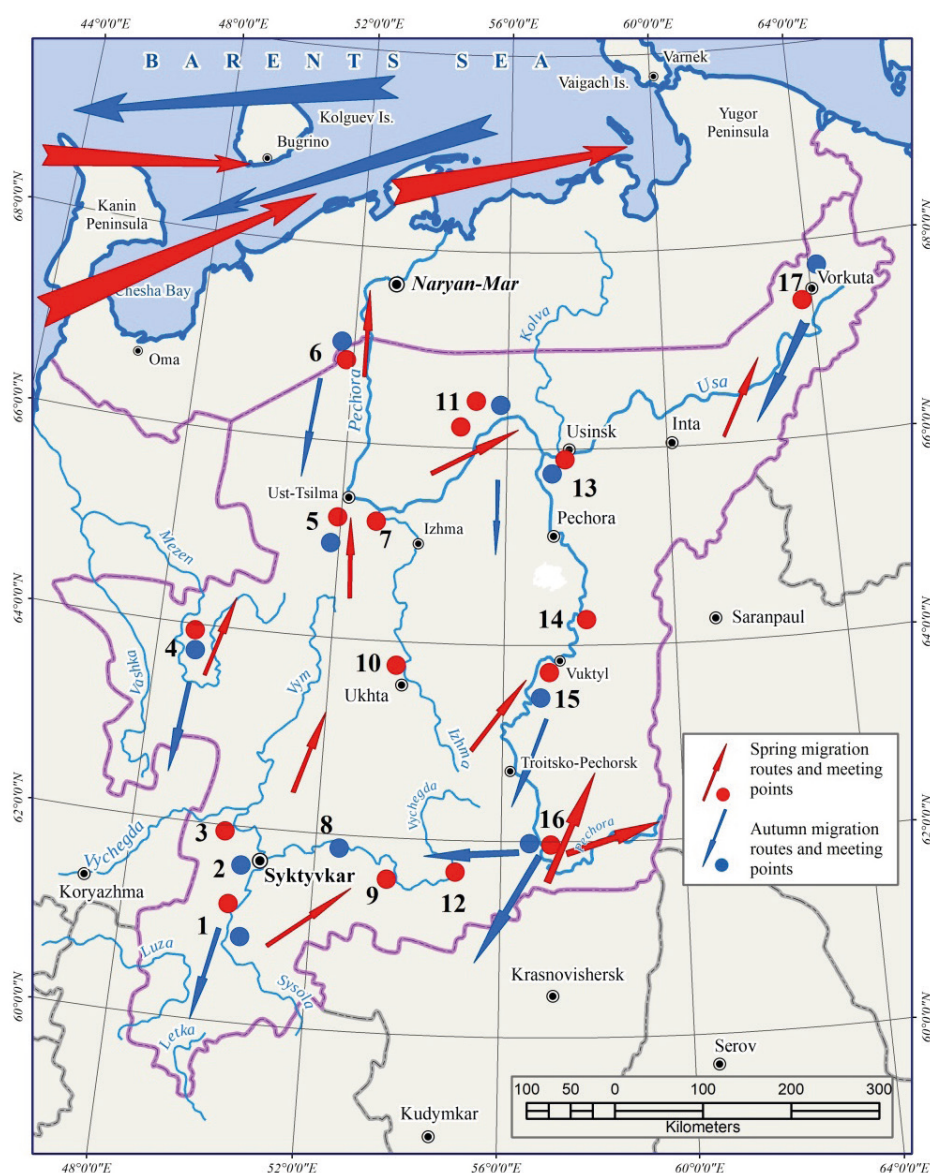


Figure 2. Directions of spring and autumn migration routes of the Long-tailed Duck and points of spring and autumn meetings of the species on the European North-East of Russia.

Рисунок 2. Направления весенних и осенних миграционных путей морянки и места встреч вида осенью и весной на европейском Северо-Востоке России.

tercourses. The transit migration of ducks in tundra habitats often lasts until the end of the first decade of June.

In the continental part of the Bolshezemelskaya tundra, Long-tailed Ducks appear in the presence of unfrozen patches of water on rivers and lakes. Flocks of Long-tailed Ducks were observed from 26 May to 11 June, on average ($n=9$ years) on 2 June. In the continental part of the Yugorskiy Peninsula, Long-tailed Ducks were recorded from 24 May to 8 June, mostly ($n=4$ years) on 29 May. The increase in the number of ducks in the Bolshezemelskaya Tundra lasted from 5 to 15 June, and on the Yugorskiy Peninsula from 12 to 19 June.

Summer migrations of Long-tailed Ducks are not pronounced. In the Malozemelskaya tundra, duck migration from the breeding grounds was recorded from 4 to 24 July, with an average of 14 July. At this time, flocks of Long-tailed Ducks, consisting of drakes or females, appeared on lakes and sea bays. Pre-moult concentrations of Long-tailed Ducks were observed on lakes, lower reaches and mouths of rivers,

coastal waters and sea bays from 1 July to 1 August, with an average of 12 July. Duck flocks can be numerous, the number of birds in them varying from 10 to 150, rarely up to 300 individuals. It is likely that the majority of birds are concentrated at sea, far from the coast. From the end of July to the first ten days of August, most of the ducks in the flocks moulted intensively.

Between June 21 and July 7, on average on July 1, non-breeding Long-tailed Ducks, mostly males, in the Bolshezemelskaya tundra migrated to the molt. During this period, drakes and female ducks gather in flocks on the lakes, and males of these flocks usually migrate in small groups of up to 20 individuals or, more commonly, float downstream into the lower courses of rivers that flow into the Barents Sea. Ducks flying away were recorded on the Yugorskiy Peninsula between June 23 and July 3. After the females have finished laying eggs, the drakes (flocks of 5-6 individuals) concentrate on rivers and lakes. The mass departure of drakes occurred between June 29 and July 14.

Autumn migrations have not been extensively studied. The main channel of the autumn migration passes over the Barents Sea [2, 3, 10, 11]. The departure of Long-tailed Ducks from the

Malozemelskaya tundra to wintering grounds occurs in the second half of August - early September. Small flocks and groups of ducks flying towards the northwest and west at this time. From mid-September, migration intensifies, and most Long-tailed Ducks fly to the Barents Sea. In the water areas of Korovinskaya and Kolokolkovaya bays and lakes, broods and some adult birds remain until the onset of freeze-up.

Long-tailed Ducks depart the Bolshezemelskaya tundra in mid to late September, in some years in early October. During this time, it was most common to observe migrating broods and small flocks of ducks. The autumn migration of Long-tailed Ducks on the Yugorskiy Peninsula starts in September, and finishing at the end of the freeze-up on lakes and the appearance of ice fields on the sea. On the Yugorskiy Shar Strait, flocks, groups and single ducks were observed until the second decade of October. Flocks of Long-tailed Ducks flying over the sea to the west were numerous on September 18-27 and October 2-8. At the same time, migratory bird

flocks were observed on lakes and rivers. Since October 8, numerous drakes in winter plumage have been appeared on the sea.

Migrations of the Long-tailed Duck in the Komi Republic

During the spring-autumn migration, Long-tailed Ducks are regularly observed in various regions of the Komi Republic (Figure 2). During spring migration, ducks typically fly in a northerly, northeasterly, or easterly direction. Autumn bird migration is observed in the same areas as spring migration. During autumn migration, ducks fly in a southerly, southwesterly, or westerly direction.

In the Sysola River basin, in the Vizinga village area, ducks are rare and are registered not every year in late May and early October. (Figure 2, Point 1). In September 2009, three Long-tailed Ducks were observed migrating along the Sysola River in the Vylgort village area [23] (Figure 2, Point 2).

In the Vychegda River basin, Aikino village area (Figure 2, Point 3), ducks are very rare, meetings were registered on May 8, 2007. In the Mezen River basin, Koslan village area (Figure 2, Point 4), ducks are rare, but are found every year on May 24-25. In autumn, small numbers of them are regularly found annually from September 28 to October 7. In the lower course of the Izhma River (Figure 2, Point 7), pairs and groups of long-tailed ducks are usually seen between May 25th and 30th. They are also recorded in small numbers every autumn, between September 28th and October 7th.

In the Lower Pechora, at the mouth of the Kharyaga River (Figure 2, Point 6), they are common in the third decade of May – first decade of June, as well as in the third decade of September – first decade of October. In the Middle Pechora River, in the mouth of the Laya River (Figure 2, Point 11), ducks occur annually in small numbers in late May – early June and in small groups in autumn. On the Pizhma River, near the village of Zagrivochnaya (Figure 2, Point 5), pairs and small flocks usually meet every year on 20-25 May. The Long-tailed Duck was observed in various locations within the Vychegda River basin. Ducks were registered in September 1969 in the Kortkeros village area (refer to Figure 2, Point 8) [24]. Several ducks were observed in the Ust-Kulom village area on May 21, 2018 (Figure 2, Point 9). Ducks are registered in small numbers in the Yugyd-Yag village area (Figure 2, Point 12) on May 18-21, but not every year. Small groups of Long-tailed Ducks are recorded annually on May 10-20 in the Ukhta River basin (Figure 2, Point 10). In the Upper Pechora River basin, ducks are regularly observed in the Sherdino village area (Figure 2, Point 15). Pairs and small flocks of ducks are seen in the third decade of May, and with a small number they are seen in the second decade of October. In the third decade of May, small numbers of Long-tailed Ducks were observed in the Podcherye village area (Figure 2, Point 14). The largest migration was observed in the Yaksha village area (Pechora-Ilychsky Nature Reserve) (Figure 2, Point 16).

Ducks are registered annually from May 16-24, and are relatively numerous, with groups ranging from 3-55 individuals. Their flight directions are typically northern, northeastern, and eastern. They are also regularly observed every year in autumn, from September 25 to October 22, in flocks of 5-56 individuals [25, 26]. In the Usy River basin, in the Usinsk city area (Figure 2, Point 13), pairs and groups of ducks migrate annually at the end of May at spring, and in the first decade of October in autumn. In the Vorkuta River basin (Figure 2, Point 17), the migration of numerous flocks of Long-tailed Ducks is typical every year during the periods from May 21-25 in spring and September 14-20 in autumn.

Occurrence of Long-tailed Ducks on migration in the Sysola River basin, in the Pechora-Ilychskij Nature Reserve and at the mouth of the Northern Dvina River, in % of all recorded *Anseriformes*

Встречаемость морянки на пролете в бассейне р. Сысола, в Печоро-Илычском заповеднике и в устье Северной Двины, в % от всех отмеченных гусеобразных

Lower course of the Sysola River 2008-2011 (our data)		Pechora-Ilychskij Nature Reserve 1956-1960 [25]		Pechora-Ilychskij Nature Reserve 1998-2008 [26]		Severnaya Dvina River mouth 1983-2001 [27]	
Spring	Autumn	Spring	Autumn	Spring	Autumn	Spring	Autumn
-	0.03	0.5	0.6	0.1	0.02	0.6	0.7

Discussion

The Long-tailed Duck remains the most numerous sea duck species in tundra of European North-East of Russia. It mainly inhabits grassy tundra close to the sea coast with numerous small, shallow freshwater lakes and marine marshes. The highest population densities are presented in the coastal areas of Malozemetskaya and Bolshezemetskaya tundra and Yugorskij Peninsula.

The primary spring-autumn migration route of Long-tailed Ducks passes along the coast of the Barents Sea, through the Pomorskij Strait, across Kolguev Island, the Kaninsky Peninsula, and the White Sea.

