

Включен в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК РФ, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней по научным специальностям:

1.5.9. Ботаника, 1.5.11. Микробиология, 1.5.12. Зоология, 1.5.7. Генетика, 1.5.18. Микология, 3.2.7. Аллергология и иммунология (биологические и медицинские науки), 3.3.8. Клиническая лабораторная диагностика

Учредитель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет»

Редакционный совет

В. С. Артамонова, д.б.н., Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, г. Новосибирск, Россия
О. Ю. Баранов, д.б.н., Институт леса НАН Беларуси, г. Гомель, Беларусь
О. Г. Баранова, д.б.н., Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН, г. С.-Петербург, Россия
В. Д. Богданов, д.б.н., чл.-корр. РАН, Институт экологии растений и животных УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия
М. В. Винарский, д.б.н., Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия
О. В. Долгих, д.м.н., Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения Роспотребнадзора, г. Пермь, Россия
С. А. Заморина, д.б.н., Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия
Е. В. Зиновьев, д.м.н., Институт экологии растений и животных УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия
Р. А. Календарь, к.б.н., "National Laboratory Astana", Назарбаев Университет, г. Нур-Султан, Республика Казахстан
Э. А. Коркотян, к.б.н., Научно-исследовательский институт им. Вейцмана, г. Реховот, Израиль
Н. Кристофи, PhD, Эдинбургский Нэпир университет, г. Эдинбург, Великобритания
А. И. Литвиненко, д.б.н., Государственный аграрный университет Северного Зауралья, г. Тюмень, Россия
П. Б. Михеев, PhD, доцент, Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия
Е. Г. Плотникова, д.б.н., Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН, г. Пермь, Россия
Д. В. Политов, д.б.н., Институт общей генетики им. Н.И. Вавилова РАН, г. Москва, Россия
А. В. Пузанов, д.б.н., Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул, Россия
М. Б. Раев, д.б.н., Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН, г. Пермь, Россия
Е. В. Рахимова, д.б.н., Институт ботаники и фитоинтродукции Комитета лесного хозяйства и животного мира, г. Алматы, Республика Казахстан
В. А. Черешнев, д.м.н., академик РАН, Институт иммунологии и физиологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия
А. Г. Ширяев, д.б.н., Институт экологии растений и животных УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

Редакционная коллегия

С. В. Боронникова, д.б.н., Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия
С. В. Гейн, д.м.н., Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН, г. Пермь, Россия
А. А. Елькин, к.б.н., Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия
О. З. Еремченко, д.б.н., Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия
С. Л. Есюнин, д.б.н., Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия
Е. Г. Ефимик (секретарь редколлегии), к.б.н., Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия
Н. В. Зайцева, д.м.н., академик РАН, Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения Роспотребнадзора, г. Пермь, Россия
И. Б. Ившина, д.б.н., академик РАН, Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН, г. Пермь, Россия
А. Р. Ишибирдин, д.б.н., профессор, Башкирский государственный университет, г. Уфа, Россия
М. С. Куюкина (гл. редактор), д.б.н., Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия
С. А. Овеснов, д.б.н., Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия
Л. Г. Переведенцева, д.б.н., Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия
О. Ю. Устинова, д.м.н., Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения Роспотребнадзора, г. Пермь, Россия

Ответственный редактор выпуска **С. А. Овеснов**

© Редакционная коллегия, 2025

Адрес учредителя и издателя:
614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15;
Тел.: 8 (342)2396435; E-mail: info@psu.ru
Подписка на журнал осуществляется онлайн на сайте агентства «Урал-Пресс»
<https://www.ural-press.ru/catalog/97266/8940022/>. Подписной индекс 41000
Адрес редакции: 614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15;
Тел.: 8 (342)2396233
E-mail: vestnik_psu_bio@mail.ru
Сайт: press.psu.ru/index.php/bio

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свид. о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС 77-66484 от 14 июля 2016 г.

Editorial Board

- V. S. Artamonova*, Dr. Biol. Sc., Institute of Soil Science and Agrochemistry of the SB RAS, Novosibirsk, Russia
O. Yu. Baranov, Dr. Biol. Sc., Institute of Forest of the NAS of Belarus, Gomel, Belarus
O. G. Baranova, Dr. Biol. Sc., Botanical Institute of the RAS, St. Petersburg, Russia
V. D. Bogdanov, Dr. Biol. Sc., Corresponding Member of the RAS, Institute of Plant and Animal Ecology of UB RAS, Ekaterinburg, Russia
M. V. Vinarski, Dr. Biol. Sc., St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia
O. V. Dolgikh, Dr. Med. Sc., Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, Perm, Russia
S. A. Zamorina, Dr. Biol. Sc., Perm State University, Perm, Russia
E. V. Zinoviev, Dr. Med. Sc., Institute of Plant and Animal Ecology of UB RAS, Ekaterinburg, Russia
R. A. Kalendar, Cand. Biol. Sc. "National Laboratory Astana", Nazarbaev University, Nur-Sultan, Kazakhstan
E. A. Korkotyan, Cand. Biol. Sc. Weizmann Institute of Science, Rehovot, Israel
N. Christofi, PhD, Edinburgh Napier University, Edinburgh, Great Britain
A. I. Litvinenko, Dr. Biol. Sc., State agrarian University of Northern TRANS-Urals, Tyumen, Russia
P. B. Mikhhev, PhD, Perm State University, Perm, Russia
E. G. Plotnikova, Dr. Biol. Sc., Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms of the UB RAS, Perm, Russia
D. V. Politov, Dr. Biol. Sc., Vavilov Institute of General Genetics of the RAS, Moscow, Russia
A. V. Puzanov, Dr. Biol. Sc., Institute for Water and Environmental Problems of the SB RAS, Barnaul, Russia
M. B. Raev, Dr. Biol. Sc., Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms of the UB RAS, Perm, Russia
E. V. Rachimova, Dr. Biol. Sc., Institute of Botany and Phytointroduction of the Committee for Forestry and Wildlife, Almaty, Kazakhstan
V. A. Chereshev, Dr. Med. Sc., Full Member of the RAS, Institute of Immunology and Physiology of UB RAS, Ekaterinburg, Russia
A. G. Shiryayev, Dr. Biol. Sc., Institute of Plant and Animal Ecology of the UB RAS, Ekaterinburg, Russia

Editors

- S. V. Boronnikova*, Dr. Biol. Sc., Perm State University, Perm, Russia
S. V. Gein, Dr. Med. Sc., Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms of the UB RAS, Perm, Russia
A. A. Elkin, Cand. Biol. Sc., Perm State University, Perm, Russia
O. Z. Eremchenko, Dr. Biol. Sc., Perm State University, Perm, Russia
S. L. Esysunin, Dr. Biol. Sc., Perm State University, Perm, Russia
E. G. Efimik (secretary of the editorial board), Cand. Biol. Sc., Perm State University, Perm, Russia
N. V. Zaitseva, Dr. Med. Sc., Full Member of the RAS, Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, Perm, Russia
I. B. Ivshina, Dr. Biol. Sc., Full Member of the RAS, Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms of the UB RAS, Perm, Russia
A. R. Ishbirdin, Dr. Biol. Sc., Bashkir State University, Ufa, Russia
M. S. Kuyukina (editor in chief), Dr. Biol. Sc., Perm State University, Perm, Russia
S. A. Ovesnov, Dr. Biol. Sc., Perm State University, Perm, Russia
L. G. Perevedenceva, Dr. Biol. Sc., Perm State University, Perm, Russia
O. Yu. Ustinova, Dr. Med. Sc., Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, Perm, Russia

Contributed editor of the issue *S. A. Ovesnov*

© Editorial Board, 2025

Founder and Publisher Address:
614068, Perm, Bukireva, 15;
Tel: 8 (342) 2396435; E-mail: info@psu.ru
For subscription, visit the catalog of Ural-Press: <https://www.ural-press.ru/catalog/97266/8940022/>. Index 41000

The journal is registered with the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media. Certificate of registration of mass media PI No. FS 77-66484 dated July 14, 2016.

Editorial office address: 614068, Perm, Bukireva, 15;
Tel.: 8 (342) 2396233
E-mail: vestnik_psu_bio@mail.ru
Website: press.psu.ru/index.php/bio

Содержание

Ботаника

<i>Газиева Э. М., Ишмуратова М. М., Ишибирдин А. Р.</i> Эпидермальные характеристики листа некоторых видов рода <i>Valeriana</i>	327
<i>Госькова М. С., Науменко Н. И., Алалыкин А. С.</i> Альгофлора родников Ижевска	338
<i>Ефимик Е. Г., Абдулманова И. Ф.</i> <i>Lycopodiella inundata</i> (L.) Holub (<i>Lycopodium inundatum</i> L.) в Красной книге Пермского края	351
<i>Мифтахова С. А.</i> Биология цветения <i>Chaenomeles japonica</i> (Thunb.) Lindl. ex Spach при интродукции на Севере	361
<i>Спирина В. Л., Сарапульцева П. Ю., Зайцев А. А., Новоселова Л. В., Исидоров В. А.</i> Растения травяно-кустарничкового яруса сосняков зеленомошной и травяной групп ООПТ «Осинская лесная дача» как источник реактивных летучих органических соединений	369
<i>Тимушева О. К., Скроцкая О. В., Сорокопудов В. Н.</i> Размножение зелеными черенками перспективных сортов смородины черной в культуре на Севере (Республика Коми)	383

Зоология

<i>Власов С. В., Есюнин С. Л.</i> Новые указания пауков (Arachnida: Araneae) для фауны Башкортостана .	391
--	-----

Микробиология

<i>Ананьина Л. Н., Шестакова Е. А., Старцева А. В., Горбунов А. А.</i> Влияние бактерии <i>Salinicola socius</i> SMB35 ^T на рост озимого рапса при низкой положительной температуре	396
<i>Коробейникова А. С., Голубев Д. М., Тарасюк А. К., Уткин Д. В., Нечаева О. В., Глинская Е. В.</i> Биопленки углеводородокисляющих бактерий антропогенно нарушенных почв г. Когалыма . . .	406
<i>Нечаева Ю. И., Пьянкова А. А., Плотникова Е. Г.</i> Штамм-деструктор фталатов <i>Stutzerimonas</i> sp. SJ1gcoг из почвы береговой зоны техногенного галошлочногo водоема	415

Экология

<i>Митракова Н. В., Султанова Н. С.</i> Эколого-биологические свойства литостратов рекультивированных отвалов Кизеловского угольного бассейна	424
<i>Нгуен Т. Ф., Парахина Е. А.</i> Мониторинг изменений зеленых зон на основе многовременных данных спутника Sentinel-2 в городе Тхайнгуен, Вьетнам	434

Иммунология

<i>Гейн О. Н., Бобровская О. В., Ибатуллин М. В., Гейн В. Л., Гейн С. В.</i> Влияние натриевых солей пирроло[3,4-с]-пиразол-3-онов и 1-фенилпиразол-3-карбоксамида на функциональную активность клеток врожденного иммунитета в экспериментальных моделях патологических состояний у мышей	445
--	-----

Contents

Botany

- Gazieva E. M., Ishmuratova M. M., Ishbirdin A. R.* Epidermal characteristics of the leaf in selected *Valeriana* species 327
- Goskova S. M., Naumenko N. I., Alalykin A. S.* Algal flora in the springs of Izhevsk 338
- Efimik E. G., Abdulmanova I. F.* *Lycopodiella inundata* (L.) Holub (*Lycopodium inundatum* L.) in the Red Book of Perm Krai 351
- Miftakhova S. A.* Biology of *Chaenomeles japonica* (Thunb.) Lindl. ex Spach flowering during introduction in the North 361
- Spirina V. L., Sarapultseva P. Yu., Zaitsev A. A., Novoselova L. V., Isidorov V. A.* Plants of the herbaceous-shrub layer in Specially Protected Natural Area the Osinskaya lesnaya dacha as a source of reactive volatile organic compounds 369
- Timusheva O. K., Skrotskaya O. V., Sorokopudov V. N.* Propagation by green cuttings of promising varieties of black currant in cultivation in the North (Komi Republic) 383

Zoology

- Vlasov S. V., Esyunin S. L.* New records of spiders (Arachnida: Araneae) for Bashkortostan fauna 391

Microbiology

- Anan'ina L. N., Shestakova E. A., Startseva A. V., Gorbunov A. A.* Effect of the *Salinicola socius* SMB35^T bacteria on the growth of winter rape at low positive temperature 396
- Korobeynikova A. S., Golubev D. M., Tarasyuk A. K., Utkin D. V., Nechaeva O. V., Glinskaya E. V.* Biofilms of hydrocarbon-oxidizing bacteria from anthropogenic soils in Kogalym 406
- Nechaeva Yu. I., Pyankova A. A., Plotnikova E. G.* Phthalate-degrading strain *Stutzerimonas* sp. SJ1gcor from soil in the coastal zone of a technogenic saline-alkaline reservoir 415

Ecology

- Mitrakova N. V., Sultanova N. S.* Ecological and biological properties of lithostrats of recultivated dumps in the Kizel coal basin 424
- Thanh Phong N., Parakhina E. A.* Monitoring of green zone changes based on multitemporal Sentinel-2 satellite data in the city of Thai Nguyen, Vietnam 434

Immunology

- Gein O. N., Bobrovskaya O. V., Ibatullin M. V., Gein V L., Gein S. V.* The effect of sodium salts of pyrrolo[3,4-c]-pyrazol-3-ones and 1-phenylpyrazole-3-carboxamides on the functional activity of innate immune cells in experimental models of pathological conditions in mice 445

БОТАНИКА

Научная статья

УДК 582.975: 581.8

EDN: APLRTM

doi: 10.17072/1994-9952-2025-4-327-337



**Эпидермальные характеристики листа некоторых видов
рода *Valeriana***

Эльмира Миниахметовна Газиева^{1, 2}, Майя Мунировна Ишмуратова^{3✉},
Айрат Римович Ишбирдин⁴

¹ Уфимский лесотехнический техникум, Уфа, Россия, snowwood@mail.ru

²⁻⁴ Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

^{3✉} ishmuratova@mail.ru

⁴ ishbirdin@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты изучения эпидермальных признаков листьев близкородственных видов рода *Valeriana* – *V. alternifolia* Ledeb., *V. officinalis* L., *V. wolgensis* Kazak., *V. tuberosa* L., *V. dubia* Bunge. Изучены тип листа по расположению устьиц на адаксиальной и абаксиальной сторонах листа, качественные и количественные признаки эпидермы листа, число эпидермальных клеток, длина, ширина, индекс и форма эпидермальных клеток, тип устьичного комплекса, число устьиц, длина, ширина и индекс замыкающих клеток устьиц, устьичный индекс. Стоматографические признаки изучали методом микроскопирования, типы устьичного комплекса определяли по методике М.А. Барановой (1985). Индекс эпидермальных клеток и замыкающих клеток устьиц подсчитывали как отношение ширины к их длине. Установлено, что тип листа *V. alternifolia* и *V. officinalis* одинаковый – гипостоматный, т.е. устьица расположены только на абаксиальных сторонах листа. *V. wolgensis*, *V. dubia* и *V. tuberosa* амфистоматный т.е. устьица присутствуют на верхней и нижней поверхностях листа. Выявлено, что устьичный комплекс у исследуемых видов аномоцитного типа, крайне редко встречается парацитный тип. *V. dubia* характеризуется наличием большего числа эпидермальных клеток, чем у остальных изучаемых видов. Форма эпидермальных клеток на адаксиальной стороне листа редко-извилистая (*V. officinalis*) или крупно-извилистая (*V. alternifolia*), на абаксиальной стороне листа – часто-извилистая (*V. alternifolia* и *V. officinalis*). Показано, что перечисленные качественные и количественные признаки эпидермы листа могут являться дополнительными таксономическими признаками для дифференциации близкородственных видов *V. alternifolia* и *V. officinalis*.

Ключевые слова: *Valeriana alternifolia*, *Valeriana officinalis*, *Valeriana dubia*, *Valeriana tuberosa*, лист, эпидерма, стоматографические признаки

Для цитирования: Газиева Э. М., Ишмуратова М. М., Ишбирдин А. Р. Эпидермальные характеристики листа некоторых видов рода *Valeriana* // Вестник Пермского университета. Сер. Биология. 2025. Вып. 4. С. 327–337. <http://dx.doi.org/10.17072/1994-9952-2025-4-327-337>.

Благодарности: работа выполнена в рамках тем научной школы «Разнообразие, популяционные и онтогенетические механизмы устойчивости, охрана, воспроизводство и рациональное использование растительных ресурсов» Уфимского университета науки и технологий.

BOTANY

Original article

Epidermal characteristics of the leaf in selected *Valeriana* species

Elmira M. Gazieva^{1, 2}, Maya M. Ishmuratova^{3✉}, Ayrat R. Ishbirdin⁴

¹ Ufa Forestry Technical College, Ufa, Russia, snowwood@mail.ru

²⁻⁴ Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

^{3✉} ishmuratova@mail.ru

⁴ ishbirdin@mail.ru

Abstract. The article presents the results of a study of leaf epidermal characters in closely related species of the genus *Valeriana* – *Valeriana alternifolia* Ledeb. *Valeriana officinalis* L., *Valeriana wolgensis* Kazak, *Valeriana tuberosa*

L., *Valeriana dubia* Bunge. The following were studied: leaf type based on the location of stomata on the adaxial and abaxial sides of the leaf, qualitative and quantitative characters of the leaf epidermis, the number of epidermal cells, length, width, index and shape of epidermal cells, the type of stomatal complex, the number of stomata, the length, width and index of stomatal guard cells, and the stomatal index. Stomatographic characters were studied by microscopy, types of stomatal complex were determined according to the method of M.A. Baranova (1985). The index of epidermal cells and stomatal guard cells was calculated as the ratio of the width to their length. It was established that the leaf type of *V. alternifolia* and *V. officinalis* is the same – hypostomate, i.e. the stomata are located only on the abaxial sides of the leaf. *V. wolgensis*, *V. dubia* and *V. tuberosa* are amphistomate, i.e. the stomata are present on the upper and lower surface of the leaf. It was revealed that the stomatal complex of the studied species is of the anomocytic type, the paracytic type of the stomatal complex is extremely rare. *V. dubia* is characterized by the presence of a greater number of epidermal cells than in the other studied species. There are no stomata on the adaxial side of the leaf of *V. alternifolia* and *V. officinalis*. The shape of the epidermal cells on the adaxial side of the leaf is sparsely sinuous (*V. officinalis*) or coarsely sinuous (*V. alternifolia*), on the abaxial side of the leaf it is frequently sinuous (*V. alternifolia* and *V. officinalis*). It is shown that the listed qualitative and quantitative characteristics of the leaf epidermis can serve as additional taxonomic characters for differentiating the closely related species *V. alternifolia* and *V. officinalis*.

Keywords: *Valeriana alternifolia*, *Valeriana officinalis*, *Valeriana dubia*, *Valeriana tuberosa*, leaf, epidermis, dental characters

For citation: Gazieva E. M., Ishmuratova M. M., Ishbirdin A. R. [Epidermal characteristics of the leaf in selected *Valeriana* species]. *Bulletin of Perm University. Biology*. Iss. 4 (2025): pp. 327-337. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.17072/1994-9952-2025-4-327-337>.

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of the topics of the scientific school “Diversity, population and ontogenetic mechanisms of sustainability, protection, reproduction and rational use of plant resources” of the Ufa University of Science and Technology.

Введение

Род *Valeriana* L. (сем. *Valerianaceae* Batsch) насчитывает по последним данным 289 видов [*Valeriana officinalis* L., 2010]. Многие виды рода *Valeriana* являются источниками валепотриатов и эфирных масел и широко используются в качестве дополнительного источника сырья седативного действия, обладают седативным действием [Фурса, Горбунов, 1979; Ломагина, Данчул, 1990; Горбунов, 2002]. Виды подсекции *Valeriana* близки морфологически и одновременно обладают высокой изменчивостью морфологических признаков вегетативных и репродуктивных органов, что затрудняет их таксономическую идентификацию. В связи с этим появляется необходимость поиска дополнительных признаков для дифференциации близкородственных видов по морфологическим признакам вегетативных и репродуктивных органов [Халиуллин, Ишмуратова, Ишбирдин, 2021; Ишмуратова и др., 2024].

Цель – изучить особенности эпидермальных признаков листа близкородственных видов *Valeriana alternifolia* Ledeb. и *V. officinalis* L., *Valeriana wolgensis* Kazak, *Valeriana tuberosa* L., *Valeriana dubia* Bunge.

Материалы исследования

Материалом для изучения stomatографических признаков являлись листья *V. alternifolia*, *V. officinalis*, *V. wolgensis*, *V. tuberosa*, *V. dubia*, которые были собраны с растений в районах Центральной Якутии (Республика Саха (РЯ)), по побережью р. Амги (левый берег), Таттинский улус в 2007 г. (*V. alternifolia*); в Республике Башкортостан: Архангельский р-н, болото, пойма р. Аскын в 2018, 2021 гг. (*V. officinalis*), Баймакский р-н, д. Старый Сибай в 2006 г. (*V. dubia*), Белорецкий р-н, Южно-Уральский государственный природный заповедник (ЮУГПЗ) в 2006–2010 гг. (*V. wolgensis*), Баймакский р-н, д. Старый Сибай, в 2007 г. (*V. tuberosa*).

Эпидермальные признаки листа изучали при помощи микроскопа «Микромед-2» при увеличении 10×40 и окулярного микрометра. Измерения проведены в 30-кратной повторности с подсчетом средней величины.

Изучены тип листа по наличию устьиц на адаксиальной и абаксиальной сторонах листа; на адаксиальной и абаксиальной сторонах листа – типы устьичных комплексов; число эпидермальных клеток и устьиц в поле зрения микроскопа с пересчетом на 1 мм²; длина, ширина (мкм), индекс (отношение длины к ширине эпидермальных клеток); форма эпидермальных клеток, длина и ширина (мкм), индекс (отношение длины к ширине) устьиц. При описании формы и характера очертания клеток эпидермы пластинки листа использовали методику и терминологию С.Ф. Захаревича [1954], типы устьичного комплекса определяли в соответствии с классификацией М.А. Барановой [1985]. Устьичный индекс определяли по формуле

$$U_i = \frac{u_n}{k_n} + u_n,$$

где $кнэ$ – число эпидермальных клеток нижней эпидермы на 1 мм^2 , $унэ$ – число устьиц нижней эпидермы на 1 мм^2 [Захаревич, 1954].

Для анализа использовали листья средней формации, препараты изготавливали из средней части листовой пластинки между главной жилкой и краем листа.

С помощью коэффициента вариации оценивали изменчивости стоматографических признаков. Расчет статистических характеристик проводили в программе Microsoft Excel. Уровни варьирования приняты по Г.Н. Зайцеву: $C_v > 20\%$ – высокий, $C_v = 11\text{--}20\%$ – средний, $C_v < 10\%$ – низкий [Зайцев, 1991].

Результаты и обсуждение

Лист *Valeriana officinalis* гипостоматный (устьица расположены только на нижней стороне листа), покрыт однослойной эпидермой. Стоматографические характеристики *V. officinalis* представлены на рис. 1, 2 и в табл. 1, 2. На адаксиальной стороне листа *V. officinalis* эпидермальные клетки имеют редко-извилистую, иногда округлую форму, устьица отсутствуют (рис. 1).

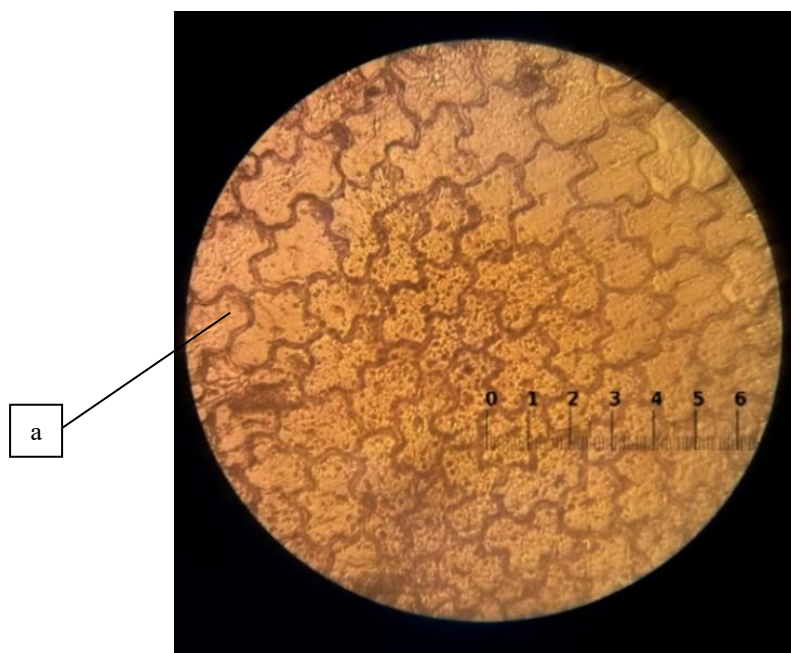


Рис. 1. Эпидерма адаксиальной стороны листа *Valeriana officinalis* L.:

а – эпидермальная клетка

[Adaxial leaf epidermis of *Valeriana officinalis* L.:

a - epidermal cell]

Число эпидермальных клеток на адаксиальной стороне листа *V. officinalis* в пересчете на 1 мм^2 составляет 428 шт. , на абаксиальной стороне листа в 2.5 раза больше – 1083 шт.

Эпидермальные клетки абаксиальной стороны листа *V. officinalis* относительно вытянутые, часто-извилистые, многоугольные (рис. 2), в 1.5–1.8 раз мельче, чем на адаксиальной стороне. Устьица на абаксиальной стороне листа *V. officinalis* расположены одиночно (рис. 2), поверхностно, имеют вытянуто-округлую форму. Размеры замыкающих клеток устьиц: длина – $26.5\pm 1.9\text{ мкм}$, ширина – $17.1\pm 0.1\text{ мкм}$. Число устьиц на 1 мм^2 – 214 шт. Устьичный индекс – 0.1.

По данным Ю.Н. Горбунова [2002], длина замыкающих клеток устьиц *V. officinalis* составляет $29.16\pm 0.52\text{ мкм}$ (на территории бывшего СССР), в нашей работе длина замыкающих клеток устьиц *V. officinalis* равна $41.1\pm 0.06\text{ мкм}$.

Лист *V. alternifolia* гипостоматный (устьица расположены только на нижней стороне листа), покрыт однослойной эпидермой. Стоматографические характеристики *V. alternifolia* представлены на рис. 3, 4 и в табл. 1, 2. На адаксиальной стороне листа *V. alternifolia* эпидермальные клетки относительно крупнее (рис. 3), чем на абаксиальной стороне (рис. 4). Эпидермальные клетки адаксиальной стороны листа *V. alternifolia* имеют крупно-извилистую, вытянутую форму, а на абаксиальной стороне листа они имеют глубоко-извилистую вытянутую форму, в 1.1–1.2 раза мельче, чем на адаксиальной стороне. Число эпидермальных клеток на 1 мм^2 на адаксиальной стороне листа составляет 151 шт. , на абаксиальной – в 1.8 раза больше – 283 шт. Устьица расположены лишь на абаксиальной стороне листа *V. alternifolia* (рис. 4).

Устьица одиночные, поверхностные, имеют вытянуто-округлую форму. Размеры замыкающих клеток устьиц *V. alternifolia*: длина – 41.1 ± 0.06 мкм, ширина – 22.5 ± 0.1 мкм. Число устьиц на 1 мм^2 75 шт. Устьичный индекс – 0.2.

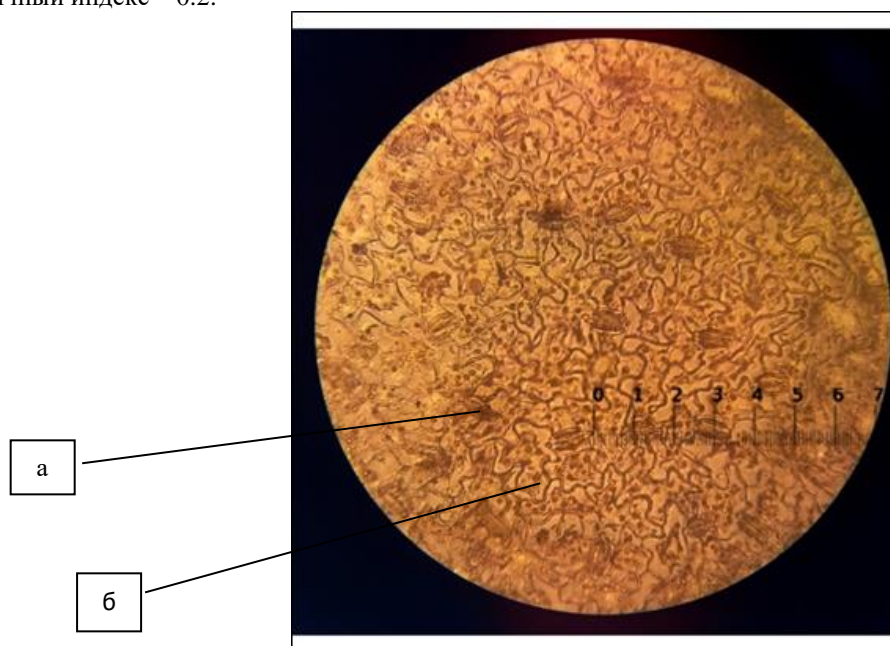


Рис. 2. Эпидерма абаксиальной стороны листа *Valeriana officinalis* L.:

а – устьице, б – эпидермальная клетка

[Abaxial leaf epidermis of *Valeriana officinalis* L.:

a - stomata; b - epidermal cell]

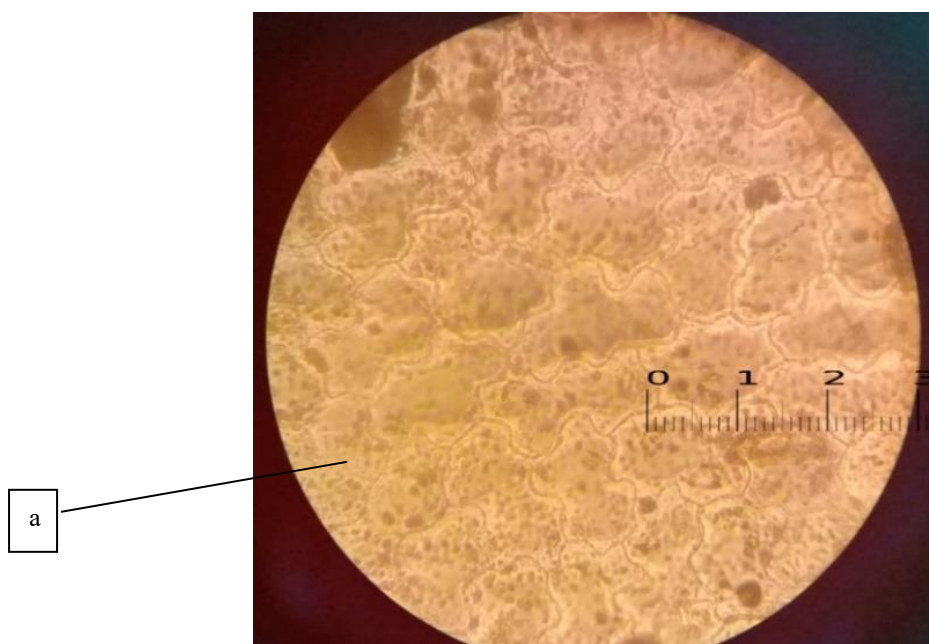


Рис. 3. Эпидерма адаксиальной стороны листа *Valeriana alternifolia* Ledeb.:

а – эпидермальная клетка

[Adaxial leaf epidermis of *Valeriana alternifolia* Ledeb.:

a - epidermal cell]

По данным Ю.Н. Горбунова [2002], длина замыкающих клеток устьиц *V. alternifolia* из Приморского края составляет 35.21 ± 0.78 мкм, из Читинской области и Якутии – 32.12 ± 0.61 мкм, что несколько мельче, чем у растений *V. alternifolia*, собранных нами в районах Центральной Якутии.

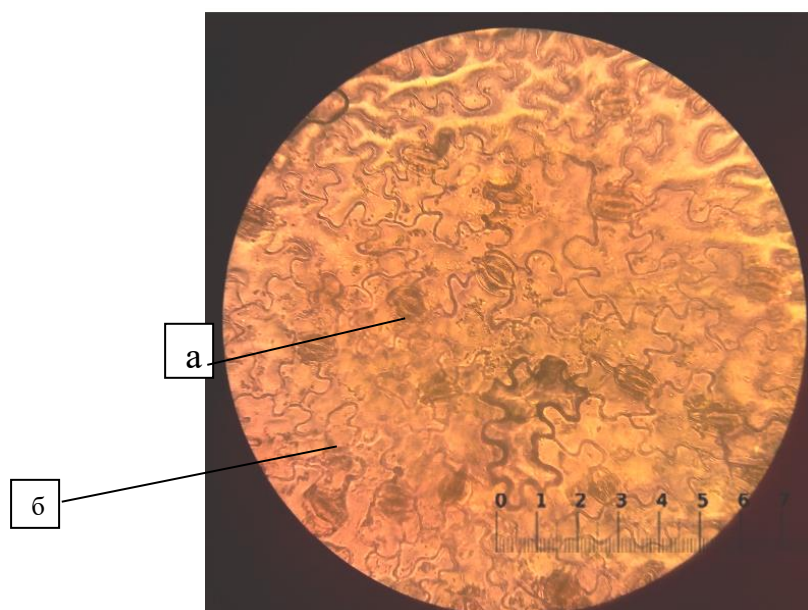


Рис. 4. Эпидерма абаксиальной стороны листа *Valeriana alternifolia* Ledeb.:

а – устьице; б – эпидермальная клетка

[Abaxial leaf epidermis of *Valeriana alternifolia* Ledeb.:

a - stomata; b - epidermal cell]

Лист *V. wolgensis* амфистоматный (устьица расположены на верхней и нижней сторонах листа), покрыт однослойной эпидермой. Стоматографические характеристики *V. wolgensis* представлены на рис. 5, 6 и в табл. 1, 2.

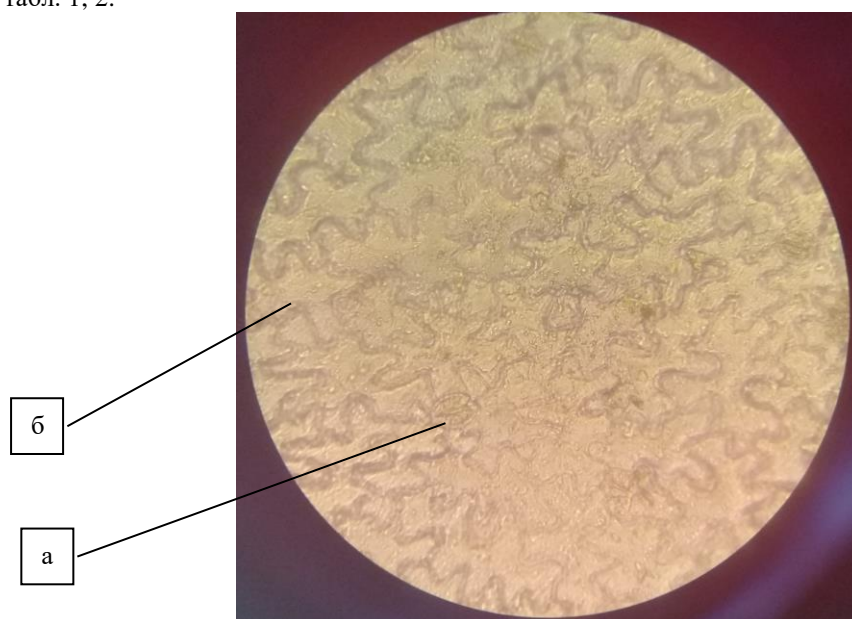


Рис. 5. Эпидерма адаксиальной стороны листа *Valeriana wolgensis* Kazak.:

а – устьице; б – эпидермальная клетка

[Adaxial leaf epidermis of *Valeriana wolgensis* Kazak.:

a - stomata; b - epidermal cell]

На адаксиальной стороне листа *V. wolgensis* эпидермальные клетки относительно крупнее (рис. 5), чем на абаксиальной стороне (рис. 6). Эпидермальные клетки адаксиальной и абаксиальной сторон листа *V. wolgensis* имеют глубоко-извилистую, вытянутую форму. Число эпидермальных клеток на 1 мм² на адаксиальной стороне листа составляет 195 шт., на абаксиальной стороне в 2.0 раза больше – 409 шт. Размеры замыкающих клеток устьиц *V. wolgensis* адаксиальной стороны: длина – 41.3 ± 0.1 мкм, ширина –

23.5±0.2 мкм, абаксиальной стороны: длина – 24.6±0.2 мкм, ширина – 16.1±0.1 мкм. Число устьиц в пересчете на 1 мм² – 13 шт. на адаксиальной стороне листа и 63 шт. – на абаксиальной стороне листа. Устьичный индекс равен 0.1.

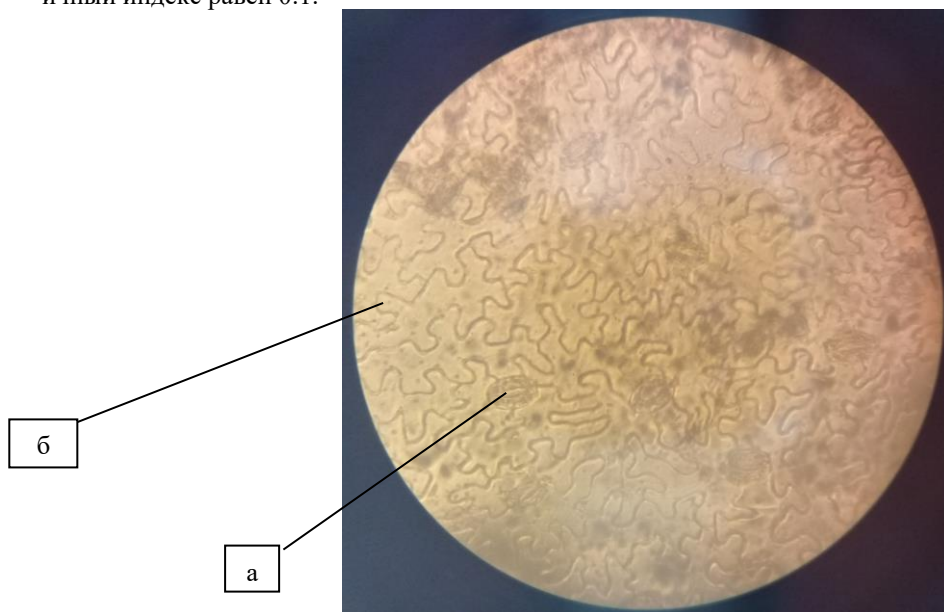


Рис. 6. Эпидерма абаксиальной стороны листа *Valeriana wolgensis* Kazak.:
а – устьице; б – эпидермальная клетка

[Abaxial leaf epidermis of *Valeriana wolgensis* Kazak.:
a - stomata; b - epidermal cell]

Лист *V. tuberosa* амфистоматный, покрыт однослойной эпидермой. Стоматографические характеристики *V. tuberosa* представлены на рис. 7, 8 и в табл. 1, 2. Эпидермальные клетки адаксиальной стороны листа *V. tuberosa* имеют часто-извилистую, вытянутую форму. На абаксиальной стороне форма эпидермальных клеток крупно-извилистая, распластанная. Углы между соседними клетками закругленные, тупые (рис. 8). Число эпидермальных клеток на 1 мм² на адаксиальной стороне листа составляет 397 шт., на абаксиальной стороне – 447 шт. Размеры замыкающих клеток устьиц *V. tuberosa*: на адаксиальной стороне листа: длина – 35.6±0.6 мкм, ширина – 20.2±0.3 мкм; на абаксиальной: длина – 33.5±0.7 мкм, ширина – 19.8±0.4 мкм. Число устьиц в пересчете на 1 мм² 88 шт. – на адаксиальной стороне, 145 шт. – на абаксиальной. Устьичный индекс – 0.2.

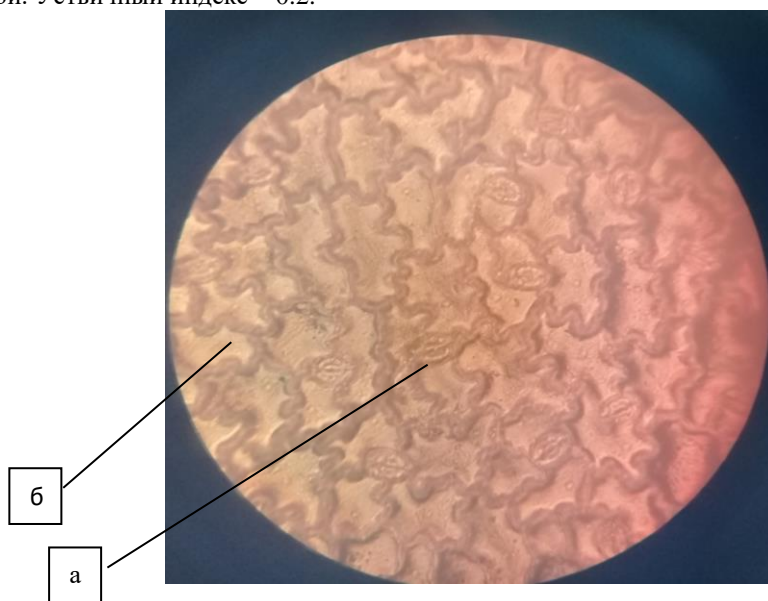


Рис. 7. Эпидерма адаксиальной стороны листа *Valeriana tuberosa* L.:
а – устьице; б – эпидермальная клетка

[Adaxial leaf epidermis of *Valeriana tuberosa* L.:
a - stomata; b - epidermal cell]

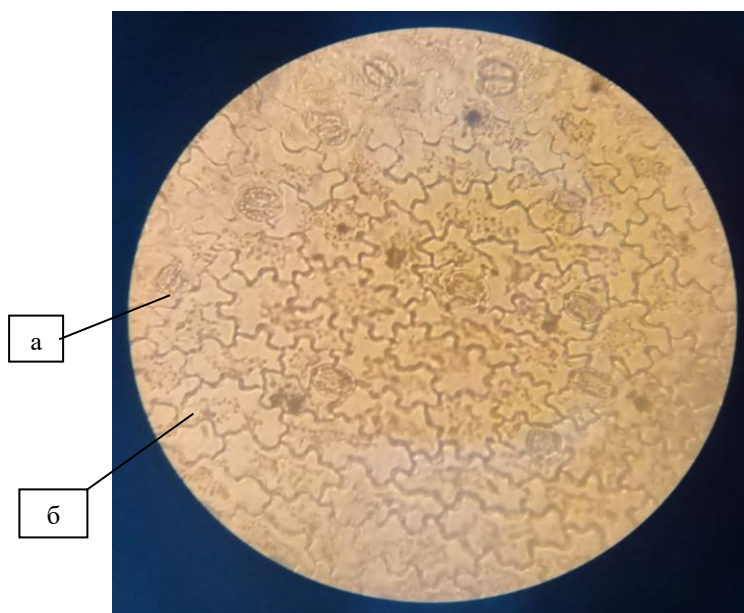


Рис. 8. Эпидерма абаксиальной стороны листа *Valeriana tuberosa* L.:
а – устьице; б – эпидермальная клетка

[Abaxial leaf epidermis of *Valeriana tuberosa* L.:
a - stomata; b - epidermal cell]

Лист *V. dubia* амфистоматный, покрыт однослойной эпидермой. Стоматографические характеристики *V. dubia* представлены на рис. 9, 10 и в табл. 1, 2. На адаксиальной стороне листа *V. dubia* эпидермальные клетки относительно редко-извилистыми очертаниями стенок (рис. 9), чем на абаксиальной стороне (рис. 10). На абаксиальной стороне листа эпидермальные клетки имеют глубоко-извилистую, вытянутую форму. Число эпидермальных клеток на 1 мм² 435 шт. – адаксиальной стороне листа, 529 шт. – абаксиальной стороне листа (рис. 10). Размеры замыкающих клеток устьиц *V. dubia*: на адаксиальной стороне листа: длина – 36.8 ± 0.8 мкм, ширина – 21.5 ± 0.4 мкм, на абаксиальной: длина – 33.9 ± 0.6 мкм, ширина – 21.5 ± 0.2 мкм. Число устьиц в перчете на 1 мм² составляет на адаксиальной стороне 19 шт., на абаксиальной – 113 шт. Устьичный индекс – 0.2.

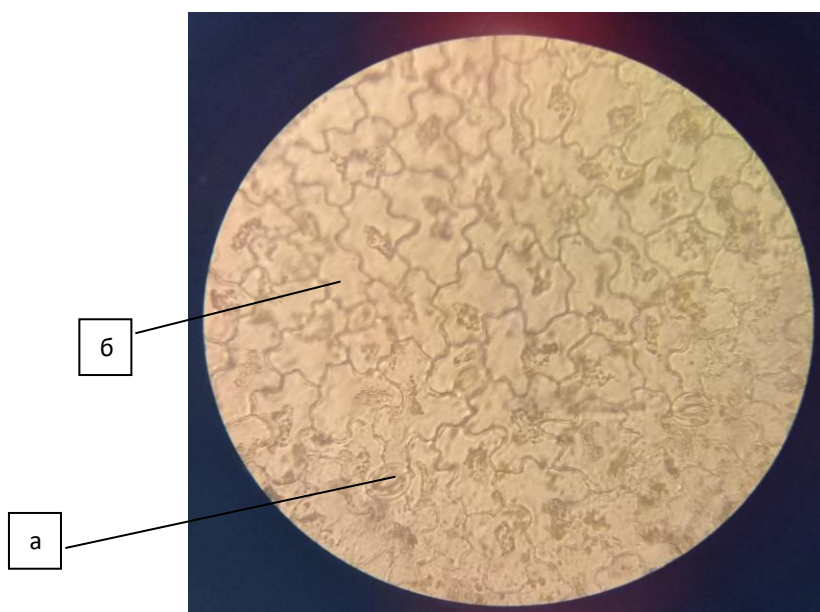


Рис. 9. Эпидерма адаксиальной стороны листа *Valeriana dubia* Bunge:
а – устьице; б – эпидермальная клетка

[Adaxial leaf epidermis of *Valeriana dubia* Bunge:
a - stomata; b - epidermal cell]

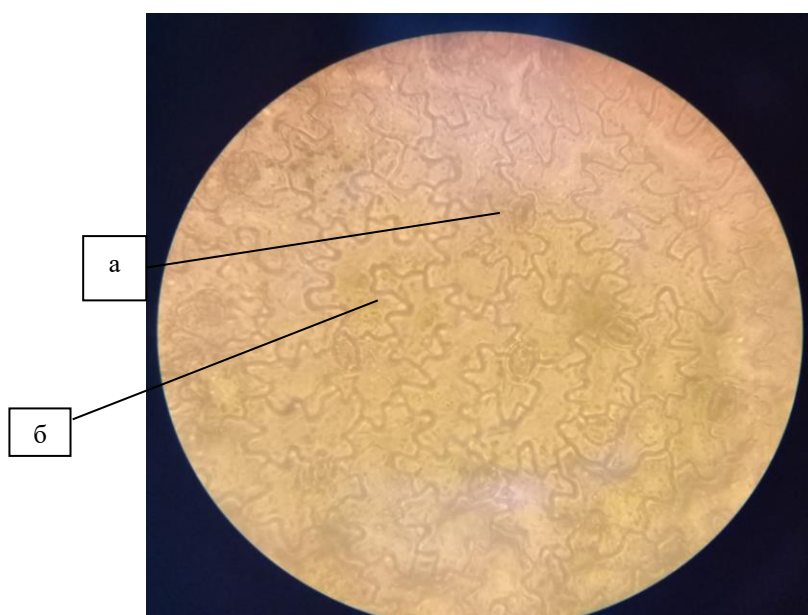


Рис. 10. Эпидерма абаксиальной стороны листа *Valeriana dubia* Bunge:

а – устьице; б – эпидермальная клетка

[Abaxial leaf epidermis of *Valeriana dubia* Bunge:

a - stomata; b - epidermal cell]

Тип листа у *V. alternifolia* и *V. officinalis* одинаковый – гипостоматный, т. е. устьица расположены только на абаксиальной стороне листа, что является показателем адаптации растения к влажным условиям обитания. *Valeriana alternifolia* встречается в местообитаниях с различным режимом увлажнения – от пойменных до остепненных лугов и опушек и обладает широким эколого-ценотическим ареалом [Семенова, Егорова, 2013; Ишмуратова и др., 2017]. *Valeriana officinalis* обитает на заболоченных, пойменных, влажных и низинных лугах, среди кустарников на опушках [Ишмуратова и др., 2024]. У *V. tuberosa*, *V. dubia*, *V. wolgensis* амфистоматный тип листа, характеризуются анамоцитным и гемипарацитным устьичными комплексами. *Valeriana tuberosa* и *V. dubia* обитают в степных экотопах [Горбунов, 2005; Ишмуратова и др., 2024].

Выявлено, что устьичный комплекс у *V. alternifolia* и *V. officinalis* одинаковый – аномоцитного типа, т. е. замыкающие клетки устьиц окружены 3–7 соседними клетками, не отличающимися по форме от остальных клеток эпидермы. Крайне редко, единично у видов встречается парацитный тип устьичного комплекса, т. е. каждая из замыкающих клеток устьиц сопровождается одной или более побочными клетками, расположенными параллельно замыкающим клеткам.

Число устьиц на адаксиальной стороне листа с расчетом на 1 мм² у *V. tuberosa* в 5–7 раз больше, чем у *V. wolgensis* и *V. dubia*. На абаксиальной стороне листа максимальное число устьиц у *V. officinalis* и минимальное – у *V. wolgensis*. Размеры замыкающих клеток устьиц на адаксиальной стороне листа у *V. wolgensis* больше в разы, чем у *V. dubia*, *V. tuberosa*. На абаксиальной стороне *V. alternifolia* в 1.2–1.5 больше, чем у *V. officinalis*, *V. tuberosa*, *V. dubia* и *V. wolgensis*. Индексы замыкающих клеток устьиц и устьичные индексы исследованных видов близки (табл. 1).

Число эпидермальных клеток у всех исследованных видов на абаксиальной стороне листа больше, чем на адаксиальной в 1.1–2.5 раз, а их размеры (длина и ширина) на адаксиальной стороне листа больше, чем на абаксиальной (табл. 2).

Известно, что *V. alternifolia* представлена двумя цитотипами (2n=28, 2n=56): растения из Читинской области и Якутии имеют тетраплоидный набор – 2n=28, а из Приморского края – октоплоидный – 2n=56 [Горбунов, 2002]. Полагаем, что относительно крупные размеры эпидермальных клеток *V. alternifolia* (табл. 2) в наших исследованиях связаны с высокой плоидностью.

Общим проявлением у *V. alternifolia* и *V. officinalis* является различие формы эпидермальных клеток и их очертаний на адаксиальной и абаксиальной сторонах листа. На адаксиальной стороне листа эпидермальные клетки имеют редко-извилистую, иногда округлую форму (*V. officinalis*) или крупно-извилистую, вытянутую форму (*V. alternifolia*). На абаксиальной стороне листа эпидермальные клетки у *V. alternifolia* и *V. officinalis* имеют часто-извилистую, многоугольную форму.

Таблица 1

Характеристика устьичного комплекса видов рода *Valeriana* L. ($M \pm m$ / CV, %)[Characteristics of the stomatal complex of the genus *Valeriana* L. ($M \pm m$ / CV, %)]

Вид	Число устьиц, шт./1 мм ²		Размеры замыкающих клеток устьиц, мкм				Устьичный индекс	
			длина		ширина			
	ад./ ad.	аб./ ab.	ад./ ad.	аб./ ab.	ад./ ad.	аб./ ab.		Индекс
<i>V. alternifolia</i>	-	<u>75.0±0.2</u> 8.0	-	<u>41.1±0.06</u> 0.7	-	<u>22.5±0.1</u> 3.1	0.5	0.2
<i>V. officinalis</i>	-	<u>214.0±1.7</u> 22.5	-	<u>26.5±1.9</u> 7.1	-	<u>17.1±0.1</u> 5.0	0.6	0.1
<i>V. wolgensis</i>	<u>13.0±0.1</u> 29.4	<u>63.0±0.1</u> 8.7	<u>41.3±0.1</u> 1.1	<u>24.6±0.2</u> 5.1	<u>23.5±0.2</u> 3.5	<u>16.1±0.1</u> 1.9	0.6	0.1
<i>V. tuberosa</i>	<u>88.0±0.4</u> 14.9	<u>145.0±0.3</u> 6.5	<u>35.6±0.6</u> 7.7	<u>33.5±0.7</u> 10.3	<u>20.2±0.3</u> 8.3	<u>19.8±0.4</u> 9.7	0.6	0.2
<i>V. dubia</i>	<u>19.0±0.4</u> 55.1	<u>113.0±0.6</u> 16.9	<u>36.8±0.8</u> 9.9	<u>33.9±0.6</u> 8.0	<u>21.5±0.4</u> 8.8	<u>21.5±0.2</u> 4.5	0.6	0.1

Примечание: сторона листа: ад. – адаксиальная сторона, аб. – абаксиальная сторона.

В целом, коэффициент вариации стоматографических признаков исследованных признаков у видов рода *Valeriana* различен. Низкая вариабельность (Cv) (до 10%) для *V. alternifolia*, *V. officinalis*, *V. wolgensis* у таких признаков, как длина эпидермальных клеток адаксиальной и абаксиальной сторон листа, у *V. dubia* – длина эпидермальных клеток адаксиальной стороны. Также низкий уровень изменчивости характерен для признаков: ширина эпидермальных клеток у *V. officinalis* (адаксальная сторона), *V. wolgensis* (адаксиальная и абаксиальная сторона), *V. tuberosa* (адаксиальная и абаксиальная стороны), *V. dubia* (абаксиальная сторона), *V. alternifolia* (адаксиальная и абаксиальная стороны), а также число устьиц на абаксиальной стороне – у *V. wolgensis*, *V. tuberosa*, *V. alternifolia*.

Таблица 2

Характеристика эпидермальных клеток видов рода *Valeriana* L. ($M \pm m$ / CV, %)[Characteristics of epidermal cells of the genus *Valeriana* L. ($M \pm m$ / CV, %)]

Вид	Число эпидермальных клеток шт./мм ²		Размеры эпидермальных клеток, мкм				индекс
			длина		ширина		
	ад./ ad.	аб./ ab.	ад./ ad.	аб./ ab.	ад./ ad.	аб./ ab.	
<i>V. alternifolia</i>	<u>151.2±0.6</u> 3.9	<u>283.0±0.6</u> 6.2	<u>103.0±1,0</u> 4.4	<u>82.4±0.3</u> 1.7	<u>33.6±0.6</u> 8.5	<u>27.1±0.1</u> 3.2	0.3
<i>V. officinalis</i>	<u>428.0±0.3</u> 2.5	<u>1083.0±0.8</u> 2.1	<u>79.9±0,1</u> 0,9	<u>52.6±0.4</u> 3.8	<u>35.3±0.2</u> 2.6	<u>19.0±0.4</u> 10.2	0.4
<i>V. wolgensis</i>	<u>195.0±0.2</u> 3.3	<u>409.0±0.1</u> 3.4	<u>100.1±0.7</u> 3.4	<u>71.0±0.3</u> 2.1	<u>35.9±0.4</u> 5.1	<u>21.4±0.2</u> 5.8	0.3
<i>V. tuberosa</i>	<u>397.0±0.8</u> 5.7	<u>447±0.4</u> 3.0	<u>79.5±0.7</u> 4.2	<u>81.1±0.5</u> 3.1	<u>44.7±0.9</u> 9.3	<u>40.3±0.4</u> 5.4	0.5
<i>V. dubia</i>	<u>435.0±3.1</u> 20.3	<u>529.0±0.7</u> 4.0	<u>71.2±1.0</u> 6.7	<u>86.4±2.3</u> 11.9	<u>35.4±2.1</u> 26.8	<u>22.4±0.3</u> 6.9	0.2

Примечание: сторона листа: ад. – адаксиальная сторона, аб. – абаксиальная сторона.

Средняя вариабельность признаков ($10 \leq Cv \leq 20\%$) выявлена у *V. dubia* для следующих признаков: длина эпидермальных клеток абаксиальной стороны листа, число устьиц на абаксиальной стороне листа; у *V. officinalis* – для признаков ширина эпидермальных клеток абаксиальной стороны листа; у *V. tuberosa* – число устьиц на адаксиальной стороне листа, длина устьиц на абаксиальной стороне листа. Изменчивость оставшихся исследованных признаков высокая (20%).

Максимальный коэффициент вариации демонстрируют признаки число устьиц у *V. officinalis* на адаксиальной стороне листа, у *V. wolgensis* – на абаксиальной стороне листа, у *V. dubia* – на адаксиальной стороне листа.

Заключение

Близкородственные виды подсекции *Valeriana* характеризуются разным типом листа: у *V. alternifolia* и *V. officinalis* гипостоматный тип, у *V. wolgensis* и *V. dubia* – амфистоматный. У *V. tuberosa* (секция *Tuberosae*) также амфистоматный тип листа. Тип устьичных комплексов у исследованных видов аномоцитный, крайне редко – парацитный.

Отличительными качественными и количественными признаками эпидермы листа изученных видов являются число, размеры (длина и ширина) и индекс эпидермальных клеток, число устьиц, размеры

(длина, ширина и индекс) замыкающих клеток устьиц, а также форма и характер очертаний эпидермальных клеток. *Valeriana dubia* характеризуется наличием большего числа эпидермальных клеток на адаксиальной стороне и меньшим – у *V. alternifolia*. На абаксиальной стороне их больше у *V. officinalis*, меньшее – у *V. alternifolia*. На адаксиальной стороне самые крупные эпидермальные клетки у *V. alternifolia*, самые мелкие – у *V. dubia*. На абаксиальной стороне листа самые крупные клетки у *V. dubia*, самые мелкие – у *V. officinalis*.

На адаксиальной стороне листа у *V. wolgensis* расположены самые крупные устьица, самые мелкие – у *V. tuberosa*. На абаксиальной стороне максимальные размеры устьиц у *V. alternifolia*, минимальные – у *V. wolgensis*. На адаксиальной стороне листа максимальное число устьиц расположено у *V. tuberosa* и минимальное число у *V. wolgensis*. На абаксиальной стороне листа максимальное число устьиц у *V. officinalis*, минимальное – у *V. wolgensis*.

Перечисленные качественные и количественные стоматографические признаки могут являться дополнительными таксономическими признаками для дифференциации близкородственных видов рода *Valeriana*.

Список источников

1. Баранова М.А. Классификация морфологических типов устьиц // Ботанический журнал. 1985. Т. 70, № 12. С. 1585–1595.
2. Горбунов Ю.Н. Валерианы флоры России и сопредельных государств: морфология, систематика, перспективы использования. М.: Наука, 2002. 207 с. EDN: TMFKVH.
3. Зайцев Г.Н. Математический анализ биологических данных. М.: Наука, 1991. 184 с.
4. Захаревич С.Ф. К методике описания эпидермиса листа // Вестник Ленинградского университета. 1954. Вып. 2, № 4. С. 65–75.
5. Ишмуратова М.М. и др. Эколого-фитоценотические, популяционные, ресурсные характеристики, биология семян и биотехнология *Valeriana alternifolia* Ledeb. // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Амосова. 2017. № 6. С. 18–25. DOI: 10.25587/SVFU.2017.62.8444. EDN: ZXWBFD.
6. Ишмуратова М.М. и др. Сравнительная характеристика морфологических признаков плодов некоторых видов рода *Valeriana* L. // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2024. Т. 185, № 2. С. 167–181. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-2-167-181. EDN: EBOYSW.
7. Ломагина З.В., Данчул Т.Ю. Семейство Valerianaceae Batch. // Растительные ресурсы СССР: Цветковые растения, их химический состав, использование. Л.: Наука, 1990. Т. 6. Caprifoliaceae – Plantaginaceae. С. 20–30.
8. Семенова В.В., Егорова П.С. Поливариантность онтогенеза *Valeriana alternifolia* Ledeb. и структура ее природных ценопопуляций в Якутии. Новосибирск: Наука, 2013. 109 с.
9. Фурса Н.С., Горбунов Ю.Н. Хемосистематическое изучение видов рода *Valeriana* L. флоры Кавказа // Растительные ресурсы. 1979. Т. 15, № 4. С. 500–506. EDN: VMZNDP.
10. Халиуллин Д.А., Ишмуратова М.М., Ишбирдин А.Р. Изменчивость морфологических признаков листа *Valeriana officinalis* L. и *V. alternifolia* Ledeb. // Вестник Пермского университета. Сер. Биология. 2021. Вып. 1. С. 18–25. DOI: 10.17072/1994-9952-2021-1-18-25. EDN: PGAQCV.
11. *Valeriana officinalis* L. // The Plant List. 2010. Version 1. URL: <http://www.theplantlist.org>.

References

1. Baranova M.A. [Classification of morphological types of stomata]. *Botanicheskij zhurnal*. V. 70, No. 12 (1985): pp. 1585-1595. (In Russ.).
2. Gorbunov Yu.N. *Valerianiy flory Rossii i sopredelnykh gosudarstv* [Valerian flora of Russia and neighboring countries: morphology, systematics, prospects of use]. Moscow, Nauka Publ., 2002. 207 p. (In Russ.). EDN: TMFKVH.
3. Zaitsev G.N. *Matematicheskij analiz biologicheskikh dannykh* [Mathematical analysis of biological data]. Moscow, Nauka Publ., 1991. 184 p. (In Russ.).
4. Zakharevich S.F. [To the method of describing the epidermis of a leaf]. *Vestnik. Leningradskogo. Universitetata*. Iss. 2, No. 4 (1954): pp. 65-75. (In Russ.).
5. Ishmuratova M.M., Ishbirdin A.R., Cherosov M.M., Baryshnikova N.I., Suleimanova E.N. [Ecological and phytocenotic, population, resource characteristics, seed biology and biotechnology of *Valeriana alternifolia* Ledeb.]. *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. M.K. Amosova*. No. 6 (2017): pp. 18-25. (In Russ.). DOI: 10.25587/SVFU.2017.62.8444. EDN: ZXWBFD.
6. Ishmuratova M.M., Ishbirdin A.R., Sulejmanova E.N., Baryshnikova N.I. [Comparative characteristics of morphological features of fruits of some species of the genus *Valeriana* L.]. *Trudy po prikladnoj botanike*,

genetike i selekcii. V. 185, No. 2 (2024): 1-15. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2024-2-1-15. EDN: EBOYSW.

7. Lomagina Z.V., Danchul T.Yu. [Valerianaceae Batsch. Family]. *Rastitelnye resursy SSSR: Tsvetkovye rasteniya, ikh khimicheskiy sostav, ispolzovanie* [Plant resources of the USSR: Flowering plants, their chemical composition, use]. Leningrad, Nauka Publ., 1990, V. 6. Caprifoliaceae – Plantaginaceae, pp. 20-30. (In Russ.).

8. Semenova V.V., Egorova P.S. *Polivariantnost ontogeneza Valeriana alternifolia Ledeb. i struktura ee prirodnykh tsenopopulyatsiy v Yakutii* [Multivariance of the ontogenesis of *Valeriana alternifolia* Ledeb. and the structure of its natural cenopopulations in Yakutia]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2013. 109 p. (In Russ.).

9. Fursa N.S., Gorbunov Yu.N. [Chemosystematic study of *Valeriana* L. spp. in the vegetation of the Caucasus]. *Rastitelnye resursy*. V. 15, No. 4 (1979): pp. 500-506. (In Russ.). EDN: VMZNDP.

10. Xaliullin D.A., Ishmuratova M.M., Ishbirdin A.R. [Variability in leaf morphological characters of *Valeriana officinalis* L. and *V. alternifolia* Ledeb.]. *Vestnik Permskogo universiteta. Biologiya*. Iss. 1 (2021): pp. 18-25. (In Russ.). DOI: 10.17072/1994-9952-2021-1-18-25. EDN: PGAQCV.

11. *Valeriana officinalis* L. The Plant List 2010. Version 1. Available at: <http://www.theplantlist.org>.

Статья поступила в редакцию 30.09.2025; одобрена после рецензирования 08.10.2025; принята к публикации 02.12.2025.

The article was submitted 30.09.2025; approved after reviewing 08.10.2025; accepted for publication 02.12.2025.

Информация об авторах

Э. М. Гагиева – преподаватель;

М. М. Ишмуратова – д-р биол. наук, профессор;

А. Р. Ишбирдин – д-р биол. наук, профессор.

Information about the authors

E. M. Gazieva – teacher;

M. M. Ishmuratova – Doctor of Biological Sciences, Professor;

A. R. Ishbirdin – Doctor of Biological Sciences, Professor.

Вклад авторов:

Гагиева Э. М. – планирование эксперимента; сбор материала; написание исходного текста; итоговые выводы; статистическая обработка материала.

Ишмуратова М. М. – научное руководство; концепция исследования; сбор материала; доработка текста; итоговые выводы.

Ишбирдин А. Р. – концепция исследования; сбор материала; доработка текста; итоговые выводы.

Contribution of the authors:

Gazieva E. M. – experimental design; data collection; writing the original text; final conclusions; statistical analysis.

Ishmuratova M. M. – scientific supervision; study concept; data collection; text revision; final conclusions.

Ishbirdin A. R. – study concept; data collection; text revision; final conclusions.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

БОТАНИКА

Научная статья

УДК 627.12[556.114+582.261/.279](470.51-25)

EDN: GRHKIT

doi: 10.17072/1994-9952-2025-4-338-350



Альгофлора родников Ижевска

Софья Михайловна Госькова^{1✉}, Николай Иванович Наumenко²,
Александр Сергеевич Алалыкин^{3, 4}

^{1, 2, 4} Удмуртский государственный университет, Ижевск, Россия

^{1✉} schwakobabr2012@yandex.ru

² naumenko-nik@yandex.ru

³ Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск, Россия, ftt@udsu.ru

Аннотация. Приводится таксономический состав альгофлоры источников г. Ижевска и его окрестностей, где было выявлено 69 видов водорослей из 10 классов 5 отделов. В списке видов выделяется ядро родниковой альгофлоры, включающее специфичные для эукренов реофильные водоросли (*Odontidium mesodon*, *Meridion circulare*, *Ulnaria ulna*, *Achnantheidium minutissimum*, *Gomphonema parvulum*), а также часто встречающиеся *Audouinella pygmaea*, *Phormidium umbilicatum*, *Frustulia crassinervia* и *Nitzschia linearis*. Низкая степень видового сходства родников обусловлена большими различиями в составе редко отмечаемых видов, среди которых выделяется группа бриофильных видов, ассоциированных с произрастающими у выходов родниковых вод мхами (*Odontidium mesodon*, *Frustulia crassinervia*). В списке отмечены редкие виды *Dactylococcopsis raphidioides* f. *falciformis* (Cyanophyceae) и *Gomphonema liyanlingae* (Bacillariophyceae). Наибольшим количеством видов в списке представлен класс Bacillariophyceae – 51 вид из 27 родов, из которых наиболее богаты видами роды *Nitzschia* (6 видов), *Pinnularia* (5 видов), *Cymbella* и *Gomphonema* (по 4 вида). Также приведены сведения о некоторых физико-химических характеристиках воды родников: температуре, кислотности, общей минерализации, содержании нитратов, сульфатов, кремния и хлоридов. Обсуждается экологическая значимость родников в урбанизированном ландшафте как уникальных водных местообитаний.

Ключевые слова: родники, подземные воды, альгофлора, Ижевск

Для цитирования: Госькова М. С., Наumenко Н. И., Алалыкин А. С. Альгофлора родников Ижевска // Вестник Пермского университета. Сер. Биология. 2025. Вып. 4. С. 338–350. <http://dx.doi.org/10.17072/1994-9952-2025-4-338-350>.

Благодарности: работа выполнена в рамках тематики научных исследований ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет», осуществляемых за счет средств федерального бюджета, поддержанных Министерством науки и высшего образования Российской Федерации «Биоразнообразие природных экосистем Заволжско-Уральского региона: история его формирования, современная динамика и пути охраны» (FEWS-2024-0011). Авторы благодарят А. В. Алтынцева, А. М. Глущенко, М. С. Куликовского, Е. М. Кезлю, Н. В. Холмогорову за содействие и ценные комментарии при выполнении исследовательской работы.

BOTANY

Original article

Algal flora in the springs of Izhevsk

Sofya M. Goskova^{1✉}, Nikolay I. Naumenko², Aleksandr S. Alalykin^{3, 4}

^{1, 2, 4} Udmurt State University, Izhevsk, Russia

^{1✉} schwakobabr2012@yandex.ru

² naumenko-nik@yandex.ru

³ Udmurt Federal Research Center of Ural branch of RSA, Izhevsk, Russia, ftt@udsu.ru

Abstract. This article provides a taxonomic list of spring algal flora in the city of Izhevsk with its area, which includes 69 species of 5 divisions. In the list of algal species, there is a core assemblage of algal flora which consists of rheophilic algae typical for eucrenes (*Odontidium mesodon*, *Meridion circulare*, *Ulnaria ulna*, *Achnantheidium minutissimum*, *Gomphonema parvulum*) and also frequently occurring *Audouinella pygmaea*,

Phormidium umbilicatum, *Frustulia crassinervia* and *Nitzschia linearis* Low compositional similarity in springs is a result of big differences in composition of species with low frequency of registering, among them there is a group of bryophytic algae, which are associated with mosses growing near springs (*Odontidium mesodon*, *Frustulia crassinervia*). There are also rare species *Dactylococcopsis raphidioides* f. *falciformis* (Cyanophyceae) and *Gomphonema liyanlingae* (Bacillariophyceae) on the list. The most species of the list belong to Bacillariophyceae (51 species of 27 genera) and among them the most species are from genera *Nitzschia* (6 species), *Pinnularia* (5 species), *Cymbella* (4 species), *Gomphonema* (4 species). Also the data about some spring water characteristics, such as temperature, pH, total dissolved solids, concentration of nitrates, sulfates, silicon and chlorides are provided. Ecological role of springs in urban environment as unique water habitat is also discussed.

Keywords: springs, groundwater, algal flora, Izhevsk

For citation: Goskova S. M., Naumenko N. I., Alalykin A. S. [Algal flora in the springs of Izhevsk]. *Bulletin of the Perm University. Biology*. Iss. 4 (2025): pp. 338-350. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.17072/1994-9952-2025-4-338-350>.

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation “Biodiversity of natural ecosystems of the Trans-Volga-Ural region: the history of its formation, modern dynamics and ways of protection (FEWS-2024-0011). The authors are grateful to A. V. Altynytsev, A. M. Glushchenko, M. S. Kulikovskiy, E. M. Kezlya, N. V. Kholmogorova for technical support and precious comments.

Введение

Родники являются характерной чертой ландшафта г. Ижевска (на его территории насчитывается 46 родников). Все они происходят из нижеустьинского терригенного водоносного горизонта, залегающего под чехлом четвертичных отложений и выходящего на поверхность в нижних частях склонов рек. Водовмещающие породы горизонта – песчаники, известняки и мергели, водоупорные слои сложены глинами и алевролитами. Мощность водовмещающей толщи колеблется от 2.1 до 24 м, питание преимущественно атмосферное, водообильность очень изменчива при среднем значении дебита родников 0.5–1.0 л/с [Елькин, Рысин, 1998; Родники Ижевска, 2000]. Все рассмотренные родники по характеру выхода являются реокренами. Многие ижевские родники имеют сливы, что оставляет очень мало пригодного для развития альгофлоры пространства; часть родников заключены в постройки и сильно затемнены, что также не способствует развитию богатой альгофлоры. Отсутствие охранного статуса городских родников привело к исчезновению 16 из них за последние два десятилетия [Экология и природопользование..., 2018], в то же время большинство оставшихся родников продолжают использоваться населением в качестве источников питьевой воды при недостаточном информировании о ее качестве. Сравнение нынешнего состояния каптажей с фотографиями 1990-х гг. из монографии «Родники Ижевска» [2000] показывает деградацию большинства прилегающих к родникам территорий.

В монографии, обобщающей данные о характеристиках и охране хозяйственно-питьевых вод Удмуртской АССР [Наумов, 1978], родниковые воды Ижевска по химическому составу характеризовались преимущественно как гидрокарбонатные с умеренной минерализацией.

Исследования воды большинства городских родников и прилегающих к ним почв по некоторым химическим параметрам периодически проводились с 1990-х гг. [Родники Ижевска, 2000; Исаев и др., 2004; Рылова и др., 2006; Рылова и др., 2008; Владыкина и др., 2016; Экология и природопользование ..., 2018; Раянова, 2021]; в 2004–2020 гг. изучалась бриофлора некоторых родников Ижевска [Рубцова, 2024]. Однако населяющая родники альгофлора в перечисленных публикациях не рассматривалась. Целью нашей работы было выявление таксономического состава водорослевой флоры ряда ижевских родников и дополнение сведений о физико-химических характеристиках их вод.

Материалы и методы

Сбор проб воды и альгологического материала проводился с 22 по 29 августа 2023 г. в следующих точках (номера в скобках соответствуют номерам родников, указанным в монографии «Родники Ижевска» [2000]) (рис. 1): **1.** Важнин ключ (№ 50); **2.** Подборенский 1 (№ 59); **3.** Подборенский 2 (№ 55); **4.** Подборенский 3 (№ 48); **5.** Подборенский 4 (№ 46); **6.** Подборенский 5 (№ 47); **7.** Родник имени Д. А. Пригова (№ 40); **8.** Козий родник (№ 41); **9.** Пугачёвский родник (село Завьялово); **10.** Артезианская скважина в деревне Кабанихе; **11.** Родник на набережной (№ 51); **12.** Родник в Парке им. Е.Ф. Драгунова; **13.** Ключ 1; **14.** Ключ 2; **15.** Родник № 13 (№ 13); **16.** Артезианская скважина в микрорайоне Шунды (ниже улицы Учхозной); **17.** Родник № 11 (№ 11); **18.** Казанский родник (№ 10); **19.** Чемошурский 1 (№ 19); **20.** Чемошурский 2 (№ 23); **21.** Родник в Ярушкинском парке; **22.** Карлутский 1 (№ 42); **23.** Карлутский 2, 3 (№ 33, № 34); **24.** Родник в 3-м микрорайоне (северо-западнее СНТ «Пенсионер»); **25.** Карлутский 4 (№

28); 26. Карлутский 5 (№ 29); 27. Карлутский 6 (№ 30); 28. Малиновский 1 (№ 3); 29. Малиновский 2 (№ 5); 30. Родник в микрорайоне Медведево (№ 25).



Рис. 1. Карта-схема точек пробоотбора (номера точек отбора проб соответствуют приведенным в тексте)

[Scheme of sample sites (numbers of sites coincide with those in the text)]

Всего были собраны и проанализированы пробы из 28 родников и 2 артезианских скважин. Определяемые физико-химические параметры включали температуру воды, кислотность, общую минерализацию, содержание нитратов, сульфатов, кремния и хлоридов.

Показатель общей минерализации воды (total dissolved solids, TDS) измерялся карманным солемером T.D.S Meter 3 Hold, pH воды – карманным pH-метром (Water test, Китай). Температуру (Т) воды измеряли ртутным термометром с минимальным делением в 1°C. Химический анализ проб воды осуществлялся фотометрическими методами (при помощи спектрофотометра «UNICO 2100») для нитратов (ПНД Ф 14.1:2:4.4-95) и кремния (ПНД Ф 14.1:2:4.215-06), турбидиметрическим методом для сульфатов (ПНД Ф 14.1:2.159-2000), аргентометрическим методом для хлоридов (ПНД Ф 14.1:2:3.96-97).

Перифитон отбирали с прилегающих к выходам родников субстратов (песка, камней, бетонных, металлических или деревянных водостоков). Анализ видового состава осуществлялся с помощью светового микроскопа Zeiss Axiostar plus (Carl Zeiss, Германия) и частично электронно-сканирующего микроскопа InspectS50 по принятым определителям [Виноградова и др., 1980; Царенко, 1990; Komarek, Anagnostidis, 2005; Куликовский и др., 2016] и электронной базе Diatoms of North America [2024]. Для приготовления препаратов диатомовых водорослей были использованы перекись водорода (37%) и среда Naphrax. Номенклатура таксонов приведена в соответствии с электронной базой данных AlgaeBase [2023]. Степень сходства флор выражалась индексом Жаккара.

Результаты и их обсуждение

Территориально в списке исследованных родников можно выделить пять групп (в скобках указаны номера точек пробоотбора):

1) **подборенские (2–6)**: родники этой группы, принадлежащие бассейну р. Подборенка, расположены компактно и сходны по составу воды и альгофлоры; t 9.5–11.0°C, pH 7.0–7.3, TDS 490–600, NO_3 40–57 мг/дм³, SO_4 61–72 мг/дм³, Si 10–12 мг/дм³, Cl 78–92 мг/дм³; здесь отмечены максимальные значения содержания сульфатов в воде;

2) **карлутские (7–8, 22–23, 25–27)**: родники этой группы, принадлежащие бассейну р. Карлутка, расположены на протяженной территории и более разнообразны по составу воды, чем родники первой группы; t 7.0–12.0°C, pH 6.9–7.4, TDS 360–640, NO_3 50–95 мг/дм³, SO_4 28–58 мг/дм³, Si 8.0–11.5 мг/дм³, Cl 37–106 мг/дм³;

3) **чешошурские (19–21)**: родники этой группы принадлежат бассейну р. Чешошурка; t 7.0–10.5°C, pH 7.0–7.2, TDS 300–490, NO_3 18–25 мг/дм³, SO_4 30–51 мг/дм³, Si 12.0–13.5 мг/дм³, Cl 53–101 мг/дм³;

4) **правобережные (15, 17–18)**: группа родников к югу от Ижевского водохранилища; t 8.5–10.0°C, pH 6.9–7.0, TDS 500–570, NO_3 52–105 мг/дм³, SO_4 48–68 мг/дм³, Si 14.5–19.0 мг/дм³, Cl 67–102 мг/дм³ (очень высокие концентрации нитратов (до 177 мг/дм³) отмечались для родников этой группы еще со второй половины 1990-х гг. [Родники Ижевска, 2000]);

5) **Малиновские (28–29)**: родники, принадлежащие бассейну р. Малиновка; t 7.0–7.5°C, pH 7.1–7.2, TDS 260–360, NO_3 36–37 мг/дм³, SO_4 19–25 мг/дм³, Si 13.5–14.0 мг/дм³, Cl 17–46 мг/дм³.

Прочие родники расположены одиночно и удаленно от этих групп. В целом значения pH воды находятся в диапазоне 6.9–9.0, TDS – 130 (точка **9**) – 640 (точка **25**), концентрации NO_3 в диапазоне <1 (точки **10** и **16**) – 105 мг/дм³ (точка **18**) (ПДК нитратов (по СанПиН 1.2.3685-21) превышена в 16-ти точках, наиболее значительно в воде родников карлутской и правобережной групп), SO_4 в диапазоне 9 (точка **9**) – 72 мг/дм³ (точка **4**), Si в диапазоне 4.5 (точка **10**) – 19 мг/дм³ (точка **15**), Cl в диапазоне <1 (точка **16**) – 147 мг/дм³ (точка **11**).

Сравнение с литературными данными по родникам других городских территорий [Назаров, 2002; Буймова, 2006; Зуева, Китаев, 2010; Кузнецова, 2016; Орлов, 2016; Лукашевич, Чернышова, 2018; Тизян, Скугорева, 2020; Пасечник и др., 2022; Романова, Большаник, 2022; Соболева, 2023] показывает, что физические параметры и концентрации макроэлементов в воде ижевских родников в целом не выходят за характерные для этого типа водных объектов пределы, хотя в воде родников северо-западной части города (точки **12**, **13**, **15**) заметно высокое содержание кремния. Вода артезианских скважин (точки **10** и **16**) отличается минимальным содержанием нитратов и кремния и низким содержанием хлоридов.

Список видов водорослей исследованных родников

Обозначения обилия и встречаемости вида (символ слева: + – единичные клетки, **r** – мало, **f** – в значительном количестве, **m** – в массе; символ справа: **P** – Подборенская группа родников, **K** – Карлутская группа, **B** – Правобережная группа, **C** – Чемошурская группа, **M** – Малиновская группа, + – более, чем в двух группах).