The spring-autumn migration route of Long-tailed Ducks in the Komi Republic may have formed historically long time ago (Figure 2), however, the current volume of this migration is low. Long-tailed Ducks are observed in small numbers every spring in various river basins including Mezen River basin (in the Koslan village area), the lower reaches of the Izhma River, and the basins of the Pizhma, Ukhta, Vychegda, Sysola, Kharyaga, Laya, Usa, Vorkuta and Pechora rivers. The Pechora River's upper course (Pechora-Ilychsky Nature Reserve) experiences the highest levels of mass migration, with annual sightings of groups ranging from 3 to 55 birds. It should be noted that in recent years the number of migratory Long-tailed Ducks on this migration route has decreased. Based on studies conducted in the Pechora-Ilychsky Nature Reserve, the proportion of migratory birds among *Anseriformes* was found to be 0.5 % in spring (Table) and 0.6 % in autumn in 1964 [25]. In the years 1998-2008, the proportion decreased to 0.1 % in spring and 0.02 % in autumn [26].

The Long-tailed Duck is likely to use this migration route to reach alternative wintering sites. In addition to the traditional wintering sites of Long-tailed Ducks in the Baltic and Norwegian Seas, several wintering sites are known in the Caspian and Black Seas, where wintering a small part of the population.

Small wintering concentrations of Long-tailed Ducks in the Caspian Sea were described already by [28]. Currently (in January 2015), during helicopter surveys conducted on a short section of the route in the northern part of the Caspian Sea (near the Bautino village, Figure 3, Point 1), at least 3.7 thousand Long-tailed Ducks were observed 3 km from the coast. They are kept in monospecific flocks of 1500, 1000, and 500 individuals. In addition, flocks of 30-150 Long-tailed Ducks were observed among large flocks of Goldeneyes *Bucephala clangula*. In January 2013, in the same area, among a concentration of Goldeneyes, flocks of Long-tailed Ducks up to 150 individuals in size were recorded. A total of 800 birds were counted [29].

In addition to the Caspian Sea, the wintering grounds of Long-tailed Ducks are also known in other southern regions. In January 1970, a large concentration of Long-tailed Ducks was noted in Kazakhstan at the Chardarinskoe reservoir east of the Caspian Sea, where about 600 individuals were counted [30]. Wintering grounds of the Long-tailed Duck in the northern part of the Black Sea is described by Z. O. Petrovich and K. O. Redinov [31]. During field work on the Dnieper-Bugskij liman (Fig. 3. Point 2) in 2000-2009 Long-tailed Ducks were recorded annually in winter in the area of Berezan Island. Recorded flocks have varied in size from 40 to 500 individuals. The authors believe that this species of duck has wintered in this location previously, but it was not discovered due to the complexity of the surveys. Meetings of the species in winter in the Northern Black Sea region were recorded in the 19th and early 20th centuries. In the early 20th century, it was observed that ducks were migrating in significant numbers during the spring. Autumn migration has been observed since mid-October. More than 500 Long-tailed Ducks were registered in the southern part of the Dnieper-Bugskij liman in late autumn in the 1950s, and in February 1961 about 100 individuals were recorded. Birds have been recorded in the area in small numbers almost every year between 1975 and 1984, with a maximum of 48 individuals. In January 1977, there were 15 individuals counted, and in January 1986, there were 70 individuals [31].

Long-tailed ducks are periodically found in the upper Dniester valley. The species' earliest records date back to March 1879 and January 1914. From 1993 to 1998, single birds and pairs of female Long-tailed Ducks were recorded annually from November to March at a reservoir near Burshtyn town



Figure 3. Migration routes and wintering sites of the Long-tailed Duck on the European part of Russia. Рисунок 3. Пути пролета и места зимовок морянки на европейском Северо-Востоке России

in the Ivano-Frankovskij region (Figure 3, Point 3). In previous years, there were registered groups consisting of 4-5 individuals and 13 individuals [32]. Wintering Long-tailed Ducks have been recorded in Dagestan (from the mouth of the Manas-Ozen River to Derbent, Figure 3, Point 4), in Kalmykia (Lake Manych-Gudilo, Figure 3, Point 5), in the Krasnodar region (in the Azov region in the area of Yeisk, Figure 3, Point 6, in the Kuban delta, Figure 3, Point 7, in the Novorossiysk area, Figure 3, Point 8) and in Abkhazia (Pitsunda Bay, Figure 3, Point 9) [33].

The birds registered are probably part of the population of Long-tailed Ducks that wintering on the Black Sea. Ducks wintering on the Black and Caspian Seas migrate along the riverbeds of the Volga and other rivers in the Rostov (Figure 3, Point 10), Astrakhan (Figure 3, Point 11), Volgograd (Figure 3, Point 12), Voronezh (Figure 3, Point 13) and Saratov regions (Figure 3, Point 14) [33]. Then follow the Kama and Volga river beds in Tatarstan (Figure 3, Point 15), where a massive migration was observed in the autumn of 1892. At the end

of the 20th century, the species was not numerous during migrations in this area. The Long-tailed Duck is also a migratory bird in the Nizhny Novgorod (Figure 3, Point 16) and Perm regions (Figure 3, Point 17), Republics of Mari El (Figure 3, Point 18) and Udmurtia (Figure 3, Point 19). On the territory of the Kirov region (Figure 3, Point 20), Long-tailed Duck is meets in spring and autumn during migration. Evidence of meetings of this species is sparse. Long-tailed Ducks were observed on migration almost every year during the 19th and 20th centuries [34]. In 1988, 1989, 1992, 1995, 1997, 1998 Long-tailed Duck was registered only in the spring in the Kirov city area ("Filippovka" fish farm). Long-tailed Ducks were recorded migrating on this location during the autumns of 1927, 1928, 1936, 1940, 1955, and 1956. Flocks of up to 30 Long-tailed Ducks have been observed [34]. Birds from the Kirov region migrate to the Komi Republic (Figure 2) by flying along river beds to the north and east until they reach their breeding grounds. In the north-western part of Kazakhstan, autumn and spring migrations of Long-tailed Ducks have been regularly recorded [35].

We believe that stable flyways of Long-tailed Ducks in the continental part of European Russia have existed historically considerable period. The data presented on the Long-tailed Duck's flyways in mainland of European Russia allows us to conclude that they connect the breeding grounds of the species in the European North-East of Russia with the southern wintering grounds on the Black and Caspian Seas. A part of the duck population has always used these areas for wintering, and depending on natural conditions, it can periodically winter there in greater numbers.

Conclusion

Based on the data obtained, it can be concluded that the breeding grounds of birds that winter in the Black and Caspian Seas are located in the forest-tundra zone and the extreme northern taiga of the Komi Republic and the Arkhangelsk region. It is possible that their breeding grounds are also located in Western Siberia, but there is insufficient data for a final conclusion. Furthermore, it is reasonable to assume that long-tailed ducks may have altered their customary wintering sites in the Baltic Sea and started to winter in larger quantities in the Black and Caspian Seas. For instance, a comparable situation arose with the Ruff *Philomachus pugnax*. In recent decades, this species has changed its important stopover sites during migration in the Netherlands to stopover sites in Belarus, in the Pripyat River basin [36].

Thus, it is likely that the flight routes of Long-tailed Ducks in the eastern and northeastern parts of European Russia along the Volga-Caspian migration route have developed historically and exist for a considerable time, been quite stable. Further study of them is required. To clarify the number of Long-tailed Ducks in wintering grounds and their annual dynamics in the waters of the Black and Caspian Seas, regular and large-scale studies are necessary. This includes regular aerial visual surveys and the development of special programs such as duck ringing and the use of satellite telemetry. These programs should involve not only ornithologist

specialists but also volunteers. Furthermore, a study should be conducted to identify genetic variations between the European and Siberian Long-tailed Duck populations.

The authors declare no conflict of interests.

References

1. Kear, J. Ducks, geese and swans / J. Kear. – Oxford, UK : Oxford University Press, 2005. – Volume 16. – P. 1-908.
2. Mineev, Y. N. Pticy Malozemel'skoj tundry i del'ty Pechory [Birds of Malozemel'skaya tundra and the Pechora Delta] / Y.N. Mineev, O.Y. Mineev. – Saint-Petersburg : Nauka, 2009. – 263 p.
3. Mineev, Y. N. Pticy Bolshezemel'skoj tundry i Yugorskogo poluostrova [Birds of Bolshezemel'skaya tundra and the Yugor Peninsula] / Y.N. Mineev, O.Y. Mineev. – Saint-Petersburg : Nauka, 2012. – 383 p.
4. Mineev, O. Population status of the globally threatened Long-Tailed Duck *Clangula hyemalis* in the northeast European tundra / O. Mineev, Y. Mineev, S. Kochanov, A. Novakovskiy // Diversity, 2023, 15, 666. – URL: <https://doi.org/10.3390/d15050666>.
5. Spangenberg, E. P. Pticy severo-vostochnogo poberezh'ya Belogo morya [Birds of the north-eastern coast of the White Sea] / E. P. Spangenberg, V. V. Leonovich // Proceedings of the Kandalaksha State Nature Reserve. – 1960. – 2nd issue. – P. 213–336.
6. Matthew, C. P. Population demographics and breeding ecology of the Long-tailed Duck (*Clangula hyemalis*) in the Churchill, Manitoba area. In: Hudson Bay Region Research / C. P. Matthew, M. R. Alison. – Aboriginal Issues Press, University of Manitoba, 2010. – P. 88–91.
7. Pihl, S. Mapping of wintering diving ducks in the Baltic Sea / S. Pihl // TemaNord. Nordisc Ministerrad. – 1995. – P. 1–56.
8. Scott, D. Atlas of Anatidae populations in Africa and Western Eurasia / D. Scott, P. Rose // Wetlands International Publication : Wageningen, the Netherlands, 1996. – № 41. – 336 p.
9. Švažas, S. Population structure among breeding and wintering Long-tailed Ducks *Clangula hyemalis* in the Western Palearctic / S. Švažas, A. Sruoga, A. Paulauskas, D. Butkauskas // Ornithologica. – 2005. – Issue 15. – P. 206–211.
10. Karwinkel, T. Year-round spatiotemporal distribution pattern of a threatened duck species breeding on Kolguev Island, south-eastern Barents Sea / T. Karwinkel, I. Pollet, S. Vardeh, H. Kruckenberg, P. Glazov [et al.] // BMC Ecology. – 2020. – Vol. 20. – 31 p.
11. Quillfeldt, P. Year round movements of Long tailed Ducks *Clangula hyemalis* from Kolguev Island, Barents Sea / P. Quillfeldt, J. Morkūnas, H. Kruckenberg, A. Kondratyev, J. Loshchagina [et al.] // Polar Biology. – 2022. – Vol. 45. – P. 71–87. – URL: <https://doi.org/10.1007/s00300-021-02973-7>.
12. Uspenskiy, S. M. Vodoplavayushhie pticy v Sovetskoj Arktike i Subarktike, raspredelenie, zapasy, voprosy khozyajstvennogo ispolzovaniya [Waterfowl in the Soviet Arctic

- and Subarctic, distribution, resources, question of economic use] / S. M. Uspenskiy // Proceedings of the Meeting "Geography of waterfowl resources in the USSR, state of reserves, ways of their reproduction and correct use". – Moscow : Moscow Society of Naturalists & Institute of Geography Acad. of Sciences of the USSR. – 1965. – Issue 1. – P. 48–50.
13. Hearn, R. International single species action plan for the conservation of the long-tailed duck *Clangula hyemalis* / R. Hearn, A. Harrison, P. Cranswick // AEW Technical Series. – 2015. – № 5. – P. 2016–2025.
 14. Skov, H. Waterbird populations and pressures in the Baltic Sea. Norden Report / H. Skov, S. Heinänen, R. Žydelis, J. Bellebaum, S. Bzoma [et al.]. – Norden : Hellerup, Denmark, 2011.
 15. Dickson, D. L. Status of marine birds of the southeastern Beaufort Sea / D. L. Dickson, H. G. Gilchrist // Arctic. 55 (SUPPL. 1). – 2002. – P. 46–58.
 16. Bowman T., Silverman D. E., Gilliland S. G., Leirness J. B. Status and trends of North American sea ducks. New York: Ecol. Conserv. North Am. sea ducks Stud. Avian Biol. CRC Press. 2015. P. 1–28.
 17. Mineev, Y. N. Vodoplavayushhie pticy Bolshezemelskoj tundry. Fauna i ekologiya [Waterfowls of Bolshezemelskaya tundra. Fauna and ecology] / Y. N. Mineev. – Leningrad : Nauka, 1987. – 110 p.
 18. Mineev, Y. N. Guseobraznye pticy v vostochno-evropejskix tundra [*Anseriformes* of the Eastern European tundra]. Ural Branch of the Russian Academy of Science, Ekaterinburg, 2003. 226 p.
 19. Mineev, O. Y. Vodoplavayushhie pticy Malozemelskoj tundry i delty r. Pechory [Waterfowl of Malozemelskaya tundra and the Pechora River Delta]. Ural Branch of the Russian Academy of Science, Ekaterinburg, 2005. 161 p.
 20. Mikheev, A. V. Materialy k izucheniyu pereletov pticz v SSSR [Materials of bird passages studies in USSR] // Scientific records of Moscow State Lenin Pedagogical Institute. Vol. I. Moscow, 1953. Issue 74. P. 113–146.
 21. Gladkov, N. A. Pticy Timanskoj tundry [Birds of Timan tundra] // Archives of Zool Mus. of Moscow Univ. 7. 1951. P. 15–89.
 22. Semenov, B. T. Oxotnichyi pticy Tianskoj tundry [Game birds of Timan tundra] // Bull. State Geogr. Soc. Moscow, 1939. Issue 71. P. 569–579.
 23. Danilova E. V., Kochanov S. K., Nakul G. L. Vesennaya migraciya utok v bassejne reki Sysoly (Respublika Komi) [Spring migration of ducks in the Sysola River basin (Komi Republic)] // Messenger of the Chelyabinsk pedagogical university. Chelyabinsk. 2010. № 12. P. 323–333.
 24. Ostroumov, A. N. Zhivotnyj mir Komi ASSR [Fauna of the Komi ASSR]. Syktyvkar, 1972. P. 99–100.
 25. Sokolsky, S. M. Prolyot vodoplavayushhix pticz v verkhovyakh Pechory [Migration of waterfowl in the upper reaches of the Pechora] // Proceedings of the Pechoro-Ilych Nature Reserve. Moscow, 1964. Issue 11. P. 83–124.
 26. Teplov, V. V. Rezultaty monitoringa guseobraznykh na vesennem i osennem proletax v Pechoro-Ilychskom zapovednike (1956–2008 gg.) [Results of monitoring of *Anseriformes* on spring and autumn migrations in the Pechoro-Ilych Nature Reserve (1956–2008)] // Proceedings of the Pechoro-Ilych Nature Reserve. Issue 16, Syktyvkar, 2010. P. 170–173.
 27. Andreev, V. A. Ekologicheskie osobennosti migracii guseobraznykh ustyevoj oblasti Severnoj Dviny [Ecological features of migration of *Anseriformes* in the mouth area of the Severnaya Dvina] // Dis. Ph.D. biol. Sci. – Moscow, 2005. 202 p.
 28. Mensbir, M. A. Pticy Rossii [Birds of Russia]. Moscow, 1895. Vol. 1. P. 633–637.
 29. Kovshar V. A., Karpov F. F. O zimnix vstrechax moryanki *Clangula hyemalis*, singi *Melanitta nigra* i turpana *Melanitta fusca* v severo-vostochnoj chasti Kaspijskogo morya gde mnogochislenny predmigracionnye skopleniya moryanki [Winter records of the Long-tailed Duck *Clangula hyemalis*, the Common Scoter *Melanitta nigra* and the Velvet Scoter *Melanitta fusca* in the northeastern part of the Caspian Sea] // Russian Ornithological Journal. Saint-Petersburg, 2017. Vol. 26. Express-issue 1500. P. 3953–3954.
 30. Auezov E. M., Bikbulatov M. N. Zimovka vodoplavayushhix pticz na yuge Kazaxstana v 1970 godu [Wintering of waterfowl in the south of Kazakhstan in 1970] // Resources of waterfowl of the USSR, their reproduction and use. Vol. 2. Moscow. 1972. P. 108–110.
 31. Petrovich Z. O., Redinov K. O. Status moryanki, singi i obyknovennogo turpana v Severnom Prichernomor'e [Status of the Long-tailed Duck, the Black Scoter and the Common Scoter in the Northern Black Sea region] // Branta : Collection of scientific works of the Azov-Black Sea ornithological station, 2009. Vol. 12. P. 161–167.
 32. Buchko, V. V. Moryanka v doline Verxnego Dnestra [Long-tailed Duck in the Upper Dniester valley] // Avifauna of Ukraine. 1998. Issue 1. P. 95–97.
 33. Belik, V. P. Pticy yuzhnoj Rossii. Tom 1. Nevorobyinye. Materialy dlya kadastra [Birds of Southern Russia. Volume 1. Non-passerines. Materials for the cadaster]. Rostov-on-Don-Taganrog. South Federal University Publishing House. 2021. 812 p.
 34. Sotnikov, V. N. Pticy Kirovskoj oblasti i sopredelnykh territorij [Birds of the Kirov region and adjacent territories]. Vol. 1. Non-passerines. Part 1. Kirov, 1999. 432 p.
 35. Dolgushin, I. A. Pticy Kazakhstana [Birds of Kazakhstan]. Volume 1. Publishing house of the Academy of Sciences of the Kazakh SSR. Alma-Ata, 1960: 469 p.
 36. Karlionova, N. V. Migracionnaya strategiya turukhtana *Philomachus pugnax* v Vostochnoj Evrope [Migration strategy of the Ruff *Philomachus pugnax* in Eastern Europe]. LAP LAMBERT Academic Publishing. 2013. 140 p.

Acknowledgements (state task):

The study was carried out within the state assignment No 122040600025-2 at the Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Благодарность (госзадание):

Исследования выполнены в рамках государственного задания Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН № 122040600025-2.

About the authors:

Oleg Y. Mineev – Candidate of Sciences (Biology), Researcher at the Department of Animal Ecology of the Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; Scopus Author ID: 6701801840, <http://orcid.org/0000-0002-6587-8653> (28 Kommunisticheskaya st., Syktyvkar, Komi Republic, 167982 Russian Federation; e-mail: mineev@ib.komisc.ru).

Sergei K. Kochanov – Candidate of Sciences (Biology), Senior Researcher at the Department of Animal Ecology of the Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; Scopus Author ID: 55854436300, <http://orcid.org/0000-0002-5810-6452> (28 Kommunisticheskaya st., Syktyvkar, Komi Republic, 167982 Russian Federation; e-mail: kochanov@ib.komisc.ru).

Информация об авторах:

Минеев Олег Юрьевич – кандидат биологических наук, научный сотрудник отдела экологии животных Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; Scopus Author ID: 6701801840, <http://orcid.org/0000-0002-6587-8653> (167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28; e-mail: mineev@ib.komisc.ru).

Кочанов Сергей Калистратович – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник отдела экологии животных Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; Scopus Author ID: 55854436300, <http://orcid.org/0000-0002-5810-6452>. (167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28; e-mail: kochanov@ib.komisc.ru).

For citation:

Mineev, O. Y. Migrations of the Long-tailed Duck in the European North-East of Russia / O. Y. Mineev, S. K. Kochanov // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series "Experimental Biology and Ecology". – 2024. – № 9 (75). – P. 98–105.

Для цитирования:

Минеев, О. Ю. Миграции морянки на европейском Северо-Востоке России / О. Ю. Минеев, С. К. Кочанов // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Экспериментальная биология и экология». – 2024. – № 9 (75). – С. 98–105.

Received: 30.10.2024

Reviewed: 01.11.2024

Accepted: 13.11.2024

Дата поступления статьи: 30.10.2024

Прошла рецензирование: 01.11.2024

Принято решение о публикации: 13.11.2024

Влияние минеральных и органических удобрений на снижение токсичности солей и урожайность хлопчатника в условиях засоленных почв южного Таджикистана

Ш. И. Ходжаев, С. Ш. Ходжаев, С. Султонов

Институт почвоведения и агрохимии Таджикской академии сельскохозяйственных наук,
Республика Таджикистан, г. Душанбе
Sharif_120696@mail.ru

Аннотация

В статье приведены результаты многолетних исследований по влиянию минеральных и органических удобрений на снижение токсичности солей и урожайности хлопчатника на вторично засоленных почвах в условиях Хатлонской области Таджикистана. Установлено, что совместное внесение минеральных и органических удобрений на засоленных землях улучшает питательный режим, снижает концентрации токсичности солей, позволяет получать качественный и высокий урожай хлопчатника.

Ключевые слова:

минеральные и органические удобрения, токсичность солей, хлопчатник, засоление, почва, урожайность

Введение

Таджикистан является древнейшей земледельческой страной. Вся Передняя Азия, Европа, а также Индия и Китай используют земледельческие культуры, зародившиеся в Таджики, и дающие миру методы интенсивного земледелия и огромный набор пород и сортов возделываемых растений. Древняя Таджики не только создала и развила многие земледельческие культуры, но довела некоторые из них до предельного совершенства [1]. Республика Таджикистан, занимая сравнительно небольшую территорию (143,1 тыс. км²), имеет весьма сложное геологическое строение и рельеф. На территории республики на дневную поверхность выходят горные породы, образованные в различное время от архей-протерозоя до четвертичного периода. Горные породы представлены различными типами, как по своему генезису так и по их литологическим особенностям. Значительные площади территории республики занимают изверженные породы [2].

Орошаемое земледелие – самый продуктивный сектор сельскохозяйственного производства. В Таджикистане 90 % продукции сельского хозяйства получают на орошаемых землях. В сельском хозяйстве занято около 70 % экономически активного населения республики, и его доля в ВВП составляет около 25 %.

The role of mineral and organic fertilisers in reducing the toxicity of salts and increasing the cotton yield in saline soils of Southern Tajikistan

Sh. I. Khodzhaev, S. Sh. Khodzhaev, S. Sultonov

Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Tajik Academy of Agricultural Sciences,
Republic of Tajikistan, Dushanbe
Sharif_120696@mail.ru

Abstract

The article presents the long-term research results on the role of mineral and organic fertilisers in reducing the toxicity of salts and increasing the cotton yield in secondary saline soils in the Khatlon Region of Southern Tajikistan. The combined application of mineral and organic fertilisers to saline soils has been found to improve the soil nutritional regime, decrease the salt toxicity, and increased the quality and quantity of the cotton yield.

Keywords:

mineral and organic fertilisers, salt toxicity, cotton plant, salinity, soil, yield

Растениеводство в речных долинах, богатых водными ресурсами, было развернуто в советское время за счет расширения сетей искусственного орошения. В результате площадь орошения увеличилась с 450 тыс. га в 1960 г. до 763 тыс. га в 2023 г. Общее количество пригодных для орошения земель в республике составляет 1,6 млн га, из них в настоящее время освоено 763 тыс. га. Орошаемая площадь Таджикистана за период 1930–2023 гг. увеличилась в 8,2 раза, а население – более, чем в 10 раз. Следовательно, год за годом уменьшается удельная площадь орошаемых земель на одного человека, и в настоящее время она составляет 0,07 га/чел.