Cyanobacteriophyta

Cyanophyceae

Chroococcales

Chroococcaceae

Chroococcus sp. **r+**

Dactylococcopsis raphidioides f. *falciformis* Printz (рис. 3c) **fP**

Microcystaceae

Merismopedia sp. **rK**

Oscillatoriales

Microcoleaceae

Phormidiochaete balearica (Bornet et Flahault ex Forti) Komárek **fPB**

Oscillatoriaceae

Phormidium umbilicatum Gomont **f+**

Coleofasciculales

Coleofasciculaceae

Symploca sp. **rB**

Heterokontophyta

Bacillariophyceae

Achnanthales

Achnanthaceae

Achnantheidium minutissimum (Kützinger) Czarnecki (рис. 2q) **m+**

Ach. sp. (рис. 3b) **f+**

Cocconeidaceae

Cocconeis euglypta Ehrenberg (рис. 2ad) **r+**

C. pediculus Ehrenberg **fK**

Achnanthidiaceae

Planothidium frequentissimum (Lange-Bertalot) Lange-Bertalot (рис. 2s) **fPK**

P. granum (Hohn and Hellerman) Lange-Bertalot (рис. 2k) **rP**

P. lanceolatum (Brébisson ex Kützinger) Lange-Bertalot (рис. 2u) **fPK**

Psammothidium chlidanos (Hohn and Hellerman) Lange-Bertalot (рис. 2m) **fCP**

P. subatomoides (Hustedt) Bukhtiyarova et Round (рис. 2r) **fP**

Bacillariales

Bacillariaceae

Denticula tenuis Kützinger (рис. 2t) **fK**

Nitzschia clausii Hantzsch **f+**

Nitzschia dissipata (Kützinger) Rabenhorst **rP**

N. fonticola (Grunow) Grunow (рис. 2aa) **rB**

N. linearis Smith. **fPK**

N. palea (Kützinger) Smith (рис. 2z) **f+**

N. sigmoidea (Nitzsch) Smith **r+**
Tryblionella salinarum (Grunow) Pelletan **fP**
 Cymbellales
 Anomoeoneidaceae
Anomoeoneis sphaerophora Pfitzer **r+**
 Cymbellaceae
Cymbella hantzschiana Krammer (рис. 2a) **mP**
C. hustedtii Krasske (рис. 2b) **mK**
C. neogena (Grunow) Krammer **r+**
C. vulgata Krammer (рис. 2c) **fP**
Witkovskia abiskoensis (Hustedt) Kulikovskiy, Glushchenko, Mironov et Kociolek (рис. 2p) **rPBK**
 Gomphonemataceae
Gomphonema acuminatum Ehrenberg (рис. 2h) **f+**
G. capitatum Ehrenberg (рис. 2g) **r+**
G. liyanlingae Metzeltin et Lange-Bertalot (рис. 2i). **rP**
Gomphonema parvulum (Kützing) Kützing sensu lato (рис. 2f). Как показано в исследовании D.T. Rose [2008], этот таксон должен по крайней мере частично включать *G. gracile*, т. к. инициальные клетки *G. parvulum* морфологически полностью соответствуют второму виду. Кроме того, некоторые выделенные в отдельные виды формы, такие как *G. exilissimum*, могут все же являться экоморфами (вид описывается как приуроченный к олиготрофным условиям с низкой минерализацией, в то время как *G. parvulum* описывается как эврибионт). В наших образцах морфологические признаки отнесенных к *G. parvulum* клеток значительно варьировали, что может быть скорее выражением возрастной структуры популяции, чем соседства различных форм. **m+**
 Rhoicospheniaceae
Rhoicosphenia abbreviata (Agardh) Lange-Bertalot **f+**
 Eunotiales
 Eunotiaceae
Eunotia bilunaris (Ehrenberg) Schaarschmidt (рис. 2ab) **fP**
 Fragilariales
 Fragilariaceae
Fragilaria radians (Kützing) Williams et Round **fP**
F. vaucheriae (Kützing) Petersen (рис. 2x) **fPK**
Odontidium mesodon (Ehrenberg) Kützing (рис. 2ac, рис. 3a) **m+**
 Staurosiraceae
Staurosira tabellaria (Smith) Leuduger-Fortmorel (рис. 2n) **fP**
 Licmophorales
 Ulnariaceae
Ulnaria ulna (Nitzsch) Compère **m+**
 Naviculales
 Naviculaceae
Caloneis silicula (Ehrenberg) Cleve **fK**
Navicula cf. *vaneii* **rK**
 Diploneidaceae
Diploneis boldtiana Cleve (рис. 2j) **rPK**
 Amphipleuraceae
Frustulia crassinervia (Brébisson ex W.Smith) Lange-Bertalot et Krammer **fK**
 Neidiaceae
Neidiomorpha binodis (Ehrenberg) M. Cantonati, Lange-Bertalot et N. Angeli (рис. 2e) **+K**
 Pinnulariaceae
Pinnularia canadodivergens Kulikovskiy, Lange-Bertalot et Metzeltin **rKC**
P. isselana Krammer **+C**
P. neomajor Krammer **r+**
P. ovata Krammer **+K**
P. subrostrata (Cleve) Cleve (рис. 2o) **rK**
 Stauroneidaceae
Stauroneis phoenicenteron (Nitzsch) Ehrenberg **rKB**
S. smithii Grunow (рис. 2d) **rK**
 Rhabdonematales
 Tabellariaceae
Meridion circulare (Greville) Agardh (рис. 2y) **m+**

Surirellales
 Surirellaceae
Surirella brebissonii Krammer et Lange-Bertalot **fPK**
S. lacrimula English (рис. 2w) **rP**
S. sp. (рис. 2v) **+K**
 Thalassiophysales
 Catenulaceae
Amphora pediculus (Kützing) Grunow (рис. 2l) **f+**
Coscinodiscophyceae
 Melosirales
 Melosiraceae
Melosira varians Agardh **f+**
Xanthophyceae
 Tribonematales
 Tribonemataceae
Tribonema sp. **+K**
Rhodophyta
Florideophyceae
 Acrochaetiales
 Audouinellaceae
Audouinella pygmaea (Kützing) Weber Bosse (рис. 3d) **mPB**
Chlorophyta
Chlorophyceae
 Chaetophorales
 Fritschiellaceae
Stigeoclonium sp. **fK**
Trebouxiophyceae
 Microthamniales
 Microthamniaceae
Microthamnion strictissimum Rabenhorst **fB**
Klebsormidiophyceae
 Klebsormidiales
 Klebsormidiaceae
Klebsormidium fluitans (Gay) Lokhorst **fK**
Ulvophyceae
 Ulotrichales
 Ulotrichaceae
Ulothrix sp. **fK**
 Cladophorales
 Cladophoraceae
Cladophora sp. **f+**
Charophyta
Zygnematophyceae
 Desmidiiales
 Desmidiaceae
Cosmarium sp. **rK**
 Closteriaceae
Closterium lunula Ehrenberg et Hemprich ex Ralfs **fM**
 Spirogyrales
 Spirogyraceae
Spirogyra sp. **rKM**
 Zygnematales
 Zygnemataceae
Mougeotia sp. **rK**

Всего в ходе исследования нами было выявлено 69 видов водорослей из 40 родов, 37 семейств и 9 классов; из них к Heterokontophyta принадлежат 53 вида (Bacillariophyceae – 51 вид из 27 родов, 21 семейства и 10 порядков, Coscinodiscophyceae – 1 вид, Xanthophyceae – 1 вид), Chlorophyta – 5 видов из 4 семейств и 4 классов, Charophyta – 4 вида из 3 семейств и 3 порядков, Rhodophyta – 1 вид, Cyanobacteria – 6 видов из 5 семейств и 3 порядков. Наибольшее видовое разнообразие имели порядки Naviculales (12

видов) и Cymbellales (11 видов), на уровне семейства – Bacillariaceae (8 видов), среди родовых таксонов – *Nitzschia* (6 видов), *Pinnularia* (5 видов), *Cymbella* и *Gomphonema* (по 4 вида).

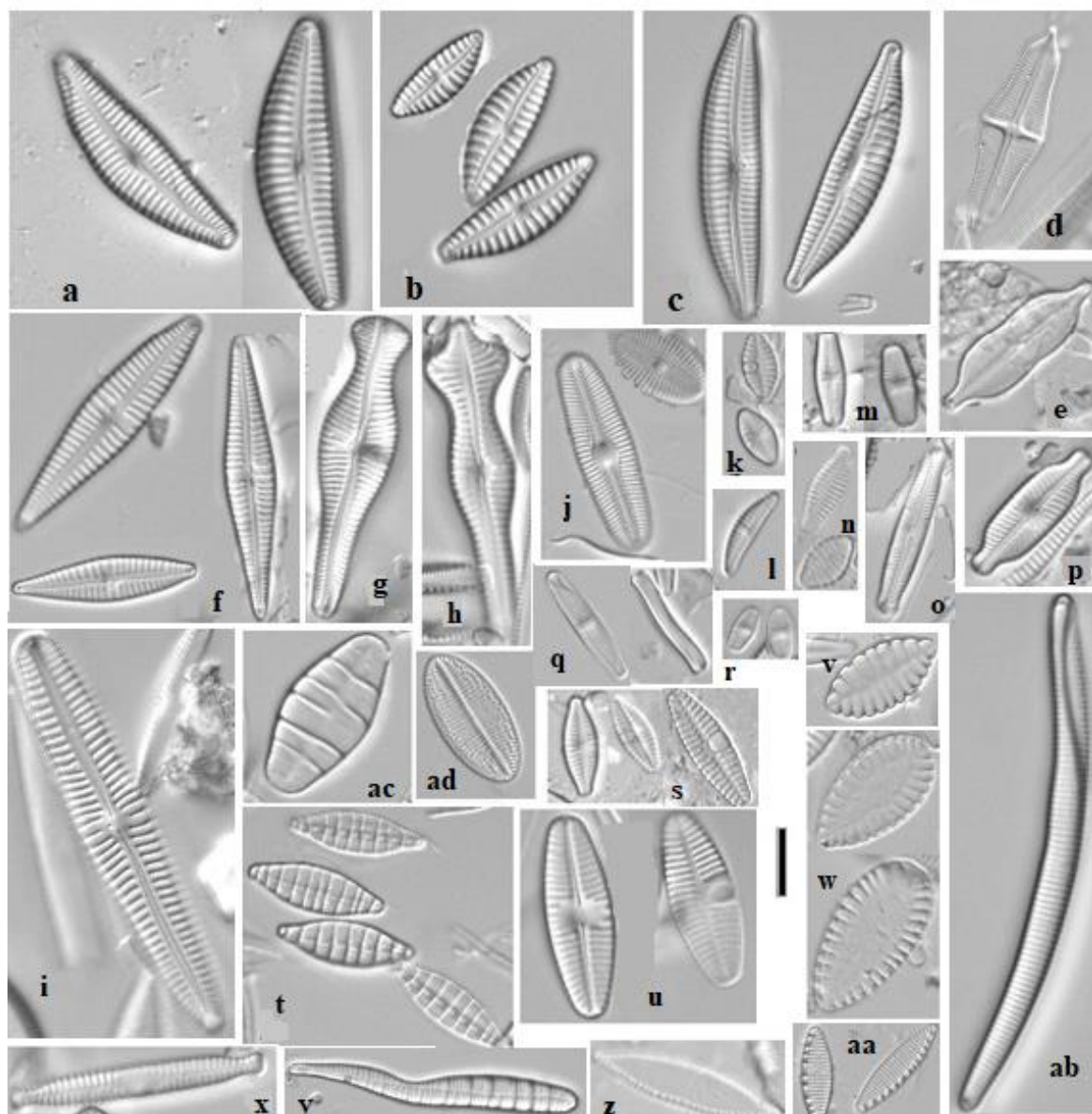


Рис. 2. Диатомовые водоросли родников Ижевска [Diatoms of Izhevsk springs]:

a – *Cymbella hantzschiana*; b – *C. hustedtii*; c – *C. vulgata*; d – *Stauroneis smithii*; e – *Neidiomorpha binodis*; f – *Gomphonema parvulum*; g – *G. capitatum*; h – *G. acuminatum*; i – *G. liyanlingae*; j – *Diploneis boldtiana*; k – *Planothidium granum*; l – *Amphora pediculus*; m – *Psammothidium chlidanos*; n – *Staurosira tabellaria*; o – *Pinnularia subrostrata*; p – *Witkovskia abiskoensis*; q – *Achnantheidium minutissimum*; r – *Psammothidium subatomoides*; s – *Planothidium frequentissimum*; t – *Denticula tenuis*; u – *Planothidium lanceolatum*; v – *Surirella* sp.; w – *S. lacrimula*; x – *Fragilaria vaucheriae*; y – *Meridion circulare* (тератоформа); z – *Nitzschia palea*; aa – *Nitzschia fonticola*; ab – *Eunotia bilunaris*; ac – *Odontidium mesodon*; ad – *Cocconeis euglypta*. Масштабная линейка: 10 мкм [Scale bar: 10 mcm]

Комплекс наиболее часто встречающихся видов водорослей – *Odontidium mesodon*, *Meridion circulare*, *Ulnaria ulna*, *Achnantheidium minutissimum*, *Gomphonema parvulum* (два первых указанных вида выявлены нами вместе в 13 точках, все перечисленные – в 4 точках). Также часто встречаются *Phormidium umbilicatum* (в 12 точках), *Audouinella pygmaea*, *Frustulia crassinervia* (в 9 точках) и *Nitzschia linearis* (в 8 точках), однако большинство выявленных видов обнаружены только в одной или двух точках. Эта особенность отмечалась у родниковых флор других территорий [Cantonati et al., 2012a, 2012b]. Наибольшее разнообразие видового состава было зафиксировано в пробах из точек 6 «Подборенский 5» и 23 «Карлутский 2, 3» (по 15 видов), наименьшее – в точках 25 «Карлутский 4» и 16 «Артезианская скважина в микрорайоне Шунды» (по 4 вида), не считая точки 8 «Козий родник», где водорослевые обрастания полностью отсут-

ствовавали по причине проведения строительных работ. Сравнительный анализ видового состава водорослей групп родников и отдельных родников показал невысокую степень сходства: значение коэффициента Жаккара не превышает 0.5. Низкая степень сходства связана с однократно встреченными видами, однако по представленности шести вышеуказанных часто встречающихся видов группы родников полностью сходны, а отдельные (не включенные в группы) родники отличаются отсутствием одного или двух из этих видов. Из наиболее часто встречающихся видов *O. mesodon*, *M. circulare* и *A. pygmaea* являются типичными криореофилами; *A. minutissimum*, *U. ulna* и *G. parvulum* обладают более широким экологическим спектром: трофические характеристики этих видов находятся в диапазоне от стенобионтных олиготрофов до мезотрофов.

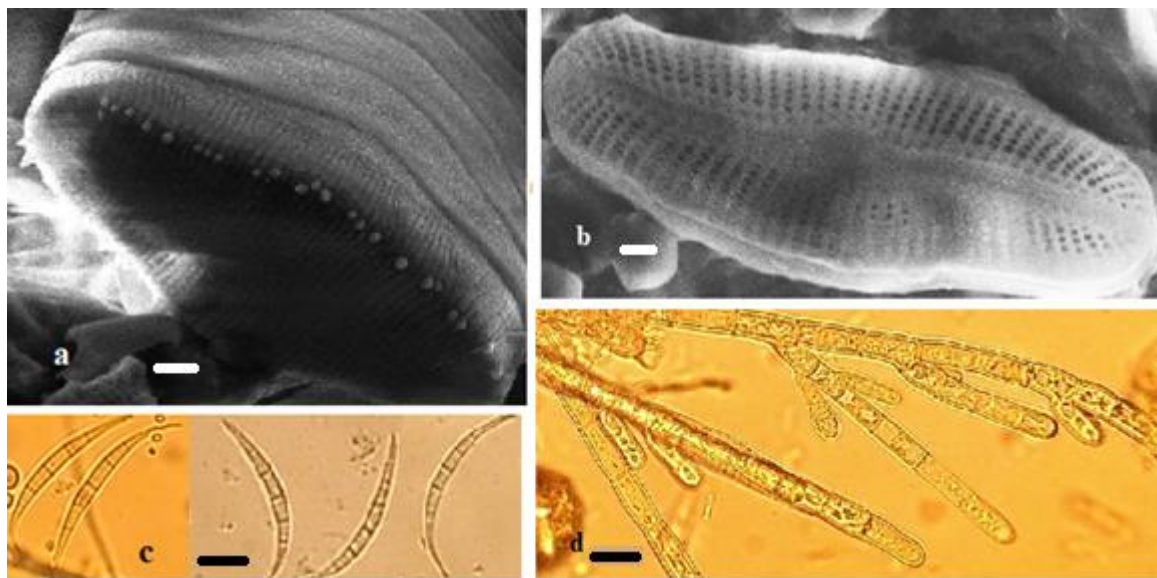


Рис. 3. Водоросли родников Ижевска [Algae of Izhevsk springs]:

a – *Odontidium mesodon*, СЭМ; b – *Achnanthidium* sp., СЭМ; c – *Dactylococcopsis raphidioides*, CM; d – *Audouinella pygmaea*, CM. Масштабная линейка: a, b – 1 мкм; c, d – 10 мкм [Scale bar: a, b – 1 mcm; c, d – 10 mcm]

Значительные различия физических характеристик родников (освещенность, характер прилегающего грунта, дебит), влияющие на развитие альгофлоры, различное число родников в группе (от 2 до 7) и степень территориальной компактности определяют степень видового сходства их альгофлор.

Родники являются уникальными по постоянству среды водными местообитаниями, где встречаются редкие виды и специфические сообщества водорослей [Cantonati et al., 2012b; Delgado et al., 2013]. Сравнение с данными по некоторым альпийским и балканским родникам [Levkov et al., 2005; Fránková et al., 2009; Cantonati et al., 2012b; Kamberović et al., 2019] показывает, что несколько родов и видов можно считать типичными представителями европейской родниковой флоры. Так, *O. mesodon* является обитателем богатых кремнием и кальцием холодных реокренов и вместе с *M. circulare* составляет характерное сообщество эукренов (выходов родниковых вод) [Cantonati et al., 2012b], которое и наблюдалось нами в большинстве исследованных проб. *A. minutissimum* и другие виды рода *Achnanthidium* часто доминируют в полноводных алкалинных водотоках на карбонатном субстрате; *P. frequentissimum*, *G. parvulum* (f. *exilissimum*) и *D. tenuis* также являются преимущественно родниковыми, гигропетрофильными видами [ibid]. Виды рода *Audouinella* представляют собой важный компонент флоры в затененных родниках с повышенным содержанием нитратов. *F. crassinervia* и виды рода *Eunotia* считаются связанными с хорошо освещенными низкоалкалинными и низкоминерализованными родниками [ibid], однако в наших пробах бриофильный вид *F. crassinervia* не проявлял связи с этими условиями. Среди самых характерных для родников родов, которые были представлены и в наших пробах, выделяются *Achnanthidium*, *Planothidium*, *Psammothidium*, *Gomphonema*, *Cymbella*, *Meridion*, *Odontidium*, *Audouinella* (при этом большая доля биомассы в исследованных нами родниках принадлежит *Ulnaria*, которая является скорее «речным» родом [Peeters et al., 2017]); все они – типичные представители перифитона.

Заключение

Таким образом, в альгофлоре исследованных родников можно выделить совокупность типичных видов, составляющих ее ядро. Большинство выявленных видов встречались только в одном или нескольких родниках. Среди них были как характерные представители родниковых флор, чувствительные к характеру субстрата и составу воды, так и эвритопные виды.

Поскольку скорость течения и субстрат играют важнейшую роль в формировании перифитонного сообщества водорослей в числе абиотических условий среды, состояние естественных выходов подземных вод оказывается не менее значимым фактором в формировании видового состава альгофлоры, чем состав воды и температура. Сохранение родников в качестве уникальных водных местообитаний и городских достопримечательностей возможно только при организации охранных мероприятий [Родники Ижевска, 2000; Гагарина, 2012; Гагарина, Юнусова, 2015; Экология и природопользование..., 2018], однако имеющиеся предложения, включающие регулярную чистку каптажных камер и контроль за состоянием родников и благоустройством их территорий, представляются нам направленными на сохранение родников только как дополнительных источников питьевого водоснабжения, а не родниковых экосистем, поскольку эти меры недостаточно способствуют сохранению остатков естественной родниковой альгофлоры. Тем не менее, придание некоторым родникам статуса особо охраняемых природных территорий местного значения, вероятно, позволило бы сохранить эти экосистемы в качестве природных местообитаний.

Список источников

1. Буймова С.А. Оценка качества родниковых вод Ивановской области и их влияния на здоровье населения: дис. ... канд. хим. наук. Иваново, 2006. 186 с. EDN: NOCQLN.
2. Виноградова К.Л. и др. Определитель пресноводных водорослей СССР: в 14-ти вып. Вып. 13. Л., 1980. 247 с.
3. Владыкина А.Н., Пушина П.Ю., Дягелев М.Ю. Исследование качества воды родников по физико-химическим показателям города Ижевска // Энергоресурсосбережение в промышленности, жилищно-коммунальном хозяйстве и агропромышленном комплексе: материалы регион. науч.-практ. семинара. Ижевск, 2016. С. 152–154. EDN: XGQFAT.
4. Гагарина О.В. Вопросы исследования и контроля эколого-санитарного состояния родников в нормативных документах РФ // Вестник Удмуртского университета. Сер. Биология. Науки о Земле. 2012. Вып. 1. С. 9–15. EDN: PAGNJL.
5. Гагарина О.В., Юнусова Л.З. Охрана родников как источников питьевого водоснабжения в аспекте развития федеральной, региональной и местной нормативно-правовой базы // Вестник Удмуртского университета. Сер. Биология. Науки о Земле. 2015. Т. 25, вып. 2. С. 7–16. EDN: UAPTZZ.
6. Елькин С.М., Рысин И.И. Подземные воды // Природа Ижевска и его окрестностей: сб. статей. Ижевск: Удмуртия, 1998. С. 67–79. EDN: YACYQD.
7. Зуева Т.В., Китаев А.Б. Качество воды в родниках города Перми (по материалам 2002–2007 гг.) // Географический вестник. 2010. № 1(12). С. 42–46. EDN: NCSHOZ.
8. Исаев М.А., Головкин И.Г., Юрк С.А. Родниковые и артезианские воды Ижевска. Ижевск: Секреты красоты и здоровья, 2004. 109 с.
9. Кузнецова Т.А. Влияние родниковой воды на состояние здоровья населения (на примере Барышского района Ульяновской области) // Ульяновский медико-биологический журнал. 2016. № 1. С. 158–167. EDN: VUYPAJ.
10. Куликовский М.С. и др. Определитель диатомовых водорослей России. Ярославль: Филигрань, 2016. 804 с. EDN: LXCHF1.
11. Лукашевич О.Д., Чернышова Н.А. Безопасность воды в родниках города Томска // XXI век. Техносферная безопасность. 2018. Т. 3, № 2(10). С. 81–97. DOI: 10.21285/2500-1582-2018-2-81-97. EDN: UQXUXW.
12. Назаров А.Д. Родники г. Томска – распространение, состав, возможности использования и акваторного обустройства // Известия Томского политехнического университета. 2002. Т. 305, вып. 8. С. 236–256. EDN: RWLSDN.
13. Наумов В.И. Характеристика и охрана хозяйственно-питьевых вод Удмуртской АССР. Ижевск: Удмуртия, 1978. 152 с.
14. Орлов А.А. Гигиенические особенности использования родников для питьевого водопользования городского и сельского населения // Медицина труда и экология человека. 2016. № 2(6). С. 33–37. EDN: WMGTCH.
15. Пасечник Е.Ю. и др. Химический состав родников как индикатор природно-техногенной эволюции городской экосистемы (на примере города Томска, юго-восток Западной Сибири) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333, № 7. С. 195–204. DOI: 10.18799/24131830/2022/7/3534. EDN: ZWXIYV.
16. Раянова И.И. Исследование содержания нитратов в водах родников техногенных ландшафтов (на примере бассейна р. Чемошурка) // Природопользование и правовая охрана окружающей среды: Всерос. науч.-практ. конф. Ижевск, 2021. С. 216–221. EDN: BKMGOY.

17. Родники Ижевска / ред. В.В. Туганаев. Ижевск: Удмуртский университет, 2000. 176 с. EDN: XXCORF.
18. Романова Т.И., Большаник П.В. Характеристика химического состава донных отложений источников г. Ханты-Мансийска // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 10(124). Ст.: 58. DOI: 10.23670/IRJ.2022.124.33. EDN: ZJLTER.
19. Рубцова А.В. Бриофлора родников Удмуртской Республики // Вестник Удмуртского университета. Сер. Биология. Науки о Земле. 2024. Т. 34, № 2. С. 145–156. DOI: 10.35634/2412-9518-2024-34-2-145-156. EDN: QODMRS.
20. Рылова Н.Г., Кузнецов М.Ф., Плавинская В.В. Сезонные изменения параметров воды родников бассейна реки Подборенки // Вестник Удмуртского университета. Сер. Биология. Науки о Земле. 2008. № 1. С. 73–84. EDN: SZCYZZ.
21. Рылова Н.Г., Кузнецов М.Ф., Плавинская В.В. Химический состав почв и растений санитарной зоны родников реки Подборенки города Ижевска // Вестник Удмуртского университета. Сер. Биология. Науки о Земле. 2006. № 10. С. 97–104. EDN: HVPLLT.
22. Соболева О.А. Эколого-химическая оценка родников Брянской области по данным паспортизации // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 4. С. 115–126. DOI: 10.35567/19994508_2023_4_4. EDN: ETIGYH.
23. Тизян Е.М., Скугорева С.Г. Анализ ионного состава воды из родников г. Кирова // Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем: материалы XVIII Всерос. науч.-практ. конф. Киров, 2020. С. 27–31. EDN: MBYYXP.
24. Царенко П.М. Краткий определитель хлорококковых водорослей Украинской ССР. Киев: Наукова думка, 1990. 208 с.
25. Экология и природопользование на территории города Ижевска / под ред. И.И. Рысина, О.Г. Барановой. Ижевск, 2018. 271 с. EDN: VJMDMM.
26. AlgaeBase. 2023. URL: <https://www.algaebase.org/> (дата обращения: 31.03.2024).
27. Cantonati M. et al. Diatoms in springs of the Alps: spring types, environmental determinants, and substratum. // Freshwater science. 2012a. Vol. 31, № 2. P. 499–524. DOI: 10.1899/11-065.1. EDN: YDTNTV.
28. Cantonati M. et al. Are benthic algae related to spring types? // Freshwater science. 2012b. Vol. 31, № 2. P. 481–498. DOI: 10.1899/11-048.1.
29. Delgado C. et al. Epilithic diatoms of springs and spring-fed streams in Majorca Island (Spain) with the description of a new diatom species *Cymboppleura margaleii* sp. nov. // Fottea. 2013. Vol. 13, № 2. P. 87–104. DOI: 10.5507/fot.2013.009.
30. Diatoms of North America. The source for diatom identification and ecology. 2024. URL: <https://diatoms.org/> (дата обращения: 31.03.2024).
31. Fránková M. et al. The structure and species richness of the diatom assemblages of the Western Carpathian spring fens along the gradient of mineral richness // Fottea. 2009. Vol. 9, № 2. P. 355–368. DOI: 10.5507/fot.2009.035.
32. Kamberović J. et al. Algal assemblages in springs of different lithologies (ophiolites vs. limestone) of the Konjuh Mountain (Bosnia and Herzegovina) // Acta Botanica Croatica. 2019. Vol. 78, № 1. P. 66–81. DOI: 10.2478/botcro-2019-0004.
33. Kasten J. et al. Steckbriefe der PhytoplanktonIndikator taxa in den WRRL Bewertungsverfahren PhytoSee und PhytoFluss mit Begleittext. Berlin: Botanic Garden and Botanical Museum Berlin, Freie Universität Berlin, 2018. 177 s. DOI:10.3372/spi.01.
34. Komarek J., Anagnostidis K. Cyanoprokaryota. 2. Teil: Oscillatoriales // Süßwasserflora von Mitteleuropa [Freshwater Flora of Europe]. Bd. 19/2. Herausgegeben von B. Büdel, G. Gärtner, L. Krienitz und M. Schagerl. München: Spektrum Akademischer Verlag, 2005. 759 s.
35. Levkov Z. et al. Diatom assemblages on Shara and Nidze Mountains, Macedonia // Nova Hedwigia. 2005. Vol. 81, № 3–4. P. 501–538. DOI: 10.1127/0029-5035/2005/0081-0501. EDN: LUIWKN.
36. Peeters V., Ector L. Atlas des diatomées des cours d'eau du territoire bourguignon. Dijon: Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement Bourgogne-Franche-Comté, 2017. Vol. 1: Centriques, Araphidées. 309 p.
37. Rose D.T. *Gomphonema parvulum* (Kutzing) Kutzing: Ecophysiological, Morphometric and Observational Studies of a Species Complex: PhD Biological Sciences Thesis. Colchester: University of Essex, 2008. 308 p. DOI: 10.24382/4094.

References

1. Buimova S.A. *Ocenka kačestva rodnikovych vod Ivanovskoj oblasti i ich vlijanija na zdorov'e naselenija* [Assessment of spring waters quality in Ivanovo region and their impact on health of the people.] Ivanovo, 2006. 186 p. (In Russ.). EDN: NOCQLN.
2. Vinogradova K.L., Gollerbah M.M., Zauer L.M., Sdobnikova N.V. *Opredelitel' presnovodnykh vodoroslej SSSR*. [Guide to freshwater algae of USSR]. Leningrad, 1980, Iss. 13. 247 p. (In Russ.).
3. Vladykina A.N., Pushina P.Yu., Dyagelev M.Yu. [Investigation of spring water quality according to physico-chemical parameters of Izhevsk city]. *Energoresursosbereženie v promyšlennosti, žiliščno-kommunal'nom chozjaistve i agropromyšlennom komplekse* [Energy conservation in industry, housing and communal services and the agro-industrial complex: materials region. scientific and practical seminar]. Izhevsk, 2016, pp. 152-154. (In Russ.).
4. Gagarina O.V. [Issues of research and control of the ecological and sanitary condition of springs in normative documents of the Russian federation]. *Bulletin of Udmurt University. Biology. Earth Sciences*. No. 1 (2012): pp. 9-15. (In Russ.). EDN: PAGNJL.
5. Gagarina O.V., Yunusova L.Z. [Protection of springs as sources of drinking water supply in the aspect of development of federal, regional and local regulatory and legal framework]. *Bulletin of Udmurt University. Biology. Earth Sciences*. V. 25, No. 2 (2015): pp. 7-16. (In Russ.). EDN: UAPTZZ.
6. El'kin S.M., Rysin I.I. [Underground waters]. *Priroda Iževska i ego okrestnostej* [The nature of Izhevsk and its surroundings: collection of articles]. Izhevsk, Udmurtija Publ., 1998, pp. 67-79. (In Russ.). EDN: YACYQD.
7. Zueva T.V., Kitaev A.B. [Water quality in springs of Perm' city]. *Geograafičeskij vestnik*. No. 1(12) (2010): pp. 42-46. (In Russ.). EDN: NCSHOZ.
8. Isaev M.A., Golovkov I.G., Yurk S.A. *Rodnikovye i artezijskie vody Iževska* [Spring and artesian waters of Izhevsk]. Izhevsk, Sekrety krasoty i zdorov'ja Publ., 2004. 109 p. (In Russ.).
9. Kuznetzova T.A. [The effect of spring water on the health of the population (for example Baryshsky district of Ulyanovsk region)]. *Ul'janovskij mediko-biologičeskij žurnal*. No. 1 (2016): pp. 158-167. (In Russ.). EDN: VUYPAJ.
10. Kulikovskii M.S., Glushchenko A.M., Genkal S.I., Kuznetsova I.V. *Opredelitel' diatomovykh vodoroslej Rossii* [Identification book of diatoms from Russia.] Yaroslavl', Filigran' Publ., 2016. 804 p. (In Russ.). EDN: LXCHFI.
11. Lukashevich O.D., Chernyshova N.A. [Safety of water in springs of Tomsk]. *XXI vek. Technosfernaja bezopasnost'*. V. 3, No. 2(10) (2018): pp. 81-97. DOI: 10.21285/2500-1582-2018-2-81-97. (In Russ.). EDN: UQXUXW.
12. Nazarov A.D. [Springs of Tomsk city – distribution, composition, ways of usage and aquapark foundation]. *Bulletin Tomskogo politechničeskogo universiteta*. V. 305, iss. 8 (2002): pp. 236-256. (In Russ.). EDN: RWLSDN.
13. Naumov V.I. *Charakteristika i ochrana chozjajstvenno-pit'evykh vod Udmurtskoj ASSR* [Characterization and protection of technical and drinkable waters of Udmurt ASSR]. Izhevsk, Udmurtija Publ., 1978. 152 p. (In Russ.).
14. Orlov A.A. [Hygienic features of the use of springs for drinking water supply for urban and rural population]. *Medicina truda i ekologija čeloveka*. No. 2(6) (2016): pp. 33-37. (In Russ.). EDN: WMGTCX.
15. Pasechnik E.Yu., L'gotin V.A., Savichev O.G., Chilinger L.N., Khvashchevskaya A.A., Chzhou D. [Chemical composition of springs as an indicator of natural-technogenic evolution of the urban ecosystem (on the example of Tomsk city, south-east of western Siberia)]. *Bulletin Tomskogo politechničeskogo universiteta. Inžiniring georesursov*. V. 333, No. 7 (2022): pp. 195-204. (In Russ.). DOI: 10.18799/24131830/2022/7/3534. EDN: ZWXIYV.
16. Rayanova I.I. [Research of nitrate content in spring waters of technogenic landscapes (on the example of Chemoshurka river basin)]. *Prirodopol'zovanie i pravovaja ochrana okružajuščej sredy* [Environmental management and legal protection of the environment: All-Russian Scientific and Practical Conference]. Izhevsk, 2021, pp. 216-221. (In Russ.). EDN: BKMGOY.
17. Tuganaev V.V. (ed.) *Rodniki Iževska* [Springs of Izhevsk]. Izhevsk, 2000. 176 p. (In Russ.). EDN: XXCORF.
18. Romanova T.I., Bol'shanik P.V. [Characteristics of the chemical composition of bottom sediments from springs in Khanty-Mansiysk]. *Meždunarodnyj naučno-issledovatel'skij žurnal*. No. 10(124) (2022): pp. 1-8. (In Russ.). DOI: 10.23670/IRJ.2022.124.33. EDN: ZJLTER.
19. Rubtsova A.V. [Bryoflora of springs of the Udmurt republic]. *Bulletin of Udmurt University. Biology. Earth Sciences*. V. 34, No. 2 (2024): pp. 145-156. (In Russ.). DOI: 10.35634/2412-9518-2024-34-2-145-156. EDN: QODMRS.

20. Rylova N.G., Kuznetsov M.F., Plavinskaya V.V. [Seasonal changes in water parameters of springs in Podborenka river basin]. *Bulletin of Udmurt University. Biology. Earth Sciences*. No. 1 (2008): pp. 73-84. (In Russ.). EDN: SZCYZZ.
21. Rylova N.G., Kuznetsov M.F., Plavinskaya V.V. [Chemical composition of soils and plants in sanitary zones of Podborenka river's springs in Izhevsk city]. *Bulletin of Udmurt University. Biology. Earth Sciences*. No. 10 (2006): pp. 97-104. (In Russ.). EDN: HVPLLT.
22. Soboleva O.A. [Ecological and chemical assessment of urban springs in Bryansk region in the system of state monitoring]. *Vodnoe khozjajstvo Rossii: problemy,ologii, upravlenie*. No. 4 (2023): pp. 115-126. (In Russ.). DOI: 10.35567/19994508_2023_4_4. EDN: ETIGYH.
23. Tizyan E.M., Skugoreva S.G. [Analysis of ion composition of water from springs in Kirov city]. *Biodiagnostika sostojanija prirodnyh i prirodno-technogennyh sistem* [Biodiagnostics of the state of natural and man-made systems: proceedings of the XVIII All-Russian Scientific and Practical Conference]. Kirov, 2020, pp. 27-31. (In Russ.). EDN: MBYYXP.
24. Tsarenko P.M. *Kratkii opredelitel' chlorokokkovykh vodoroslej Ukrainskoj SSR* [Brief guide to chlorococcal algae of Ukrain SSR]. Kiev, 1990. 208 p. (In Russ.).
25. Rysin I.I., Baranova O.G. (eds.) *Èkologija i prirodopol'zovanie na territorii goroda Iževska* [Ecology and nature management in the territory of the city of Izhevsk]. Izhevsk, 2018. 272 p. ISBN 978-5-4344-0529-4. (In Russ.). EDN: VJMDMM.
26. AlgaeBase. 2023. Available at: <https://www.algaebase.org/> (accessed 31.03.2024).
27. Cantonati M., Angeli N., Bertuzzi E., Spitale D. Diatoms in springs of the Alps: spring types, environmental determinants, and substratum. *Freshwater science*. V. 31, No. 2 (2012a): pp. 499-524. DOI: 10.1899/11-065.1. EDN: YDTNTV.
28. Cantonati M., Rott E., Spitale D., Angeli N., Komarek J. Are benthic algae related to spring types? *Freshwater science*. V. 31, No. 2 (2012b): pp. 481-498. DOI: 10.1899/11-048.1.
29. Delgado C., Ector L., Novais M.N., Blanco S., Hoffmann L., Pardo I. Epilithic diatoms of springs and spring-fed streams in Majorca Island (Spain) with the description of a new diatom species *Cymboplectura margaleii* sp. nov. *Fottea*. V. 13, No. 2 (2013): pp. 87-104. DOI: 10.5507/fot.2013.009.
30. Diatoms of North America. The source for diatom identification and ecology. 2024. Available at: <https://diatoms.org/> (accessed 31.03.2024).
31. Fránková M., Bojková J., Pouličková A., Hájek M. The structure and species richness of the diatom assemblages of the Western Carpathian spring fens along the gradient of mineral richness. *Fottea*. V. 9, No. 2 (2009): pp. 355-368. DOI: 10.5507/fot.2009.035.
32. Kamberović J., Plenković-Moraj A., Borojević K. K., Udovič M. G., Žutinić P., Hafner D., Cantonati M. Algal assemblages in springs of different lithologies (ophiolites vs. limestone) of the Konjuh Mountain (Bosnia and Herzegovina). *Acta Botanica Croatica*. V. 78, No. 1 (2019): pp. 66-81. DOI: 10.2478/botcro-2019-0004.
33. Kasten J., Kusber W.-H., Riedmüller U., Tworeck A., Oschwald L., Mischke U. Steckbriefe der PhytoplanktonIndikator taxa in den WRRL Bewertungsverfahren PhytoSee und PhytoFluss mit Begleittext. Berlin, Botanic Garden and Botanical Museum Berlin, Freie Universität Berlin, 2018. 177 s. DOI:10.3372/spi.01.
34. Komarek J., Anagnostidis K. Cyanoprokaryota. 2. Teil: Oscillatoriales. Susswasserflora von Mitteleuropa [Freshwater Flora of Europe]. Bd. 19/2. Herausgegeben von B. Büdel, G. Gärtner, L. Krienitz und M. Schagerl. München, Spektrum Akademischer Verlag, 2005. 759 s. ISBN: 978-3-82741-914-9.
35. Levkov Z., Krstić S., Nakov T., Melovski L. Diatom assemblages on Shara and Nidze Mountains, Macedonia. *Nova Hedwigia*. V. 81, No. 3-4 (2005): pp. 501-538. DOI: 10.1127/0029-5035/2005/0081-0501. EDN: LUIWKN.
36. Peeters V., Ector L. Atlas des diatomées des cours d'eau du territoire bourguignon. Vol. 1: Centriques, Araphidées. Dijon, Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement Bourgogne-Franche-Comté, 2017. 309 p. ISBN: 978-2-11-152091-2.
37. Rose D.T. *Gomphonema parvulum* (Kützinger) Kützinger: Ecophysiological, Morphometric and Observational Studies of a Species Complex: PhD Biological Sciences Thesis. Colchester, University of Essex, 2008. 308 p. DOI: 10.24382/4094.

Статья поступила в редакцию 10.06.2025; одобрена после рецензирования 03.11.2025; принята к публикации 02.12.2025.

The article was submitted 10.06.2025; approved after reviewing 03.11.2025; accepted for publication 02.12.2025.

Информация об авторах

С. М. Госькова – младший научный сотрудник, аспирант кафедры ботаники, зоологии и биоэкологии;

Н. И. Науменко – д-р биол. наук, профессор, зав. кафедрой ботаники, зоологии и биоэкологии;

А. С. Алалыкин – канд. физ.-мат. наук, доцент, старший научный сотрудник, доцент кафедры теоретической и экспериментальной физики.

Information about the authors

S. M. Goskova – junior researcher, Tobolsk complex scientific station; postgraduate student of Department of Botany, Zoology and Bioecology;

N. I. Naumenko – Advanced Doctor in Biological Sciences, Professor, Head of Department of Botany, Zoology and Bioecology;

A. S. Alalykin – Candidate of Physics and Mathematics Sciences, senior researcher, Udmurt Federal Research Center of Ural branch of RSA; assistant professor of Department of Theoretical and Experimental Physics.

Вклад авторов:

Госькова С. М. – сбор материала; определение видов; химический анализ.

Науменко Н. И. – обзор литературы; анализ данных.

Алалыкин А. С. – электронно-сканированные микрофотографии.

Contribution of the authors:

Goskova S. M. – sampling; species definition; chemical analysis.

Naumenko N. I. – literature review; data analysis.

Alalykin A. S. – SEM photos.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

БОТАНИКА

Научная статья

УДК 581.5:502.1(470.53)

EDN: KDHSTC

doi: 10.17072/1994-9952-2025-4-351-360



***Lycopodiella inundata* (L.) Holub (*Lycopodium inundatum* L.)
в Красной книге Пермского края**

Елена Герасимовна Ефимик^{1✉}, Ирина Фиргатовна Абдулманова²

^{1, 2} Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия,

^{1✉} efimik.elena@mail.ru

² a.ir-flora@mail.ru

Аннотация. Плаун заливаемый (*Lycopodium inundatum* L.), или плаунок заливаемый (*Lycopodiella inundata* (L.) Holub) – единственный представитель отдела плауновидные (Lycopodiopsida) в Красной книге Пермского края, имеющий на сегодняшний день категорию редкости I (вид, находящийся в критическом состоянии). До 2008 г. вид был известен лишь из единственного местонахождения в Пермском крае. В результате мониторинговых работ и дополнительных маршрутных исследований в 2008–2025 гг. были обнаружены новые местонахождения данного вида. К настоящему времени известно 7 подтвержденных локалитетов из Краснокамского, Кочевского, Гайнского, Усольского, Чердынского и Красновишерского административных образований Пермского края. Все новые местонахождения отмечаются либо во вторичных болотных биотопах, либо на антропогенно-нарушенных участках естественных верховых и переходных болот. В настоящее время *Lycopodiella inundata* имеет тенденцию к распространению по территории края, причем часто по молодым техногенным биотопам. Половина из известных ценопопуляций характеризуются высокой численностью, малочисленные популяции относительно стабильны. Наиболее высокая численность отмечается на слабонарушенных олиготрофных почвах в молодых маловидовых сообществах, но их зарастание в дальнейшем значительно снижает численность вида. В малочисленных локальных популяциях рекомендуется поддерживать численность за счет целенаправленного повреждения верхнего слоя почвы по краям местонахождений *Lycopodiella inundata* для создания небольших оголенных участков субстрата. Многолетние наблюдения показывают, что снижения численности и уменьшения ареала вида не наблюдается, количество местонахождений увеличивается, вид толерантен к слабым антропогенным нарушениям. На этом основании предлагается изменить категорию редкости для *Lycopodium inundatum* (syn. *Lycopodiella inundata*) в Красной книге Пермского края с I категории (вид, находящийся в критическом состоянии) на III (редкий вид).