По данным гидромелиоративной экспедиции Агентства мелиорации и ирригации при Правительстве Республики Таджикистан, на 1 января 2023 г. общая площадь засоленных почв в орошаемой зоне составила свыше 62 151 тыс. га. Из них 3222 тыс. га – сильнозасоленные почвы, 12 454 тыс. га – средnezасоленные и 46 475 тыс. га – слабозасоленные почвы. В осенне-зимний период 2022 г. осуществлена промывка засоленных почв на площади 12 409 га и на 22 541 га очищена коллекторно-дренажная сеть.

По республике на площади 21 281 га имеются земли с критической глубиной уровня (меньше 1 м) грунтовых вод и более 36 200 га орошаемых земель находятся в неудовлетворительном мелиоративном состоянии. Продо-вольственная проблема становится все более острой, и решать ее придется за счет повышения продуктивности существующих угодий, в основном орошаемых, и освоения новых орошаемых площадей, резерв которых в республике составляет порядка 837 тыс. га.

Задачей отрасли сельского хозяйства на период до 2025 г. и далее является обеспечение населения ре-спублики продуктами питания и сельскохозяйственным сырьем в объемах не ниже требуемых нормативов. Ожи-дается, что 40–84 % требуемого роста потребностей сель-скохозяйственной продукции будет покрыто за счет роста урожайности сельскохозяйственных культур, остальная его часть должна будет решаться за счет привлечения (освоения) дополнительных земельных и водных ресурсов.

Цель настоящего исследования – выявление оптималь-ных норм внесения минеральных и органических удобре-ний, позволяющих снижать токсичность солей и повышать урожайность хлопчатника в условиях засоленных земель южного Таджикистана.

Материалы и методы

В полевой обстановке для изучения эффективности совместного влияния минеральных и органических удо-брений в уменьшении токсичности остаточно-засоленных почв на урожайность хлопчатника заложены опыты на слабо- и средnezасоленных почвах с хлорид-но-сульфатным типом засоления в дехканском хозяйстве «Хулафои Рошидин» Джалолидин Балхийского района Хатлонской области (Ка-ралангский массив, Вахшская долина).

Опытный участок осенью 2018 г. был вспахан на глубину 35–40 см, а весной 2019 г., после предварительного внесения минераль-ных и органических удобрений, перед посе-вом произведена перепашка почвы. Мине-ральные удобрения вносились из расчета: азота 250 кг/га (в виде карбамида) и 200 кг/га P_2O_5 (в форме суперфосфата). Навоз был вне-сен из расчета 20 и 30 т/га.

В период 2018–2020 гг. были проведены по-левые опыты с хлопчатником согласно обще-принятой методике.

Взятые почвенные, водные и растительные образцы подвергались химическим анализам, в частности в них определяли содержание гумуса (по методу Тюрина), общего азота (по методу Кельдаля), нитратного азота (по мето-ду Шафферштейна, Липкинда и Савве), амми-ачного азота (с помощью реактива Неслера), валового фосфора (по методу Гинзбурга и Ще-гловой), подвижного фосфора (по методу Ма-чигина), калия (по методу Протасова в 1 %-ной углеаммонийной вытяжке).

Результаты и их обсуждение

Результаты определения исходного содержания рас-творимых солей в начале вегетации показали, что наи-большая их концентрация наблюдается в пахотном слое 0–40 см и в 2 раза больше, чем в нижних горизонтах (табл. 1). Это свидетельствует о том, что в зоне светлых сероземов из-за небольшого количества осенне-зимних осадков не происходит вымывания солей из верхних слоев почвы в нижние. В данном случае замечен факт подтяги-вания солей вверх. По содержанию ионов хлора наиболее опресненными оказались горизонты 40–60 (0,021 %) и 60–80 см (0,020 %).

В табл. 1 приведены результаты исследований по вли-янию нормы минеральных и органических удобрений на снижение концентрации токсичности солей в условиях засоленных почв южного Таджикистана. Как показали результаты исследований, после действия минеральных и органических удобрений на варианте N250P200 (Фон) содержание анионов хлора, сульфата и гидрокарбонатов относительно исходных значений уменьшилось в пахотном слое на 0,011, 0,190 и 0,008 %, соответственно, в подпахот-ном слое – на 0,005, 0,317 и 0,005 % соответственно. Такая картина наблюдается на варианте «Фон+20 т/га навоза».

Наибольшее влияние минеральных и органических удобрений на снижение токсичности солей наблюдается у варианта «Фон+30 т/га навоза», где содержание анио-нов хлора, сульфата и гидрокарбонатов уменьшилось на 0,017, 0,222 и 0,011 % относительно исходного их значения. Показано, что действия минеральных и органических удо-

Таблица 1

Содержание водорастворимых солей (%) в почве опытного участка в конце вегетации (в среднем за 2019–2020 годы).

Table 1

Content of water-soluble salts (%) in the soil of the experimental plot at the end of the growing season (2019–2020)

Глубина см	Сухой остаток	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{--}	Ca^{++}	Mg^{++}	Na^+
Исходное содержание (Контроль)							
0–20	1,35	0,029	0,047	0,824	0,263	0,023	0,091
20–40	1,55	0,023	0,024	0,972	0,259	0,039	0,119
40–60	0,61	0,018	0,021	0,394	0,131	0,024	0,014
60–80	0,63	0,088	0,020	0,365	0,123	0,021	0,034
N250P200 (Фон)							
0–20	1,02	0,021	0,036	0,634	0,233	0,021	0,071
20–40	0,95	0,018	0,019	0,655	0,218	0,032	0,104
40–60	0,56	0,011	0,016	0,276	0,115	0,025	0,020
60–80	0,60	0,031	0,021	0,211	0,106	0,020	0,064
Фон+20 т/га навоза							
0–20	1,22	0,021	0,035	0,756	0,241	0,019	0,075
20–40	1,42	0,018	0,020	0,853	0,247	0,032	0,106
40–60	0,54	0,012	0,018	0,363	0,125	0,021	0,025
60–80	0,57	0,080	0,016	0,338	0,118	0,020	0,031
Фон+30 т/га навоза							
0–20	1,05	0,018	0,030	0,602	0,220	0,014	0,052
20–40	1,12	0,014	0,017	0,746	0,228	0,027	0,084
40–60	0,42	0,010	0,014	0,343	0,121	0,020	0,021
60–80	0,48	0,065	0,016	0,352	0,122	0,022	0,023

брений в значительной степени снизили содержание токсичности солей (см. табл. 1).

Следует отметить, что при промывном режиме орошения высокой агротехникой и рациональном применении минеральных и органических удобрений такое содержание водорастворимых солей вряд ли может оказать сильное токсическое действие на хлопчатник.

В результате многолетних исследований по тканевой диагностике и хлоридному засолению почв содержание ионов хлора и натрия в тканях хлопчатника возрастает с увеличением степени засоления почв. Концентрация хлорид-ионов наиболее высокая в фазе 3–4 настоящих листьев, к концу вегетации она незначительно снижается. Количество же ионов натрия больше накапливается к концу вегетации.

Почвы исследуемой территории представлены светлыми серозёмами, которые характеризуются незначительным содержанием питательных веществ. В пахотном слое содержание гумуса составляет 1,0–1,3 %, азота – 0,062–0,040 %. Обеспеченность подвижными фосфатами в целом низкая, а калием – довольно хорошая.

На промытых хлоридных солончаках внесение минеральных удобрений обеспечивает получение относительно высокого урожая хлопка-сырца. Внесение навоза дает некоторую дополнительную прибавку урожая. На промытых гипсоносных солончаках без внесения удобрений и при внесении только минеральных удобрений урожай отсутствовал. Добавка навоза способствовала нормальному развитию растений и получению хорошего урожая хлопка-сырца. Эффективность удобрений на засоленных почвах и при освоении солончаков зависит от концентрации токсичных солей, находящихся в корнеобитаемом слое почвы в период вегетации. При избыточном засолении почвы невозможно ожидать того, что сильно угнетенные растения могут развиваться нормально и давать высокие урожаи только за счет улучшения условий минерального питания. Гораздо больше возможностей открывается при сочетании этого приема с мероприятиями по опреснению почв промывными поливами, или разбавлением концентрации почвенного раствора оросительной водой посредством регулирования режима орошения. Следует отметить, что для культурных растений, в том числе для хлопчатника, пределы колебания содержания вредных солей в почве весьма узкие, по сравнению с фактическими количествами солей, имеющихся в сильнозасоленных почвах и солончаках. Полученные нами результаты согласуются с данными других авторов [3–6].

Избыток соли – это стресс-фактор, на который большинство культур реагируют снижением урожайности. Засоление наносит вред сельскому хозяйству больше, чем засуха и морозы, так как действует постоянно. Даже при слабом засолении ежегодно теряется около 20 % урожайности, а на сильнозасоленных землях потери составляют 70–80 %. Например, согласно данным А. С. Лосевой и А. Е. Петрова-Спиридонова, на незасоленных почвах Узбекистана урожай хлопка-сырца достигал 40 ц/га, в то время как на засоленных – только 7–10 ц/га. При слабом засолении урожайность хлопка снижается на 20–30 %,

кукурузы – на 40–50, пшеницы – на 50–60 %. На сильнозасоленных почвах урожайность хлопчатника уменьшается до 80 %, а пшеница угнетается и погибает [7]. На слабо- и средnezасоленных хлоридно-сульфатных почвах в условиях повышенной минерализации оросительной воды и маловодья, усиленные нормы минеральных и органических удобрений улучшают питательный режим почвы и способствуют получению сравнительно высоких урожаев хлопка-сырца (35,3–40,4 ц/га). Это больше, чем в хозяйствах, где нарушается баланс питательных веществ в почве [8].

Применение навоза значительно увеличивает урожайность хлопчатника. Так, от внесения 20 т/га и 100 т/га навоза можно получить 10,9 и 24,1 ц/га прибавки урожая хлопка-сырца соответственно, а на одну тонну навоза – 54,5 и 24,1 кг/га хлопка-сырца [9]. Это, по-видимому, связано с тем, что навоз – это богатое питательными элементами органическое удобрение, которое прежде всего улучшает азотное питание хлопчатника. По мнению Д. Н. Прянишникова, навоз важен для бедных почв со скудным поглощающим комплексом и при его внесении нет дефицита микроэлементов.

Для создания стартовых условий повышения плодородия все мелиорированные и рекультивированные новоорошаемые почвы в начальный период освоения нуждаются в применении высоких норм минеральных удобрений, превышающих нормы выноса питательных веществ хлопчатника в 1,5–2 раза. М. С. Султанов отмечает, что по мере достижения балансовых показателей, близких к нормальным условиям, через 3–5 лет освоения земель нормы минеральных удобрений можно снизить до уровня доз, создающих положительный баланс РК в системе «почва-растение» [10]. Поэтому в условиях слабозасоленных сероземно-луговых почв Северного Таджикистана для получения устойчивых и высоких урожаев хлопка-сырца, рекомендуется на фоне пленочной мульчи применять 200 кг/га азота, 200 кг/га фосфора и 25 кг/га калия [11].