Ключевые слова: плаунок заливаемый, *Lycopodium inundatum*, *Lycopodiella inundata*, Пермский край, охраняемые виды, Красная книга

Для цитирования: Ефимик Е. Г., Абдулманова И. Ф. *Lycopodiella inundata* (L.) Holub (*Lycopodium inundatum* L.) в Красной книге Пермского края // Вестник Пермского университета. Сер. Биология. 2025. Вып. 4. С. 351–360. <http://dx.doi.org/10.17072/1994-9952-2025-4-351-360>.

BOTANY

Original article

***Lycopodiella inundata* (L.) Holub (*Lycopodium inundatum* L.)
in the Red Book of Perm Krai**

Elena G. Efimik^{1✉}, Irina F. Abdulmanova²

^{1, 2} Perm State University, Perm, Russia

^{1✉} efimik.elena@mail.ru

² a.ir-flora@mail.ru

Abstract. *Lycopodium inundatum* L. (*Lycopodiella inundata* (L.) Holub) is the only representative of the Lycopodiopsida phylum listed in the Perm Krai Red Data Book. It is classified as a category I rarity (critically endangered). Until 2008, the species was known from only one locality in the Perm Krai. During monitoring and additional route surveys from 2008 to 2025, new locations of this species were discovered. Currently, seven con-

firmed locations are known in the Perm Krai. All new locations are observed either in secondary wetland biotopes or in anthropogenically disturbed areas of natural raised bogs and transitional bogs. Currently, *Lycopodiella inundata* is spreading across the region through young man-made biotopes. Most known cenopopulations are characterized by high abundance (with slight fluctuations from year to year). Small populations are relatively stable. Highest abundance is observed in young, species-poor communities, while overgrowth significantly reduces the species' abundance. In small local populations, it is recommended to maintain abundance by deliberately damaging the topsoil at the edges of the habitats to create small, bare patches of substrate. Long-term observations show no decline in population or range, an increase in the number of localities, and the species' tolerance to minor anthropogenic disturbances. Therefore, we propose changing the rarity category of *Lycopodiella inundata* in the Perm Krai Red Data Book from Category I (critically endangered) to Category III (rare).

Keywords: the slat is filled in, *Lycopodium inundatum*, *Lycopodiella inundata*, Perm Krai, protected species, Red Book

For citation: Efimik E. G., Abdulmanova I. F. [*Lycopodiella inundata* (L.) Holub (*Lycopodium inundatum* L.) in the Red Book of Perm Krai]. *Bulletin of Perm University. Biology*. Iss. 4 (2025): pp. 351-360. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.17072/1994-9952-2025-4-351-360>.

Введение

Красная книга Пермского края [2018] включает 75 видов сосудистых растений, среди которых 13 видов I категории редкости. Мониторинг состояния популяций данных видов ведется ежегодно. Как правило, мониторинг уже известных ценопопуляций дополняется новыми маршрутными исследованиями. Именно дополнительные маршрутные исследования территории края позволили выявить для многих охраняемых видов новые локальные популяции. Одним из них стал плаун заливаемый (*Lycopodium inundatum* L.), в Красной книге Пермского края [2018] имеющий I категорию редкости.

В Красной книге Пермского края вид рассматривается в составе рода *Lycopodium*, как и в основных региональных флористических работах [Овеснов, 1997; Иллюстрированный определитель..., 2007; Ефимик, 2009 и др.]. Но подавляющее большинство современных авторов вслед за Josef Holub [1964] рассматривают плаун заливаемый (*Lycopodium inundatum* L.) в составе рода *Lycopodiella* (*Lycopodiella inundata* (L.) Holub). В настоящей статье мы также придерживаемся данной точки зрения.

Lycopodiella inundata – земноводный травянистый многолетний представитель отдела Lycopodiophyta с ежегодно отмирающими на зиму побегами. В течение вегетационного периода вид формирует короткие слабо ветвящиеся побеги, густо покрытые шиловидно-ланцетными филлоидами. В отличие от других представителей плауновидных, встречающихся в крае, плаунок заливаемый характеризуется не резко обособленными от ветвей рыхлыми стробилами 3–8 см длиной. Спороношение идет с июля по сентябрь. Размножается спорами и вегетативно [Ильин, 1934; Бобров, 1974; Иллюстрированный определитель..., 2007]. Для вида характерна облигатная эндомикориза с *Mycoromycotina* [Kowal et al., 2020; Hoysted et al., 2021], поддерживающая существование растения на олиготрофных субстратах как на стадии гаметофита, так и на стадии спорофита.

Вид распространен в Северном полушарии: на Кавказе, в Скандинавии, Центральной и Атлантической Европе, в Западной и Восточной Сибири, на Дальнем Востоке, в Северной Америке [Ильин, 1934; Бобров, 1974; Флора Сибири, 1988].

В ареале плаунок заливаемый встречается исключительно на переувлажненных бедных почвах. В Пермском крае встречается на верховых сфагновых болотах, на заболоченных лесных дорогах.

Во многих регионах, особенно в Центральной Европе, вид является редким и включен в Красные книги ряда стран. На сопредельных с Пермским краем территориях включен в действующие Красные книги Республики Татарстан [2016], Республики Коми [2019], Удмуртской Республики [2023].

Редкость вида обусловлена рядом факторов. В первую очередь это узкая экологическая амплитуда и низкая конкурентоспособность. Для плаунка заливаемого очень важна постоянная влажность субстрата, особенно в начале вегетационного сезона. Влажность субстрата определяет скорость прироста побегов, которая замедляется при пересыхании грунта. Кроме того, численность популяций плаунка сильно снижается в условиях зарастания его типичных местообитаний, где он не выдерживает конкуренции с другими растениями [Kiedrzyński, Bogdanowicz, Śliwińska-Wyrzychowska, 2015]. Также любое хозяйственное освоение территорий произрастания плаунка заливаемого (мелиоративные работы, выработка торфа), высокая рекреационная нагрузка и пожары на верховых болотах могут снижать численность (в плане прямого физического уничтожения) и ухудшать состояние его локальных популяций.

Материалы и методика

Полевые исследования проводились авторами с 2008 по 2025 гг. ежегодно на различных административных территориях Пермского края: Гайнском, Кочевском, Чердынском, Красновишерском, Соликам-

ском, Усольском, Березниковском и Краснокамском. Полевые обследования осуществляли по общепринятым методикам [Корчагин, 1964; Методы изучения ..., 2002], все новые местонахождения подтверждались фотофиксацией и дневниковыми записями.

Учет численности плаунка заливаемого проводился с использованием методики учета редких и охраняемых растений [Изучение ценопопуляций ..., 2006]. В качестве счетной единицы принят однолетний побег, поскольку побеги *Lycopodiella inundata* формируются ежегодно, невелики по размеру и удобны для учета.

Номенклатура видов дана в соответствии с порталом Плантариум [Плантариум. Растения и лишайники...].

Результаты и их обсуждение

Первая находка *Lycopodiella inundata* сделана на территории Пермского края в 1987 г. (Пермская обл, Гайнский р-н, п. Усть-Черная, 02.07.1987. Н.В. Москвина, Л. Горленко, В. Банников – гербарий PERM). Единственное местонахождение, а также исключительная редкость вида на прилегающих территориях послужили основой для включения вида в первое издание Красной книги Пермского края [2008].

С этого момента были начаты работы по ведению кадастра и мониторинга состояния видов животных, растений и других организмов, занесенных в Красную книгу Пермского края. Практически сразу после выхода Красной книги, уже летом 2008 г. был обнаружен новый локалитет *Lycopodiella inundata* в Краснокамском городском округе, на болоте Пальтинское (Пермская обл., Краснокамский р-н, окрестности д. Шабуничи, ок. 2 км к ю/з от станции, берег оз. Черное, ринхоспорово-сфагновое болото, 06.09.2008 г. Е.Г. Ефимик, С.В. Кононыхина, Д.Г. Шумигай) [Ефимик, 2009]. Плаунок заливаемый (рис. 1) встречается здесь среди типичных растений верхового болота: *Andromeda polifolia* L., *Oxycoccus palustris* Pers., *Rhynchospora alba* (L.) Vahl, *Eriophorum vaginatum* L., *Scheuchzeria palustris* L., *Juncus filiformis* L., *Drosera rotundifolia* L., *Drosera anglica* Huds., *Drosera* × *obovata* Mert. & W.D.J. Koch и др.



Рис. 1. *Lycopodiella inundata* (L.) Holub в окрестностях станции Шабуничи

[*Lycopodiella inundata* (L.) Holub in the vicinity of Shabunichi railway station]

Численность данной ценопопуляции вида в Краснокамском р-не с 2008 г. по настоящее время довольно постоянна и составляет в разные годы от 120 до 200 побегов на площади 500 м² [Ефимик, 2015], а в 2025 г. количество учтенных побегов достигло 500. В последующие несколько лет после 2009 г. были обнаружены отдельные ценопопуляции в пределах этого же Пальтинского болота, часть из них – в непосредственной близости с краснокамской объездной автодорогой. В целом, состояние популяции вида в Краснокамском городском округе удовлетворительное, численность высокая и довольно стабильная. Многие особи формируют стробилы, т.е. находятся в генеративном состоянии. Численность популяции

колеблется по годам. Все колебания связаны с условиями увлажнения местообитания в различные годы, а также с деятельностью человека (в большинстве случаев это физическое уничтожение особей из-за механического повреждения грунта). В то же время повреждения грунта являются и новыми возможностями для расселения вида на участки с нарушенным растительным покровом.

Отметим, что во время десяти лет ежегодных обследований окрестностей п. Усть-Черная (Гайнский м.о.) с 2008 по 2018 гг. ликоподиелла заливаемая повторно не была обнаружена. Тем не менее, во второе издание Красной книги Пермского края [2018] вид был включен на основании двух известных местонахождений. Категория редкости не изменилась (I – вид, находящийся в критическом состоянии).

После выхода Красной книги Пермского края в 2018 г. мониторинговые работы были продолжены, и с 2021 г. по 2025 г. обнаруживаются новые местонахождения плаунка заливаемого, описанные ниже.

Кочевский муниципальный округ, окрестности д. Кукушка, заболоченный участок на месте добычи ПГС. Локалитет обнаружен Е.Г. Ефимик (11.08.2021). В травяном ярусе совместно с плаунком произрастают *Drosera rotundifolia*, *Lycopodium clavatum* L., всходы видов *Salix* sp., а также *Alnus incana* (L.) Moench, *Betula pubescens* Ehrh и др. Локальная популяция малочисленна, на площади в 100 м² численность побегов по годам меняется от 20 до 50. Заращение местообитания густым подростом кустарников и деревьев приводит к снижению численности вида в данном местонахождении.

Красновишерский муниципальный округ, ООПТ «Нижневишерский», Озерное местонахождение нефти, у куста скважин №7 (КС-7) на техногенном участке. Локалитет обнаружен И.Ф. Абдулмановой (25.07.2023). В травяном ярусе совместно с плаунком произрастают *Drosera rotundifolia*, *Vaccinium uliginosum* L., *Vaccinium myrtillus* L., *Oxycoccus palustris*, *Linnaea borealis* L., *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth, *Prunella vulgaris* L., *Melilotus albus* Medik., *Trifolium repens* L., *Hieracium umbellatum* L., *Antennaria dioica* (L.) Gaertn., молодые особи *Betula pubescens*, *Populus tremula* L., *Pinus sylvestris* L. В составе сообщества также отмечены многочисленные побеги дремлика болотного (*Epipactis palustris* (L.) Crantz), как в генеративном состоянии, так и вегетирующие. *Epipactis palustris* занесен в Красную книгу Пермского края (категория III – редкий вид). Кроме того, здесь же зафиксированы виды, нуждающиеся в особом внимании к их состоянию в природной среде (включенные в Приложение 3 к Красной книге Пермского края) – *Gymnadenia conopsea* (L.) R. Br. (2 особи в генеративном состоянии), *Lycopodium selago* L. (8 особей). Локальная популяция плаунка заливаемого многочисленна, насчитывается свыше 500 побегов. Высокая численность была зафиксирована при повторных обследованиях в 2024 и в 2025 гг. Тем не менее, стоит отметить, что для популяции существует ряд угроз: загрязнение биотопа нефтью, буровыми растворами, механическое уничтожение в ходе обслуживания и предупреждения зарастания площадки куста скважин, затопление в результате нарушения гидрологического режима участка в ходе эксплуатации куста скважин, зарастание биотопа (прежде всего сфагновыми и политриховыми мхами).

Чердынский муниципальный округ, ООПТ «Зеповское болото», на заброшенной узкоколейке. Локалитет обнаружен И.Ф. Абдулмановой (24.07.2024). Совместно с плаунком произрастают *Drosera rotundifolia*, *Vaccinium uliginosum*, *Vaccinium myrtillus*, *Vaccinium vitis-idaea* L., *Oxycoccus palustris*, *Calamagrostis epigeios*, *Lycopodium clavatum* L. В 2024 г. локальная популяция насчитывала около 120 побегов, в 2025 г. – не более 50. В 2025 г. отмечено общее снижение проективного покрытия травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов в пределах места произрастания плаунка.

Березниковский городской округ, окрестности д. Легино (пос. Яйвинский рейд), заболоченный участок с поврежденным растительным покровом на просеке. Локалитет обнаружен Е.Г. Ефимик (29.07.2025). Вид произрастает на нарушенном участке, сформировавшемся при прокладке дороги вдоль просеки. Совместно с плаунком заливаемым в травяном ярусе встречаются *Drosera rotundifolia*, *Prunella vulgaris*, *Parnassia palustris* L., *Juncus articulatus* L., *Omalotheca sylvatica* (L.) Sch. Bip. & F.W. Schultz и др. Данная локальная популяция малочисленна, насчитывает 35 побегов на 100 м², что связано с зарастанием биотопа кустарниками и подростом деревьев. Это различные виды ив (*Salix* sp.), *Alnus incana* (L.) Moench и *Betula pubescens* Ehrh.

Гайнский муниципальный округ, окрестности д. Оныл, заболоченный участок вблизи автодороги на месте с поврежденным растительным покровом. Локалитет обнаружен Е.Г. Ефимик (25.07.2025). Состав видов сосудистых растений на участке произрастания плаунка заливаемого невелик: *Vaccinium uliginosum*, *Drosera rotundifolia*, *Calluna vulgaris* (L.) Hull, *Oxycoccus palustris*, также отмечены всходы *Pinus sylvestris* L., *Betula pubescens*. В молодом биотопе с нарушенным растительным покровом плаунок заливаемый в отсутствии конкуренции формирует многочисленную локальную популяцию. Здесь учтено более 200 побегов на площади в 200 м².

Также в 2024 г. Е.Г. Ефимик подтверждено местонахождение плаунка заливаемого в Гайнском муниципальном округе, известное по гербарному образцу 1987 г., к сожалению, с невысокой численностью и небольшое по площади (около 50 м²). В 2024 г. здесь учтено 28 побегов, в 2025 – 32 побега. Совместно с плаунком в травяно-кустарничковом ярусе здесь отмечены *Drosera rotundifolia*, *Viola epipsila* Ledeb., *Juncus filiformis* L., *Ranunculus acris* L., *Anthoxanthum odoratum* L., *Antennaria dioica*, *Lycopodium clavatum*, подрост *Alnus incana* и *Betula pubescens*.

Таким образом, в настоящее время на территории Пермского края известно 7 подтвержденных местонахождений *Lycopodiella inundata* (рис. 2), преимущественно на среднетаежных территориях, в южной тайге местонахождения единичны.

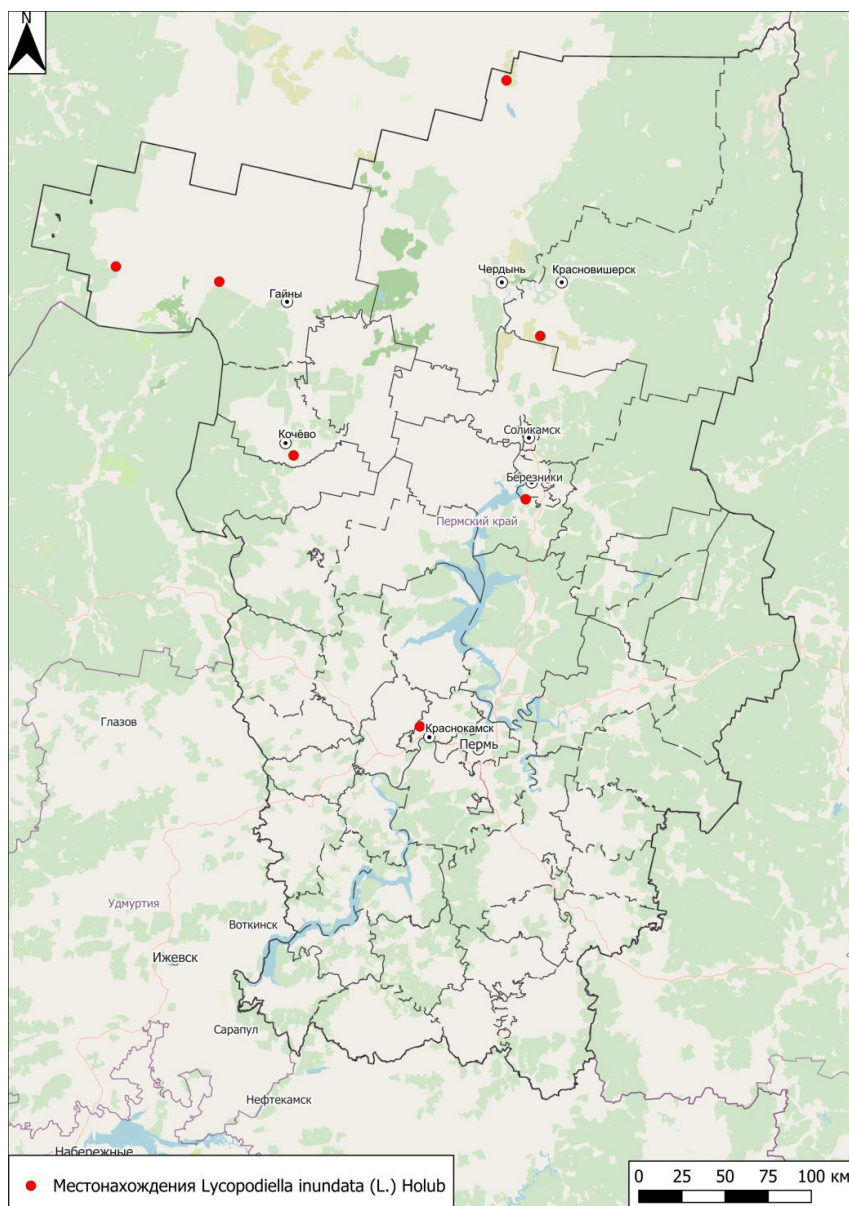


Рис. 2. Местонахождения *Lycopodiella inundata* (L.) Holub в Пермском крае

[Locations of *Lycopodiella inundata* (L.) Holub in the Perm Krai]

Все местообитания плаунка заливаемого на территории Пермского края характеризуются постоянным или временным переувлажнением. Часто *Lycopodiella inundata* предпочитает слабо заросшие участки, где нередко может формировать почти чистые одновидовые заросли совместно с некоторыми видами зеленых или сфагновых мхов. Практически постоянным спутником вида является *Drosera rotundifolia*, что также отмечено в ряде публикаций [Чхобадзе, Филиппов, 2013; Глазунов, 2015; Тетерюк и др., 2018; Teteryuk et al., 2020]. Наиболее высока численность вида на влажных участках с нарушенным растительным покровом на первых этапах зарастания (рис. 3). Такие антропогенно-нарушенные участки формируются по северу края в большом количестве.

Некоторые авторы давно отмечают тот факт, что плаунок заливаемый довольно быстро распространяется по нарушенным местообитаниям [Чхобадзе, Филиппов, 2013; Глазунов, 2015, 2021]. Нами отмечена сходная тенденция. В последние несколько лет находки *Lycopodiella inundata* связаны исключительно с антропогенными заболоченными биотопами: места добычи ПГС, нарушенные участки вдоль шоссе и проселочных дорог, зарастающие нефте- и газопроводы, просеки под линиями электропередач, отсыпки узкоколейных дорог и проч. Все новые местонахождения обнаружены на слабонарушен-

ных участках с избыточным увлажнением и заболачиванием, идущим по верховому типу. По-видимому, количество известных местонахождений *Lycopodiella inundata* в крае будет только расти.



Рис. 3. *Lycopodiella inundata* (L.) Holub и *Drosera rotundifolia* L. в Гайнском муниципальном округе на техногенно-нарушенном участке

[*Lycopodiella inundata* (L.) Holub and *Drosera rotundifolia* L. in the Gainsky municipal district in a man-made disturbed area]

Численность изученных локальных популяций варьирует в пределах территории края. Ряд из них характеризуется высокой численностью, малочисленные популяции достаточно стабильны. В целом для всех локалитетов отмечены колебания по годам, иногда довольно существенные, что связано с учетом однолетних побегов, отрастающих ежегодно. Несмотря на то, что плаунок заливаемый одним из первых способен заселять бедные, влажные и свободные от других растений субстраты, вид очень слабо конкурентоспособен, и по мере зарастания территории другими видами растений может исчезать из сообществ. Нами отмечено, что в отсутствии конкуренции со стороны других растений и при значительном увлажнении побеги развиваются максимально быстро, формируя многочисленные локальные популяции. Но при зарастании местообитаний картина в корне меняется – численность *Lycopodiella inundata* сильно снижается вплоть до его полного исчезновения. Подобные явления отмечены и для некоторых европейских стран [Kiedrzyński, Bogdanowicz, Śliwińska-Wyrzychowska, 2015]. Для длительного существования популяций плауника заливаемого необходимы периодические нарушения субстрата [Jacquemart, Champlu-

vier, De Sloover, 2003; Ivanova, Natcheva, 2016], приводящие к созданию новых подходящих местообитаний. Это могут быть как естественные нарушения, связанные с деятельностью животных или с колебаниями уровня воды, так и антропогенные.

В некоторых странах для создания благоприятных условий произрастания ряда водно-болотных растений, в том числе *Lycopodiella inundata*, проводят специальные мероприятия, связанные с нарушением верхнего торфяного слоя почвы в водно-болотных угодьях [Jacquemart, Champluvier, De Sloover, 2003]. Это создает дополнительные местообитания и увеличивает численность редкого вида.

Мы также рекомендуем поддерживать существующие малочисленные локальные популяции за счет целенаправленного повреждения верхнего слоя почвы по краям местонахождений *Lycopodiella inundata* для создания небольших оголенных участков субстрата. Это позволит увеличить численность популяций этого редкого вида там, где это необходимо.

В целом, анализ существующей ситуации по *Lycopodiella inundata* показывает, что в настоящее время в Пермском крае вид имеет тенденцию к распространению по территории края, причем часто по молодым техногенным биотопам, особенно в подзоне среднетаежных лесов. Многолетние наблюдения показывают, что снижения численности и уменьшения ареала вида не наблюдается. Существует большая вероятность обнаружения новых местонахождений вида.

Все вышеперечисленное позволяет нам предложить изменить категорию редкости для *Lycopodiella inundata* в Красной книге Пермского края с I категории (вид, находящийся в критическом состоянии) на III (редкий вид).

Заключение

Плаун заливаемый (*Lycopodium inundatum* L.), или плаунок заливаемый (*Lycopodiella inundata* (L.) Holub) – единственный представитель отдела плауновидные (Lycopodiopsida) в Красной книге Пермского края, имеющий на сегодняшний день категорию редкости I [Красная книга., 2018]. До 2009 г. вид действительно был известен лишь из единственного местонахождения в Пермском крае (Гербарий PERM).

В результате мониторинговых работ и дополнительных маршрутных исследований были обнаружены новые местонахождения данного вида. В настоящее время известно 7 подтвержденных локалитетов из Краснокамского, Кочевского, Гайнского, Усольского, Чердынского и Красновишерского административных образований Пермского края. Все известные местонахождения отмечаются либо во вторичных болотных биотопах, либо на антропогенно-нарушенных участках естественных верховых и переходных болот.

На сегодняшний день *Lycopodiella inundata* имеет тенденцию к распространению по территории края, причем часто по молодым техногенным биотопам. Половина из известных ценопопуляций характеризуется высокой численностью (с небольшими колебаниями по годам), малочисленные популяции относительно стабильны. Наиболее высокая численность отмечается в молодых маловидовых сообществах, зарастание же значительно снижает численность вида. В малочисленных локальных популяциях рекомендуется поддерживать численность за счет целенаправленного повреждения верхнего слоя почвы по краям местонахождений *Lycopodiella inundata* для создания небольших оголенных участков субстрата.

Многолетние наблюдения показывают, что снижения численности и уменьшения ареала вида не наблюдается, количество местонахождений увеличивается, вид толерантен к слабым антропогенным нарушениям. На этом основании мы рекомендуем изменить категорию редкости для *Lycopodium inundatum* (syn. *Lycopodiella inundata*) в Красной книге Пермского края с I категории (вид, находящийся в критическом состоянии) на III (редкий вид).

Список источников

1. Бобров А.Е. Отдел *Lycopodiophyta* – Плаунообразные // Флора Европейской части СССР. Л.: Наука, 1974. Т. 1. С. 54–61.
2. Глазунов В.А. Особенности распространения и мест обитания *Lycopodiella inundata* (L.) Holub (Lycopodiaceae) в Западной Сибири // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. Специальный выпуск «Камелинские чтения», 2021. Т. 20, № 2. С. 86–89. DOI: 10.14258/pbssm.2021125. EDN: EERKBI.
3. Глазунов В.А. Распространение и охрана *Lycopodiella inundata* (L.) Holub (Lycopodiaceae) в Западной Сибири // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2015. № 2(30). С. 35–45. DOI: 10.17223/19988591/30/4. EDN: TXTKFD.
4. Ефимик Е.Г. О мониторинге некоторых видов растений Красной книги Пермского края // Актуальные проблемы сохранения биоразнообразия в регионах Российской Федерации. Красная книга как объект государственной экологической экспертизы: материалы Межрегион. науч.-практ. конф. Пермь, 2015. С. 81–84. EDN: VTCBHJ.

5. Ефимик Е.Г. О новых и редких видах с территории Пермского края // Ботанические исследования на Урале: материалы Регион. с междунар. участием науч. конф., посвящ. памяти П.Л. Горчаковского. Пермь, 2009. С. 114–115. EDN: SXACZV.
6. Изучение ценопопуляций растений «Красной книги Удмуртской Республики» в природе и при интродукции: учеб.-метод. руководство / сост. О.Г. Баранова. Ижевск: Удмуртский университет, 2006. 74 с.
7. Иллюстрированный определитель растений Пермского края / С.А. Овеснов, Е.Г. Ефимик, Т.В. Козьминых и др.; под ред. С.А. Овеснова. Пермь: Кн. мир, 2007. 743 с. EDN: VYCNOF.
8. Ильин М.М. Семейство Плауновые – *Lycopodiaceae* // Флора СССР. Л.: Изд-во АН СССР, 1934. Т. 1. С. 112–129.
9. Корчагин А.А. Видовой (флористический) состав растительных сообществ и методы его изучения // Полевая геоботаника, 1964. Т. 3. С. 39–62.
10. Красная книга Пермского края / науч. ред. А.И. Шепель. Пермь: Кн. мир, 2008. 256 с.
11. Красная книга Пермского края / под общ. ред. М.А. Бакланова. Пермь: Алдари, 2018. 232 с.
12. Красная книга Республики Коми / под общ. ред. С. В. Дёгтевой. Изд. 3. Сыктывкар: Коми республиканская типография, 2019. 768 с.
13. Красная книга Республики Татарстан: животные, растения, грибы / гл. ред. А. А. Назиров. Изд. 3. Казань: Идел-Пресс, 2016. 760 с.
14. Красная книга Удмуртской Республики. Животные растения, лишайники, грибы / отв. ред. О. Г. Баранова, Н.И. Науменко. Изд. 3. Белгород: Константа, 2023. 500 с.
15. Методы изучения лесных сообществ. СПб.: НИИХимии СПбГУ, 2002. 240 с.
16. Овеснов С.А. Конспект флоры Пермской области. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1997. 252 с. EDN: OPPCGO.
17. Плантариум. Растения и лишайники России и сопредельных стран. URL: <https://www.plantarium.ru/> (дата обращения: 10.11.2025).
18. Тетерюк Л.В. и др. Находки *Lycopodiella inundata* (Lycopodiaceae) на территории Республики Коми // Ботанический журнал. 2018. Т. 103, № 12. С. 1623–1627. DOI: 10.1134/S0006813618120098. EDN: YSGVRR.
19. Флора Сибири. Lycopodiaceae – Hydrocharitaceae. Новосибирск: Наука, 1988. 200 с.
20. Чхобадзе А.Б., Филиппов Д.А. *Lycopodiella inundata* и *Selaginella selaginoides* в Вологодской области // Ботанический журнал. 2013. Т. 98, № 4. С. 515–532. DOI: 10.1134/S1234567813040101. EDN: PXNTXV.
21. Holub J. *Lycopodiella*, nový rod rádu Lycopodiales, eine neue Gattung der Ordnung Lycopodiales // Preslia (Praha). 1964. Vol. 36 (1). P. 16–22.
22. Hoysted G.A. et al. Phenology and function in Lycopod–Mucoromycotina symbiosis // New Phytologist. 2021. Vol. 229, № 5. P. 2389–2394. DOI: 10.1111/nph.17009. EDN: KRZRFI.
23. Ivanova D., Natcheva R. Reintroduction of the critically endangered plant marsh clubmoss (*Lycopodiella inundata*) in one of its historical occurrences // Annuaire de l'Université de Sofia "St. Kliment Ohridski" Faculte de Biologie First National Conference of Reintroduction of Conservation-reliant Species Sofia 2015. University Press, 2016. P. 36–42.
24. Jacquemart A., Champluvier D., De Sloover J. A test of mowing and soil-removal restoration techniques in wet heaths of the High Ardenne, Belgium // Wetlands. 2003. Vol. 23, № 2. P. 376–385. DOI: 10.1672/0277-5212(2003)023. EDN: MIOPME.
25. Kiedrzyński M., Bogdanowicz M., Śliwińska-Wyrzychowska A. Succession is threatening the large population of *Lycopodiella inundata* (L.) Holub. on anthropogenic site // Ecological Questions. 2015. № 22. P. 67–73. DOI: 10.12775/EQ.2015.024.
26. Kowal J. et al. Prevalence and phenology of fine root endophyte colonization across populations of *Lycopodiella inundata* // Mycorrhiza. 2020. Vol. 30. P. 577–587. DOI: 10.1007/s00572-020-00979-3. EDN: ANPJCV.
27. Teteryuk L.V. et al. *Lycopodiella inundata* (L.) Holub (Lycopodiaceae) in the Komi Republic (Russian Federation) // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 3. С. 111–118. DOI: 10.25750/1995-4301-2020-3-111-118. EDN: CPYORX.

References

1. Bobrov A.E. [Division Lycopodiophyta]. *Flora Evropejskoj časti SSSR* [Flora of the European part of the USSR]. Leningrad, Nauka Publ., 1974. V. 1, pp. 54–61. (In Russ.).
2. Glazunov V.A. [Distribution and habitats of *Lycopodiella inundata* (L.) Holub (Lycopodiaceae) in Western Siberia]. *Problemy botaniki Južnoj Sibiri i Mongolii. Special'nyj vypusk «Kamelinskie čtenija»*. V. 20, No. 2 (2021): pp. 86–89. (In Russ.). DOI: 10.14258/pbssm.2021125. EDN: EERKBI.

3. Glazunov V.A. [Distribution and protection of *Lycopodiella inundata* (L.) Holub in Western Siberia]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologija*. No. 2(30) (2015): pp. 35-45. (In Russ.). DOI: 10.17223/19988591/30/4. EDN: TXTKFD.
4. Efimik E.G. [About monitoring of some plant species of the Perm Krai]. *Aktual'nye problemy sochraneniya bioraznoobrazija v regionach Rossijskoj Federacii. Krasnaja kniga kak ob'ekt gosudarstvennoj ekologičeskoj ekspertizy* [Actual problems of biodiversity conservation in the regions of the Russian Federation. The Red Book as an object of state environmental expertise. Materials of the interregional scientific and practical conference]. Perm, 2015, pp. 81-84. (In Russ.). EDN: VTCBHJ.
5. Efimik E.G. [About new and rare species from the territory of Perm Krai]. *Botaničeskie issledovanija na Urale* [Botanical research in the Urals. Materials of a regional scientific conference with international participation dedicated to the memory of P.L. Gorchakovskij]. Perm, 2009, pp. 114-115. (In Russ.). EDN: SXACZV.
6. Baranova O.G., comp. *Izučenie cenopopulacij rastenij "Krasnoj knigi Udmurtskoj Respubliki" v prirode i pri introdukcii* [Study of plant cenopopulations of the "Red Book of the Udmurt Republic" in nature and in production: An educational and methodological guide]. Izhevsk, Udmurtskij universitet Publ., 2006. 74 p.
7. Ovesnov S.A., ed. *Illjustrirovannyj opredelitel' rastenij Permskogo kraja* [Illustrated Key of Plants of Perm Region]. Perm, Knizhnyi Mir Publ., 2007. 743 p. (In Russ.). EDN: VYCNOF.
8. Il'in M.M. [Family Lycopodiaceae]. *Flora SSSR* [Flora USSR]. Leningrad, AN SSSR Publ., 1934. V. 1, pp. 112-129. (In Russ.).
9. Korchagin A.A. [Species (floristic) composition of plant communities and the methods of its investigation]. *Polevaja geobotanika* [Field geobotany]. Moscow, Leningrad, AN SSSR Publ., 1964, V. 3, pp. 39-62. (In Russ.).
10. Schepel A.I., ed. *Krasnaja kniga Permskogo kraja* [The Red Data Book of the Perm Region]. Perm, Knizny mir Publ., 2018. 256 p. (In Russ.).
11. Baklanov M.A., ed. *Krasnaja kniga Permskogo kraja* [The Red Data Book of the Perm Region]. Perm, Aldari Publ., 2018. 232 p. (In Russ.).
12. Dyogteva S.V., ed. *Krasnaja kniga Respubliki Komi* [Red Book of the Komi Republic]. 3rd edition. Syktyvkar, Komi respublikanskaja tipografija Publ., 2019. 768 p. (In Russ.).
13. Nazirov A.A., ed. *Krasnaja kniga Respubliki Tatarstan: životnye, rastenija, griby* [The Red Book of the Republic of Tatarstan: animals, plants, and mushrooms]. 3rd edition. Kazan, Idel-Press Publ., 2016. 760 p. (In Russ.).
14. Baranova O.G., Naumenko N.I., eds. *Krasnaja kniga Udmurtskoj Respubliki. Životnye, rastenija, lišajniki, griby* [The Red Data Book of the Udmurt Republic. Animals, plants, lichens, and fungi]. 3rd edition. Изд. 3-е. Belgorod, Konstanta Publ., 2023. 500 p. (In Russ.).
15. *Metody izučenija lesnych soobščestv* [Methods of studying forest communities]. St-Peterburg, NIChimii SPBGU Publ., 2002. 240 p. (In Russ.).
16. Ovesnov S.A. *Konspekt flory Permskoj oblasti* [Abstract of the flora of the Perm region]. Perm, PSU Publ., 1997. 252 p. (In Russ.). EDN: OPPCGO.
17. Plantarium. Plants and lichens of Russia and neighboring countries: open online galleries and plant identification guide. 2007–2025. Available at: <https://www.plantarium.ru/lang/en.html> (accessed 10.11.2025).
18. Teteryuk L.V., Bobrov Yu.A., Teteryuk B.Yu., Kanev V.A., Plyusnin S.N. [Records *Lycopodiella inundata* (Lycopodiaceae) in Komi Republic]. *Botaničeskij žurnal*. V. 103, No. 12 (2018): pp. 1623-1627. (In Russ.). DOI: 10.1134/S0006813618120098. EDN: YSGVRR.
19. *Flora Sibiri. Lycopodiaceae – Hydrocharitaceae* [Flora of Siberia. Lycopodiaceae – Hydrocharitaceae]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1988. 200 p.
20. Czhabadze A.B., Philippov D.A. [*Lycopodiella inundata* and *Selaginella selaginoides* in Vologda region]. *Botaničeskij žurnal*. V. 98, No. 4 (2013): pp. 515–532. (In Russ.). DOI: 10.1134/S1234567813040101. EDN: PXNTXV.
21. Holub J. *Lycopodiella*, nový rod řádu Lycopodiales, eine neue Gattung der Ordnung Lycopodiales. *Preslia* (Praha). V. 36 (1) (1964): pp. 16-22.
22. Hoysted G.A., Bidartondo M.I., Duckett J.G., Pressel S., Field K.J. Phenology and function in Lycopod–Mucoromycotina symbiosis. *New Phytologist*. V. 229, No. 5 (2021): pp. 2389-2394. DOI: 10.1111/nph.17009. EDN: KRZRFI.
23. Ivanova D., Natcheva R. Reintroduction of the critically endangered plant marsh clubmoss (*Lycopodiella inundata*) in one of its historical occurrences. *Annuaire de l'Université de Sofia "St. Kliment Ohridski" Faculte de Biologie First National Conference of Reintroduction of Conservation-reliant Species*, Sofia 2015. University Press, 2016, pp. 36-42.
24. Jacquemart A., Champluvier D., De Sloover J. A test of mowing and soil-removal restoration techniques in wet heaths of the High Ardenne, Belgium. *Wetlands*. V. 23, No. 2 (2003): pp. 376-385. doi: 10.1672/0277-5212(2003)023. EDN: MIOPME.

25. Kiedrzyński M., Bogdanowicz M., Śliwińska-Wyrzychowska A. Succession is threatening the large population of *Lycopodiella inundata* (L.) Holub. on anthropogenic site. *Ecological Questions*. No. 22 (2015): pp. 67-73. DOI: 10.12775/EQ.2015.024.

26. Kowal J., Arrigoni E., Serra J., Bidartondo M. Prevalence and phenology of fine root endophyte colonization across populations of *Lycopodiella inundata*. *Mycorrhiza*. V. 30 (2020): pp. 577-587. DOI: 10.1007/s00572-020-00979-3. EDN: ANPJCV.

27. Teteryuk L.V., Bobrov Yu.A., Teteryuk B.Yu., Marchenko-Vagapova T.I., Golubeva Yu.V., Kanev V.A., Plyusnin S.N. *Lycopodiella inundata* (L.) Holub (Lycopodiaceae) in the Komi Republic (Russian Federation). *Teoretičeskaja i prikladnaja ekologija = Theoretical and applied ecology*. No. 3 (2020): pp. 111-118. DOI: 10.25750/1995-4301-2020-3-111-118. EDN: CPYORX.

Статья поступила в редакцию 05.10.2025; одобрена после рецензирования 19.10.2025; принята к публикации 02.12.2025.

The article was submitted 05.10.2025; approved after reviewing 19.10.2025; accepted for publication 02.12.2025.

Информация об авторах

Е. Г. Ефимик – канд. биол. наук, доцент кафедры ботаники и генетики растений;

И.Ф. Абдулманова – аспирант, ассистент кафедры биогеоценологии и охраны природы.

Information about the authors

E. G. Efimik – candidate of biological sciences, associate professor of the Department of Botany and Plant Genetics;

I.F. Abdulmanova – postgraduate student, assistant of the Department of Biogeocenology and Nature Conservation.

Вклад авторов:

Ефимик Е. Г. – полевые исследования; сбор материала; написание текста статьи.

Абдулманова И.Ф. – полевые исследования; сбор материала; написание текста статьи.

Contribution of the authors:

Efimik E. G. – field research; sample collection; manuscript writing.

Abdulmanova I.F. – field research; sample collection; manuscript writing.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

БОТАНИКА

Научная статья

УДК 582.639:581.145(470.1)

EDN: KNDEUD

doi: 10.17072/1994-9952-2025-4-361-368



**Биология цветения *Chaenomeles japonica* (Thunb.) Lindl. ex Spach
при интродукции на Севере**

Светлана Алексеевна Мифтахова

Институт биологии Коми научного центра УрО РАН, Сыктывкар, Россия, mifs@ib.komisc.ru

Аннотация. Проведено изучение биологии цветения многофункционального растения *Chaenomeles japonica* в сложных климатических и почвенных условиях севера. Выявлено, что ежегодное необильное цветение приводит к образованию незначительного числа плодов с полноценными семенами, что делает возможным получение более устойчивого потомства. Исследование генеративной сферы *C. japonica* при интродукции показало, что строение цветка соответствует видовым признакам растения. Также установлены некоторые отклонения, связанные с выращиванием в условиях севера, выражающиеся в нарушении развития как стерильных, так и фертильных структур, таких как махровость – увеличение числа лепестков, изменение целостности их очертаний (волнистый край), петализация, превращение тычинок в стаминодии, увеличение или уменьшение стилодиев, увеличение или уменьшение гнезд в завязи, недоразвитый пестик. Необильное цветение и значительное число аномалий в фертильных частях цветка приводит к формированию малого числа плодов на растениях. Основным способом опыления *C. japonica* является энтомофилия, основным типом — ксеногамия, которую помогает контролировать высокая степень самонесовместимости. Проведенные исследования позволяют считать данное растение перспективным для дальнейшего выращивания и изучения в сложных условиях интродукции, а также способствуют обогащению культурной флоры севера новым плодовым растением.

Ключевые слова: *Chaenomeles japonica*, Республика Коми, цветок, плод, север, опыление, цветение

Для цитирования: Мифтахова С. А. Биология цветения *Chaenomeles japonica* (Thunb.) Lindl. ex Spach при интродукции на Севере // Вестник Пермского университета. Сер. Биология. 2025. Вып. 4. С. 361–368. <http://dx.doi.org/10.17072/1994-9952-2025-4-361-368>.

Благодарности: работа проведена на экспериментальной базе УНУ «Научная коллекция живых растений Ботанического сада Института биологии Коми НЦ УрО РАН», регистрационный номер 507428. Исследования выполнены в рамках государственного задания по теме «Оценка влияния климатических условий Севера на процессы репродукции ресурсных растений». № в системе ЕГИСУ 1022041300181-3.

BOTANY

Original article

**Biology of *Chaenomeles japonica* (Thunb.) Lindl. ex Spach
flowering during introduction in the North**

Svetlana A. Miftakhova

Institute of Biology of the Komi Scientific Center of the UB RAS, Syktывkar, Russia, mifs@ib.komisc.ru

Abstract. The present study is devoted to the investigation of the flowering biology of the multifunctional plant *Chaenomeles japonica* under the difficult climatic and soil conditions of the north. It was revealed that annual weak/poor flowering leads to the formation of a small number of fruits with full seeds, which makes it possible to obtain more stable offspring. A study of the generative sphere of *C. japonica* during introduction showed that the structure of the flower corresponds to the specific characteristics of the plant. At the same time, some deviations associated with cultivation in the north have been identified. They are expressed in a violation of the development of both sterile and fertile structures, such as terry (an increase in the number of petals), change in the integrity of their outlines (wavy edge), petalization, transformation of stamens into staminodes, increase or decrease in stylodia, increase or decrease in nests in ovaries, underdeveloped pistils. Weak/Poor flowering and a significant number of anomalies in the fertile parts of a flower lead to the formation of a small number of fruits on plants. The main pollination method of *C. japonica* is entomophilia, the main type is xe-

nogamy, which is controlled by a high degree of self-incompatibility. The conducted studies allow us to consider this sample promising for further cultivation and study in difficult conditions of introduction, as well as contribute to the enrichment of the cultural flora of the North with a new fruit plant.

Keywords: *Chaenomeles japonica*, Komi Republic, flower, fruit, north, pollination, flowering

For citation: Miftakhova S. A. [Biology of *Chaenomeles japonica* (Thunb.) Lindl. ex Spach flowering during introduction in the North]. *Bulletin of Perm University. Biology*. Iss. 4 (2025): pp. 361-368. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.17072/1994-9952-2025-4-361-368>.

Acknowledgments: the work was carried out on the experimental base of the Scientific Collection of Living Plants of the Botanical Garden of the Komi Institute of Biology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, registration number 507428. The research was carried out within the framework of the state assignment on the topic "Assessment of the influence of climatic conditions of the North on the reproduction of resource plants". No. in the EGISU system 1022041300181-3.

Введение

Обогащение культурной флоры является одной из важнейших задач ботанических садов. Еще более значимо оно в северных регионах, где из-за сурового климата складываются неблагоприятные условия для интродукции многих полезных растений. В последнее время наметилась тенденция изменения среднемесячных температур воздуха вегетационного периода в сторону их повышения в среднетаежной подзоне Республики Коми [Братцев, Братцев, 2000], что дает возможность выращивания древесных растений, которые ранее считались неперспективными. Особенно ценно, когда вводятся в культуру на севере многофункциональные растения с большим практическим применением. Одним из таких растений является *Chaenomeles japonica* (Thunb.) Lindl. ex Spach (хеномелес японский, айва японская), принадлежащий к подсемейству *Maloideae* семейства *Rosaceae*. Род *Chaenomeles*, согласно современной классификации, насчитывает пять видов: *Chaenomeles speciosa* (Sweet) Nakai, *Chaenomeles thibetica* T.T.Yu, *Chaenomeles cathayensis* (Hemsl.) C.K. Schneid., *Chaenomeles japonica* (Thunb.) Lindl. ex Spach и один гибридный вид *Chaenomeles* x *superba* (Frahm) Rehder [The World Flora Online: эл. ресурс]. В традиционной китайской медицине на протяжении тысяч лет использовались плоды различных видов *Chaenomeles* для лечения ревматоидного артрита, гепатита, астмы и простуды [Zhang и др., 2010]. Они содержат много биологически активных компонентов, таких как полифенолы, тритерпены и органические кислоты, что обеспечивает защитное действие от сердечно-сосудистых заболеваний, и обладает противоопухолевыми, противовоспалительными и антиоксидантными свойствами. Плоды *Chaenomeles* sp. являются ценными пищевыми ингредиентами. Свежие плоды очень твердые и слишком кислые, чтобы употреблять в пищу сырыми, но их биоактивные компоненты, характерный аромат и большое количество пищевых волокон делают плоды хорошо подходящими для промышленной переработки.

C. japonica – самый экологически пластичный вид в роде *Chaenomeles* [Рындин и др., 2020] и лучше всего подходит для выращивания в северных условиях, где интерес к нему обусловлен декоративными качествами цветков и потенциально полезными свойствами его плодов. Широко используется как вторичная культура в Северной Европе, где проводится его детальное изучение [Rumpunen et al., 2000]. Плоды *C. japonica* нашли широкое применение в пищевой промышленности, обогащая продукты фенольными соединениями и аскорбиновой кислотой, а также улучшая профиль летучих веществ более существенно, чем использование других фруктов для этой цели, являясь наиболее ценной добавкой, которая улучшает вкус пищевых продуктов, и сырьем для парфюмерной и фармацевтической промышленности [ibid]. Препарат флаванола из плодов *C. japonica*, богатый моно- и олигомерами процианидинов, обладает цитотоксическим, противовоспалительным и антипролиферативным действием. Фенольный экстракт листьев содержит до 36 фенолов, из которых хлорогеновая кислота и нарингенин были обнаружены как основные компоненты. На основании последних данных полифенолы *C. japonica* могут быть пригодны для профилактики преддиабета, диабета II типа и метаболического синдрома [ibid].

На юге России *C. japonica* традиционно рассматривается как декоративный кустарник [Солтани, Маляровская, 2020а/б]. Для влажных субтропиков России разработан подходящий сортимент *Chaenomeles*, используемых в озеленении, и изучен их биоресурсный потенциал [Солтани, Маляровская, 2020а/б]. Как плодовая культура в России испытывается в Тамбовской [Федулова, Шиковец, 2016], Белгородской [Куклина, Сорокопудов, Навальнева, 2016], Омской областях [Кумпан, Сухоцкая, 2018], Республике Крым [Комар-Темная, 2018]. В более северных условиях изучение хеномелеса японского не проводилось. В последнее время наметилась тенденция развития северных городов, в результате чего возникает потребность введения в культуру таких многофункциональных растений, как *C. japonica*. Являясь декоративным, он может использоваться и как пищевое, и лекарственное растение. Вид обладает высокой устойчивостью к вредителям и болезням, позволяя не использовать ядохимикаты, что повышает биологическую ценность плодов. При введении растения в культуру на север актуально изучить, как в сложных климатических и почвенных условиях проходит период цветения, включающий в себя опыление и

оплодотворение, влияющие на формирование плодов и семян в новых условиях существования. Ботанический сад Института биологии Коми НЦ УрО РАН является одним из самых северных садов России, в котором культивируется *C. japonica*.

Объект и методы исследования

Chaenomeles japonica (Thunb.) Lindl. ex Spach – айва японская в коллекции Ботанического сада с 1995 г. Данный образец получен из Ботанического сада-института (Йошкар-Ола). Наблюдения проводили с 2020 по 2024 гг.

При описании генеративной сферы и плодов руководствовались Атласами по описательной морфологии [Федоров, Артющенко, 1975; Артющенко, Федоров, 1986]. Изучение цветения и опыления проводили согласно методикам А.Н. Пономарева [1960] и Е.И. Демьяновой [2011]. Полученные результаты обработаны статистически с использованием программы MS Excel.

Для выяснения периода восприимчивости рыльца к пыльце применяли методику Робинсона [Robinson, 1924]. Для этого выбирали рыльца на разных стадиях развития цветка. Помещали в 1–2%-ный раствор KMnO_4 на 1–2 мин., после чего промывали проточной водой и просматривали под биноклем. Рыльца, восприимчивые к пыльце, окрашивались, невосприимчивые – не окрашивались.

Для установления типа опыления в 2023 и 2024 гг. проводили опыт по контролируемому опылению. При установлении возможности идиогамии осуществили следующие варианты опыта: для проверки автотогамии проводили изоляцию цветка и нанесение собственной пыльцы на рыльца; для возможности геитотогамии проводили кастрацию, принудительное опыление пыльцой цветка с этого же растения и изоляцию. Изоляцию проводили на стадии готовых к распусканию бутонов. Для установления ксеногамии проводили кастрацию, принудительное опыление пыльцой цветка с другого растения и изоляцию. Контролем служило свободное опыление.

Названия таксонов приведены согласно современной литературе по базе данных World Flora Online.

Исследование проводили в дендрарии Ботанического сада Института биологии Коми НЦ УрО РАН, который расположен в 8 км от г. Сыктывкара (61.6° с.ш., 50.8° в.д.). Данная территория относится к южным районам Республики Коми, к подзоне средней тайги. Климат умеренно-континентальный, зима сравнительно суровая, лето короткое и прохладное. Наибольшее число дней в году здесь приходится на холодный период. Среднегодовая температура воздуха в Сыктывкаре +0.4°С. За вегетационный период (150 дней), начинающийся в третьей декаде апреля при среднесуточной температуре воздуха выше +5°С, сумма суточных температур достигает 1 800°С, за период активной вегетации (90–110 дней) со среднесуточными температурами +10°С и выше – 1 450°С. Район интродукции характеризуется достаточным увлажнением – среднегодовая сумма осадков составляет 500–600 мм, основная масса которых (400–450 мм) выпадает в теплый период года [Атлас..., 1997].

Результаты и их обсуждение

C. japonica – невысокий кустарник до 1 м с тонкими шипами. Ветви раскидистые; веточки пурпурные и шероховатые в молодости, черно-коричневые, бородавчатые и голые в старости; почки пурпурные, треугольно-яйцевидные, голые, верхушка острая. Прилистники почковидные, около 1 см, голые, край пильчатый, верхушка тупая; черешок около 5 мм, голый; листовая пластинка обратнойцевидная или лопатчатая до широкояйцевидной, 3–5 см длины и 2–3 см ширины, основание клиновидное или ширококлиновидное, край городчатый, верхушка тупая или острая. Цветоножка короткая или почти отсутствует, голая. Цветки собраны в пучки по 3–5 штук, диаметром 2.5–4 см [Flora of China: эл. ресурс].

Основным фактором успешности интродукции растений на севере является зимостойкость. Хотя в зимний период кустарники защищены снегом, обмерзание побегов отмечаем ежегодно. *C. japonica* в условиях интродукции отрастать начинает в середине – конце мая в зависимости от метеоусловий в весенний период. Цветение и плодоношение – наиболее важные признаки успешной акклиматизации к новым условиям. Согласно литературным данным, в условиях южной лесостепи Омской области цветение *C. japonica* наблюдается с 10–12 мая по 29 мая – 6 июня [Кумпан, Сухоцкая, 2018]; в Сочи – в марте [Солтани, Маляровская, 2020а/б]. В условиях Ботанического сада цветение необильное с первой декады июня по начало июля. Цветки на побегах прошлого года.

Цветок. *C. japonica* является энтомофильным растением, хотя в строении цветка не имеет ярко выраженных приспособлений к определенному агенту опыления. Цветок привлекательный и броский, в диаметре около 4 см, не специализирован. Цветоножка короткая – от 2 до 9 мм, отклоненная. Гипантий бокаловидный. Чашечка пятилопастная, зеленая, гладкая. Чашелистики после цветения остаются на плоде. Лопасты отстают от венчика. Венчик отклоненный раздельнолепестной, состоит из пяти красновато-оранжевых цельных, обратнойцевидных лепестков, опадающих после цветения. Цветок многотычинковый; тычинок от 15 до 36 шт. Они прикреплены основанием тычиночной нити к верхней части гипантия,

свободные, прямые и отогнутые, фертильные. Тычиночная нить прямая, длинная, голая, по форме цилиндрическая. Тычинки располагаются в два условных круга – наружный и внутренний. Пыльник прямостоячий, голый, свободный сердцевидный, слегка раздвоен у основания, теки сближенные. Место разрыва пыльника продольное. Пыльник соединен с тычиночной нитью посередине. Андроей свободный, полимерный. Пестик почти одной длины с тычинками, состоит из завязи и пяти стилодиев, сросшихся на 1/3 или до половины. Завязь нижняя, гладкая, яйцевидная, пятигнездная со многими семязачатками. Плацентация сатуральная угловая. Стилодиев пять, сросшихся до половины, они верхушечные, длинные, голые. Рыльца верхушечные, лопастные на стилодиях, имеют сосочки. Гинецей синкарпный, образован пятью плодолистиками. Длина пестика около 22 мм. Морфометрические параметры частей цветка представлены в таблице. В условиях Ботанического сада цветки до 5 шт. собраны в малоцветковые соцветия кисть.

Морфометрические параметры частей цветка *Chaenomeles japonica*
[Morphometric parameters of *C. japonica* flower parts]

Параметры цветка	M±m	Min – Max
Длина чашелистика, см	0.62±0.04	0.45–0.9
Ширина чашелистика, см	0.46±0.04	0.2–0.65
Длина лепестка, см	1.92±0.05	1.5–2.2
Ширина лепестка, см	1.46±0.04	1.3–1.7
Длина тычиночной нити, мм	8.88±0.23	6.0–12.5
Длина пыльника, мм	1.63±0.05	1.2–1.9
Ширина пыльника, мм	1.11±0.04	0.9–1.3

Наряду с нормально сформированными цветками наблюдали и тераты. Аномалии в развитии встречались как у стерильных частей цветка, так и у фертильных. Для чашелистиков, как и для лепестков, характерно наличие выемчатости и зубчатости, а также изменение формы. Для лепестков часто наблюдалась махровость (до 8 лепестков). Для тычинок – петализация и превращение нескольких тычинок в стаминодии. У пестика – изменение числа стилодиев как в сторону увеличения, так и уменьшения, срастание стилодиев происходило на различном расстоянии, срастание пяти (четырех) стилодиев до половины и один несросшийся. Завязь была от четырехгнездной до семигнездной. Некоторые цветки имели недоразвитые пестики. Наличие цветков с визуальным дефектным пестиком отмечали также Е. Kaufman и К. Rumpunen [2002].

Появлению терат способствуют суровые условия среды интродукции. Отклонения в норме факторов существования оказывают влияние на меристематические ткани цветка, следствием чего является множество тератологических изменений, которые показывают, что под воздействием изменившихся условий среды и внутренней реакции организма в первую очередь подвергаются изменчивости цветок и его отдельные органы [Тутаюк, 1969]. Все изменения в цветке демонстрируют его высокую пластичность.

В развитии цветка *C. japonica* выделяются четыре стадии: плотный бутон (I стадия); рыхлый бутон (II стадия); цветки, начавшие функционировать (III стадия); цветки, закончившие функционировать (IV стадия). В стадии плотного бутона (I стадия) чашелистики полностью закрывают венчик. Тычинки согнуты и плотно прилегают к пестiku. Длительность I стадии до 8 дней. В рыхлом бутоне (II стадия) чашелистики лишь наполовину или на одну треть закрывают венчик. Постепенно происходит увеличение всех структур цветка, рост тычиночных нитей и столбиков, увеличение лепестков. Тычинки закрывают пестик. Тычиночные нити внутреннего круга сложены вдвое вокруг пестика. Тычинки и пестик плотно прилегают друг к другу. Длительность данной стадии от 4 до 6 дней. В раскрывшемся цветке (III стадия) лепестки отгибаются. Тычинки внешнего круга отклоняются от гинецея, располагаются вертикально, пыльники почти одной длины с рыльцами, а внутренние тычиночные нити в начале цветения еще согнуты пополам. Рыльца стилодиев отходят друг от друга. Наблюдается увеличение завязи при переходе от начавших функционировать цветков к цветкам, закончившим свое цветение, в связи с начавшимся процессом роста после оплодотворения. Длительность стадии до 10 дней. В заканчивающем функционировать цветке (IV) начинают опадать лепестки, подсыхают пыльники и рыльца. На растении одновременно присутствуют несколько стадий жизненного цикла цветка.

Экология цветения и опыления. Изучение экологии цветения и опыления растений необходимо для выяснения степени их адаптационной приспособленности к новым условиям в процессе интродукции. Цветение хеномелеса в условиях среднетаежной подзоны Республики Коми происходит, когда еще возможны заморозки, а также возвратные холода в июне, задерживающие процессы роста и развития. К началу цветения на кусте уже появляются листочки. Цветение растянуто, т. к. бутоны раскрываются не одновременно, а с интервалом. Цветение одного цветка – от 2 до 8 дней в зависимости от погодных

условий. Цветение в условиях дендрария не обильное, так как ежегодно происходит обмерзание побегов. Адаптируясь к неблагоприятным условиям интродукции, растения формируют минимум генеративных органов, что выступает как приспособительный эффект для самосохранения растений.

При раскрывании цветков решающее значение имеет определение времени созревания пестика и тычинок. В полураскрывшемся цветке в солнечные дни уже наблюдается вскрывание нескольких пыльников наружного круга. Пыльники вскрываются последовательно. Сначала друг за другом вскрываются пыльники внешнего круга, а затем внутреннего. В солнечную жаркую погоду начало засыхания первых вскрывшихся пыльников происходит уже к завершению первого дня цветения. Для цветков *C. japonica* характерно одновременное созревание нескольких пыльников внешнего круга и рылец. Согласно опыту с окрашиванием рылец KMnO_4 для определения степени их зрелости, установлено, что они готовы воспринимать пыльцу сразу же после распускания цветка. Тычинки внешнего круга тоже начинают вскрываться в это же время. Тычинки вскрываются на протяжении почти всего периода цветения поочередно. В раскрытом цветке тычинки внешнего круга подсыхают, затем выпрямляются тычинки внутреннего круга и вскрываются. Характерна гомогамия с частичной протерандрией. Рыльца подсыхают, когда произошло опыление. К этому времени часто еще не все пыльники внутреннего круга вскрывались. После вскрытия всех пыльников внутреннего круга они подсыхают, и одновременно опадают лепестки. Постепенное вскрывание пыльников увеличивает возможность эффективного опыления цветка. Происходит совмещение тычиночной и рыльцевой фаз, затем снова наступает тычиночная. Хотя тычинки и пестик находятся почти на одном уровне, во время цветения они не соприкасаются. Имеет место частичное попадание пыльцы на рыльца, т. е. возможна автогамия. Условия для автогамии сохраняются в течение всего времени функционирования пестика.

Структуру цветка следует рассматривать с точки зрения экологии опыления. Одним из этапов семенного размножения является опыление. Наиболее важен с генетической точки зрения тип опыления. Для определения типа опыления цветков *C. japonica* проводили опыты с контролируемым опылением. В 2023 г. в изолированных цветках и цветках с принудительным опылением пыльцой цветка с этого же растения с предварительной их кастрацией плоды не образовались. Самоопыления не произошло. При повторении опытов в 2024 г. результат был тот же. При принудительном перекрестном опылении и свободном опылении в единичных цветках образовались плоды и завязались семена как в 2023, так и в 2024 г. Данный факт указывает на частичную или полную несовместимость пыльцы и рыльца, то есть физиологическую самостерильность, которая является наиболее универсальным приспособлением к перекрестному опылению. Это подтверждают и данные Е. Kaufman, К. Rumpunen [2002], указывающие на сильную систему самонесовместимости гомоморфного гаметофитного типа у *C. japonica*, когда реакция подавления прорастания пыльцевых зерен происходит в столбике.

Успешное закрепление растений в новых местообитаниях при перекрестном опылении зависит от присутствия соответствующих опылителей-насекомых, являющихся переносчиками пыльцы. Яркие, относительно крупные цветки *C. japonica* с легким приятным ароматом привлекательны для насекомых, которые, собирая нектар и пыльцу, опыляют их. *C. japonica* является ценным источником нектара и пыльцы для насекомых [Weryszko-Chmielewska, Sulborska-Różycka, Sawidis, 2022]. Нектарники расположены в гипантии. Цветок *C. japonica* не имеет ярко выраженных приспособлений к определенному виду насекомых, следовательно, при переселении в новые условия произрастания может опыляться разными насекомыми. В северных условиях мало цветущих растений, и поэтому между ними нет конкуренции за опылителей. Если между насекомым и растением нет прямых адаптаций, то местные насекомые могут использовать новый источник пищи. Взаимоотношения между цветком и насекомым-опылителем устанавливаются с помощью аттрактанта. Открытый цветок *C. japonica*, представляющий элемент аттракции, дает опылителю пыльцу и нектар, которые относятся к первичным аттрактантам. Вторичными аттрактантами являются легкий аромат, выделяемый во время цветения, и визуальная аттракция с помощью яркой красно-оранжевой окраски, формы и довольно большой величины венчика, делающими цветок очень заметным на фоне зеленой листвы. Также наличие близко расположенных соседних цветков увеличивает их привлекательность. Такое оптическое действие основано на цветовом контрасте цветка с окружающей обстановкой [Демьянова, 2011]. Неспециализированные цветки привлекательны для многочисленных местных видов насекомых, которые используют их аттрактанты, тем самым обеспечивая опыление. При опылении опылитель входит в тесный контакт с фертильными органами цветка, которые выделяют и улавливают пыльцу. Насекомое, пробираясь за нектаром, расположенным в гипантии между местом прикрепления внутреннего круга тычинок и завязи, оставляет на рыльцах цветков пыльцу с других растений, а пробираясь наружу, пачкается пыльцой этого же цветка. У цветков рыльца используются как посадочная площадка. После удачного опыления происходит оплодотворение. Цветки, в которых оплодотворения не произошло, опадают.

Плод *C. japonica* пиренариевый ценокарпный, сочный, яблоко многокосточковое. В плоде от 10 до 40 семян длиной от 6.4 мм до 7.3 мм и шириной от 3.6 до 4 мм. Плодоношение охватывает период с июля по конец сентября – начало октября. В начале плодоношения часть плодиков опадает. Плоды зеленые,

к моменту созревания приобретают зелено-бордовый цвет, но не ежегодно. Иногда и под зиму уходят зеленые. Плоды остаются на растении в течение всего зимнего периода. Плодоношение единичное. Не все плоды содержат полноценные семена. Часть плодов была меньших размеров с невыполненными семенами. Нарушения процессов эмбриогенеза (как на начальных, так и на поздних этапах) приводят к недоразвитию семязачатков и семени, и могут быть вызваны различными факторами (морфогенетическими, генетическими, физиологическими, антропогенными, экологическими), вызывающими снижение семенной продуктивности. D. Andersone и E. Kaufmane [2003] указывали, что критическими периодами эмбриогенеза, когда происходило наибольшее количество отклонений, были период оплодотворения (через 4–8 дней после опыления) и период, включающий первые 30 дней после оплодотворения. Эти события совпадают с опадением цветков сразу после цветения и опадением плодиков примерно через месяц после опыления. Плодики, которые не опадали в течение этого периода, обычно развивались в нормальные плоды. Наличие полноценных, хоть и в незначительном числе, семян позволит получить более устойчивое к северным условиям потомство.

Заключение

Chaenomeles japonica (Thunb.) Lindl. ex Spach – новое плодовое растение в среднетаежной подзоне Республики Коми. Изучение генеративной сферы растений *C. japonica* при интродукции в подзоне средней тайги Республики Коми показало, что строение цветков соответствует видовым признакам растения. *C. japonica* относится к насекомоопыляемым растениям, что обусловлено морфологическими особенностями, такими как открытый цветок, яркая окраска венчика, легкий аромат и наличие нектара. Вместе с тем выявлены некоторые отклонения, связанные с выращиванием в условиях севера, выражающиеся в нарушении развития как стерильных, так и фертильных структур, среди которых махровость (увеличение числа лепестков), изменение целостности их очертаний (волнистый край), петализация, превращение тычинок в стаминодии, увеличение или уменьшение числа стилодиев, увеличение или уменьшение числа гнезд в завязи, наличие дефектного пестика. Отмечена высокая степень самонесовместимости, что было подтверждено контролируемым опылением. Плодоношение, как и цветение, единичное. Значительное число аномалий в фертильных частях цветка, возможно, приводит к формированию малого числа плодов на растениях. Получение полноценных семян имеет большое практическое применение, т. к. позволяет использовать их для проведения селекционной работы по отбору наиболее устойчивых особей в последующих семенных поколениях с целью дальнейшего внедрения и распространения вида в северных условиях. Интродуцируемый образец *C. japonica* проявил себя как перспективный для дальнейшего выращивания и изучения в условиях дендрария Ботанического сада Института биологии Коми НЦ УрО РАН.

Список источников

1. Артюшенко З.Т., Федоров Ал.А. Атлас по описательной морфологии высших растений. Плод. Л.: Наука, 1986. 392 с.
2. Атлас Республики Коми по климату и гидрологии / отв. ред. А.И. Таскаев. М.: Дрофа, 1997. 115 с.
3. Братцев С.А., Братцев А.А. Закономерности изменения температуры воздуха в Республике Коми в XX веке // Вестник Института биологии Коми НЦ УрО РАН. 2000. Вып. 6(29). URL: <https://ib.komisc.ru/add/old/t/ru/ir/vt/00-29/01.html> (дата обращения: 23.04.2025).
4. Демьянова Е.И. О постановке антропогенных наблюдений в условиях интродукции // Ботанический журнал. 2011. Т. 98, № 8. С. 1127–1134. EDN: NXVBYP.
5. Карпун Ю.Н. Субтропическая декоративная дендрология: Справочник. СПб., 2010. 580 с. EDN: VPQYQJ.
6. Комар-Тёмная Л.Д. Характеристика признаков коллекции хеномелеса (*Chaenomeles* Lindl.) // Бюллетень Ботанического сада-института ДВО РАН. 2018. Вып. 20. С. 52–64. DOI: 10.17581/bbgi2005. EDN: VPKNFH.
7. Кумпан В.Н., Сухоцкая С.Г. Завязываемость плодов хеномелеса японского в условиях южной лесостепной зоны Омской области и влияющие факторы // Вестник Казанского ГАУ. 2018. № 4(51). С. 51–55.
8. Кукина А.Г., Сорокопудов В.Н., Навальнева И.А. Интегральная оценка плодоношения отборных форм хеномелеса (*Chaenomeles* Lindl.) в Средней России // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. 2016. № 2(14). С. 3–10. DOI: 10.21685/2307-9150-2016-2-1. EDN: WXXGIDH.
9. Пономарев А.Н. Изучение цветения и опыления растений // Полевая геоботаника. М.; Л., 1960. Т. 2. С. 9–19.
10. Рындин А.В. и др. Красивоцветущие кустарники на юге России (хеномелес, форсайтия, вейгела, гидрангея, гибискус). Сочи, 2020. 188 с. EDN: HLCVJH.

11. Солтани Г.А., Маляровская В.И. Перспективные сорта хеномелеса (*Chaenomeles* Lindl.) для использования в озеленении юга России // Плодоводство и виноградарство Юга России. 2020а/б. № 66(6). С. 412–424. DOI: 10.30679/2219-5335-2020-6-66-412-424. EDN: HAKCLU.
12. Солтани Г.А., Маляровская В.И. Биоресурсный потенциал хеномелесов (*Chaenomeles* Lindl.) в условиях влажных субтропиков России // Бюллетень ГНБС. 2020а/б. Вып. 136. С. 67–77. DOI: 10.36305/0513-1634-2020-136-67-77. EDN: NMIMXU.
13. Тутаюк В.Х. Тератология цветка. Баку, 1969. 111 с.
14. Фегри К., Л. Ван дер Пэйл. Основы экологии опыления. М.: Мир. 1982. 384 с.
15. Федоров А.А., Артюшенко З.Т. Атлас по описательной морфологии высших растений. Цветок. Л.: Наука. 1975. 352 с.
16. Федулова Ю.А., Шиковец Т.А. Японская айва – новая плодовая культура в садах России // Современное садоводство. 2016. № 4. С. 25–29. EDN: XEHFAP.
17. Andersone D., Kaufmane E. Flowering and Fruit Set in *Japanese Quince* (*Chaenomeles japonica*) // Japanese Quince-Potential Fruit Crop for Northern Europe. Swedish University of Agricultural Sciences; Alnarp, Sweden, 2003. P. 29–36.
18. Flora of China. URL: <http://www.efloras.org>. (дата обращения: 03.04.2025).
19. Kaufmane E., Rumpunen K. Pollination, pollen tube growth and fertilization in *Chaenomeles japonica* (Japanese quince) // Scientia Horticulturae. 2002. Vol. 94, Iss. 3–4: P. 257–271, DOI: 10.1016/S0304-4238(01)00371-5. EDN: MABONJ.
20. Robinsohn I. Die Färbungsreaction der Narben, Stigmatochromie, als morphologische Blütenuntersuchungsmethod // Sitzungsber. Akad. Wiss. 1924. Bd. 133, h. 6. S. 181–211.
21. Rumpunen K. et al. Domestication of *Japanese Quince* (*Chaenomeles japonica*) // Acta Hort. 2000. № 538: P. 345–348. DOI: 10.17660/Acta Hort.2000.538.59.
22. The World Flora Online. URL: <http://www.worldfloraonline.org>. (дата обращения: 03.04.2025).
23. Weryszko-Chmielewska E., Sulborska-Różycka A., Sawidis T. Structure of the nectary in *Chaenomeles japonica* (Thunb.) Lindl. ex Spach. in different stages of flowering with focus on nectar secretion // Protoplasma. 2022. Vol. 259, № 6. P. 1467–1476. DOI: 10.1007/s00709-022-01750-5. EDN: PAEQWE.
24. Zhang L. et al. Antioxidant, anti-inflammatory and anti-influenza properties of components from *Chaenomeles speciose* // Molecules. 2010. Vol. 15, № 11: P. 8507–8517. DOI: 10.3390/molecules15118507. EDN: OMLUCZ.

References

1. Artyushenko Z.T., Fedorov A.I. *Atlas po opisatel'noj morfologii vysšich rastenij. Plod* [Atlas of descriptive morphology of higher plants. Fructus]. Leningrad, Nauka Publ., 1986. 392 p. (In Russ.).
2. Taskaev A.I., ed. *Atlas Respubliki Komi po klimatu i gidrologii* [Atlas of the Komi Republic on climate and hydrology] Moscow, Drofa Publ., 1997, 115 p. (In Russ.).
3. Brattsev S.A., Brattsev A.A. [Patterns of air temperature change in the Komi Republic in the 20th century]. *Vestnik Instituta biologii Komi NC UrO RAN*. Iss. 6(29) (2000). Available at: <https://ib.komisc.ru/add/old/t/ru/ir/vt/00-29/01.html> (accessed 23.04.2025). (In Russ.).
4. Demyanova E.I. [On setting up antecological observations in the conditions of introduction]. *Botaničeskij žurnal*. V. 98, No. 8 (2011): pp. 1127–1134. (In Russ.). EDN: NXVBYR.
5. Karpun Yu.N. *Subtropičeskaja dekorativnaja dendrologija* [Subtropical decorative dendrology: A reference book]. St. Petersburg, 2010. 580 p. (In Russ.). EDN: VPQYOJ.
6. Komar-Dark L.D. [Characteristics of the featured collection of chaenomeles (*Chaenomeles* Lindl.)]. *Bjulleten' Botaničeskogo sada-instituta DVO RAN*. Iss. 20 (2018): pp. 52–64. (In Russ.). DOI: 10.17581/bbgi2005. EDN: VPKNFH.
7. Kumpan V.N., Sukhotskaya S.G. [Knotting of Japanese henomeles fruits in the conditions of the southern forest-steppe zone of the Omsk region and influencing factors]. *Vestnik Kazanskogo GAU*. No. 4(51) (2018): pp. 51–55. (In Russ.). DOI: 10.12737/article_5c3de3817d4092.85461715. EDN: YWHBRJ.
8. Kuklina A.G., Sorokopudov V.N., Navalneva I.A. [Integral assessment of fruiting of selected forms of chaenomeles (*Chaenomeles* Lindl.) in Central Russia]. *Izvestija vysšich učebnyh zavedenij. Povolžskij region. Estestvennye nauki*. No. 2(14) (2016): pp. 3–10. (In Russ.). DOI: 10.21685/2307-9150-2016-2-1. EDN: WXGIDH.
9. Ponomarev A.N. [Study of flowering and pollination of plants]. *Polevaja geobotanika* [Field geobotany]. Moscow, Leningrad, AN SSSR Publ., 1960, V. 2, pp. 9–19. (In Russ.).
10. Ryndin A.V., Malyarovskaya V.I., Karpun Yu.N., Soltani G.A., Kunina V.A., Tyshchenko E.L., Kuvaytsev M.V. *Krasivocvetušcie kustarniki na juže Rossii (henomeles, forsajtija, vejgela, gidrangeja, gibiskus)* [Flowering shrubs in the south of Russia (chaenomeles, forsythia, weigela, hydrangea, hibiscus)]. Sochi, 2020. 188 p. (In Russ.). EDN: HLCVJH.

11. Soltani G.A., Malyarovskaya V.I. [Promising varieties of chaenomeles (*Chaenomeles* Lindl.) for use in landscaping in southern Russia]. *Plodovodstvo i vinogradarstvo Juga Rossii*. No. 66(6) (2020a/b): pp. 412-424. (In Russ.). DOI: 10.30679/2219-5335-2020-6-66-412-424. EDN: HAKCLU.
12. Soltani G.A., Malyarovskaya V.I. [Bioresource potential of Chaenomeles (*Chaenomeles* Lindl.) in the humid subtropics of Russia]. *Bulleten' GNBS*. Iss. 136 (2020a/b): pp. 67-77. (In Russ.). DOI: 10.36305/0513-1634-2020-136-67-77. EDN: NMIMXU.
13. Tutayuk V.H. *Teratologiya cvetka* [Teratology of a flower]. Baku, AN Azerbajzhanskoj SSR Publ., 1969. 111 p. (In Russ.).
14. Fegri K., L. Van der Pale. *Osnovy èkologii opyleniya* [Fundamentals of pollination ecology]. Moscow, Mir Publ., 1982. 384 p. (In Russ.).
15. Fedorov A.A., Artyushenko Z.T. *Atlas po opisatel'noj morfologii vysšich rastenij. Cvetok* [Atlas of descriptive morphology of higher plants. Flower]. Leningrad, Nauka Publ., 1975. 352 p. (In Russ.).
16. Fedulova Yu.A., Shikovets T.A. [Japanese quince is a new fruit crop in Russian gardens]. *Sovremennoe sadovodstvo (Elektronnyj žurnal)*. No. 4 (2016): pp. 25-29. (In Russ.). EDN: XEHFAP.
17. Andersone D., Kaufmane E. Flowering and Fruit Set in Japanese quince (*Chaenomeles japonica*). Japanese Quince-Potential Fruit Crop for Northern Europe. Swedish University of Agricultural Sciences; Alnarp, Sweden. 2003, pp. 29-36.
18. Flora of China. Available at: <http://www.efloras.org>. (accessed 3.04.2025).
19. Kaufman E., Rumpunen K. Pollination, pollen tube growth and fertilization in *Chaenomeles japonica* (Japanese quince). *Scientia Horticulturae*. V. 94, iss. 3-4 (2002): pp. 257-271. DOI: 10.1016/S0304-4238(01)00371-5. EDN: MABONJ.
20. Robinsohn I. Die Farbungsreaction der Narben, Stigmatochromie, als morphologische Blumenuntersuchungenmethod. *Sitzungsber. Akad. Wiss.* Bd. 133, h. 6 (1924): S. 181-211.
21. Rumpunen K., Trajkovski V., Bartish I., Garkava L., Nybom H., Laencina J., Ros, J.M., Jordan M.J., Hellin P., Tigerstedt P.M.A., Kauppinen S., Thibault J.F., Thomas M., Gustafsson M., Norin I., Åkesson B., Gröön I., Kaufmane E., Ruusa S. and Stanys V. et al., Domestication of Japanese quince (*Chaenomeles japonica*). *Acta Hortic.* No. 538 (2000): pp. 345-348. DOI: 10.17660/ACTA HORTIC.2000.538.59.
22. The World Flora Online. Available at: <http://www.worldfloraonline.org>. (accessed 3.04.2025).
23. Weryszko-Chmielewska E., Sulborska-Różycka A., Sawidis T. Structure of the nectary in *Chaenomeles japonica* (Thunb.) Lindl. ex Spach. in different stages of flowering with focus on nectar secretion. *Protoplasma*. V. 259, No. 6 (2022): pp. 1467-1476. DOI: 10.1007/S00709-022-01750-5. EDN: PAEQWE.
24. Zhang L., Cheng Y.X., Liu A.L., Wang H.D., Wang Y.L., Du G.H. Antioxidant, anti-inflammatory and anti-influenza properties of components from *Chaenomeles speciosa*. *Molecules*. V. 15, No. 11 (2010): pp. 8507-8517. DOI: 10.3390/molecules15118507. EDN: OMLUCZ.

Статья поступила в редакцию 19.07.2025; одобрена после рецензирования 13.10.2025; принята к публикации 02.12.2025.

The article was submitted 19.07.2025; approved after reviewing 13.10.2025; accepted for publication 02.12.2025.

Информация об авторе

С. А. Мифтахова – канд. биол. наук, научный сотрудник отдела Ботанический сад.

Information about the author

S. A. Miftakhova – candidate of biological sciences, researcher of the Botanical Garden.

БОТАНИКА

Научная статья

УДК 581.192 (470.53)

EDN: LMHWON

doi: 10.17072/1994-9952-2025-4-369-382



**Растения травяно-кустарничкового яруса сосняков
зеленомошной и травяной групп типов леса ООПТ «Осинская
лесная дача» как источник летучих органических соединений**

**В. Л. Спирина¹, П. Ю. Сарапульцева¹ А. А. Зайцев¹, Л. В. Новоселова¹,
В. А. Исидоров²**

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

²Белостокский технический университет, Белосток, Польша

Автор, ответственный за переписку: Виктория Леонидовна Спирина, victoria45winter@mail.ru

Аннотация. С целью определения компонентов летучих выделений растений травяно-кустарничкового яруса, входящих в общее количество летучих органических соединений (ЛОС) пограничного слоя атмосферы, установлен качественный состав ЛОС девяти видов растений (*Ledum palustre* L., *Arctostaphylos uva-ursi* (L.) Spreng, *Vaccinium myrtillus* L., *Oxycoccus palustris* Pers., *Rubus saxatilis* L., *Chimaphila umbellata* (L.) W. Barton, *Aegorodium podagraria* L., *Asarum europaeum* L., *Lycopodium complanatum* L.), собранных на особо охраняемой природной территории «Осинская лесная дача». По результатам химического анализа идентифицировано более 100 различных органических соединений девяти классов. Установлено, что основной вклад в эмиссию приходится на долю терпенов, которые обладают высокой реакционной способностью и могут принимать участие в процессах радикального газофазного окисления. Проведен сравнительный анализ ЛОС, выделяемых *Vaccinium myrtillus* L., *Chimaphila umbellata* (L.) W. Barton и *Asarum europaeum* L., собранных на одной и той же территории в разные годы. Отмечено существенное различие в составах монотерпенов и сесквитерпенов, выделяемых этими группами растений.

Ключевые слова: растения травяно-кустарничкового яруса, летучие органические соединения, эмиссия, твердофазная микроэкстракция, ГХ-МС

Для цитирования: Растения травяно-кустарничкового яруса сосняков зеленомошной и травяной групп ООПТ «Осинская лесная дача» как источник реактивных летучих органических соединений / В. Л. Спирина, П. Ю. Сарапульцева А. А. Зайцев, Л. В. Новоселова, В. А. Исидоров // Вестник Пермского университета. Сер. Биология. 2025. Вып. 4. С. 369–382. <http://dx.doi.org/10.17072/1994-9952-2025-4-369-382>.

BOTANY

Original article

**Plants of the herbaceous-shrub layer in Specially Protected
Natural Area the Osinskaya lesnaya dacha as a source of reactive
volatile organic compounds**

**V. L. Spirina¹, P. Yu. Sarapultseva¹, A. A. Zaitsev¹, L. V. Novoselova¹,
V. A. Isidorov²**

¹Perm State University, Perm, Russia

²Bialystok Technical University, Bialystok, Poland

Corresponding author: Victoria L. Spirina victoria45winter@mail.ru

Abstract. In order to further assess the contribution of volatile emissions from herbaceous-shrub layer plants to the total amount of volatile organic compounds (VOCs) in the atmospheric ground layer, the qualitative composition of VOCs was determined for nine plant species (*Ledum palustre* L., *Arctostaphylos uva-ursi* (L.) Spreng, *Vaccinium myrtillus* L., *Oxycoccus palustris* Pers., *Rubus saxatilis* L., *Chimaphila umbellata* (L.) W. Barton, *Aegorodium podagraria* L., *Asarum europaeum* L., *Lycopodium complanatum* L.) selected from the Osinskaya Lesnaya Dacha specially protected natural area. Based on the results of chemical analysis, more than 100 different organic compounds of nine classes were identified. Terpenes were identified as the main emission

source. They are highly reactive and able to participate in radical gas-phase oxidation processes. Based on the results of the study, we performed a comparative analysis of the volatile organic compounds emitted by *Vaccinium myrtillus* L., *Chimaphila umbellata* (L.) W. Barton, and *Asarum europaeum* L. with all specimens collected from the same location in May, with a two-year interval between sampling events. A significant difference was noted in the composition of monoterpenes and sesquiterpenes emitted by these plant groups.