Известно, что высокая концентрация солей оказывает отрицательное действие, прежде всего, на корневую систему растений. Засоление приводит к нарушению соотношения между поглощением ионов натрия, калия и магния: интенсивное поглощение натрия снижает поглощение калия и магния [12]. Для получения высокого урожая хлопка-сырца порядка 35–40 ц/га и других культур на слабо- и средnezасоленных почвах можно поднять нижний предел токсичности по сухому остатку до 1 %, по хлору – 0,04 и по токсичным сульфатам – 0,12 %, вместо существующих 0,3, 0,02 и 0,05 % соответственно [13]. В этой связи назрела необходимость разработать новую классификацию засоленных почв для орошаемой зоны по пригодности их использования. Как показали наши результаты, опытный участок достаточно обеспечен содержанием гумуса, валового азота и фосфора и, тем самым, мало отличается от сероземов других зон (табл. 2). Содержание нитратного азота значительно увеличивается вниз по профилю, что тесно связано с нитратным характером засоления грунтовых вод. В отличие от нитратов, в почве опытного участка аммиак содержится лишь в подпахотном слое, а ниже отсутствует.

Подвижного фосфора содержится больше в верхних слоях, что связано с ранее примененными удобрениями. Характер распределения подвижного калия по профилю почвы аналогичен содержанию нитратов.

Следует отметить, что по содержанию подвижного фосфора и калия в почве опытный участок относится к слабообеспеченной категории почв. Поэтому фосфорно-калийные удобрения должны способствовать накоплению питательных веществ в почве в период вегетации хлопчатника, о чем свидетельствуют данные табл. 3. Из результатов опыта первого года видно, что доминирующей формой азота в почве является нитрат. Под влиянием грунтовых вод, органических и минеральных удобрений количество нитратного азота в почве заметно увеличивается, особенно в слое 30-50 см. В последующие фазы развития хлопчатника наблюдается уменьшение содержания аммиачного азота, который полностью исчезает к фазе созревания растения.

Наблюдения за динамикой подвижных фосфатов в пахотном слое почвы опытных участков показали, что контрольный вариант содержит около 15 мг/кг P_2O_5 и данный участок относится к сильно нуждающейся в фосфатах почве. На удобренных участках содержание подвижного фосфора заметно увеличивается против контрольных как в пахотном, так и подпахотном слоях. Эта тенденция сохраняется по мере роста и развития хлопчатника на всех изученных участках. На этих участках в первом году опыта в течение вегетации растений содержание K_2O подвергается незначительным колебаниям и к концу вегетации его становится немного больше, что связано с резкими уменьшениями выноса NPK (базового макроэлементного комплекса) хлопчатником. Результаты анализов питательных веществ в почве показывают (табл. 4), что хлопчатник свою вегетацию начал при наличии в почве большого количества как нитратного, так и аммиачного азота. Это особенно сильно заметно на удобренных вариантах. Заметное влияние навоза на минеральные удобрения обнаружено по содержанию подвижного фосфора в почве вначале вегетации хлопчатника. В результате минерализации навоза и внесения минеральных удобрений за вегетацию растения содержание нитратного азота и подвижного фосфора повышается к периоду созревания хлопчатника. Это

является важным резервом для урожая будущего года, в особенности по фосфорному уровню. Содержание подвижного калия не показало заметных изменений по сравнению с первым годом опыта. Таким образом, выявлена тенденция накопления подвижных форм питательных веществ в почве опытного участка, что выражается в уменьшении пестроты и густоты стояния, улучшении роста и развития хлопчатника.

Уже с первых дней появления массовых всходов была отчетливо заметна большая разница в развитии растений между контрольным и удобренными вариантами. На удобренных участках появление всходов произошло синхронно, растения имели нормальный здоровый вид. В дальнейшем они развивались одинаково с приблизительно одновременным прохождением фаз. В контрольном варианте растения отставали по темпам роста и имели угнетенный вид, бледно-зеленую окраску и мелкие листья. Минеральные и органические удобрения положительно повлияли не только на вегетативные органы, но и на величину и количество генеративных органов на все процессы роста и развития растений хлопчатника. Показатели за ростом и развитием по фазам рельефно отражаются на

Таблица 2
Агрохимические свойства почв опытного участка (исходное содержание)
Table 2
Agrochemical soil properties in the experimental plot (initial content)

Глубина, см	Валовое содержание, %			Подвижные формы, мг/кг			
	Гумус	N	P_2O_5	NO_3	NH_4	P_2O_5	K_2O
0-30	1,20	0,106	0,062	30,2	Нет	17,5	228
30-50	0,73	0,082	0,058	35,4	2,9	14,7	240
50-70	0,54	0,061	0,047	41,6	Нет	9,2	218
70-100	0,25	0,028	0,038	50,3	нет	6,7	208

Таблица 3
Содержание питательных веществ (мг/кг) в почве опытного участка в 2019 году
Table 3
Nutrient content (mg/kg) in the soil of the experimental plot in 2019

Варианты опыта	Глубина, см	Фаза 2-3 настоящих листочков, май				Фаза созревания, сентябрь			
		NO_3	NH_4	P_2O_5	K_2O	NO_3	NH_4	P_2O_5	K_2O
Контроль	0-30	36	17,2	12,5	284	64,6	Нет	18,0	322
	30-50	27	9,5	8,2	220	32,2	Нет	12,0	308
N250P200 (Фон)	0-30	124	58,6	36,7	308	182,0	Нет	40,2	316
	30-50	38	44,7	28,2	300	221,5	Нет	31,0	302
Фон+20 т/га навоза	0-30	210	28,4	34,1	324	234,2	Нет	32,0	360
	30-50	200	20,2	26,8	268	154,2	Нет	29,0	282
Фон+30 т/га навоза	0-30	204	25,2	34,6	332	400,0	Нет	42,4	380
	30-50	78	10,5	26,9	258	284,2	Нет	34,5	246

Таблица 4
Содержание питательных веществ (мг/кг) в почве опытного участка в 2020 году
Table 4
Nutrient content (mg/kg) in the soil of the experimental plot in 2020

Варианты опыта	Глубина, см	Фаза 2-3 настоящих листочков, май				Фаза созревания, сентябрь			
		NO_3	NH_4	P_2O_5	K_2O	NO_3	NH_4	P_2O_5	K_2O
Контроль	0-30	38	18,8	20,7	310	54,8	Нет	19,8	325
	30-50	25	10,9	14,5	254	34,2	Нет	12,0	312
N250P200(Фон)	0-30	124	48,5	31,7	300	136,0	Нет	40,0	322
	30-50	68	35,4	22,4	324	218,0	Нет	32,0	330
Фон+20 т/га навоза	0-30	210	22,8	30,4	328	228,5	Нет	38,5	406
	30-50	194	18,0	27,1	265	160,7	Нет	33,0	320
Фон+30 т/га навоза	0-30	214	25,4	32,1	334	465,0	Нет	44,4	410
	30-50	85	12,7	24,8	295	240,0	Нет	36,3	270

урожайности хлопчатника, как в год действия, так и в год последующего действия.

Внесение хозяйственной нормы минеральных удобрений в 2019 г. (N250P200) резко повысило урожай хлопчатника против варианта без удобрений. Прибавка урожая хлопка-сырца от них составила 13,0 ц/га. Это указывает на большое значение минеральных удобрений в повышении урожайности хлопчатника на засоленных почвах. Высокий урожай хлопка-сырца – 35,6 ц/га – был получен на участке «Фон + 20 т/га навоза», а максимальный – 38,1 ц/га – у варианта «Фон + 30 т/га навоза» (табл. 5).

Полученные прибавки полностью окупают расходы на внесение навоза и способствуют поднятию плодородия почв. Наблюдения, проведенные на опытных участках в 2020 г. после внесения минеральных и органических удобрений, продемонстрировали, что действие удобрений в повышении урожая сельскохозяйственных культур и продуктивности на слабозасоленных почвах не ограничивается только одним годом, оно распространяется и на последующие годы. Выявлено (табл. 6), что действие удобрений на второй год после их внесения более значительно, чем прямое воздействие в год их внесения. На контрольном участке за два года средний урожай хлопчатника не изменился и составил 19–20,2 ц/га (табл. 5 и 6). На удобренных участках прибавка урожайности хлопка-сырца в последующий год после внесения навоза увеличилась до 15,3 (N250P200), 19,8 (Фон + 20 т/га навоза) и 23,6 (Фон + 30 т/га навоза) ц/га.

Таким образом, результаты опыта отчетливо демонстрируют значимую роль органических и минеральных удобрений (варианты «Фон + 20 т/га навоза» и «Фон + 30 т/га навоза») в снижении токсичности солей на засоленных почвах и повышении урожайности хлопчатника, что согласуется с работами других авторов [4–9, 11, 12].

Урожай хлопка-сырца (ц/га) по вариантам опыта (2019)

Raw cotton harvest (c/ha) for different experimental conditions, 2019

Варианты опыта	Повторность				Средняя	Прибавка	
	I	II	III	IV		ц/га	%
Контроль	22,1	21,0	19,9	17,8	20,2	-	-
N250P200 (Фон)	33,8	35,9	31,6	31,5	33,2	13,0	64,4
Фон+20 т/га навоза	38,4	36,6	33,9	33,5	35,6	15,4	76,2
Фон+30 т/га навоза	39,5	38,8	36,2	37,9	38,1	17,9	88,6
НСР ₀₅ , ц/га					2,08		

Урожай хлопка-сырца (ц/га) по вариантам опыта (2020)

Raw cotton harvest (c/ha) for different experimental conditions, 2020

Варианты опыта	Повторность				Средняя	Прибавка	
	I	II	III	IV		ц/га	%
Контроль	19,0	20,5	18,5	18,0	19,0	-	-
N250P200 (Фон)	35,5	34,0	34,7	33,0	34,3	15,3	80,5
Фон+20 т/га навоза	37,8	37,1	40,9	39,4	38,8	19,8	104,2
Фон+30 т/га навоза	41,7	42,5	43,7	42,5	42,6	23,6	124,2
НСР ₀₅ , ц/га					2,69		

Закключение

1. Действия минеральных и органических удобрений в значительной степени снижают содержание токсичности солей. На фоновом участке (N250P200) содержание анионов хлора, сульфата и гидрокарбонатов относительно исходных значений в пахотном слое уменьшилось на 0,011, 0,190 и 0,008%, в подпахотном слое – на 0,005, 0,317 и 0,005 % соответственно. У варианта «Фон+30 т/га навоза», относительно исходных значений, содержание анионов хлора, сульфата и гидрокарбонатов уменьшилось на 0,017, 0,222 и 0,011 %.
2. Засоленные почвы обладают неблагоприятными химическими и агрохимическими свойствами, препятствующими получению высоких урожаев хлопчатника. Применение минеральных и органических удобрений под хлопчатник в комплексе с агротехническими и мелиоративными мероприятиями является высокоэффективным способом повышения производительности и улучшения химических и агрохимических свойств засоленных почв.
3. Внесение 30 т/га навоза, совместно с N250P200 способствует увеличению урожайности хлопчатника на средnezасоленных почвах от 38,1 до 42,6 ц/га с прибавкой от 17,90–23,60 ц/га.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

1. Горбунов, Н. П. Таджикская комплексная экспедиция / Н. П. Горбунов. – Ленинград : Госиздат, 1933. – с. 13.
2. Недзвецкий, А. П. Рельеф и геологическое районирование / А. П. Недзвецкий // Таджикистан. Природа и природные ресурсы. – [Б. м.] : Дониш, 1982. – 25 с.
3. Джуманкулов, Х. Дж. Тканевая диагностика степени хлоридного засоления почвы на посевах хлопчатника / Х. Дж. Джуманкулов, Л. Д. Макарова. – Доклады ТАСХН. – 2009. – № 4 (22). – С. 17–21.
4. Липкинд, И. М. Агрохимическая характеристика почв и применение удобрений в Вахшской долине / И. М. Липкинд // Почвы Вахшской долины и их мелиорация. – Душанбе : Госиздат ТаджССР, 1947. – С. 131–169.
5. Липкинд, И. М. Роль удобрения в развитии и продуктивности хлопчатника на почвах разной степени и характера засоления / И. М. Липкинд, И. М. Джумаева. – Труды ТаджНИИ почвоведения. – 1972. – Т. 15, вып. 2. – С. 15–21.
6. Липкинд, И. М. Избранные труды / И. М. Липкинд. – Душанбе, 1985. – 482 с.
7. Лосева, А. С. Устойчивость растений к неблагоприятным факторам среды / А. С. Лосева, А. Е. Петров-Спиридонов. – Москва : Изд-во МСХА, 1983. – С. 47.