Keywords: plants of the herbaceous-shrub layer, volatile organic compounds, emission, solid-phase microextraction, GC-MS

For citation: Spirina V. L., Sarapultseva P. Yu., Zaitsev A. A., Novoselova L. V., Isidorov V. A. Plants of the herbaceous-shrub layer in Specially Protected Natural Area the Osinskaya lesnaya dacha as a source of reactive volatile organic compounds]. *Bulletin of Perm University. Biology*. Iss. 4 (2025): pp. 369-382. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.17072/1994-9952-2025-4-369-382>.

Введение

Ежегодные глобальные выбросы летучих органических соединений (ЛОС), выделяемых в основном растениями суши, составляют около 1 Гт. В них входят преимущественно изопрен (2-метил-1,3-бутадиен, 50%), монотерпены ($C_{10}H_{16}$, 15%) и сесквитерпены ($C_{15}H_{24}$, 3%), а также соединения в виде неизопреноидов, например, около 10% метанола и другие [Stocker et al., 2013].

ЛОС играют важную роль в атмосферных процессах, протекающих в пограничном слое атмосферы, участвуя в формировании его окислительного потенциала, оптических свойств и радиационного баланса [Hester, Harrison, 1995; Atkinson, 2000; Glasius et al., 2016]. Примесями атмосферы являются, помимо других, биогенные соединения (моно-, сесквитерпены и их кислородсодержащие производные), которые легко вступают в реакции с озоном, радикалами $\cdot OH$ и $\cdot NO_3$ (рис. 1) [Белан, 2010; Isidorov et al., 2022]. Терпеновые соединения могут принимать участие в образовании вторичных атмосферных аэрозолей, рассеивающих и поглощающих солнечную радиацию [Heald et al., 2010; Makkonen et al., 2012; Glasius, Goldstein, 2016; Kourtev et al., 2016; Isidorov, 2022]. Накоплены обширные сведения о составе и скоростях эмиссии биогенных ЛОС практически всех видов лесообразующих древесных растений [Isidorov et al., 1985; Shao et al., 2001; Komenda, Koppmann, 2002; Komenda et al., 2003; Tarvainen et al., 2005; Grabmer et al., 2006; Filella et al., 2007; Hakola et al., 2023].

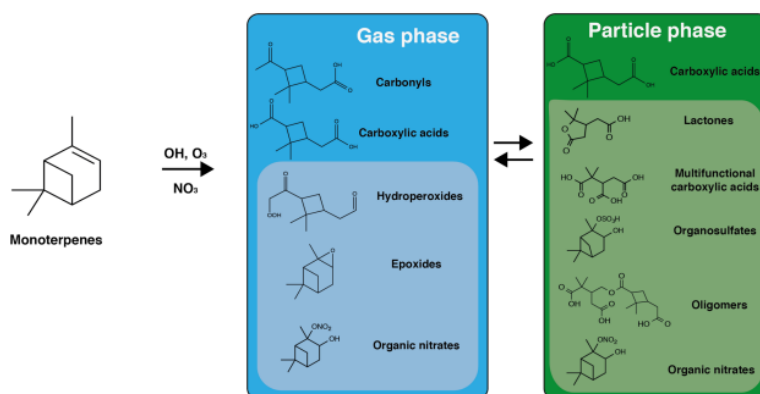


Рис. 1. Продукты реакций монотерпенов с радикалами в газовой фазе и фазе частиц [Glasius, Goldstein, 2016]

[Reaction products of monoterpenes with radicals in the gas phase and particle phase [Glasius, Goldstein, 2016]]

Методика определения скорости эмиссии изопрена и терпенов в хвойных лесах различных районов СССР представлена в работе В.А. Исидорова [Isidorov, Zenkevich, Ioffe, 1985]. Она заключается в концентрировании соединений, выделяемых растениями, в сорбционных трубках, последующей термодесорбции компонентов в капиллярную колонку, их газовой-хромато-масс-спектрометрической идентификации и количественном определении при помощи пламенно-ионизационного детектора. Изучен качественный состав ЛОС, продуцируемых 22 видами растений, характерных для лесов Северного полушария (17 видов древесных пород (*Salix pentandra* L., *Populus tremula* L., *Populus balsamifera* L., *Quercus robur* L., *Betula pendula* Roth и другие) и 5 видов травяно-кустарничкового яруса (*Vaccinium vitis-idaea* L., *Vaccinium myrtillus* L., *Ledum palustre* L. и др.)). Перечень идентифицированных соединений включает более 70 веществ различных классов (парафины и непредельные УВ, спирты, простые и сложные эфиры, карбонильные соединения, фураны и галогенированные соединения). Было установлено, что основными компонентами (около 80%) летучих выбросов хвойных пород являются терпены, а именно α -пинен, 3-карен, камфен, лимонен и др. Определена интенсивность эмиссии изопрена и терпенов для некоторых

древесных пород. Скорости эмиссии терпенов и изопрена для сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), сосны сибирской кедровой (*Pinus sibirica* Du Tour) и лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) составили от 0.5 до 20 мкг/(г·ч). Определены средние концентрации терпенов в хвойных лесах различных регионов СССР. Суммарные концентрации терпенов в воздухе хвойных лесов обычно колеблются от 3.5 до 35 мкг⁻³. Было отмечено сильное влияние метеорологических условий на интенсивность эмиссии и концентрацию терпенов в воздухе в лесном массиве.

Тем не менее, эмиссия ЛОС лесными экосистемами в настоящее время остается недостаточно изученной [Isidorov, 1990; Mogensen et al., 2015; Yang et al., 2016; Zhou et al., 2017; Praplan et al., 2020].

Наиболее крупным источником реакционноспособных биогенных ЛОС в Северном полушарии являются леса бореального и умеренного поясов [Isidorov, 1992; Guenther et al., 1995; van Meeningen et al., 2017; Isidorov, Zaitsev, 2022]. Согласно Таблицам и моделям хода роста и продуктивности насаждений основных лесообразующих пород Северной Евразии, фитомасса растений травяно-кустарничкового и напочвенного ярусов в 20-летних сосновых насаждениях 2 класса бонитета в горных средне- и южнотажных регионах Урала составляет (в среднем) 1.8 т·га⁻¹, увеличиваясь до 5.4 т·га⁻¹ в возрасте 100 лет, в 20-летних ельниках составляют 0.3 т·га⁻¹, в 100-летних ельниках – 0.8 т·га⁻¹ [Таблицы и модели..., 2008].

В обзоре [Isidorov, Zaitsev, 2022] рассматриваются различные источники биогенных ЛОС под пологом леса в бореальных и умеренных природных экосистемах Северного полушария. Авторы, опираясь на исследования различных ученых, отмечают, что современные химические транспортные модели не учитывают вклад природных источников, например, такого как опад, в образование озона и вторичных загрязняющих нижнюю атмосферу веществ. Исследователи отмечают, что было проведено множество измерений скорости эмиссии ЛОС как для свежей листвы отдельных растений, так и для различных растительных сообществ. В частности, в обзоре, охватывающем период с 1979 по 1997 гг., приведены 314 значений скорости эмиссии изопрена и монотерпенов, опубликованные в 52 статьях. Кроме того, 126 значений скорости эмиссии 39 нетерпеновых соединений более чем 50 видами растений опубликованы с 1992 по 1999 год [Isidorov, Zaitsev, 2022]. Среди растений, перечисленных в этом обзоре, упомянут только один вид из семейства Ericaceae, входящий в кустарничковый ярус бореальных лесов, – голубика (*Vaccinium uliginosum*). Этот кустарник является незначительным источником изопрена. Высокое содержание монотерпенов отмечено в ЛОС кассандры (*Chamaedaphne calyculata*) и багульника (*Ledum groenlandicum*) [Isebrands et al., 1999].

Впервые результаты лабораторных экспериментов по установлению состава ЛОС, выделяемых растениями живого напочвенного покрова и травяно-кустарничкового яруса разных таксонов: моховидными, папоротниковидными, цветковыми травянистыми растениями и кустарничками – представлены в работе [Isidorov et al, 2022]. Изучаемые растения были отобраны в полосе хвойно-широколиственных (смешанных) лесов таежной зоны на востоке европейской части России в Пермском крае и в смешанных лесах средних широт на востоке Польши. Изучен качественный состав летучих выделений 1 вида лишайника (*Cladonia arbuscula*), 5 видов моховидных (*Dicranum polysetum*, *Hylocomnium splendens*, *Leucobrium glaucum*, *Pleurozium schreberi*, *Sphagnum phallax*), 1 вида папоротников (*Pteridium aquilinum*), 2 видов цветковых травянистых растений (*Asarum europaeum* и *Antennaria dioica*) и 2 представителей кустарничков (*Vaccinium myrtillus* и *Chimaphilla umbellata*). Для всех растений характерна эмиссия терпенов и терпеноидов, представленных 112 соединениями, вторую по численности группу (35 веществ) образовывали карбонильные соединения. Все представители этих таксонов обладают высокой реакционной способностью, вследствие чего легко вступают в реакции с радикалами [•]ОН, [•]NO₃ и другими оксидами азота с образованием вторичных примесей атмосферы различного характера, таких как озон и различные пероксиды [Atkinson, 2002; Atkinson, Arey, 2003].

Таким образом, экспериментально подтверждается, что растения травяно-кустарничкового яруса являются неучтенным источником большого числа разнообразных ЛОС, состав которых изучен лишь частично, поэтому целью данного исследования является установление качественного состава ЛОС, выделяемых в атмосферу растениями травяно-кустарничкового яруса лесов Пермского края.

Объекты и методика исследования

Объектом исследования явились лесные растения, произрастающие на территории особо охраняемой природной территории регионального значения «Осинская лесная дача», которая находится в границах кварталов 1–130 Осинского участкового лесничества Осинского лесничества Пермского края¹. Схема расположения мест сбора объектов исследования представлена на рис. 2. Координаты места отбора проб

¹ Приказ Министерства природных ресурсов, лесного хозяйства и экологии Пермского края от 09.01.2017 № СЭД-30-01-02-2365 "Об утверждении Положений об особо охраняемых природных территориях регионального значения Осинского муниципального района Пермского края".

(57°16'N, 55°09'E). Авторами сбора растений и геоботанических описаний были А.А. Зайцев, Е.Л. Гатина, И.Ф. Абдулманова.

Территория представляет собой древние террасы р. Камы, которые четко прослеживаются в направлении с запада на восток. В геоморфологическом отношении поверхность представляет собой плато размыва. Основные формы рельефа представлены эрозионными образованиями: речные долины с комплексом аккумулятивных форм (поймы, террасы), овраги и балки [Андреев, 2012].

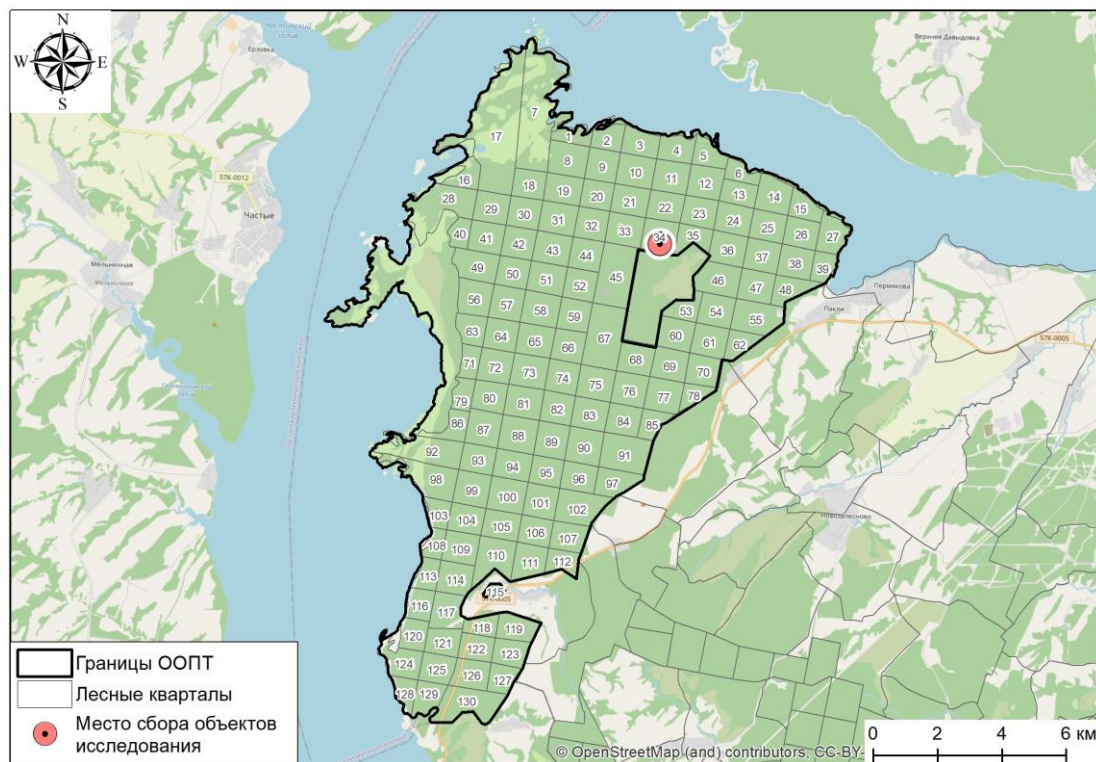


Рис. 2. Место сбора объектов исследования (квартал 34) на схеме охраняемого ландшафта [Особо охраняемые природные территории ..., 2017]

[Geographical location of plant selection areas [Buzmakov, 2017]]

На большей части территории «Осинской лесной дачи» расположены сосновые леса естественного и искусственного (культуры) происхождения. На юге территории фрагментарно развиты темнохвойные сообщества, прежде всего еловые. В западной части ООПТ, на низовых болотах произрастают березняки с примесью сосны. Выделены лесные генетические резерваты сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.).

Наиболее распространенными типами леса на охраняемой территории являются сосняки зеленомошные, сосняки брусничные, сосняки войничково-костяничные. Сосняки зеленомошные встречаются в центральной части ООПТ. Здесь древесный ярус редкий, сформирован в основном сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris*) с участием березы повислой (*Betula pendula* Roth) и лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) (формула древостоя 9С1Б+Л). Средняя высота древостоя 20–22 м, сомкнутость крон 0.3–0.4. В подросте преобладает лиственница сибирская. В подлеске представлена рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia* L.). Доминантом травяно-кустарничкового яруса является костяника обыкновенная (*Rubus saxatilis*). Проективное покрытие травянистых растений не превышает 30%, средняя высота растений 10–20 см. Среди мхов преобладают плевроциум Шребера (*Pleurozium schreberi* (Willd. ex Brid.) Mitt) и виды рода дикранум (*Dicranum polysetum* Sw.). Проективное покрытие мохового яруса достигает 50%.

В сосняке брусничном древесный ярус сформирован в основном сосной обыкновенной и единично березой повислой (формула древостоя 10С+Б). Проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса не превышает 40%, средняя высота растений 10–15 см. Доминантами яруса являются типичные представители светлых лесов: брусника (*Vaccinium vitis-idaea* L.) и костяника обыкновенная (*Rubus saxatilis*). Проективное покрытие мхов составляет 50% с преобладанием плевроциума Шребера.

Сосняк войничково-костяничный характеризуется разреженным древесным ярусом и сформирован в основном сосной обыкновенной, единично в нем встречается береза повислая. Состав древостоя 8С2Б,

высота древесного яруса 18–20 м, он редкий, с сомкнутостью крон 0.2. В подросте присутствует только подрост березы повислой. Кустарниковый ярус образован в основном ракитником русским (*Chamaecytisus ruthenicus* Klask.). Доминантами травяно-кустарничкового яруса являются вейник наземный (*Calamagrostis epigeios* (L.) Roth) и костяника обыкновенная (*Rubus saxatilis*). Средняя высота растений 10–15 см, проективное покрытие трав 40%. Моховой ярус представлен пятнами с общим проективным покрытием в 30% и преобладанием лесного плеуроциума Шребера.

Во второй декаде мая 2022 года были собраны кустарнички семейства Ericaceae: клюква обыкновенная (*Oxycoccus palustris* Pers.), черника (*Vaccinium myrtillus* L.), толокнянка обыкновенная (*Arctostaphylos uva-ursi* (L.) Spreng), багульник болотный (*Ledum palustre* L.); Pyrolaceae – зимостружка зонтичная (*Chimaphila umbellata* (L.) W. Barton); Rosaceae – костяника (*Rubus saxatilis* L.). Также представлены травянистые многолетние растения: копытень европейский (*Asarum europaeum* L.) семейства Aristolochiaceae, сныть обыкновенная (*Aegorodion podagraria* L.) семейства Apiaceae и один вид из семейства Lycopodiaceae – плаун уплощенный (*Lycopodium complanatum* L.). Для идентификации растений использован Иллюстрированный определитель растений Пермского края [2007].

Сбор типичных растений со средними показателями развития проводился в фенофазу начала цветения и один вид – *Lycopodium complanatum* L. – в фенофазу вегетации, в наиболее распространенных типах соснового леса – зеленомошном, вейниково-костяничном, брусничном и мертвопокровном. Общее руководство осуществлял А.А. Зайцев.

Растения выкапывали с корнями и после удаления остатков почвы помещали в открытые стеклянные емкости с раствором Кнопа [Прянишников, 1965]. Отобранные пробы использовали в течение суток для определения состава выделяемых ЛОС. Все пробы были собраны в один день и доставлены в лабораторию химического факультета ПГНИУ в г. Пермь

Методика эксперимента

Растения извлекали из раствора Кнопа, помещали в стеклянную емкость объемом 0.75–1 л, закрывали крышкой с отверстием для ввода сорбционного волокна через силиконовую мембрану и оставляли на 1 ч при комнатной температуре и полном дневном свете (рис. 3). Процедуру проводили параллельно 3 раза для каждого вида растения. Затем в емкость вводили подготовленное волокно с неподвижной фазой ДВБ/КАР/ПДМС и выдерживали в течение 1 ч, периодически встряхивая емкость. Десорбцию ЛОС с волокна проводили в течение 15 мин в нагретом до 260°C испарителе газowego хроматографа Agilent 7890В с трехосевым детектором 5977А MSD (Agilent Technologies, США) и капиллярной колонкой HP-5MS (30 м, внутренний диаметр 0.25 мм, толщина пленки стационарной фазы 0.25 мкм) с электронным контролем давления и инжектором в режиме без деления потока. Хроматографирование проводили в следующих условиях: скорость потока гелия – 1 мл/мин; начальная температура колонки – 40°C, конечная – 200°C, скорость нагрева – 3°C/мин.

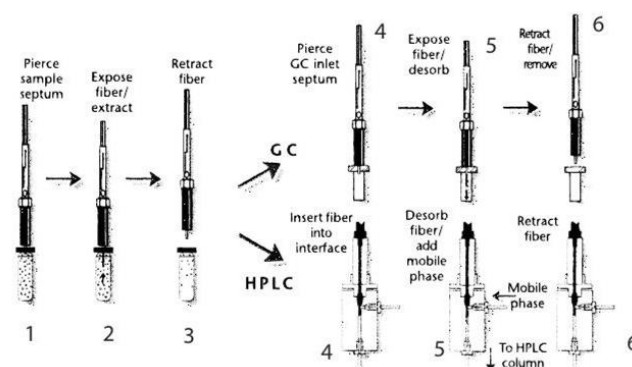


Рис. 3. Процедура твердофазной микроэкстракции [Другов, Родин, 2020]

- 1 – прокол мембраны пробы; 2 – погружение сорбционного стержня (сорбция) в пробу; 3 – извлечение сорбционного стержня из пробы; 4 – прокол иглы в испарителе газowego хроматографа (ГХ); 5 – погружение сорбционного стержня (десорбция) в испаритель ГХ; 6 – извлечение сорбционного стержня из ГХ

[Solid-phase technique [Drugov, Rodin, 2020]

- 1 – sample vial septum puncture; 2 – immersion of the sorption rod into the sample (sorption step); 3 – retraction of the sorption rod from the sample; 4 – puncture of the gas chromatograph (GC) inlet septum; 5 – immersion of the sorption rod into the GC inlet (desorption); 6 – retraction of the sorption rod from the GC]]

Для расчета линейных индексов удерживания (RI) анализировали в идентичных условиях смесь н-алканов C₆–C₁₈.

Обработку полученных хроматограмм выполняли с применением программного обеспечения Agilent ChemStation OpenLab. Идентификацию органических компонентов осуществляли с использованием двух независимых аналитических параметров: масс-спектров и значений экспериментально рассчитанных линейных индексов удерживания (RI) – с помощью автоматической системы, снабженной библиотекой масс-спектров NIST MS Search 2.4, а также онлайн базы данных The NIST Chemistry WebBook (<http://webbook.nist.gov/>). Идентификацию считали достоверной, если результаты поиска в библиотеке масс-спектров подтверждались экспериментальными значениями RI, т. е. их отклонение от значений, опубликованных в базе данных, не превышало ± 10 ед. Относительное содержание компонентов определяли после интегрирования пиков на кривой полного ионного тока (ПИТ) как отношение площади пика к суммарной площади всех пиков. Содержание компонентов, площадь пиков которых составляла менее 0.1%, считали следовым.

Результаты и обсуждение

Пример хроматограммы ЛОС, выделяемых живым растением черники *Vaccinium myrtillus* представлен на рис. 4. Суммарно на хроматограммах девяти видов растений зарегистрировано 301 соединение. Максимальное число соединений зафиксировано в ЛОС *Rubus saxatilis* и *Aegorodium podagraria* (63 и 60 пиков соответственно), а минимальное – *Arctostaphylos uva-ursi* и *Oxycoccus palustris* (11 и 10 пиков соответственно). Анализ хроматограмм, полученных для отдельных экземпляров одного вида, показал, что выделения растений имеют идентичный качественный состав (количество и расположение пиков воспроизводится).

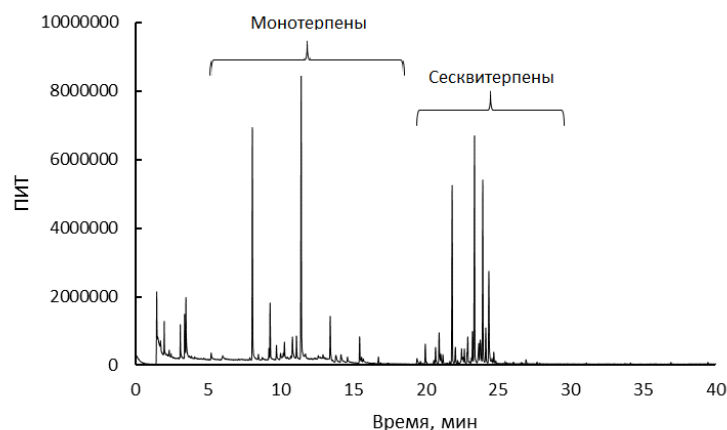


Рис. 4. Хроматограмма летучих выделений *Vaccinium myrtillus*

[Chromatogram of volatile emissions of *Vaccinium myrtillus*]

Наибольшее количество идентифицированных соединений относится к группе терпенов, включающей 37 монотерпенов C_{10} , 107 сесквитерпенов C_{15} и 3 дитерпена C_{20} (последние соединения обнаружены только в летучих выделениях кустарничка *Chimaphila umbellata*). Вторая по численности группа из 33 соединений была образована ароматическими углеводородами.

Соединения, зарегистрированные в летучих выделениях всех девяти растений живого напочвенного покрова, были объединены по их химической природе в 11 групп, относительное содержание которых, а также главных представителей каждой из них приведено в табл. 1. и 2.

Таблица 1

Относительный групповой состав (% ПИТ*) ЛОС, выделяемых кустарничками
[Relative group composition of VOCs emitted by low shrubs]

Группы соединений	Относительное содержание ЛОС в выделениях кустарничков					
	1	2	3	4	5	6
Монотерпены и их производные, в том числе:	2.59	57.55	1.24	6.91	-^{3*} (3)	49.99
- β-мирцен	(2) ^{2*}	(2)	(2)	(24)	-	(10)
- лимонен	2.12	55.56	следы ^{4*}	3.65	-	46.54
- α-фелландрен	0.47	1.98	-	3.26	-	-
- β-фелландрен	-	-	-	-	-	-
	-	-	0.84	-	-	0.19

Группы соединений	Относительное содержание ЛОС в выделениях кустарничков					
	1	2	3	4	5	6
Сесквитерпены и их производные, в том числе:	84.84 (16)	30.63 (5)	10.46 (11)	73.29 (24)	31.42 (3)	47.36 (20)
- α-фунебрен	57.76	-	-	-	13.19	-
- палюстрол	13.20	18.39	-	7.87	-	22.35
- виридофлорен	3.53	1.78	-	-	9.72	9.05
- аллоаромадендрен	0.54	4.83	-	-	-	5.89
- α-гуржунен	-	3.22	-	-	-	3.95
- транс-каламенен	-	-	2.66	13.95	8.51	0.18
- кариофиллен	-	-	1.14	9.64	-	-
- глобулол	2.47	2.41	-	-	-	3.88
Дитерпены, в том числе:	6.59 (3)	-	-	-	-	-
- цис-цеибрен А	0.50					
- неоцеибрен А	1.83					
Алифатические спирты, в том числе:	-	-	0.99 (1)	-	-	-
- 2-гептанол	-	-	0.99	-	-	-
Алифатические карбонильные соединения, в том числе:	-	2.04 (1)	0.49 (1)	-	-	-
- 3-октанон	-	2.04	-	-	-	-
- 2-гептанон	-	-	0.49	-	-	-
Алифатические кислоты, в том числе:	-	-	12.72 (3)	-	-	-
- гексановая кислота	-	-	3.75	-	-	-
- октановая кислота	-	-	7.35	-	-	-
Ароматические соединения, в том числе:	2.42 (3)	-	29.06 (7)	0.88 (1)	38.07 (4)	0.48 (4)
- бензойная кислота	-	-	16.28	-	-	-
- бензамид	-	-	6.60	-	-	-
- толуол	-	-	-	-	23.44	-
- о-ксилол	-	-	-	0.88	4.14	-
- п-ксилол	-	-	-	trace	4.22	-
- м-цимол	-	-	-	trace	-	0.23
Алканы и алкены, в том числе:	1.43 (3)	1.98 (1)	-	17.59 (3)	-	0.11 (1)
- 1,3-октадиен	-	-	-	9.43	-	-
- додекан	0.71	1.98	-	7.01	-	0.11
- тетрадекан	0.72	-	-	1.15	-	-
Другие соединения	-	-	15.27 (4)	-	3.82 (1)	0.74 (1)
Не идентифицированные соединения	2.12 (2)	7.80 (1)	49.51 (10)	1.32 (1)	26.70 (3)	1.32 (5)
Общее число соединений	30	10	63	35	11	41

Примечания: *ПИТ – полный ионный ток, ^{2*} – число соединений в группе приведено в скобках; ^{3*} – не обнаружено; ^{4*} следы – ниже 0.1% ПИТ. Цифрами обозначены кустарнички: 1 – *Chimaphila umbellata*; 2 – *Oxycoccus palustris*; 3 – *Rubus saxatilis*; 4 – *Vaccinium myrtillus*; 5 – *Arctostaphylos uva-ursi*; 6 – *Ledum palustre*.

Таблица 2

Относительный групповой состав (% ПИТ*) ЛОС, выделяемых растениями
[Relative group composition of VOCs emitted by plants]

Группа соединений	Травянистые растения и плаун		
	1	2	3
Монотерпены и их производные, в том числе	20.11 (6) ^{2*}	40.47 (9)	38.98 (13)
- β-мирцен	- ^{3*}	12.15	11.29
- лимонен	-	-	11.25
- α-фелландрен	-	12.66	-

Группа соединений	Травянистые растения и плаун		
	1	2	3
- β-фелландрен	4.23	13.43	-
- 3,7,7-триметил-1,3,5-циклогептатриен	7.06	-	-
- 3-карен	5.76	-	-
- α-пинен	3.08	следы ^{4*}	1.48
Сесквитерпены и их производные, в том числе	57.45 (5)	18.44 (16)	51.97 (37)
- α-фунебрен	51.54	-	-
- палюстрол	2.85	-	1.43
- виридофлорен	1.08	-	5.21
- купарен	0.98	-	0.59
- аллоаромадендрен	-	-	2.28
- транс-каламенен	-	5.30	7.86
- цис-муrola-4(14),5-диен	-	1.92	1.10
- γ-муrolен	-	2.43	2.08
Алифатические карбонильные соединения, в том числе	-	-	следы (1)
- 3-октанон	-	-	следы
Алифатические кислоты, в том числе	-	4.43 (3)	-
- этановая кислота	-	2.87	-
- пентановая кислота	-	1.56	-
Алифатические эфиры, в том числе	следы	23.04 (2)	-
- 3-гидрокси-2,2,4-триметилпентилизобутаноат	следы	12.19	-
2,2-диметил-1-(2-гидрокси-1-метилэтил)пропил-2-метилпропаноат	-	8.84	-
Ароматические соединения, в том числе	19.29 (5)	12.77 (2)	3.61 (4)
- бензойная кислота	следы	-	-
- толуол	13.85	-	-
- о-цимол	-	11.02	-
- м-цимол	0.95	-	1.59
- п-цимол	4.49	-	-
- м-цименен	следы	-	1.05
- п-цименен	-	-	0.97
Алканы & алкены	3.15 (1)	-	2.68 (3)
- додекан	-	-	0.34
- тридекан	-	-	1.98
- тетрадекан	-	-	0.36
Другие соединения	-	0.86 (1)	1.38 (1)
Не идентифицированные соединения	-	-	1.38 (1)
Число соединений	18	34	60

Примечания: *ПИТ – полный ионный ток, ^{2*} – число соединений в группе приведено в скобках; ^{3*} – не обнаружено; ^{4*} следы – ниже 0.1% ПИТ. Цифрами обозначены растения: 1 – *Lycopodium complanatum*; 2 – *Asarum europaeum*; 3 – *Aegorodium podagraria*.

На рис. 5 представлено относительное содержание (в % от ПИТ) монотерпенов, сесквитерпенов и ароматических соединений.

Как видно из данных табл. 1 и 2 и рис. 5, выход монотерпенов в газовую фазу отмечен у 8 из 9 исследованных растений. В составе ЛОС толокнянки *Arctostaphylos uva-ursi* монотерпены не были обнаружены. Наибольшее относительное содержание этих веществ установлено в выделениях *Oxycoccus palustris*

и *Ledum palustre*. Основными представителями монотерпенов являются β -мирцен, лимонен, α -фелландрен и β -фелландрен.

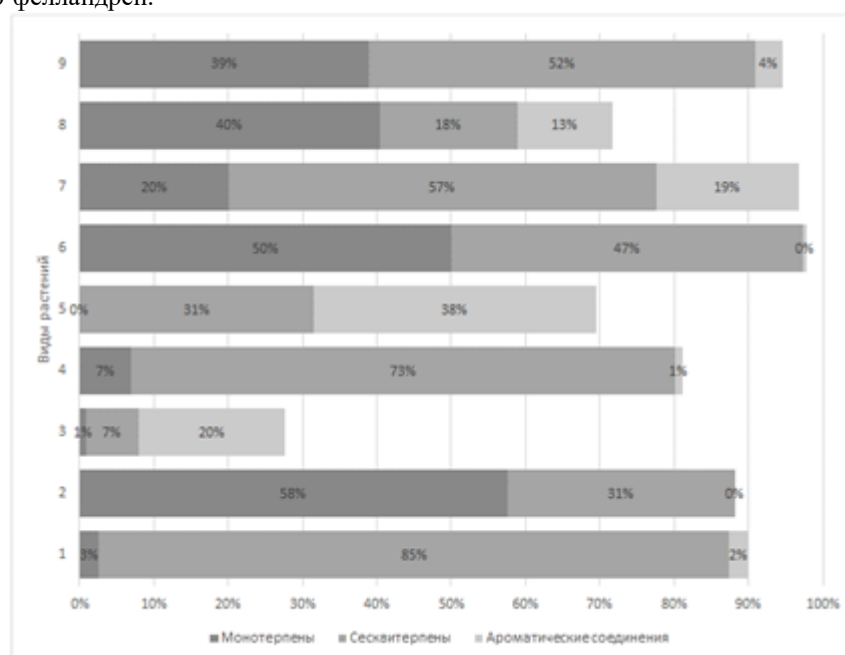


Рис. 5. Соотношение монотерпенов, сесквитерпенов и ароматических соединений в ЛОС исследуемых растений.

Цифрами обозначены: 1 – *Chimaphila umbellata*; 2 – *Oxycoccus palustris*; 3 – *Rubus saxatilis*; 4 – *Vaccinium myrtillus*; 5 – *Arctostaphylos uva-ursi*; 6 – *Ledum palustre*; 7 – *Lycopodium complanatum*; 8 – *Asarum europaeum*; 9 – *Aegorodium podagraria*

[The ratio of monoterpenes, sesquiterpenes and aromatic compounds of VOCs of the studied plants]]

В летучих выделениях всех исследованных видов растений присутствовали сесквитерпены и их кислородсодержащие производные. В ЛОС *Chimaphila umbellata* и *Vaccinium myrtillus* отмечено наибольшее относительное содержание соединений данной группы. Соединения α -фунебрен и палюстрол преобладают в эмиссии *Chimaphila umbellata*, а транс-каламенен и кариофиллен – в *Vaccinium myrtillus*. Другие представители этого класса – это виридофлорен, аллоаромадендрен и глобулол.

Наиболее богатым источником ароматических соединений, важных с точки зрения участия в атмосферных химических процессах, в том числе в образовании вторичных аэрозолей, оказались кустарнички семейства *Ericaceae* и травянистые растения. Арены обнаружены в ЛОС восьми из девяти исследованных растений. На хромато-масс-спектрограмме *Oxycoccus palustris* они отсутствовали. Напротив, в выделениях *Arctostaphylos uva-ursi* и *Rubus saxatilis* преобладают толуол и бензойная кислота соответственно. Другие ароматические соединения, отмеченные на хромато-масс-спектрограммах, это бензамид, *o*- и *n*-ксилолы.

Стоит отметить высокую долю неидентифицированных соединений в ЛОС *Rubus saxatilis* и *Arctostaphylos uva-ursi*, что объясняется отсутствием необходимых аналитических параметров (масс-спектров и/или значений RI) в доступных базах данных.

В исследованиях 2020 г. был изучен состав ЛОС *Vaccinium myrtillus*, *Chimaphila umbellata* и *Asarum europaeum*, отобранных на той же территории ООПТ «Осинская лесная дача» во второй декаде мая 2020 года [Isidorov et al, 2022]. Методики отбора и анализа не отличались. Сравнительный анализ результатов, полученных в 2020 и 2022 гг. показал, что состав основных представителей ЛОС (моно- и сесквитерпенов и аренов) не одинаков. В составе ЛОС *Vaccinium myrtillus* в 2022 г. не обнаружен α -пинен, а среди сесквитерпенов преобладают палюстрол, транс-каламенен и γ -муурола-4(14),5-диен, в то время как в 2020 г. эти соединения не были зафиксированы. В ЛОС *Chimaphila umbellata*, отобранной в 2022 г., также обнаруживаются новые сесквитерпены: α -фунебрен, палюстрол и виридофлорен. По сравнению с 2020 г. в составе монотерпенов отсутствуют линалоол и 3-карен, но содержится мирцен.

Похожая картина наблюдается и в случае *Asarum europaeum* – в летучих выделениях 2022 г. в составе монотерпенов отсутствует мирцен и 3-карен, однако впервые обнаружены α - и β -фелландрен. Среди сесквитерпенов, выделяемых растением в 2020 г., преобладают α -гумулен, δ -кадинен и гермакрен D, которые в 2022 г. сменяются транс-каламененом и γ -мууроленом.

Заключение

Анализ ЛОС, выделяемых растениями травяно-кустарничкового яруса лесных насаждений – сосняков зеленомошной и травяной групп типов леса, произрастающих на ООПТ «Осинская лесная дача», показал, что основными представителями являются моно-, сесквитерпены и их кислородсодержащие производные. Наибольшее число монотерпенов (13) идентифицировано в выделениях *Aegorodium podagraria*, а их максимальное содержание (49,99 %) отмечено в ЛОС *Ledum palustre*. Больше число сесквитерпенов (24) присутствует в ЛОС *Vaccinium myrtillus*, а в ЛОС *Chimaphila umbellata* наблюдается самая высокая доля сесквитерпенов (84,84%).

Сравнение данных газохроматографического анализа *Vaccinium myrtillus*, *Chimaphila umbellata* и *Asarum europaeum*, отобранных в 2020 и 2022 г., показывает, что состав соединений, выделяемых растениями в газовую фазу, отличается, что может быть связано с влиянием различных абиотических и биотических факторов на состав ЛОС. Одним из возможных направлений дальнейших исследований является определение качественного и количественного состава летучих соединений, выделяемых растениями травяно-кустарничкового яруса в различные фенологические фазы.

В источниках литературы недостаточно данных о составе ЛОС растений, произрастающих в различных географических зонах. В связи с этим необходимо расширение географии проводимых исследований, в том числе установление состава ЛОС растений из различных ботанико-географических районов.

По данным литературы, для терпеновых соединений характерна высокая вероятность образования различных атмосферных фотоокислителей и вторичных аэрозолей. Следовательно, растения живого напочвенного покрова служат источником высокореакционных ЛОС, которые, попадая в атмосферу, увеличивают их общее содержание и тем самым влияют на химические процессы в атмосфере. Для установления влияния абиотических факторов на качественный состав ЛОС растений травяно-кустарничкового яруса и оценки их вклада в общее количество пограничного слоя атмосферы требуется продолжение исследований.

Список источников

1. Андреев Д.Н. Экогеохимическая диагностика антропогенной трансформации особо охраняемых природных территорий: дис. ... канд. геогр. наук. Пермь, 2012. 164 с.
2. Белан Б.Д. Проблема тропосферного озона и некоторые результаты его измерений // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9, № 9. С. 1184–1213.
3. Бузмаков С.А., Гатина Е.Л. Зонирование особо охраняемой природной территории «Осинская лесная дача» // Географический вестник. 2009. № 1. С. 51–55.
4. Другов Ю.С., Родин А.А. Газохроматографический анализ загрязненного воздуха: практическое руководство. М.: Лаборатория знаний, 2020. 530 с.
5. Зябченко С.С. Сосновые леса европейского Севера. Л.: Наука, 1984. 248 с. EDN: TMRNBX.
6. Иллюстрированный определитель растений Пермского края / С.А., Овеснов, Е.Г. Ефимик, Т.В. Козьминых и др.; под ред. С.А. Овеснова. Пермь: Кн. мир, 2007. 743 с.
7. Исидоров В.А. Летучие выделения растений: состав, скорость эмиссии и экологическая роль // СПб.: Алга, 1994. 188 с.
8. Особо охраняемые природные территории Пермского края / под ред. С.А. Бузмакова. Пермь: Астер, 2017. 516 с. EDN: UUQCCO.
9. Прянишников Д.Н. Популярная агрохимия. М.: Наука, 1965. 398 с.
10. Рысин Л.П. Сосновые леса Европейской части СССР. М.: Наука, 1975. 213 с. EDN: VZHYPN.
11. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесобразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы). Изд. второе, доп. М., 2008. 887 с.
12. Aaltonen H. et al. Boreal pine forest floor biogenic volatile organic compound emissions peak in early summer and autumn // Agric. Forest Meteorol. 2011. Vol. 151. P. 682–691. DOI: 10.1016/j.agrformet.2010.12.010. EDN: YHHIHW.
13. Aaltonen H. et al. Continuous VOC flux measurements on boreal forest floor // Plant Soil. 2013. Vol. 369. P. 241–256. DOI: 10.1007/s11104-012-1553-4. EDN: LOHIAO.
14. Atkinson R. Atmospheric chemistry of VOCs and NOx // Atmospheric environment. 2000. Vol. 34, № 12–14. P. 2063–2101. EDN: AETVOV.
15. Atkinson R., Arey J. Gas-phase tropospheric chemistry of biogenic volatile organic compounds: a review // Atmospheric Environment. 2003. Vol. 37. P. 197–219. DOI: 10.1016/S1352-2310(03)00391-1. EDN: ERSYLN.
16. Di Carlo P. et al. Missing OH reactivity in a forest: Evidence for unknown reactive biogenic VOCs // Science. 2004. Vol. 304, № 5671. P. 722–725.
17. Filella I. et al. Volatile organic compounds emissions in Norway spruce (*Picea abies*) in response to temperature changes // Physiologia Plantarum. 2007. Vol. 130, № 1. P. 58–66.