8. Садридинов, А. А. Характеристика почвенного покрова. Светлые сероземы / А. А. Садридинов // Таджикистан. Природа и природные ресурсы. – [Б. м.] : Дониш, 1982. – 317 с.
9. Сангинов, С. Р. Комплексная диагностика минерального питания хлопчатника в условиях Таджикистана : автореф. ... доктора сельскохозяйственных наук / С. Р. Сангинов. – Ташкент, 1994. – 42 с.
10. Султанов, М. С. Агрохимические свойства и пути повышения плодородия мелиорированных новоорошаемых почв Таджикистана : автореф. ... доктора сельскохозяйственных наук / М. С. Султанов. – Душанбе, 1997. – 48 с.
11. Собиров, Д. А. Влияние возрастающих норм удобрения и мульчи на агрохимические свойства слабозасоленных сереземно-луговых почв и урожайность хлопчатника : дис. ... кандидата сельскохозяйственных наук / Д. А. Собиров. – Душанбе, 2006. – 98 с.
12. Кабузенко, С. Н. Влияние засоления и экзогенных фитогормонов на рост и некоторые физиолого-биохимические функции растений на ранних этапах онтогенеза : автореф. ... доктора сельскохозяйственных наук: 03.00.12 / С. Н. Кабузенко. – Киев : ун-т им. Т. Шевченко, 1997. – 47 с.
13. Юлдашев, Х. К вопросу классификации засоленных почв / Х. Юлдашев // Материалы первого съезда почвоведов Таджикистана. – Душанбе, 2001. – С. 267–269.
5. Lipkind, I. M. Rol udobreniya v razvitii i produktivnosti hlochatnika na pochvah raznoy stepeni i haractera zasolenia [The role of fertiliser in the development and productivity of cotton plants in soils of varying degrees and nature of salinity] / I. M. Lipkind, I. M. Dzhumayeva // Proceedings of the Taj Research Institute of Soil Science. – 1972. – Vol. 15, Iss. 2. – P. 15.
6. Lipkind, I. M. Izbrannye trudy [Selected works] / I. M. Lipkind. – Dushanbe, 1985. – 482 p.
7. Loseva, A. S. Ustojchivost rastenij k neblagopriyatnym faktoram sredy [Plant resistance to unfavorable environmental factors] / A. S. Loseva, A. E. Petrov-Spiridonov. – Moscow : Moscow Agricultural Academy, 1983. – P. 47.
8. Sadridinov, A. A. Haracteristika pochvennogo pokrova. Svetlye serozyomy [Soil cover characteristics. Light grey soils] / A. A. Sadridinov // Tadjikistan. Priroda i prirodnye resursy [Tajikistan. Nature and natural resources]. – Dushanbe : Donish, 1982. – P. 317.
9. Sanginov, S. R. Complexnaya diagnostika mineralnogo pitaniya hlochatnika v usloviyah Tadjikistana [Comprehensive diagnostics of mineral nutrition of cotton plants in the conditions of Tajikistan] : abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Agricultural Sciences / Sanginov S. R. – Tashkent, 1994. – 42 p.
10. Sultanov, M. S. Agrohicheskie svoystva i puti povysheniya plodorodiya meliorirovannyh novooroshaemyh pochv Tadjikistana [Agrochemical properties and ways to increase the fertility of reclaimed newly irrigated soils of Tajikistan] : extended abstract of Doctor's thesis (Agriculture) / Sultanov M. S. – Dushanbe, 1997. – 48 p.
11. Sobirov, D. A. Vliyanie vozrastayushchih norm udobreniya i mulchi na agrohicheskie svoystva slabozasolennyh serozomno-lugovyh pochv i urojaynost hlochatnika [The influence of increasing fertiliser rates and mulch on the agrochemical properties of slightly saline grey-meadow soils and cotton yield] : Candidate's thesis (Agriculture) / Sobirov D. A. – Dushanbe, 2006. – 98 p.
12. Kabuzenko, S. N. Vliyanie zasoleniya i ekzogenykh fitogormonov na rost i nekotorye fiziologo-biohicheskie funkii rasteniy na rannih etapah ontogeneza [The influence of salinity and exogenous phytohormones on the growth and some physiological and biochemical functions of plants at the early stages of ontogenesis] : specialty 03.00.12 : extended abstract of Doctor's thesis (Agriculture) / Kabuzenko S. N. – Kiev, 1997. – 47 p.
13. Yuldashev, Kh. K voprosu klassifikatsii zasolennyh pochv [On the issue of classification of saline soils] / Kh. Yuldashev // Materials of the First Congress of Soil Scientists of Tajikistan. – Dushanbe, 2001. – P. 267–269.

References

1. Gorbunov, N. P. Tajikskaya kompleksnaya ekspeditsiya [Tajik complex expedition] / N. P. Gorbunov. – Leningrad, 1933. – P. 13.
2. Nedzvetskiy, A. P. Relyef i geologicheskoe rayonirovanie [Relief and geological zoning] / A. P. Nedzvetskiy // Tajikistan. Priroda i prirodnye resursy [Tajikistan. Nature and natural resource]. – Dushanbe, 1982. – P. 25.
3. Dzhumankulov, H. D. Tkanevaya liagnostika stepeni hloridnogo zasoleniya pochvy na posevah hlochatnika [Tissue diagnostics of the degree of chloride salinization of soil in cotton crops] / H. D. Dzhumankulov, L. D. Makarova // Reports of TAAS. – 2009. – № 4 (22). – P. 17–21.
4. Lipkind, I. M. Agrohicheskiye harakteristiki pochv i primeneniye udobreniy v Vahshskoy doline [Agrochemical characteristics of soils and the use of fertilizers in the Vakhsh valley] / I. M. Lipkind // Pochvy Vahshskoy doliny i ih melioratsiya [Soils of the Vakhsh valley and their reclamation]. – Dushanbe : State Publishing House of the TSSR, 1947. – P. 131–169.

Благодарность (госзадание):

Работа выполнена в рамках государственного задания, регистрационный номер №0121TJ1082.

Acknowledgements (state task):

The study was carried out within the state assignment, registration number 0121TJ1082.

Информация об авторах:

Ходжаев Шариф Идиевич – старший научный сотрудник отдела мелиорации Института почвоведения и агрохимии Академии сельскохозяйственных наук (Республика Таджикистан, 734025, г. Душанбе, проспект Рудаки 21 А; e-mail: sharif_120696@mail.ru).

Ходжаев Сулаймон Шарифович – научный сотрудник отдела мелиорации Института почвоведения и агрохимии Академии сельскохозяйственных наук (Республика Таджикистан, 734025, г. Душанбе, проспект Рудаки 21 А; e-mail: khojaevsulaimon338@gmail.com).

Султонов Сухроб – старший научный сотрудник отдела мелиорации Института почвоведения и агрохимии Академии сельскохозяйственных наук (Республика Таджикистан, 734025, г. Душанбе, проспект Рудаки 21 А).

About the authors:

Sharif I. Khodzhaev – Candidate of Sciences (Agriculture), Senior Researcher at the Department of Land Reclamation of the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Academy of Agricultural Sciences (Republic of Tajikistan, 734025, Dushanbe, Rudaki Avenue 21 A; e-mail: sharif_120696@mail.ru).

Sulaimon Sh. Khodzhaev – Researcher at the Department of Land Reclamation of the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Academy of Agricultural Sciences (Republic of Tajikistan, 734025, Dushanbe, Rudaki Avenue 21 A; e-mail: khojaevsulaimon338@gmail.com).

Sukhrob Sultonov – Senior Researcher at the Department of Land Reclamation of the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Academy of Agricultural Sciences (Republic of Tajikistan, 734025, Dushanbe, Rudaki Avenue 21 A).

Для цитирования:

Ходжаев, Ш. И. Влияние минеральных и органических удобрений на снижение токсичности солей и урожайность хлопчатника в условиях засоленных почв южного Таджикистана / Ш. И. Ходжаев, С. Ш. Ходжаев, С. Султонов // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Экспериментальная биология и экология». – 2024. – № 9 (75). – С. 106–112.

For citation:

Khodzhaev, Sh. I. Vliyanie mineralnykh i organicheskikh udobreniy na snizhenie toksichnosti solei i urozhainost khlopchatnika v usloviyakh zasolennykh pochv yuzhnogo Tadjikistana [The role of mineral and organic fertilisers in reducing the toxicity of salts and increasing the cotton yield in saline soils of Southern Tajikistan] / Sh. I. Khodzhaev, S. Sh. Khodzhaev, S. Sultonov // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series "Experimental Biology and Ecology". – 2024. – № 9 (75). – P. 106–112.

Дата поступления статьи: 04.07.2024

Прошла рецензирование: 09.09.2024

Принято решение о публикации: 21.10.2024

Received: 04.07.2024

Reviewed: 09.09.2024

Accepted: 21.10.2024

События

Международная научная конференция
«Лишайники:
от молекул до экосистем»
(Сыктывкар, 1–5 июля 2024 г.)

Events

International Scientific Conference
“Lichens: From Molecules to
Ecosystems”
(Syktyvkar, July 1–5, 2024)



Международная научная конференция «Лишайники: от молекул до экосистем» состоялась в г. Сыктывкаре (Республика Коми) 1–5 июля 2024 г. Инициатором ее проведения выступил Институт биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, организаторами конференции – лаборатория экологической физиологии растений и отдел флоры и растительности Севера этого же института. Соучредителями стали Коми отделение Русского ботанического общества и Коми отделение Общества физиологов растений России. Финансовую и организационную поддержку оказали ООО «Биолабмикс» (г. Новосибирск), ООО «Газпром трансгаз Ухта» (г. Ухта), Республиканский центр обеспечения функционирования особо охраняемых природных территорий и природопользования (г. Сыктывкар).

В конференции приняли очное, онлайн и заочное участие 131 специалист из пяти стран (Россия, Беларусь, Казахстан, Сирия, ЮАР), представляющих 33 научные и природно-охранные организации и 19 университетов. Среди участников: один член-корреспондент РАН, 12 докторов и более 50 кандидатов наук, в том числе, 33 сотрудника ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. Доля участников в возрасте до 39 лет составила свыше 50 %.

Работа конференции проходила по четырем направлениям (секциям):

1. Биологическое разнообразие и распространение лишайников.
2. Современные методы исследования и создание баз данных гербарных коллекций.
3. Лишайники в растительных сообществах и экосистемах.
4. Экспериментальная биология и экология лишайников.

Во время конференции было заслушано 58 докладов. На пленарной сессии ведущие специалисты представили три обобщающих и проблемных лекций, посвященные различным аспектам изучения лишайников. С. В. Дёгтева (ИБ Коми НЦ УрО РАН) д.б.н., член-корреспондент РАН подвела итоги работ по охране растительного мира Республики Коми. В лекции д.б.н. Е. Э. Мучник (Институт лесоведения

РАН) были обсуждены актуальные вопросы ведения лихенологических разделов Красной книги. Лекция д.б.н. Ф. В. Минибаевой (Казанский институт биохимии и биофизики ФИЦ КазНЦ РАН) была посвящена проблеме стрессоустойчивости лишайников, роли пигментов и лишайниковых веществ в адаптации к избыточному освещению и другим неблагоприятным воздействиям среды.

На первой секции были представлены два пленарных и 13 секционных докладов. Пленарный доклад С. В. Борискина (Республиканский центр обеспечения функционирования ООПТ) был посвящен перспективам цифровизации кадастра редких видов растений и животных Республики Коми и достижениям в этой сфере. В пленарном докладе д.б.н. А. Г. Пауков (Уральский федеральный университет) рассмотрел вопросы таксономии и разнообразия накипных лишайников рода *Circinaria* и проблемы использования в этих целях молекулярных методов и подходов. В секционных сообщениях были освещены различные аспекты изучения биологического разнообразия, распространения и охраны редких видов лишайников в регионах Российской Федерации.

Вторая секция была представлена пленарным и тремя секционными докладами. В пленарном докладе к.б.н. И. Ф. Чадин (ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН) проанализировал опыт оцифровки ботанических коллекций на примере гербария SYKO. В секционных выступлениях освещены вопросы создания и использования электронного каталога гербария SYKO для ведения базы данных коллекции лишайников. В обстоятельном сообщении представителя ООО «Биолабмикс» приведена информация полезная для молекулярно-генетического изучения лишайников.

Третья секция включала один пленарный и 10 секционных докладов. Пленарный доклад д.б.н. С. В. Загировой (ИБ Коми НЦ УрО РАН) был посвящен оценке вклада лишенобиоты в потоки парниковых газов крупнобугристого болота на европейском Северо-Востоке России. В секционных докладах были озвучены результаты исследований экосистемной роли лишайников, их участие в формировании растительного покрова.

Работу секции «Экспериментальная биология и экология лишайников» открыла пленарным докладом д.б.н. проф. Т. К. Головкин, посвященным эколого-физиологическим исследованиям фотосинтеза и сопряженных процессов в лишайниках бореальной зоны. В пленарном докладе проф. Ричарда Беккета (Университет КваЗулу-Натал, ЮАР) рассмотрены вопросы адаптации лишайников к свету. Широкий спектр вопросов был обсужден в 20 секционных докладах. Изучены эколого-физиологические и биохимические свойства лишайников и компонентов симбиоза, антиоксидантный и транскриптомный ответы на стресс-факторы, адаптивные изменения состава и свойств мембран клеток талломов, изотопный состав углерода и азота представителей лишайнобиоты, использование лишайников в качестве объекта мониторинга.

В рамках круглого стола были заслушаны два сообщения на тему «Лихенология и образование», представленные сотрудниками Главного ботанического сада им. Н. В. Цицина РАН и преподавателем Коми республиканского лицея при СыктГУ им. П. Сорокина. В дискуссии по данной теме были подняты вопросы подготовки специалистов-лихенологов, преподавания лихенологии в вузах и задачах экопросветительской деятельности.

В ходе конференции были проведены экскурсии в Геологический музей им. А. А. Чернова Института геологии Коми НЦ УрО РАН им. академика Н. П. Юшкина, Археологический музей Института языка, литературы и истории Коми НЦ УрО РАН, а также пешеходная экскурсия по памятным и историческим местам г. Сыктывкара. Был организован однодневный выезд в Государственный заказник федерального значения «Параськины озера» (МО ГО «Ухта»), где проведена научная лихенологическая экскурсия.

На заключительном заседании принята Резолюция, в которой изложены рекомендации конференции:

- Объединить усилия специалистов лихенологов для изучения разнообразия лишайнобиоты слабо исследованных регионов и сложных групп лишайников;
- развивать лихенологические исследования с позиций современной биологии, экологии, биотехнологии



Участники Международной научной конференции «Лишайники: от молекул до экосистем» (Сыктывкар, 1–5 июля 2024 г.) (фото – Е. И. Лю-Ля-Мин).

Participants of the International Scientific Conference "Lichens: From Molecules to Ecosystems" (Syktvykar, July 1–5, 2024) (photo by E. I. Lyu-Lya-Min).

и биомедицины, привлечь к участию в лихенологических исследованиях специалистов смежных научных направлений – физиологов, биохимиков, биофизиков, биотехнологов, молекулярных биологов;

- разработать методические рекомендации по ведению лихенологических разделов Красной книги регионального и муниципального уровней на основе мониторинга состояния редких и исчезающих видов;
- развивать сотрудничество и координацию исследований, обмен научной информацией и коллекционными образцами, опытом создания электронного каталога лишайников и оцифровки ботанических коллекций;
- расширить подготовку молодых специалистов-лихенологов через магистратуру, аспирантуру, докторантуру, стажировки в ведущих научных центрах и проведение молодежных лихенологических школ;
- издать материалы докладов в электронном виде, подготовить информацию о конференции и подать ее в журналы соответствующего профиля (Ботанический журнал, Теоретическая и прикладная экология, Известия Коми научного центра УрО РАН и др.);
- одобрить инициативу проведения Международной конференции «Лишайники: от молекул до экосистем».

Провести следующую конференцию в 2027 г. на базе Горного ботанического сада Дагестанского ФИЦ РАН (г. Махачкала) и предусмотреть в рамках конференции проведение молодежной лихенологической школы.

Материалы докладов конференции опубликованы в формате электронного издания. Сборник материалов доступен для скачивания на сайте конференции: https://ib.komisc.ru/add/conf/lichens_conf_2024/reports/ и размещен в базе данных научной литературы РИНЦ <https://elibrary.ru/item.asp?id=72586348>.



Дискуссии и обсуждения проблем лихенологии не прекращались и в перерывах между заседаниями. Слева направо: д.б.н. А. Г. Пауков (Уральский федеральный университет), проф. Ричард Беккет (Университет КваЗулу-Натал (ЮАР)), д.б.н. Ф. В. Минибаева (Казанский институт биохимии и биофизики), д.б.н. проф. Е. Э. Мучник (Институт лесоведения РАН) (фото – Е. И. Лю-Ля-Мин).

Discussions and debates on the problems of lichenology did not stop even during breaks between sessions. From left to right: D.Sc. (Biology) A. G. Paukov (Ural Federal University), Prof. Richard Beckett (University of KwaZulu-Natal (South Africa)), D.Sc. (Biology) F. V. Minibaeva (Kazan Institute of Biochemistry and Biophysics), D.Sc. (Biology) E. E. Muchnik (Institute of Forest Science of the Russian Academy of Sciences) (photo by E. I. Lyu-Lya-Min).



Участники конференции на полевой лишенологической экскурсии в Государственный заказник федерального значения «Параськины озера» (МО ГО «Ухта») (фото – Д. И. Кудрявцевой).
Conference participants during the field lichenological excursion to the Federal State Nature Reserve "Paraskiny Oзера" (Ukhta Municipal District) (photo by D. I. Kudryavtseva).

Участники конференции отметили высокий уровень комплексных исследований лишенобиоты, выполняемых специалистами Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. Выразили благодарность администрации учрежде-



Во время экскурсии. Консультация с ведущим лишенологом России д.б.н., проф. Е. Э. Мучник (крайняя справа) (фото – Г. Ю. Поповой).
During the excursion. Consultation with the leading lichenologist of Russia, Prof. E. E. Muchnik (far right) (photo by G. Yu. Popova).

ния, оргкомитету за высокий уровень организации и проведения научного мероприятия, а также за насыщенную культурную программу.

Зам. председателя Оргкомитета конференции
д.б.н., проф. Т. К. Головки.
Ответственный секретарь Оргкомитета конференции
к.б.н., н.с. М. А. Шелякин

Юбилей

Аркадий Леонидович Максимов



11 августа 2024 г. отметил 75-летний юбилей **Аркадий Леонидович МАКСИМОВ** – известный российский ученый в области экологии и адаптации человека к экстремальным природно-климатическим условиям, участник легендарных антарктических зимовок на станции «Восток», высокогорных, полярных и морских экспедиций, доктор медицинских наук, профессор, заслуженный деятель науки, член-корреспондент Российской академии наук.

Аркадий Леонидович родился в 1949 г. в г. Усть-Каменогорске Казахской ССР, окончил школу в г. Чкаловске Таджикской ССР. После окончания в 1974 г. Киргизского государственного медицинского института в г. Фрунзе (Бишкек) работал в Институте физиологии и экспериментальной патологии высокогорья Академии наук Киргизской ССР. Аркадий Леонидович в период 1975–1979 гг. участвовал и руководил экспедиционными исследованиями по изучению межсистемных механизмов, лимитирующих физическую и психическую деятельность человека в экстремальных условиях среды в высокогорье Тянь-Шаня, Памира, Кавказа, пустынях Средней Азии, районах строительства БАМа. В результате этих исследований была разработана номограмма для прогнозирования физической работоспособности человека на различных высотах в зависимости от сроков адаптации и опубликован ряд статей, а также две коллективные монографии: «Опыт изучения физической и умственной работоспособности в горах» и «Прогностические аспекты трудовой деятельности в условиях высокогорья».

Кроме жарких пустынь и высокогорий Аркадию Леонидовичу довелось работать в составе 25 и 27 Советских Антарктических экспедиций (1979–1980; 1982–1983), где на высокогорной станции «Восток» им были проведены уникальные исследования по физиологии адаптационных перестроек у полярников, попавших в суперэкстремальные

Anniversaries

Arkady Leonidovich Maximov

условия жизнедеятельности после уничтожения в результате пожара энергетических установок станции. Опыт по выживанию человека в экстремальных условиях и прогностической оценке его потенциальных психофизиологических резервов был применен при предполетной подготовке и послеполетной реабилитации ряда космонавтов во время их пребывания в среднегорье в Киргизстане в период работы там А. Л. Максимова.

Свой научный путь в Магаданской области А. Л. Максимов начал в качестве врача-исследователя в лыжной экспедиции «Берингов мост», возглавляемой известным полярным путешественником Д. Шпаро. В процессе этого зимнего перехода длиной около 2 тыс. км по Чукотке и Аляске А. Л. Максимов проводил сравнительные исследования по изменению физической работоспособности и функциональным перестройкам у российских и американских участников этой полярной экспедиции. В 1989 г. он по согласованию руководства академий был переведен в Институт биологических проблем Севера ДВО АН СССР (Магадан). Там А. Л. Максимовым была создана лаборатория физиологии экстремальных состояний и развернуты сравнительные комплексные исследования по изучению адаптивных особенностей у аборигенов, мигрантов и укорененного населения северо-востока России из числа европеоидов уроженцев различных поколений Магаданской области и Чукотки. Помимо этого были проведены серии фундаментальных и прикладных исследований в интересах обороны страны по отбору и прогнозированию функциональных возможностей военнослужащих по оценке и прогнозированию устойчивости их организма к сочетанному действию ряда экстремальных факторов, включая гипоксию, гиперкапнию, низкие и высокие температурные показатели при специальной деятельности в ограниченных гермообъемах.

В начале 1990-х гг. Аркадий Леонидович активно участвовал в создании первого в структуре АН СССР Российско-Американского Международного научно-исследовательского центра (ныне – НИЦ «Арктика» ДВО РАН), соучредителями которого выступили ДВО АН СССР и Университет Аляски, который он в дальнейшем возглавлял с 1995 по 2016 г.

В 1994 г. А. Л. Максимов защитил диссертацию на степень доктора медицинских наук по двум специальностям: «Нормальная физиология» и «Безопасность в чрезвычайных ситуациях», а в 1999 г. ему было присвоено ученое звание профессора.