18. Glasius M., Goldstein A.H. Recent discoveries and future challenges in atmospheric organic chemistry // *Environ. Sci. Technol.*, 2016. Vol. 50, № 6. P. 2754–2764. DOI: 10.1021/acs.est.5b05105. EDN: WVGQZT.
19. Grabmer W. et al. VOC emissions from Norway spruce (*Picea abies* L.[Karst]) twigs in the field—results of a dynamic enclosure study // *Atmospheric Environment*. 2006. Vol. 40. P. 128–137.
20. Gray C.M., Monson R.K., Fierer N. Emission of volatile organic compounds during the decomposition of plant litter // *J. Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. Art. G03015. DOI: 10.1029/2010JG001291. EDN: NBOAMR.
21. Guenther A. et al. A global model of natural volatile organic compounds emission // *J. Geophys. Res.* 1995. Vol. 100. P. 8873–8892.
22. Hakola H. et al. Emissions of volatile organic compounds from Norway spruce and potential atmospheric impacts // *Frontiers in Forests and Global Change*. 2023. Vol. 6. Art. 1116414. DOI: 10.3389/ffgc.2023.1116414. EDN: CBJRYL.
23. Heald C.L. et al. A simplified description of the evolution of organic aerosol composition in the atmosphere // *Geophysical Research Letters*, 2010. Vol. 37, № 8. Art. L08803.
24. Hester R.E., Harrison R.M. (eds.). Volatile organic compounds in the atmosphere // *Royal Society of Chemistry*. 1995. Vol. 4. Art. 140.
25. Isebrands J.D. et al. Volatile organic compound emission rates from mixed deciduous and coniferous forests in Northern Wisconsin, USA // *Atmos. Environ.* 1999. Vol. 33. P. 2527–2536. DOI: 10.1016/S1352-2310(98)00250-7. EDN: ACTBVL.
26. Isidorov V.A. Non-methane hydrocarbons in the atmosphere of boreal forests: composition, emission rates, estimation of regional emission and photocatalytic transformation // *Ecol. Bull.* 1992. Vol. 42. P. 71–76.
27. Isidorov V., Jdanova M. Volatile organic compounds from leaves litter // *Chemosphere*, 2002. Vol. 48. P. 975–979. DOI: 10.1016/S0045-6535(02)00074-7. EDN: YKIWED.
28. Isidorov V.A. et al. Emission of volatile organic compounds by plants on the floor of boreal and mid-latitude forests // *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2022. Vol. 79. P. 153–166. DOI: 10.1007/s10874-022-09434-3. EDN: CJOSZN.
29. Isidorov V.A. et al. Chemical composition of volatile and extractive compounds of pine and spruce leaf litter in the initial stages of decomposition // *Biogeosciences*. 2010. Vol. 7. P. 2785–2794. DOI: 10.5194/bg-7-2785-2010. EDN: MURVGM.
30. Isidorov V.A., Vinogorova V.T., Rafałowski K. HS–SPME analysis of volatile organic compounds of coniferous needle litter // *Atmos. Environ.* 2003. Vol. 37. P. 4645–4650. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2003.07.005. EDN: XRWEZM.
31. Isidorov V., Vinogorova V., Rafałowski K. Gas chromatographic determination of extractable compounds composition and emission rate of volatile terpenes from larch needle litter // *J. Atmos. Chem.* 2003. Vol. 50. P. 263–278.
32. Isidorov V.A., Zaitsev A.A. Reviews and syntheses: VOC emissions from soil cover in boreal and temperate natural ecosystems of the Northern Hemisphere // *Biogeosciences Discussions*, 2022. Vol. 19. P. 4715–4746. DOI: 10.5194/bg-19-4715-2022. EDN: ORZJNM.
33. Isidorov V.A., Zenkevich I.G., Ioffe B.V. Volatile organic compounds in the atmosphere of forest // *Atmos. Environ.* 1985. Vol. 19. P. 1–8. DOI: 10.1016/0004-6981(85)90131-3. EDN: XLOFMF.
34. Komenda M. et al. Comparability of biogenic VOC emission rate measurements under laboratory and ambient conditions at the example of monoterpene emissions from Scots pine (*Pinus sylvestris*) // *Journal of atmospheric chemistry*. 2003. Vol. 45. № 1. P. 1–23. EDN: EQPBFL.
35. Komenda M., Koppmann R. Monoterpene emissions from Scots pine (*Pinus sylvestris*): field studies of emission rate variabilities // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2002. Vol. 107. № D13. Art. ACH 1-1-ACH 1-13.
36. Kourtchev I. et al. Enhanced volatile organic compounds emissions and organic aerosol mass increase the oligomer content of atmospheric aerosols // *Sci. Rep.* 2016. Vol. 6. Art. 35038.
37. Makkonen R. et al. BVOC-aerosol climate interactions in the global aerosol-climate model ECHAM5.5-HAM2 // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. Vol. 12. P. 10077–10096. DOI: 10.5194/acp-12-10077-2012.
38. Mogensen D. et al. Simulations of atmospheric OH, O₃ and NO₃ reactivities within and above the boreal forest // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2015. Vol. 15, № 7. P. 3909–3932. DOI: 10.5194/acp-15-3909-2015. EDN: VGPYAD.
39. Shao M. et al. Volatile organic compound emissions from Scots pine: mechanisms and description by algorithms // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2001. Vol. 106. № D17. P. 20483–20491.
40. Stocker T.F. et al. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change // *Climate change*. 2013. Vol. 5. P. 1–1552.
41. Tarvainen V. et al. Temperature and light dependence of the VOC emissions of Scots pine // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2005. Vol. 5, № 4. P. 989–998.
42. van Meeningen Y. et al. Isoprenoid emission variation of Norway spruce across a European latitudinal transect // *Atmos. Environ.* 2017. Vol. 170. P. 45–57.

43. Yang Y. et al. Towards a quantitative understanding of total OH reactivity: A review // *Atmospheric Environment*. 2016. Vol. 134. P. 147–161.
44. Zhou P. et al. Simulating ozone dry deposition at a boreal forest with a multi-layer canopy deposition model // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2017. Vol. 17, № 2. P. 1361–1379. DOI: 10.5194/acp-17-1361-2017. EDN: YXJQBB.

References

1. Andreev D.N. *Èkogeochimičeskaja diagnostika antropogennoj transformacii osobo ochranjaemych prirodnykh territorij. Diss. kand. nauk* [Ecogeochemical diagnostics of anthropogenic transformation of specially protected natural areas. Cand. Diss.]. Perm, 2005. 164 p. (In Russ.).
2. Belan B.D. [The problem of tropospheric ozone and some results of its measurements]. *Optika atmosfery i okeana*. V. 9, No. 9 (1996): pp. 1184–1213. (In Russ.).
3. Buzmakov S.A., Gatina E.L. [Zoning of the specially protected natural area "Osinskaya forest dacha"]. *Geografičeskij vestnik*. No. 1 (2009): pp. 51–55. (In Russ.).
4. Drugov Yu.S., Rodin A.A. *Gazochromatografičeskij analiz zagriznennogo vozducha* [Gas Chromatographic Analysis of Air Pollution: A Practical Guide]. Moscow, Laboratoria znaniy Publ., 2020. 530 p. (In Russ.).
5. Zyabchenko S.S. *Sosnovye lesa evropejskogo severa* [Pine forests of the European North]. Leningrad, Nauka Publ. 1984. 248 p. (In Russ.).
6. Ovesnov S.A., ed. *Illjustrirovannyj opredelitel' rastenij Permskogo kraja* [Illustrated guide to plants of the Perm region]. Perm, Knizhny Mir Publ., 2007. 743 p. (In Russ.).
7. Isidorov V.A. *Letučie vydelenija rastenij* [Volatile emissions from plants: composition, emission rate and ecological role]. St-Peterburg, Alga Publ., 1994. 188 p. (In Russ.).
8. Buzmakov S.A., ed. *Osobo ochranjaemye prirodnye territorii Permskogo kraja* [Specially protected natural areas of Perm Krai]. Perm, Aster Publ., 2017. 516 p. (In Russ.).
9. Pryanishnikov D.N. *Populjarnaja agrochimija* [Popular agrochemicals]. Moscow, Nauka Publ, 1965. 398 p. (In Russ.). (In Russ.).
10. Rysin L.P. *Sosnovye lesa Evropejskoj časti SSSR* [Pine forests of the European part of the USSR]. Moscow, Nauka Publ.. 1975. 213 p. (In Russ.).
11. *Tablicy i modeli choda rosta i productivnosti nasaždenij osnovnykh lesoobrazujuščich porod Severnoj Evrazii* [Tables and models of growth and productivity of stands of the main forest-forming species of Northern Eurasia (normative and reference materials)]. Moscow, 2008. 887 p. (In Russ.).
12. Aaltonen H., Pumpanen J., Pihlatie M., Hakola H., Hellén H., Kulmala, L. et al. Boreal pine forest floor biogenic volatile organic compound emissions peak in early summer and autumn. *Agricul. Forest Meteorol*, V. 151 (2011): pp. 682–691.
13. Aaltonen H., Aalto J., Kolari P., Pihlatie M., Pumpanen J., Kulmala M. et al. Continuous VOC flux measurements on boreal forest floor. *Plant Soil*. V. 369 (2013): pp. 241–256.
14. Atkinson R. Atmospheric chemistry of VOCs and NOx. *Atmospheric environment*. V. 34, No. 12–14 (2000): pp. 2063–2101.
15. Atkinson R., Arey J. Gas-phase tropospheric chemistry of biogenic volatile organic compounds: a review. *Atmospheric Environment*. V. 37 (2003): pp. 197–219.
16. Di Carlo P., Brune W.H., Martinez M., Harder H., Leshe R., Ren X. et al. Missing OH reactivity in a forest: Evidence for unknown reactive biogenic VOCs. *Science*. V. 304, No. 5671 (2004): pp. 722–725.
17. Filella I., Wilkinson M.J., Llusia J., Hewitt C.N., Peñuelas J. Volatile organic compounds emissions in Norway spruce (*Picea abies*) in response to temperature changes. *Physiologia Plantarum*. V. 130, No. 1 (2007): pp. 58–66.
18. Glasius M., Goldstein A.H. Recent discoveries and future challenges in atmospheric organic chemistry. *Environ. Sci. Technol*. V. 50, No. 6 (2016): pp. 2754–2764.
19. Grabmer W., Kreuzwieser J., Wisthaler A., Cojocariu C., Graus M., Rennenberg H. et al. VOC emissions from Norway spruce (*Picea abies* L.[Karst]) twigs in the field—results of a dynamic enclosure study. *Atmospheric Environment*. V. 40 (2006): pp. 128–137.
20. Gray C.M., Monson R.K., Fierer N. Emission of volatile organic compounds during the decomposition of plant litter. *J. Geophys. Res*. V. 115 (2010). Art. G03015. DOI: 10.1029/2010JG001291.
21. Guenther A., Hewitt C.N., Erickson D., Fall R., Geron C., Graedel T. et al. A global model of natural volatile organic compounds emission. *J. Geophys. Res*. V. 100 (1995): pp. 8873–8892.
22. Hakola H., Taipale D., Praplan A., Schallhart S., Thomas S., Tykkä T. et al. Emissions of volatile organic compounds from Norway spruce and potential atmospheric impacts. *Frontiers in Forests and Global Change*. V. 6 (2023). Art. 1116414. DOI: 10.3389/ffgc.2023.1116414.

23. Heald C.L., Kroll J.H., Jimenez J.L., Docherty K.S., DeCarlo P.F., Aiken A.C. et al. A simplified description of the evolution of organic aerosol composition in the atmosphere. *Geophysical Research Letters*. V. 37, No. 8 (2010). Art. L08803.
24. Hester R.E., Harrison R.M., eds. Volatile organic compounds in the atmosphere. *Royal Society of Chemistry*. V. 4 (1995). Art. 140.
25. Isebrands J.D., Guenther A.B., Harley P., Helmig D., Klinger L., Vierling L., Zimmerman P., Geron C. Volatile organic compound emission rates from mixed deciduous and coniferous forests in Northern Wisconsin, USA. *Atmos. Environ.* V. 33 (1999): pp. 2527-2536. DOI: 10.1016/S1352-2310(98)00250-7.
26. Isidorov V.A. Non-methane hydrocarbons in the atmosphere of boreal forests: composition, emission rates, estimation of regional emission and photocatalytic transformation. *Ecol. Bull.* V. 42 (1992): pp. 71-76.
27. Isidorov V., Jdanova M. Volatile organic compounds from leaves litter. *Chemosphere*. V. 48 (2002): pp. 975-979.
28. Isidorov V.A., Pirožnikov E., Spirina V.L., Vasyanin A.N., Kulakova S.A. Emission of volatile organic compounds by plants on the floor of boreal and mid-latitude forests. *Journal of Atmospheric Chemistry*. V. 79 (2022): pp. 153-166.
29. Isidorov V.A., Smolewska M., Purzyska-Pugacewicz A., Tyszkiewicz Z. Chemical composition of volatile and extractive compounds of pine and spruce leaf litter in the initial stages of decomposition. *Biogeosciences*. V. 7 (2010): pp. 2785-2794. DOI: 10.5194/bg-7-2785-2010.
30. Isidorov V.A., Vinogorova V.T., Rafałowski K. HS-SPME analysis of volatile organic compounds of coniferous needle litter. *Atmos. Environ.* V. 37 (2003): pp. 4645-4650.
31. Isidorov V., Vinogorova V., Rafałowski K. Gas chromatographic determination of extractable compounds composition and emission rate of volatile terpenes from larch needle litter. *J. Atmos. Chem.* V. 50 (2003): pp. 263-278.
32. Isidorov V.A., Zaitsev A.A. Reviews and syntheses: VOC emissions from soil cover in boreal and temperate natural ecosystems of the Northern Hemisphere. *Biogeosciences Discussions*. V. 19 (2022): pp. 4715-4746. DOI: 10.5194/bg-19-4715-2022.
33. Isidorov V.A., Zenkevich I.G., Ioffe B.V. Volatile organic compounds in the atmosphere of forest. *Atmos. Environ.* V. 19 (1985): pp. 1-8. DOI: 10.1016/0004-6981(85)90131-3.
34. Komenda M., Kobel K., Koppmann R., Wildt J. Comparability of biogenic VOC emission rate measurements under laboratory and ambient conditions at the example of monoterpene emissions from Scots pine (*Pinus sylvestris*). *Journal of atmospheric chemistry*. V. 45, No. 1 (2003): pp. 1-23.
35. Komenda M., Koppmann R. Monoterpene emissions from Scots pine (*Pinus sylvestris*): field studies of emission rate variabilities. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. V. 107, No. D13 (2002). Art. ACH 1-1-ACH 1-13.
36. Kourtchev I., Giorio C., Manninen A., Wilson E., Mahon B., Aalto J. et al. Enhanced volatile organic compounds emissions and organic aerosol mass increase the oligomer content of atmospheric aerosols. *Sci. Rep.* V. 6 (2016). Art. 35038.
37. Makkonen R., Asmi A., Kerminen V.M., Boy M., Arneth A., Guenther A., Kulmala M. BVOC-aerosol climate interactions in the global aerosol-climate model ECHAM5.5-HAM2. *Atmos. Chem. Phys.* V. 12 (2012): pp. 10077-10096. DOI: 10.5194/acp-12-10077-2012.
38. Mogensen D., Gierens R., Crowley J.N., Keronen P., Smolander S., Sogachev A. et al. Simulations of atmospheric OH, O₃ and NO₃ reactivities within and above the boreal forest. *Atmospheric Chemistry and Physics*. V. 15, No. 7 (2015): pp. 3909-3932. DOI: 10.5194/acp-15-3909-2015.
39. Shao M., Czapiewski K.V., Heiden A.C., Kobel K., Komenda M., Koppmann R., Wildt J. Volatile organic compound emissions from Scots pine: mechanisms and description by algorithms. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. V. 106, №. D17 (2001): pp. 20483-20491.
40. Stocker T.F., Qin D., Plattner G.K., Tignor M.M.M.B., Allen S.K., Boschung J. et al. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. *Climate change*. V. 5 (2013): pp. 1-1552.
41. Tarvainen V., Hakola H., Hellén H., Bäck J., Hari P., Kulmala M. Temperature and light dependence of the VOC emissions of Scots pine. *Atmospheric Chemistry and Physics*. V. 5, №. 4 (2005): pp. 989-998.
42. van Meeningen Y., Wang M., Karlsson T., Seifert A., Schurgers G., Rinnan R., Holst T. Isoprenoid emission variation of Norway spruce across a European latitudinal transect. *Atmos. Environ.* V. 170 (2017): pp. 45-57.
43. Yang Y., Shao M., Wang X., Nölscher A.C., Kessel S., Guenther A., Williams J. Towards a quantitative understanding of total OH reactivity: A review. *Atmospheric Environment*. V. 134 (2016): pp. 147-161.
44. Zhou P., Ganzeveld L., Rannik Ü., Zhou L., Gierens R., Taipale D. et al. Simulating ozone dry deposition at a boreal forest with a multi-layer canopy deposition model. *Atmospheric Chemistry and Physics*. V. 17, No. 2 (2017): pp. 1361-1379. DOI: 10.5194/acp-17-1361-2017.

Статья поступила в редакцию 14.10.2025; одобрена после рецензирования 19.11.2025; принята к публикации 02.12.2025.

The article was submitted 14.10.2025; approved after reviewing 19.11.2025; accepted for publication 02.12.2025.

Информация об авторах

Виктория Леонидовна Спирина – victoria45winter@mail.ru, аспирант кафедры ботаники и генетики растений, ассистент кафедры аналитической химии и экспертизы;

Полина Юрьевна Сарапульцева – polyustrik@mail.ru, аспирант, ассистент кафедры аналитической химии и экспертизы;

Андрей Аркадьевич Зайцев – rabbitzay@yandex.ru, канд. геогр. наук, декан географического факультета, доцент кафедры биогеоценологии и охраны природы;

Лариса Викторовна Новоселова – larisa.novoselova2010@yandex.ru, д-р биол. наук, профессор кафедры ботаники и генетики растений;

Валерий Алексеевич Исидоров – isidorov@uwb.edu.pl, д-р хим. наук, профессор.

Information about the authors

Victoria L. Spirina – victoria45winter@mail.ru, PhD student of Botany and Plant Genetics Department, assistant of the Department of Analytical Chemistry and Expertise;

Polina Yu. Sarapultseva – polyustrik@mail.ru, PhD student, assistant of the Department of Analytical Chemistry and Expertise;

Andrei A. Zaitsev – rabbitzay@yandex.ru, candidate of geographical sciences, Dean of the Faculty of Geography, Associate Professor of the Department of Biogeocenology and Nature Conservation;

Larisa V. Novoselova – larisa.novoselova2010@yandex.ru, doctor of biological sciences, professor of Botany and Plant Genetics Department;

Valery A. Isidorov – isidorov@uwb.edu.pl, doctor of chemical sciences, professor.

Вклад авторов:

Спирина В. Л. – выполнение исследования; написание исходного текста; обработка и анализ полученных результатов.

Сарапульцева П. Ю. – выполнение исследования; доработка текста.

Зайцев А. А. – участие в полевых работах; доработка текста.

Новоселова Л. В. – редактирование; утверждение окончательного варианта.

Исидоров В. А. – научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; доработка текста; итоговые выводы.

Contribution of the authors:

Spirina V. L. – research execution; writing the draft; processing of results.

Sarapultseva P. Yu. – research execution; text revision.

Zaitsev A. A. – fieldwork participation; text revision.

Novoselova L. V. – editing; final version approval.

Isidorov V. A. – research supervision; research concept; methodology development; text revision; final conclusions.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

БОТАНИКА

Научная статья

УДК 634.721:631.535:631.81(470.13)

EDN: LVAAUE

doi: 10.17072/1994-9952-2025-4-383-390



Размножение зелеными черенками перспективных сортов смородины черной в культуре на Севере (Республика Коми)

Ольга Кимовна Тимушева^{1✉}, Ольга Валерьевна Скроцкая²,
Владимир Николаевич Сорокопудов³

^{1, 2} Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия

^{1✉} otimusheva@ib.komisc.ru

² skrockaja@ib.komisc.ru

³ Всероссийский НИИ люпина – филиал ВИК им. В.Р. Вильямса, пос. Мичуринский, Брянская область, Россия, sorokopud2301@mail.ru

Аннотация. Смородина черная (*Ribes nigrum* L.) – популярная ягодная культура в любительском и фермерском садоводстве Республики Коми. Для обеспечения населения адаптированными к условиям Севера сортами данной ягодной культуры имеется необходимость вегетативного размножения наиболее перспективных из них методом зеленого черенкования. Поэтому целью данного исследования было установить влияние стимуляторов корнеобразования – препаратов «Корневин» и «Эпин-экстра» – на укореняемость зеленых черенков. В 2021–2023 гг. испытывались пять сортов данной культуры алтайской ('Сеянец Голубки'), московской ('Вологда', 'Наследница'), мичуринской ('Элевеста') и орловской ('Лентяй') селекции. Исследования проводили с учетом методических указаний ВНИИР им. Н.И. Вавилова. «Корневин» и «Эпин-экстра» подтвердили свою эффективность в качестве стимуляторов корнеобразования при зеленом черенковании сортов смородины черной в климатических условиях Республики Коми. В среднем за три года исследований укореняемость черенков составила 81.1%, что соответствует рекомендуемому стандарту, подтверждающему рентабельность данного метода черенкования. Выбор стимулятора для получения максимального числа прижившихся черенков зависит от сорта смородины. Однако у некоторых сортов эффект от применения стимуляторов для обработки черенков мало отличался от контроля. «Корневин» и «Эпин-экстра» оказывают влияние на число корней разного порядка у исследуемых сортов. Отмечено, что применение обоих стимуляторов при укоренении сортов 'Элевеста', 'Сеянец Голубки', 'Вологда', 'Наследница' влияет на длину корня нулевого порядка. У некоторых сортов положительное воздействие наблюдалось и на формирование корней первого порядка. Установлено наиболее существенное действие «Корневина», чем «Эпина-экстра».

Ключевые слова: смородина черная, сорт, зеленые черенки, «Корневин», «Эпин-экстра», укореняемость, число и длина корней

Для цитирования: Тимушева О. К., Скроцкая О. В., Сорокопудов В. Н. Размножение зелеными черенками перспективных сортов смородины черной в культуре на Севере (Республика Коми) // Вестник Пермского университета. Сер. Биология. 2025. Вып. 4. С. 383–390. <http://dx.doi.org/10.17072/1994-9952-2025-4-383-390>.

Благодарности: исследование выполнено на базе УНУ «Научная коллекция живых растений Ботанического сада Института биологии Коми НЦ УрО РАН», регистрационный номер 507428, в рамках государственного задания по теме «Оценка влияния климатических условий Севера на процессы репродукции ресурсных растений», номер гос. регистрации 125021302139-3.

BOTANY

Original article

Propagation by green cuttings of promising varieties of black currant in cultivation in the North (Komi Republic)

Olga K. Timusheva^{1✉}, Olga V. Skrotskaya², Vladimir N. Sorokopudov³

^{1, 2} Institute of Biology of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the RAS, Syktывkar, Russia

^{1✉} otimusheva@ib.komisc.ru

² skrockaja@ib.komisc.ru

³ Department of Fruit Growing of the All-Russian Research Institute of Lupine - a branch "V.R. Williams VIC", Michurinsky settlement, Bryansk region, Russia, sorokopud2301@mail.ru

Abstract. Black currant (*Ribes nigrum* L.) is a popular berry crop in amateur and farm gardening in the Republic of Komi. In order to provide the population with currant varieties adapted to the conditions of the North, there is a need for vegetative propagation of promising varieties of this berry crop using green cuttings. Therefore, the purpose of this study is to establish the effect of root formation stimulants – “Kornevin” and “Epin-extra” preparations on the rooting of green cuttings of promising black currant varieties promising for the region. In 2021–2023, five varieties of this crop were tested: Altai (‘Seyanec Golubki’), Moscow (‘Vologda’, ‘Naslednica’), Michurin (‘Elevesta’) and Oryol (‘Lentyaj’) selection. The studies were carried out taking into account the guidelines of the VNIIR named after N.I. Vavilov. “Kornevin” and “Epin-extra” have confirmed their effectiveness as root formation stimulants in green cuttings of black currant varieties in the climatic conditions of the Komi Republic. On average, over three years of research, the rooting of cuttings was 81.1%, which corresponds to the recommended standard confirming the profitability of this method of cuttings. The choice of a stimulant for obtaining the maximum number of rooted cuttings depends on the currant variety. However, for some varieties, the effect of using stimulants for processing cuttings was very close to the control. “Kornevin” and “Epin-extra” have an effect on the number of roots of different orders in the studied varieties. The use of both stimulants in rooting ‘Elevesta’, ‘Seyanec Golubki’, ‘Vologda’ and ‘Naslednica’ was noted to have an effect on the length of the zero-order root. Some varieties also showed a positive effect on the formation of first-order roots. “Kornevin” was found to have a more significant effect than “Epin-Extra”.

Keywords: Black currant, variety, green cuttings, “Kornevin”, “Epin-extra”, rooting, number and length of roots

For citation: Timusheva O. K., Skrotskaya O. V., Sorokopudov V. N. [Propagation by green cuttings of promising varieties of black currant in cultivation in the North (Komi Republic)]. *Bulletin of Perm University. Biology*. Iss. 4 (2025): pp. 383-390. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.17072/1994-9952-2025-4-383-390>.

Acknowledgments: the study was carried out on the basis of the Scientific Collection of Live Plants of the Botanical Garden of the Institute of Biology of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, registration number 507428, and within the framework of the state assignment on the topic of “Assessment of the Impact of Climatic Conditions of the North on the Reproduction Processes of Resource Plants”, state registration number 125021302139-3.

Введение

Полезные свойства и вкусовые качества смородины черной обуславливают интерес со стороны промышленных предприятий, мелких фермерских хозяйств и садоводов-любителей. Данное обстоятельство актуализирует исследование поведения различных сортов смородины в условиях климатических особенностей Республики Коми. Следует отметить, что современные сорта смородины черной, созданные для выращивания в различных регионах, отличаются разнообразием в зависимости от рассматриваемого признака – урожайности, биохимического состава, устойчивости к вредителям и болезням и др. [Djordjevic et al., 2014]. Сохранение ценных хозяйственно-биологических свойств сортов обеспечивается при вегетативном размножении, поэтому разработка научных основ размножения ягодных культур и промышленное производство саженцев в соответствии с биологическими особенностями растений, зональными условиями и др. является актуальным и практически значимым направлением исследований. Один из наиболее перспективных способов размножения плодово-ягодных культур – зеленое черенкование с применением стимуляторов роста [Сучкова, Михайлова, 2017; Клинг и др., 2020]. Последние при черенковании облегчают адаптацию растений к колебаниям погодных условий, защищают от заболеваний, повышают укоренение, улучшают качество посадочного материала. Также при зеленом черенковании существенно увеличивается число получаемых черенков с одного маточного растения, что позволяет рационально использовать площади питомника [Аладина, 2013; Кошева, 2017; Бопп, 2021].

Целью данной работы было установление роли стимуляторов корнеобразования «Корневина» и «Эпин-экстра» («Эпина») на укоренение зеленых черенков сортов смородины черной в условиях среднетасажной подзоны Республики Коми.

Материал и методика исследования

Исследование проводилось в окрестностях г. Сыктывкара в Ботаническом саду Института биологии Коми НЦ УрО РАН. В настоящее время в Ботаническом саду создана коллекция сортов смородины черной для отбора наиболее продуктивных образцов с комплексом БАВ (витамины Р, А, Е, В₁, В₂, В₃, В₆, В₉, РР, К, соли калия, железа, кальций, фосфор, магний; пектиновые, дубильные, азотистые вещества, флавоноиды, антоцианы). Опыты по размножению зелеными черенками проводили в 2021–2023 гг. Объектами исследований были пять сортов различной селекции: ‘Сеянец Голубки’, ‘Элевеста’, ‘Вологда’, ‘Наследница’ и ‘Лентяй’. Это, как установлено ранее, наиболее перспективные (продуктивные, крупноплодные и адаптированные) сорта для выращивания в среднетасажной подзоне Республики Коми.

Район, где проводилось исследование, относится к достаточно увлажненному, со среднегодовой суммой осадков 500–600 мм, из которых 400–450 мм выпадает в теплый период года [Атлас по климату..., 1997]. Почвы на участке дерново-подзолистые, глееватые, среднекультуренные, суглинистого гранулометрического состава. Начало вегетационного периода со среднесуточной температурой выше +5°C, как правило, отмечается в последней декаде апреля. Его продолжительность в среднем составляет 150 дней, сумма суточных температур за этот период – 1 800°C. Продолжительность периода активной вегетации со среднесуточными температурами +10°C изменяется от 90 до 110 дней, сумма суточных температур в этот период – 1 450°C [Атлас по климату..., 1997].

Лучшим сроком зеленого черенкования смородины черной для Северо-Запада РФ является вторая–третья декада июля [Поздняков, 1985]. Оптимальный период для данного способа вегетативного размножения в условиях среднетаежной подзоны Республики Коми был установлен нами ранее. Он приходится на первую–вторую декады июля. Июль в 2021–2023 гг. оказался умеренно жарким: среднесуточная температура воздуха составила от +17.4°C до +19.8°C, что выше нормы на 0.8–3.2°C. Сумма эффективных температур (выше 5°C) в 1.3–2.1 раза превышала норму. В целом погода для укоренения черенков была благоприятной.

Исследование проводилось согласно методическим указаниям ВНИИР им. Н.И. Вавилова [Плеханова, 1989]. Укореняемость, или корнеобразование, определяли через три недели после высадки подготовленных черенков, она обозначает долю числа черенков с образовавшимися придаточными корнями от общего количества высаженных черенков данного сорта.

В ходе опыта изучали динамику корнеобразования у зеленых черенков: число корней нулевого и первого порядков, суммарную длину корней нулевого порядка, среднюю длину корня нулевого порядка. Полученные данные статистически обработаны по общепринятым методикам [Доспехов, 1985; Рязанова, Проворченко, Горбунов, 2013]. Следует отметить, что в настоящее время для укоренения зеленых черенков чаще используют искусственные субстраты, состоящие из компонентов растительного происхождения (торф, мох, лигнин, опилки хвойных и листопадных пород, измельченную кору, отработанный шампиньонный субстрат, всевозможные компосты, свежескошенную газонную траву, кокосовое волокно), и инертные материалы (гравий, асбест, песок, перлит, керамзит, пемзу, минеральное волокно, пенопласт, цеолит) [Кумпан, Ярцева, 2020], однако в наших опытах в качестве субстрата (грунта) для черенков использовали смесь речного песка с торфом в пропорции 1:1 слоем 3.5–4 см, что также является широко распространенным и вполне приемлемым. Зеленые побеги сортов брали в утренние часы, затем их нарезали на черенки длиной 12–16 см с тремя–пятью почками. Для опыта отбирали по 30 черенков в двух повторностях. После обработки их высаживали на глубину 2 см наклонно, под углом до 45°. Черенки накрывали материалом «Агротекс». Стимуляторами корнеобразования в опыте служили препараты «Корневин» и «Эпин-экстра». В качестве контроля использовали дистиллированную воду.

Оценка существенности отличий между числом образовавшихся у черенка корней нулевого порядка, средней длиной корня при применении стимулятора корнеобразования с одной стороны и выдержкой черенка в воде (контроль) – с другой, осуществлялась с помощью расчета критерия существенности разности средних двух наборов данных.

Если для сортов $t_{\text{факт}}$ больше $t_{\text{табл}}$ критерия Стьюдента, то стимуляторы корнеобразования влияют на образование корней и это статистически значимо.

Результаты и обсуждение

Среди ягодных культур смородина черная выделяется как легко размножаемое вегетативным путем растение [Кумпан, Ярцева, 2020]. Формирование придаточных корней на стеблевых черенках проявляется неодинаково и зависит от многих факторов: жизненной формы, наследственных особенностей, характеристик маточных растений, условий укоренения и пр. [Аладина, 2006; Стрельцов, Тучин, 2008; Воскобойников и др., 2019]. Однако для достижения рентабельности при выращивании культур, полученных путем черенкования, укореняемость должна составлять не менее 60–90%, а выход стандартных саженцев – не менее 30–40% от исходного числа черенков [Аладина, 2013].

В условиях открытого грунта в среднетаежной подзоне Республики Коми образование корней на черенках разных сортов смородины черной начиналось спустя 16–18 дней после посадки. В третьей декаде июля на черенках всех сортов фиксировалось образование корней нулевого порядка, и спустя месяц, к началу третьей декады августа, формировались корни первого порядка.

В 2021 г. в контроле и стимуляторах корнеобразования в среднем укоренилось 74.7–90.9% черенков. Укореняемость зеленых черенков разных сортов смородины в вариантах с «Корневином» и «Эпином» оказалась выше, по сравнению с контролем, почти в 1.2 раза. У черенков сорта 'Наследница' наибольшая укореняемость фиксировалась при использовании «Корневина», однако в контроле она была несколько выше, чем при обработке черенков «Эпином». То же наблюдалось и у сорта 'Элевеста', укореняемость черенков которого в «Эпине» также оказалась ниже, чем в контроле. Эффект применения «Эпина» замечен только

у сорта 'Лентяй'. В 2022 г. процент укоренившихся черенков был несколько ниже, чем в 2021 у разных сортов – 70.7–84.7% в зависимости от варианта обработки. В данном году в стимуляторах корнеобразования укоренилось в среднем 74–83% черенков. В среднем по пяти сортам при использовании «Корневина» и «Эпина» укореняемость черенков также оказалась выше, чем в контроле, почти в 1.2 раза. И при использовании «Корневина» данный показатель был максимальным у сорта 'Наследница', как и в опыте предыдущего года. Исключение составил сорт 'Сеянец Голубки', у которого процент укоренения был выше в контроле, чем в «Корневине» и «Эпине». Менее, чем у других сортов, укоренилось черенков у сорта 'Элевеста', как в контроле, так и с применением стимуляторов корнеобразования, при этом лучшего эффекта удалось достичь при использовании «Корневина». У сортов 'Лентяй', 'Наследница', 'Сеянец Голубки' в контроле укоренилось черенков больше, чем в «Эпине», на 2.8, 6.9 и 7.2% соответственно.

Результаты по укореняемости черенков сортов смородины черной в разных стимуляторах корнеобразования в 2023 г. мало отличались от таковых в 2021 г. В среднем за 3 года (2021–2023) исследований у сортов 'Наследница' и 'Сеянец Голубки' процент укоренения в контроле превышал таковой в «Эпине» на 5.4 и 1.2 % соответственно (рис. 1). То есть применение «Эпина» не дало эффекта увеличения укореняемости. Его действие было заметно в отдельные годы только при укоренении черенков сортов 'Лентяй' и 'Элевеста'. Поэтому полученные результаты позволяют рекомендовать «Корневин» как более эффективный стимулятор корнеобразования при размножении сортов смородины черной.

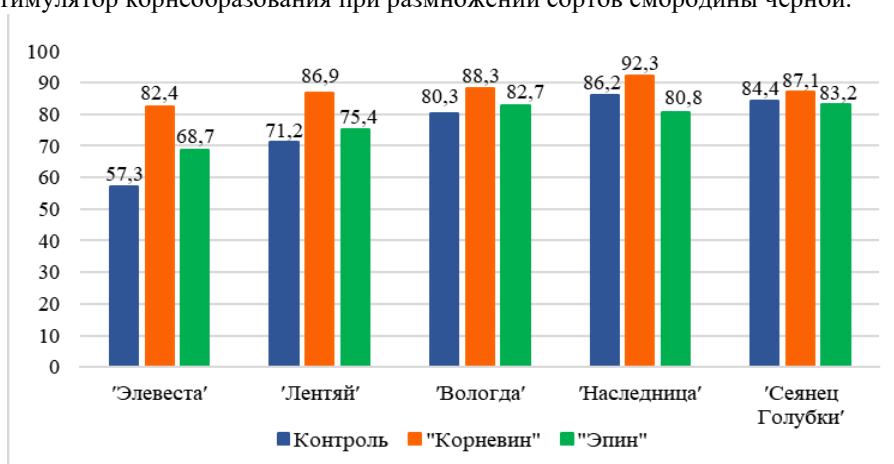


Рис. 1. Укореняемость зеленых черенков сортов смородины черной в среднетаежной подзоне Республики Коми (Ботанический сад Института биологии) в 2021–2023 гг., %

[Rooting of green cuttings of black currant varieties in the middle taiga subzone of the Komi Republic (Botanical Garden of the Institute of Biology) in 2021–2023, %]

В результате анализа данных о формировании корней нулевого и первого порядков на черенках исследуемых сортов смородины было установлено наибольшее положительное влияние «Корневина» на их количество. Большое число корней нулевого и первого порядков образовалось при обработке черенков «Эпином». На рис. 2 отображены укорененные в Ботаническом саду Института биологии Коми НЦ УрО РАН черенки смородины черной.

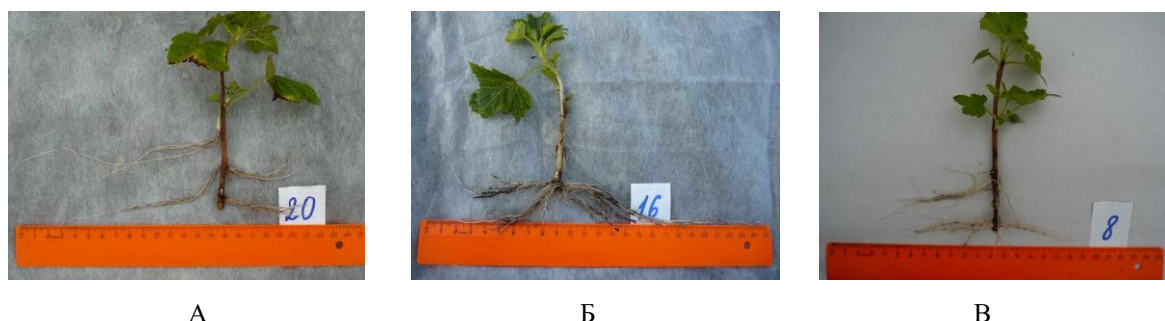


Рис. 2. Укорененные черенки смородины черной:

А– сорт 'Сеянец Голубки' (контроль); Б – сорт 'Вологда' («Корневин»); В – сорт 'Лентяй' («Эпин»)

[Rooted cuttings of black currant:

A – variety 'Seyanec Golubki' (control); B – variety 'Vologda' ("Kornevin"), C – variety 'Lentyaj' ("Epin-extra")]

В таблице 1 показана сравнительная характеристика числа корней нулевого порядка у черенков сортов смородины черной.

Таблица 1

**Число корней нулевого порядка у черенков сортов смородины черной, 2021–2023 гг. (шт.),
Ботанический сад Института биологии**
[Number of zero-order roots in cuttings of blackcurrant varieties, 2021–2023 (pcs.), Botanical Garden
of the Institute of Biology]

Сорт	Контроль (вода)			«Корневин»			«Эпин»		
	число корней (M ± m)	раз- ность	CV, %	число корней (M ± m)	раз- ность	CV, %	число корней (M ± m)	раз- ность	CV, %
‘Сеянец Голубки’ (St)	60.2±3.1	–	12.3	92.2±4.7	–	14.6	60.8±6.7	–	18.9
‘Элевеста’	25.7±3.7	- 34.5	13.6	60.7±4.6	- 31.5	19.2	35.7±5.9	- 25.1	19.3
‘Вологда’	47.2±5.1	- 13.0	18.7	94.2±3.2	2.0	8.4	61.5±4.6	0.7	10.1
‘Наследница’	41.2±5.2	- 19.0	17.6	81.2±5.3	- 11.0	12.1	52.7±4.9	- 8.1	19.7
‘Лентяй’	55.3±2.8	- 4.9	12.5	83.5±3.7	- 8.7	8.2	62.9±5.1	2.1	19.4
НСР ₀₅	12	-	-	11	-	-	16	-	-

При выдерживании черенков в воде (контроль) у всех сортов образовалось меньше корней нулевого порядка, чем при использовании стимуляторов. Существенная разница от сорта-стандарта ‘Сеянец Голубки’ наблюдалась в контроле и в стимуляторах у сорта ‘Элевеста’. У остальных сортов образовалось меньше корней нулевого порядка, чем у сорта-стандарта, только в контроле, за исключением сорта ‘Лентяй’. Коэффициент вариации по числу корней нулевого порядка у сортов в контроле был средний (12.3–18.7%). Средний уровень коэффициента вариации фиксировался у сортов и в стимуляторах корнеобразования. Низкий коэффициент вариации отмечен у сортов: ‘Лентяй’ в «Корневине», ‘Вологда’ в «Корневине» и «Эпине».

В среднем за 3 года исследований установлено, что корней первого порядка на черенках формировалось в 3.7 раза больше, чем нулевого. Показано положительное влияние стимуляторов на увеличение числа корней первого порядка у сортов ‘Наследница’, ‘Лентяй’, ‘Сеянец Голубки’, ‘Элевеста’ (только с «Корневином»), ‘Вологда’ и ‘Элевеста’ (с «Эпином»). При этом в контроле у сортов ‘Наследница’ и ‘Лентяй’ отмечено большее число корней первого порядка, чем в варианте с «Эпином».