В 2002 г. А. Л. Максимов организовал и обеспечил научные медико-физиологические исследования группы альпинистов, среди которых были инвалиды-спинальники с парализованными нижними конечностями, совершившие уникальное восхождение на высочайшую вершину Северной Америки – пик Мак-Кинли (Аляска, США, 6190 м).

Проводимые А. Л. Максимовым ранее и в настоящее время исследования в условиях Крайнего Севера и Арктики связаны с изучением морфофункциональных адаптационных изменений организма и управления здоровьем человека в зависимости от его возраста, сроков пребывания и исходного уровня неспецифической резистентности. Установлено, что у северян, включая молодых уроженцев этих экстремальных регионов, функциональные перестройки носят транзиторный незавершенный характер, и в более старшем возрасте являются одним из условий формирования дезадаптационных расстройств и хронических нарушений здоровья. Полученные данные дают возможность прогнозирования изменений функциональных резервов и уровня здоровья у жителей экстремальных регионов страны относительно лиц, проживающих в более комфортных природно-климатических условиях.

В 2011 г. Аркадий Леонидович был избран член-корреспондентом РАН. Им разработана новая концепция конвергентной адаптации, способствующая с физиологических позиций формированию на северо-востоке России популяции укорененных уроженцев-европеоидов их числа лиц, родившихся в этом регионе, что является одним из важных медико-биологических аспектов обоснования и закрепления на Крайнем Севере и в приарктических регионах страны постоянного населения. А. Л. Максимовым было установлено, что хроническое воздействие низких температур и гипоксии на жителей Севера, определяющее изменение функциональных возможностей организма, реализуется по единому принципу «порочного круга», генезис которого во многом обусловлен формированием недостатка кислорода в тканях и органах на самых различных системных уровнях. При его непосредственном руководстве и личном участии организован ряд экспедиционных исследований по сравнительной оценке состояния здоровья молодых уроженцев Магаданской области и Чукотки из числа уроженцев-европеоидов и аборигенов. Проведенные исследования показали, что функциональные резервы и адаптационный потенциал укорененных молодых уроженцев-европеоидов вполне сопоставимы и даже по ряду физиологических показателей превосходят характеристики их сверстников из числа аборигенных жителей.

За последние годы А. Л. Максимовым была разработана и апробирована на базе кафедры нормальной физиологии ВМА им. С. М. Кирова и Военного института физкультуры МО РФ технология физиологической типизации и отбора военнослужащих для деятельности в экстремальных природно-климатических условиях высокогорья и арктиче-

ских регионов, направленная на сохранение у контингента высокой работоспособности и функциональных резервов. Разработанная на основе пробы с ререспирацией при сочетании локальным охлаждением тела технология может быть также эффективной для подготовки спортсменов и прогнозирования успешности достижения ими высоких результатов. В настоящее время в этом направлении под его руководством в Институте физиологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН развернуты комплексные исследования, имеющие не только фундаментальную, но и прикладную значимость для понимания тонких функциональных механизмов, обеспечивающих устойчивость организма к экстремальным факторам и отбора специальных контингентов для действий в особых природно-климатических условиях окружающей среды, а также подготовки спортсменов высшей квалификации.

Полученные результаты с учетом исследований, проводимых в других регионах Российской Федерации и ряде зарубежных стран, были доложены на многочисленных общероссийских и международных форумах и опубликованы более чем в 600 научных сообщениях и профильных научных журналах, в том числе шести специализированных монографиях. В настоящее время А. Л. Максимов входит в состав редакций и редакционных советов пяти ведущих эколого-физиологических журналов, является членом диссертационного совета по защите докторских диссертаций, Научного совета Российской академии наук по изучению Арктики и Антарктики и экспертом РАН.

Под руководством А. Л. Максимова подготовлены семь кандидатов наук и один доктор наук, запатентованы шесть изобретений, ведется руководство молодыми учеными. Значительное внимание А. Л. Максимов уделяет научно-популярной деятельности: опубликовал книгу «Восток на самом дальнем юге. Хроника одной зимовки», выступил с интервью федеральной газете «Аргументы недели», на медиаплатформах «Россия сегодня», «НаукаPRO» и региональном телевидении и пр.

Заслуги Аркадия Леонидовича отмечены высокими государственными наградами: орденом Трудового Красного Знамени (1983), орденом Почета (2000), званием «Заслуженный деятель науки Российской Федерации» (2007), рядом ведомственных наград, включая медаль 300 лет РАН (2024).

Коллектив Института физиологии Коми НЦ УрО РАН от всей души поздравляет юбиляра с днем рождения и желает активного творческого долголетия на пути к покорению вершин науки!

*Коллектив Института физиологии
ФИЦ Коми НЦ УрО РАН*



Хоть и солиден жизни стаж,
в расцвете – он, а не на склоне.
Наш юбиляр – Ю. Г. Солонин

21 июня 2024 г. отметил 85-летний юбилей **Юрий Григорьевич СОЛОНИН**, доктор медицинских наук, профессор, академик Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности, главный научный сотрудник Отдела экологической и медицинской физиологии Института физиологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН.

После окончания учебы на санитарно-гигиеническом факультете и аспирантуры на кафедре гигиены в Свердловском медицинском институте в 1966 г. Юрий Григорьевич блестяще защитил кандидатскую диссертацию. Он начал свой путь в науке с ассистента на кафедре, затем в течение 16 лет руководил лабораторией физиологии труда в Свердловском научно-исследовательском институте гигиены труда и профзаболеваний. Совместно с сотрудниками лаборатории изучил труд более 50 профессий на крупнейших машиностроительных и металлургических предприятиях страны (Уралмашзавод, Волжский автомобильный завод, Нижне-Тагильский металлургический комбинат, Братский алюминиевый завод и др.). В 1984 г. Ю. Г. Солонин защитил докторскую диссертацию в Киевском научно-исследовательском институте гигиены труда и профзаболеваний.

Ю. Г. Солонин – специалист в области физиологии, гигиены и экологии человека. Он внес существенный вклад в развитие физиологии труда, разработал физиолого-гигиенические основы нормирования трудовых нагрузок и подготовил методические рекомендации Минздрава СССР (1980) «Физиологические нормы напряжения организма при физическом труде», которые действуют до сих пор и внедрены в производство, научную деятельность,

учебный процесс медицинских вузов Российской Федерации, практическую работу органов Роспотребнадзора.

В 1985 г. судьба свела его с Севером. Ю. Г. Солонин приехал в г. Сыктывкар, где возглавлял лабораторию социальной физиологии и здоровья сначала в Институте биологии, затем в Институте физиологии Коми НЦ УрО РАН. В Республике Коми предметом его физиологических и экологических исследований стали люди, живущие и работающие в суровых природных условиях: вахтовые работники Вуктыльских газопромыслов, болгарские лесорубы, операторы Сыктывкарского лесопромышленного комплекса, оленеводы, военнослужащие, жители разных по широте регионов республики. Впервые были выявлены у жителей Европейского Севера физиологические особенности организма (замедленные психомоторные реакции, ускоренные темпы возрастной инволюции, сниженный уровень физического здоровья и др.) и негативное влияние факторов географической широты на организм человека по мере продвижения на Север. Им показано, что продвижение на Север даже на 5° с. ш. уже оказывает существенное влияние на функциональное состояние организма человека.

Ю. Г. Солониным доказано также влияние социальных факторов (уровень доходов и медицинского обслуживания) на физиологический статус и физическое здоровье северян. Установлено негативное действие неблагоприятной экологической обстановки на организм подростков в ряде населенных пунктов Республики Коми.

В 2009–2011 гг. в работы Юрия Григорьевича пришел космос: выполнено успешное медико-физиологическое исследование северной группы участников международного проекта «Марс-500». У практически здоровых испытуемых-северян в отдельные месяцы длительного мониторинга выявлены донозологические состояния организма, что открыло большие перспективы для внедрения аналогичных исследований в практику здравоохранения. Он продолжает с удовольствием и увлечением читать лекции на космическую тематику перед школьниками и разными группами населения.

Ю. Г. Солониным опубликовано более 420 работ, в том числе шесть монографий, более 150 статей в рецензируемых журналах, ряд учебно-методических пособий. Он неоднократно выступал на международных и всероссийских научных конференциях, школах для ученых. С 1997 по 2003 г. Ю. Г. Солонин получал стипендию РАН для выдающихся ученых России. За активную пропаганду научных знаний среди населения он отмечен благодарственными грамотами общества «Знание» России (1997, 2002). Юрий Григорьевич активно участвует в подготовке научных и медицинских кадров для Республики Коми: им подготовлено шесть кандидатов наук, он ведет курс гигиены в Медицинском институте Сыктывкарского государственного университета им. Питирима Сорокина (далее – СГУ).

Ю. Г. Солонин сочетает научную, учебную и просветительскую деятельность с общественной работой. Он –

председатель Сыктывкарского отделения Всероссийского физиологического общества им. И. П. Павлова и член Центрального совета этого общества, член правления Сыктывкарского отделения Геронтологического общества при РАН, член диссертационного совета по физиологии, ученого совета и председатель комитета по биоэтике при Институте физиологии Коми НЦ УрО РАН, член ученого совета медицинского института СГУ им. Питирима Сорокина, член Общественного совета при Министерстве труда, занятости и социальной защиты Республики Коми, лектор Российского общества «Знание».

Трудовые и научные достижения Юрия Григорьевича отмечены наградами, среди них медаль «За освоение целинных земель» (1958), знак «Отличник здравоохранения» (1979), Почетная грамота Министерства труда и социального развития Российской Федерации (2001), Почетная грамота РАН (2008) и УрО РАН (2009). Он также награжден Почетной грамотой Республики Коми (1997) и грамотами ряда министерств республики. В 2003 г. ему присвоено почетное звание «Заслуженный работник Республики Коми».

В 2016 г. за большой вклад в развитие науки, образования, подготовку квалифицированных специалистов и многолетнюю плодотворную деятельность Ю. Г. Солонин награжден медалью ордена «За заслуги перед Отечеством» II степени. В 2023 г. за активную просветительскую деятельность Юрий Григорьевич удостоен Почетного знака Министерства образования и науки Российской Федерации «Почетный наставник».

Несмотря на возраст, Юрий Григорьевич остается в прекрасной научной и физической форме. В 2017 г. приказом Министерства спорта Российской Федерации он был награжден золотым знаком отличия Всероссийского физкультурно-спортивного комплекса «Готов к труду и обороне».

Коллектив Института физиологии от всей души желает Юрию Григорьевичу крепкого здоровья, творческих успехов и активного долголетия!

*Коллектив Института физиологии
ФИЦ Коми НЦ УрО РАН*



Научный журнал

ИЗВЕСТИЯ

Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук

**Серия «Экспериментальная биология и экология»
№ 9 (75)**

Номер подготовили:

Ответственный секретарь серии – к.б.н. Е. А. Юшкова

Выпускающий редактор – И. В. Курляк

Редактор – О. А. Гросу

Переводчик – Е. С. Кузьмина

Оригинал-макет – Е. Н. Старцева

Дизайн обложки – Я. С. Куликова

Лицензия № 0047 от 10.01.1999.

Подписано в печать 18.12.2024. Дата выхода в свет 20.12.2024.

Уч.-изд.л. 20,0. Усл.-печ.л. 14,0. Тираж 300. Заказ № 49.

Формат 60х84/8. Свободная цена.

Подготовлено к изданию и отпечатано в редакционно-издательском центре ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
167982, Российская Федерация, ГСП-2, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 24.

Адрес учредителя, издателя: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук».
167982, Российская Федерация, ГСП-2, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 24.