Установлено, что суммарная длина корней нулевого порядка в стимуляторах корнеобразования была больше, чем в контроле: в «Корневине» – в 2–3.7 раза, в «Эпине» – в 1.2–1.8 раза (табл. 2). По данному показателю существенное отличие от сорта-стандарта, как в контроле, так и при обработке стимуляторами, имел сорт ‘Элевеста’, наименьшее наблюдалось у сорта ‘Лентяй’ во всех средах. В «Корневине» и «Эпине» наибольшее значение суммарной длины корней нулевого порядка имел сорт ‘Вологда’.

Таблица 2

**Суммарная длина корней нулевого порядка у черенков сортов смородины черной, (см),
2021–2023 гг., Ботанический сад Института биологии**
[Total length of zero-order roots in cuttings of blackcurrant varieties, (cm), 2021–2023, Botanical Garden
of the Institute of Biology]

Сорт	Контроль (вода)		«Корневин»		«Эпин»	
	суммарная длина корней (M ± m)	разность	суммарная длина корней (M ± m)	разность	суммарная длина корней (M ± m)	разность
‘Сеянец Голубки’ (St)	265.8±19.8	-	563.2±32.9	-	342.9±32.2	-
‘Элевеста’	103.2±18.5	- 162.6	376.7±32.2	- 186.5	178.3±45.1	- 164.6
‘Вологда’	243.3±40.8	- 22.5	602.5±44.5	39.3	381.3±12.9	38.4
‘Наследница’	209.6±18.4	- 56.2	497.8±12.3	- 65.4	299.1±26.4	- 43.8
‘Лентяй’	279.3±17.9	13.5	551.8±54.9	- 11.4	329.5±23.3	- 13.4
НСР ₀₅	68.2	-	124.3	-	93.9	-

По результатам работы в табл. 3 показан анализ влияния стимуляторов корнеобразования на число и длину корней нулевого порядка зеленых черенков сортов смородины черной за 3 года исследований (средние показатели).

У всех сортов на образование корней нулевого порядка заметно влияние «Корневина». Так, применение «Корневина» и «Эпина» положительно сказывается на увеличении числа корней нулевого порядка у сортов ‘Элевеста’ и ‘Лентяй’, и данное влияние статистически значимо (табл. 3). Максимальное среди всех сортов значение по показателю $t_{\text{факт}}$ фиксировали у сорта ‘Элевеста’ в «Корневине». У сорта ‘Сеянец Голубки’ в «Эпине» образовалось меньше корней, чем в контроле (отрицательное значение $t_{\text{факт}}$). Влия-

ние «Корневина» на образование корней нулевого порядка оказалось более сильным, чем «Эпина», по показателям $t_{\text{факт}}$ у сортов ‘Элевеста’, ‘Наследница’ и ‘Лентяй’.

Таблица 3

**Анализ влияния стимулятора корнеобразования на число и длину корней нулевого порядка,
2021–2023 гг., Ботанический сад Института биологии**
[Analysis of the effect of a root formation stimulator on the number and length of zero-order roots,
2021–2023, Botanical Garden of the Institute of Biology]

Сорт	Стимулятор	\bar{d}	S_d	$t_{\text{факт}}$	$t_{\text{табл}}$	Вывод о влиянии стимулятора
‘Сеянец Голубки’	«Корневин»/контроль	$\frac{31.4}{1.8}$	$\frac{8.7}{0.5}$	$\frac{3.62}{3.51}$	2.78	Значим Значим
	«Эпин»/контроль	$\frac{-0.2}{1.4}$	$\frac{9.8}{0.4}$	$\frac{-0.02}{3.08}$	2.78	Не значим Значим
‘Элевеста’	«Корневин»/контроль	$\frac{18.4}{1.8}$	$\frac{3.7}{0.3}$	$\frac{5.02}{5.45}$	2.78	Значим Значим
	«Эпин»/контроль	$\frac{9.2}{0.8}$	$\frac{2.9}{0.2}$	$\frac{3.17}{3.29}$	2.78	Значим Значим
‘Вологда’	«Корневин»/контроль	$\frac{39.8}{1.5}$	$\frac{10.5}{0.5}$	$\frac{3.79}{3.08}$	2.78	Значим Значим
	«Эпин»/контроль	$\frac{12.5}{1.2}$	$\frac{9.9}{0.4}$	$\frac{1.27}{3.11}$	2.78	Не значим Значим
‘Наследница’	«Корневин»/контроль	$\frac{43.1}{1.5}$	$\frac{10.5}{0.4}$	$\frac{4.11}{3.96}$	2.78	Значим Значим
	«Эпин»/контроль	$\frac{11.7}{0.5}$	$\frac{8.9}{0.2}$	$\frac{1.31}{2.96}$	2.78	Не значим Значим
‘Лентяй’	«Корневин»/контроль	$\frac{34.1}{1.2}$	$\frac{8.4}{0.4}$	$\frac{4.05}{3.19}$	2.78	Значим Значим
	«Эпин»/контроль	$\frac{14.9}{0.5}$	$\frac{5.1}{0.3}$	$\frac{2.91}{1.86}$	2.78	Значим Не значим

Примечание: в числителе указаны средние данные по числу корней, в знаменателе – средние данные по длине корней нулевого порядка.

Отмечено, что оба стимулятора корнеобразования влияют также на длину корней. Исключение составил сорт ‘Лентяй’, у которого длина корней нулевого порядка не зависела от применения «Эпина» (табл. 3). Максимальный показатель $t_{\text{факт}}$ наблюдался у сорта ‘Элевеста’ как в «Корневине», так и «Эпине».

Заключение

В результате исследований было выявлено различное влияние двух стимуляторов корнеобразования на укоренение зеленых черенков сортов смородины черной в условиях среднетаежной подзоны Республики Коми. Установлено, что на черенках всех сортов корни нулевого порядка были сформированы к третьей декаде июля, а корни первого порядка – к началу третьей декады августа. Процент укоренения соответствовал принятому стандарту (не менее 60% от высаженных черенков). Показано, что применение «Корневина» и «Эпина» оказывает благоприятное воздействие на укореняемость черенков. Выбор стимулятора для получения максимального числа прижившихся черенков зависит от сорта смородины: «Корневин» целесообразно использовать при размножении всех сортов, «Эпин» – для сортов ‘Сеянец Голубки’, ‘Наследница’, ‘Лентяй’, ‘Элевеста’. Для сорта ‘Вологда’ приживаемость черенков оказалась наибольшей в «Корневине» и в контроле (вода). Установлено, что число корней нулевого порядка и их длина у рассматриваемых сортов зависели от применения стимуляторов, особенно «Корневина», и у ряда из них стимуляторы оказывали дополнительное положительное воздействие на образование корней первого порядка. Однако у сорта ‘Лентяй’ применение «Эпина» не влияло на длину корней нулевого порядка. Отчетливо проявилось влияние «Корневина» на длину корней и их количество у сортов ‘Элевеста’ и ‘Наследница’.

Список источников

- Аладина О.Н. Влияние возраста маточных растений на регенерационную способность крыжовника // Известия ТСХА. 2006. № 4. С. 47–58. EDN: HVSPXX.
- Аладина О.Н. Оптимизация технологии зеленого черенкования садовых растений // Известия ТСХА. 2013. № 4. С. 5–22. EDN: RCLYSR.
- Атлас по климату и гидрологии Республики Коми. М.: Дрофа; ДИК, 1997. 116 с.
- Бопп В.Л. Обзор современных решений повышения ризогенеза зеленых черенков *Ribes nigrum* L. // Вестник КрасГАУ. 2021. № 4(169). С. 51–59. DOI: 10.36718/1819-4036-2021-4-51-59. EDN: CPMQYD.

5. Воскобойников Ю.В. и др. Оптимизация технологии зеленого черенкования голубики высокорослой // Плодоводство и ягодоводство России. 2019. Т. 59. С. 53–60. DOI: 10.31676/2073-4948-2019-59-53-60. EDN: QHKDAU.
6. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
7. Клинг А.П. и др. Сравнительная оценка укоренения смородины черной зелеными черенками // Вестник Омского ГАУ. 2020. № 4(40). С. 29–33. EDN: ZXONOL.
8. Кошева О.Н. Применение регуляторов роста при зеленом черенковании селекционных сортообразцов смородины черной // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2017. Т. 47, № 2. С. 23–27. EDN: YPZTPL.
9. Кумпан В.Н., Ярцева Л.А. Влияние сортовых особенностей на регенерационную способность зеленых черенков смородины черной // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2020. Т. 2(38). С. 67–75. EDN: LTOXVR.
10. Плеханова М.Н. Маточные насаждения и технология размножения синей жимолости (метод. указания). Л., 1989. 34 с.
11. Поздняков А.Д. Смородина. М.: Агропромиздат, 1985. 128 с.
12. Рязанова Л.Г., Проворченко А.В., Горбунов И.В. Основы статистического анализа результатов исследований в садоводстве. Краснодар, 2013. 61 с.
13. Стрельцов Ф.Ф., Тучин Р.А. Совершенствование технологии производства посадочного материала плодовых и ягодных культур // Достижения науки и техники АПК. 2008. № 7. С. 24–26. EDN: JWVLTR.
14. Сучкова С.А., Михайлова С.И. Ускоренное размножение ягодных культур в условиях Сибири // Сборник научных трудов Государственного Никитского ботанического сада. 2017. Т. 144-2. С. 96–100. EDN: ZDFDNN.
15. Djordjevic B. et al. Pomological and biochemical characterization of European currant berry (*Ribes* sp.) cultivars // Scientia Horticulturae, 2014. Vol. 165(22). P. 156–162. DOI: 10.1016/j.scienta.2013.11.014.

References

1. Aladina O.N. [The influence of the age of uterine plants on the regenerative ability of gooseberries]. *Izvestiya TSCHA*. No. 4 (2006): pp. 47-58. (In Russ.).
2. Aladina O.N. [Optimization of the technology of green cuttings of garden plants]. *Izvestiya TSCHA (Genetika, selekcija i semenovodstvo, biotekhnologija, fiziologija rastenij)*. No. 4 (2013): pp. 5-22. (In Russ.).
3. *Atlas po klimatu i gidrologii Respubliki Komi* [Atlas of climate and hydrology of the Komi Republic]. Moscow, Drofa and DIK Publ., 1997. 116 p. (In Russ.).
4. Bopp V.L. [Review of modern solutions for increasing rhizogenesis of green cuttings *Ribes nigrum* L.]. *Vestnik KrasGAU*. No. 4(169) (2021): pp. 51-59. DOI: 10.36718/1819-4036-2021-4-51-59. (In Russ.).
5. Voskoboynikov Yu.V., Akimova S.V., Matskevich M.P., Matskevich P.P., Demenko V.I., Strelets V.D., Panichkin L.A., Konstantinovich A.V. [Optimization of technology for green cuttings of highbush blueberry]. *Plodovodstvo i jagodovodstvo Rossii*. V. 59 (2019): pp. 53-60. DOI: 10.31676/2073-4948-2019-59-53-60. (In Russ.).
6. Dospekhov B.A. *Metodika polevogo opyta* [Methods of field experience (with the basics of statistical processing of research results)]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1985. 351 p. (In Russ.).
7. Kling A.P., Kumpan V.N., Makarova M.V., Zhuchkov A.V. [Comparative assessment of rooting of black currant by green cuttings]. *Vestnik Omskogo GAU*. No. 4(40) (2020): pp. 29-33. (In Russ.).
8. Kosheva O.N. [Application of growth regulators in green cuttings of selection varieties of black currant]. *Sibirskij vestnik sel'skochozjajstvennoj nauki*. V. 47, No. 2 (2017): pp. 23-27. (In Russ.).
9. Kumpan V.N., Yartseva L.A. [Influence of varietal characteristics on the regenerative ability of green cuttings of black currant]. *Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. V. 2(38) (2020): pp. 67-75. (In Russ.).
10. Plekhanova M.N. *Matočnye nasaždenija i tehnologija razmnoženija sinej žimolosti* [Uterine plantings and reproduction technology of blue honeysuckle (methodological guidelines)]. Leningrad, VNIIR im. N.I. Vavilova Publ., 1989. 34 p. (In Russ.).
11. Pozdnyakov A.D. *Smorodina* [The currant]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1985. 128 p. (In Russ.).
12. Ryazanova L.G., Provorchenko A.V., Gorbunov I.V. *Osnovy statističeskogo analiza rezul'tatov issledovanij v sadovodstve* [Fundamentals of statistical analysis of research results in horticulture]. Krasnodar, 2013. 61 p. (In Russ.).
13. Streltsov F.F., Tuchin R.A. [Improving the technology of production of planting material for fruit and berry crops]. *Dostiženija nauki i tehniki APK*. No. 7 (2008): pp. 24-26. (In Russ.).
14. Suchkova S.A., Mikhailova S.I. [Accelerated reproduction of berry crops in Siberia]. *Sbornik naučnyh trudov Gosudarstvennogo Nikitskogo botaničeskogo sada*. V. 144-2 (2017): pp. 96-100. (In Russ.).

15. Djordjevic B., Rakonjac V., Fotiric Aksic M., Savikin K., Vulic T. Pomological and biochemical characterization of European currant berry (*Ribes* sp.) cultivars. *Scientia Horticulturae*. V. 165(22) (2014): pp. 156-162. DOI: 10.1016/j.scienta.2013.11.014.

Статья поступила в редакцию 25.08.2025; одобрена после рецензирования 13.10.2025; принята к публикации 02.12.2025.

The article was submitted 25.08.2025; approved after reviewing 13.10.2025; accepted for publication 02.12.2025.

Информация об авторах

О. К. Тимушева – ведущий инженер отдела Ботанический сад;

О. В. Скроцкая – канд. биол. наук, заведующий отделом Ботанический сад;

В. Н. Сорокопудов – д-р с.-х. наук, профессор, главный научный сотрудник комплексного научно-исследовательского отделения направления плодородства.

Information about the authors

O. K. Timusheva – Leading Engineer of Botanical Garden Department;

O. V. Skrotskaya – Candidate of Biological Sciences, Head of Botanical Garden Department;

V. N. Sorokopudov – Doctor of Agricultural Sciences, Professor specializing in Botany, Chief Researcher of the Integrated Research Department of Fruit Growing of the All-Russian Research Institute of Lupine – a branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Center "V.R. Williams VIC".

Вклад авторов:

Тимушева О.К. – написание исходного текста; статистическая обработка материала.

Скроцкая О.В. – научное руководство; доработка текста; итоговые выводы.

Сорокопудов В.Н. – научное руководство; концепция исследования; итоговые выводы.

Contribution of the authors:

Timusheva O. K. – writing the source text; statistical processing of the material.

Skrotskaya O. V. – research supervision; followon revision of the text; final conclusions.

Sorokopudov V. N. – research supervision; research concept; final conclusions.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

ЗООЛОГИЯ

Краткое сообщение

УДК 595.44(570.57)

EDN: SXVZHM

doi: 10.17072/1994-9952-2025-4-391-395



Новые указания пауков (Arachnida: Araneae) для фауны Башкортостана

Семен Викторович Власов^{1✉}, Сергей Леонидович Есюнин²

^{1, 2} Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

^{1✉} probel15@yandex.ru

² esyunin@psu.ru

Аннотация. В ходе краткосрочной экспедиции в равнинную часть Абзелиловского р-на Башкортостана в сентябре 2025 г. была собрана небольшая коллекция пауков, насчитывающая 25 видов. 7 видов впервые отмечаются для Башкортостана. Один вид (*Larinia jeskovi* Marusik, 1986) впервые отмечен в фауне Урала. Для 17 видов уточнено распространение в пределах Республики Башкортостан. Обсуждается распространение всех новых для Башкортостана видов. Приведены диагностические признаки малоизвестного вида *Trichoncus affinis*. По результатам настоящего исследования общее число видов пауков, зарегистрированных в Башкортостане, возросло до 470 видов.

Ключевые слова: фауна, новые указания, новые находки, пауки, Башкирское Предуралье

Для цитирования: Власов С. В., Есюнин С. Л. Новые указания пауков (Arachnida: Araneae) для фауны Башкортостана // Вестник Пермского университета. Сер. Биология. 2025. Вып. 4. С. 391–395. <http://dx.doi.org/10.17072/1994-9952-2025-4-391-395>.

Благодарности: авторы признательны А. В. Пономареву (Ростов-на-Дону, Россия) за конструктивные замечания по рукописи.

ZOOLOGY

Short message

New records of spiders (Arachnida: Araneae) for Bashkortostan fauna

Semen V. Vlasov^{1✉}, Sergei L. Esyunin²

^{1, 2} Perm State University, Perm, Russia

^{1✉} probel15@yandex.ru

² esyunin@psu.ru

Abstract. During a short expedition to the lowland part of the Abzelilovskiy Region of Bashkortostan in September 2025, a small collection of spiders containing 25 species was collected. Seven species being recorded from Bashkortostan for the first time. One species *Larinia jeskovi* Marusik, 1986 being recorded for the first time in the Ural fauna. For the 17 species, the distribution within the Republic of Bashkortostan is clarified. Distribution of all species new to Bashkortostan is discussed. Diagnostic characters are illustrated for little-known species *Trichoncus affinis*. Based on the results of the present study, the total number of spider species recorded from Bashkortostan has increased to 470 species.

Keywords: fauna, new records, new occurrences, spider, Bashkir Cis-Urals

For citation: Vlasov S. V., Esyunin S. L. [New records of spiders (Arachnida: Araneae) for Bashkortostan fauna]. *Bulletin of Perm University. Biology*. Iss. 4 (2025): pp. 391-395. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.17072/1994-9952-2025-4-391-395>.

Acknowledgments: the authors are grateful to A.V. Ponomarev (Rostov-na-Don, Russia) for constructive comments on the manuscript.

Целенаправленное изучение разнообразия фауны пауков республики Башкортостан осуществлялось в последнее десятилетие XX в. в основном благодаря усилиям пермских арахнологов [Пахоруков, Ефимик, 1988; Есюнин, Полянин, 1990; Ефимик, 1995а, 1995б, 1997; Ефимик, Гулящих, 1995 и др.]. Согласно

данным последней сводки [Есюнин, 2009], в фауне пауков республики насчитывалось 462 вида. В Абзелиловском р-не, расположенном в центральной части Башкирского Предуралья, фауна пауков ранее не изучалась. Во время краткосрочной экспедиции в равнинную часть района была собрана небольшая коллекция пауков, содержащая 25 видов. Среди них 7 видов впервые обнаружены в фауне Башкортостана, а один вид является новым для Урала.

Задачи данной публикации сводятся к следующему: обнародовать данные о находках новых для Урала и республики Башкортостан видов пауков и уточнить распространения уже известных для республики видов.

Материал и методы

Материал был собран С. В. Власовым в сентябре 2025 г. в Абзелиловском р-не Башкортостана. Исследованы территории вблизи двух карстовых озер, окруженных степными ландшафтами. Берега оз. Мулдаккуль засолены. В окрестностях двух озер обследовано 7 биотопов:

- четыре в окрестностях оз. Бурсунсы (2 сентября 2025): берег озера, 53.192333 N / 58.612315 E, укосы по траве; солонец, 53.170986 N / 58.580737 E, ручной сбор; степь типчаково-ковыльная на вершине холма, 53.177744 N / 58.608228 E, укосы по траве; степь типчаково-ковыльная у подножья холма, 53.177743 N / 58.604045 E, укосы по траве;

- три в окрестностях оз. Мулдаккуль (2–4 сентября 2025): берег озера, 53.421738 N / 58.797384 E, укосы по траве; луг разнотравно-злаковый, 53.419911 N / 58.794346 E, укосы по траве; луг злаковый, 53.420670 N / 58.795151 E, укосы по траве и почвенные ловушки.

Собранная коллекция пауков передана в Зоологический музей РАН, г. Санкт-Петербург (куратор коллекции Д.В. Логунов).

Для фотографирования отпрепарированные эпигины вываривались в 10% щелочи (KOH) на водяной бане в течение 5 мин. Из мацерированных эпигин изготовлялся временный препарат в глицерине. Цветные цифровые изображения копулятивных органов были получены при помощи фотокамеры Olympus OMD EM-10 с объективом M. Zuiko Digital ED 60 mm f/2.8 и микроскопа Zeiss Axio Imager.A2 в ведущей лаборатории Микробных и клеточных технологий биологического факультета ПГНИУ.

Новые указания пауков для фауны Башкортостана

Acartauchenius scurrilis (O. Pickard-Cambridge, 1873) (Linyphiidae): 1 ♀, Абзелиловский р-н, окрестности оз. Бурсунсы, солонец, ручной сбор 2.IX.2025. Новый для фауны Башкортостана вид, в Приуралье ранее обнаружен на степоидах Кунгурского р-на Пермского края и в степях Оренбургской обл. Ареал западно-центральнопалеарктический суббореальный. В Европе обитает рядом с муравейниками [Nentwig et al., 2025].

Argiope bruennichi (Scopoli, 1772) (Araneidae): 2 ♀, Абзелиловский р-н, окрестности оз. Мулдаккуль, луг разнотравно-злаковый, укосы по траве, 2–4.IX.2025. В Приуралье обитает в лесостепной и степной зоне Оренбургской и Челябинской обл. Для фауны Башкортостана указывается впервые. Ареал транспалеарктический суббореально-семиаридный.

Evarcha michailovi Logunov, 1992 (Salticidae): 1 ♀, Абзелиловский р-н, окрестности оз. Мулдаккуль, луг разнотравно-злаковый, укосы по траве, 2–4.IX.2025. Новый для фауны Башкортостана вид. В Приуралье обнаружен в Пермском крае, Оренбургской и Челябинской обл. Ареал вида западно-центральнопалеарктический суббореально-семиаридный.

Larinia jeskovi Marusik, 1986 (Araneidae): 1 ♂, Абзелиловский р-н, окрестности оз. Мулдаккуль, луг разнотравно-злаковый, укосы по траве, 2–4.IX.2025. Новый для фауны Урала вид; его ареал простирается вдоль суббореальной зоны Евразии от Франции на западе до Японии на востоке [Nentwig et al., 2025]. В России вид известен из нескольких регионов: Ростовская [Пономарев, 2022] и Новосибирская обл. [Azarkina et al., 2018], Бурятия [Данилов, 2008], Амурская область [Marusik, 1987] и Приморский край [Oliger, Marusik, Koponen, 2002].

Nomisia aussereri (L. Koch, 1872) (Gnaphosidae): 1 ♀, Абзелиловский р-н, окрестности оз. Бурсунсы, солонец, ручной сбор 2.IX.2025. Новый для фауны Башкортостана вид. Данное указание – самая северная в Приуралье находка данного вида, ранее известного только из Оренбургской обл. Ареал западно-центральнодревнесредиземноморский.

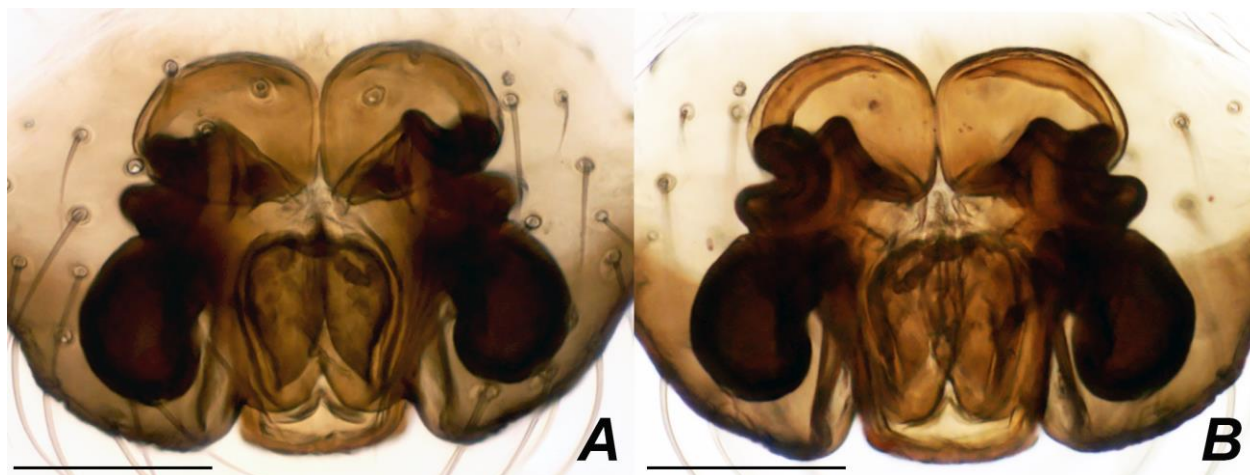
Rhysodromus histrio (Latreille, 1819) (Philodromidae): 3 неполовозрелых ♀♀, Абзелиловский р-н, окрестности оз. Бурсунсы, степь типчаково-ковыльная, укосы, 2.IX.2025. Этот циркумглоарктический суббореально-семиаридный вид широко распространен в степях и ксерофитных местообитаниях Приуралья. Для фауны Башкортостана указывается впервые.

Silometopus elegans (O. Pickard-Cambridge, 1873) (Linyphiidae): 1 ♀, Абзелиловский р-н, окрестности оз. Мулдаккуль, луг разнотравно-злаковый, укосы по траве, 2–4.IX.2025. Новый для фауны Башкортостана вид.

стана вид. В Приуралье известен из Пермского края и Челябинской обл. Ареал европейско-западносибирский температурный.

Tetragnatha reimoseri (Roşca, 1939) (Tetragnathidae): 1 неполовозрелая ♀, Абзелиловский р-н, окрестности оз. Бурсунсы, степь у подножья холма, укусы, 2.IX.2025. Новый для фауны Башкортостана вид. В недавней статье на материалах из Челябинской обл. было показано, что в Приуралье обитает именно этот вид, распространенный от Западной Европы до Восточно-Казахстанской области [Efimik, Tiunov, 2025].

Trichoncus affinis Kulczyński, 1894 (Рис.; Linyphiidae): 1 ♀, Абзелиловский р-н, окрестности оз. Бурсунсы, солонец, ручной сбор 2.IX.2025. Ранее для Башкортостана указывался вид *Trichoncus vasconicus* Denis, 1944, таксономический статус которого на современном этапе не ясен. Некоторые авторы считают его синонимом *T. affinis* [Wunderlich, 2011: 283], другие – отдельным видом [World Spider catalog, 2025]. Исследованная нами самка по строению эндогины соответствует фотографиям и рисункам именно *T. affinis* [Oger, 2025].



Эпигина *Trichoncus affinis* Kulczyński, 1894:

A – дорсальный и B – вентральный вид. Шкалы: 0.1 мм

[Epigyne of *Trichoncus affinis* Kulczyński, 1894:

A – dorsal, and B – ventral view. Scale bars: 0.1 mm]

Новые находки пауков

Как отмечалось во Введении, фауна пауков Абзелиловского р-на республики Башкортостан ранее не изучалась. Ниже приведена краткая информация об обнаруженных видах и их биотопическом распределении.

Окрестности оз. Бурсунсы. На берегу озера обнаружены *Clubiona phragmitis* C. L. Koch, 1843, *Larinioides suspicax* (O. Pickard-Cambridge, 1876) и *Tetragnatha extensa* (Linnaeus, 1758); на солонце – *Agalenatea redii* (Scopoli, 1763), *Agroeca cuprea* Menge, 1873, *Cyclosa oculata* (Walckenaer, 1802), *Nomisia aussereri* (L. Koch, 1872) и *Pardosa agrestis* (Westring, 1861); в типчаково-ковыльной степи на вершине холма – *Cheiracanthium punctarium* (Villers, 1789), *L. suspicax* и *Rhysodromus histrio* (Latreille, 1819); в типчаково-ковыльной степи у подножья холма – *Ch. punctarium*, *Rh. histrio* и *T. extensa*.

Окрестности оз. Мулдаккуль. На берегу озера обнаружены *C. phragmitis*, *Cercidia prominens* (Westring, 1851) и *Singa nitidula* C. L. Koch, 1844; на разнотравно-злаковом лугу – *Argiope bruennichi* (Scopoli, 1772), *Bathyphantes nigrinus* (Westring, 1851), *Cercidia prominens* (Westring, 1851), *Ebrechtella tricuspidata* (Fabricius, 1775), *Neoscona adianta* (Walckenaer, 1802), *Silometopus elegans* (O. Pickard-Cambridge, 1873), *Spiracme striatipes* (L. Koch, 1870) и *Trichopterna cito* (O. Pickard-Cambridge, 1873); на злаковом лугу – *C. prominens*, *Clubiona stagnatilis* Kulczyński, 1897, *Erigone atra* Blackwall, 1833, *L. suspicax*, *Pachygnatha degeeri* Sundevall, 1830 и *Trochosa ruricola* (De Geer, 1778).

Обсуждение

Впервые для фауны Урала указан вид *Larinia jeskovi* Marusik, 1986. 7 видов впервые обнаружены на территории Башкортостана. Находки части видов, широко распространенных в соседних регионах, таких как *Argiope bruennichi* (Scopoli, 1772), *Rhysodromus histrio* (Latreille, 1819) и *Evarcha michailovi* Logunov, 1992, закономерны и скорее всего свидетельствуют о неполноте изученности фауны республики.

Об этом же говорит и обнаружение двух пауков-кругопрядов *Larinia jeskovi* Marusik, 1986 и *Tetragnatha reimoseri* (Roşca, 1939), плетущих свои сети на прибрежных, зачастую стоящих в воде, растениях. Арахнологи редко обращают внимание на эти необычные для пауков местообитания, чем, по-видимому, и объясняется недостаток коллекционного материала по этим видам и разорванность ареала Ларинии. Особый интерес в новой коллекции представляет самая северная в Приуралье находка степного вида *Nomisia aussereri* (L. Koch, 1872). В целом можно сделать вывод о необходимости дополнительных исследований фауны пауков республики Башкортостан.

До начала нашего исследования в фауне пауков республики Башкортостан насчитывалось 462 вида. По результатам настоящего исследования общее число видов пауков, зарегистрированных в Башкортостане, возросло до 470.

Список источников

1. Данилов С.Н. Каталог пауков (Arachnida, Aranei) Забайкалья. Улан-Удэ: Изд-во Бурятского научного центра СО РАН, 2008. 108 с.
2. Есюнин С.Л. К фауне пауков (Aranei) северного Башкортостана // Вестник Пермского университета. 2009. Вып.10(36). С. 43–49. EDN: PAVDOL.
3. Есюнин С.Л., Полянин А.Б. К фауне пауков горно-лесного пояса Южного Урала // Животный мир Южного Урала. Свердловск, 1990. С. 15–16.
4. Ефимик В.Е. Пауки (Aranei) Башкирского государственного заповедника // Фауна и экология пауков. Пермь, 1995а. С. 98–116.
5. Ефимик В.Е. Зоогеографический анализ фауны пауков западного макросклона Южного Урала // Вестник Пермского ун-та. 1995б. Вып. 1. С. 102–107.
6. Ефимик В.Е. Биотопическая приуроченность пауков Башкирии // Вестник Пермского ун-та. 1997. Вып. 3. Биология. С. 128–138. EDN: YKILBN.
7. Ефимик В.Е., Гулящих Е.В. Фауна пауков сосново-широколиственных лесов Южного Урала // Фауна и экология пауков. Пермь, 1995. С. 116–131.
8. Пахоруков Н.М., Ефимик В.Е. К фауне пауков Башкирского государственного заповедника // Фауна и экология паукообразных. Пермь, 1988. С. 15–34.
9. Пономарев А.В. Пауки (Arachnida: Aranei) юго-востока Русской равнины: каталог, особенности фауны. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного научного центра РАН, 2022. 640 с. EDN: LLCITU.
10. Azarkina G.N. et al. A check-list and zoogeographic analysis of the spider fauna (Arachnida: Aranei) of Novosibirsk Area (West Siberia, Russia) // Arthropoda Selecta. 2018. Vol. 27, № 1. P. 73–93. DOI: 10.15298/arthscl.27.1.11. EDN: XSJNGX.
11. Efimik V.E., Tiunov A.V. *Tetragnatha reimoseri* (Roşca, 1939) (Aranei: Tetragnathidae) in the Ural and some territories of North Eurasia // Caucasian Entomological Bulletin. 2025. Vol. 21, № 1. P. 101–106. DOI: 10.5281/zenodo.15183159. EDN: IWIWPH.
12. Marusik Yu.M. The orb-weaver genus *Larinia* Simon in the USSR (Aranei, Araneidae) // Spixiana. 1987. № 9. P. 245–254.
13. Nentwig W. et al. Spiders of Europe. Version 11.2025. 2025. URL: <https://www.araneae.nmbe.ch>.
14. Oger P. Les araignées de Belgique et de France. 2025. URL: <https://arachno.piwigo.com/>
15. Oliger T.I., Marusik Yu.M., Koponen S. New and interesting records of spiders (Araneae) from the Maritime Province of Russia // Acta arachnologica. 2002. Vol. 51, № 2. P. 93–98.
16. World Spider Catalog. 2025. Version 26. Natural History Museum Bern. URL: <http://wsc.nmbe.ch>
17. Wunderlich J. Extant and fossil spiders (Araneae). Heutige und fossile Spinnen // Beiträge zur Araneologie. 2011. Bn. 6. S. 1–640.

References

1. Danilov S.N. *Katalog paukov (Arachnida, Aranei) Zabajkal'ja* [Catalog of spiders (Arachnida, Aranei) of Transbaikalia]. Ulan-Ude, Buryat Scientific Center SB RAS Press, 2008. 108 p. (In Russ.).
2. Esyunin S.L. [To the spider (Aranei) fauna of northern Bashkortostan]. *Bulletin of Perm University*. Iss. 10(36) (2009): pp. 43–49. (In Russ.).
3. Esyunin S.L., Polyaniin A.B. [On the spider fauna of the mountain forest belt of the South Urals]. *Životnyj mir Južnogo Urala* [Wildlife of the Southern Urals]. Sverdlovsk, 1990, pp. 15–16. (In Russ.).
4. Efimik V.E. [Spiders (Aranei) of the Bashkir State Nature Reserve]. *Fauna i ècologija paukov* [Fauna and ecology of spiders]. Perm, 1995a, pp. 98–116. (In Russ.).
5. Efimik V.E. [Zoogeographical analysis of the spider fauna of the western macroslope of the Southern Urals]. *Bulletin of Perm University*. Iss. 1 (1995b): pp. 102–107. (In Russ.).
6. Efimik V.E. [Biotopic distribution of spiders in Bashkiria]. *Bulletin of Perm University*. Iss. 3 (1997): pp. 128–138. (In Russ.).

7. Efimik V.E., Gulyashchikh E.V. [Spider fauna of pine-deciduous forests of the South Urals]. *Fauna i ècologija paukov* [Fauna and ecology of spiders]. Perm, 1995, pp. 116-131. (In Russ.).
8. Pakhorukov N.M., Efimik V.E. [On the spider fauna of the Bashkir State Nature Reserve]. *Fauna i ècologija paukoobraznykh* [Fauna and ecology of arachnids]. Perm, 1988, pp. 15-34. (In Russ.).
9. Ponomarev A.V. *Pauki (Arachnida: Aranet) jugo-vostoka Russkoj ravniny* [Spiders (Arachnida: Araneae) of the Southeast of the Russian Plain: Catalogue, the fauna specific features]. Rostov-on-Don: Southern Scientific Center of the RAS Publ., 2022. 640 p. (In Russ.).
10. Azarkina G.N., Lyubchanskii I.I., Trilikauskas L.A., Dudko R.Yu., Bespalov A.N., Mordkovich V.G. A check-list and zoogeographic analysis of the spider fauna (Arachnida: Aranei) of Novosibirsk Area (West Siberia, Russia). *Arthropoda Selecta*. V. 27, Iss. 1 (2018): pp. 73-93. DOI: 10.15298/arthscl.27.1.11. EDN: XSJNGX.
11. Efimik V.E., Tiunov A.V. *Tetragnatha reimoseri* (Roşca, 1939) (Aranei: Tetragnathidae) in the Ural and some territories of North Eurasia. *Caucasian Entomological Bulletin*. V. 21, Iss. 1 (2025): pp. 101-106. DOI: 10.5281/zenodo.15183159. EDN: IWIWPH.
12. Marusik Yu.M. The orb-weaver genus *Larinia* Simon in the USSR (Aranei, Araneidae). *Spixiana*. No. 9 (1987): pp. 245-254.
13. Nentwig W, Blick T, Bosmans R, Gloor D, Hänggi A, Kropf C. Spiders of Europe. Version 11.2025. (2025). Available at: <https://www.araneae.nmbe.ch>.
14. Oger P. *Les araignées de Belgique et de France*. (2025). Available at: <https://arachno.piwigo.com/>
15. Oligier T.I., Marusik Yu.M., Koponen S. New and interesting records of spiders (Araneae) from the Maritime Province of Russia. *Acta arachnologica*. V. 51, Iss. 2 (2002): pp. 93-98.
16. *World Spider Catalog*. Version 26. Natural History Museum Bern. (2025). Available at: <http://wsc.nmbe.ch>
17. Wunderlich J. Extant and fossil spiders (Araneae). Heutige und fossile Spinnen. *Beiträge zur Araneologie*. Bn. 6 (2011): pp. 1-640.

Статья поступила в редакцию 20.11.2025; одобрена после рецензирования 25.11.2025; принята к публикации 02.12.2025.

The article was submitted 20.11.2025; approved after reviewing 25.11.2025; accepted for publication 02.12.2025.

Информация об авторах

С. В. Власов – старший преподаватель кафедры зоологии беспозвоночных и водной экологии;

С. Л. Есюнин – д-р биол. наук, доцент, профессор кафедры зоологии беспозвоночных и водной экологии.

Information about the authors

S. V. Vlasov – Senior Lecturer at the Department of Invertebrate Zoology and Aquatic Ecology;

S. L. Esyunin – Doctor of Biology, Associate Professor, Professor Department of Invertebrate Zoology and Aquatic Ecology.

Вклад авторов:

Власов С. В. – определение видов; обработка полевого материала; сбор полевого материала.

Есюнин С. Л. – концепция исследования; изготовление рисунка; оформление текста.

Contribution of the authors:

Vlasov S. V. – identification of species; processing of field material; collection of field material.

Esyunin S. L. – research concept; making a drawing; text design.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

МИКРОБИОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 579.64

EDN: TEAPFN

doi: 10.17072/1994-9952-2025-4-396-405



Влияние бактерии *Salinicola socius* SMB35^T на рост озимого рапса при низкой положительной температуре

Людмила Николаевна Ананьина^{1✉}, Елена Анатольевна Шестакова²,
Алёна Викторовна Старцева³, Алексей Аркадьевич Горбунов⁴

^{1,2} Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН – филиал ПФИЦ УрО РАН, Пермь, Россия

^{1✉} ludaananyina@mail.ru

² sheanton@mail.ru

³ Пермский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал ПФИЦ УрО РАН, Пермь, Россия, frolova.al87@mail.ru

⁴ Институт технической химии УрО РАН – филиал ПФИЦ УрО РАН, Пермь, Россия, agorbunof@mail.ru

Аннотация. В настоящем исследовании выявлена способность штамма *Salinicola socius* SMB35^T синтезировать фитогормон – индол-3-уксусную кислоту. Продукция фитогормона зависела от фазы роста бактерии. Изучено влияние инокуляции семян ауксинсинтезирующей бактерией *S. socius* SMB35^T на рост и холодоустойчивость озимого рапса в условиях *in vitro*. Установлено, что эффект являлся дозозависимым: применение 40 мг биомассы бактерии для обработки 1 г семян значительно снижало высоту побегов, отмечена тенденция к снижению длины корней, в то время как использование бактериальных клеток в концентрации в 2 раза ниже нивелировало негативный эффект и формировало тенденцию к увеличению средних показателей длины корней и высоты побегов. Исследовано действие бактериальной обработки семян на рост рапса (всхожесть и биомассу) при стрессе, вызванном низкой положительной температурой. Показано, что в условиях холода инокуляция семян ростостимулирующей концентрацией бактерии приводила к увеличению всхожести семян на 13.3% и биомассы проростков на 15.1%. Однако применение штамма *S. socius* SMB35^T не вызвало увеличения количества осмолитов, таких как сахароза и пролин, в проростках рапса. Напротив, обнаружено значимое снижение содержания сахарозы на 35.5%. Полученные результаты свидетельствуют о других механизмах взаимодействия бактерии и растения, приведших к увеличению устойчивости к холоду растений на раннем этапе развития. Экспериментально подтверждено, что определение концентрационной специфичности и последующее изучение альтернативных молекулярных механизмов взаимодействия бактерий с растениями являются ключевыми факторами для разработки эффективных микробных препаратов.

Ключевые слова: *Brassica napus* L., *Salinicola socius*, индол-3-уксусная кислота, холод, низкая температура

Для цитирования: Влияние бактерии *Salinicola socius* SMB35^T на рост озимого рапса при низкой положительной температуре / Л. Н. Ананьина, Е. А. Шестакова, А. В. Старцева, А. А. Горбунов // Вестник Пермского университета. Сер. Биология. 2025. Вып. 4. С. 396–405. <http://dx.doi.org/10.17072/1994-9952-2025-4-396-405>.

Благодарности: работа выполнена при поддержке Российского научного фонда и Министерства образования и науки Пермского края в рамках научного проекта № 24-26-20070.

MICROBIOLOGY

Original article

Effect of the *Salinicola socius* SMB35^T bacteria on the growth of winter rape at low positive temperature

Lyudmila N. Anan'ina^{1✉}, Elena A. Shestakova², Alena V. Startseva³,
Alexey A. Gorbunov⁴

^{1,2} Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms UB RAS – branch of the PFRC of the UB RAS, Perm, Russia

^{1✉} ludaananyina@mail.ru

² sheanton@mail.ru

³ Perm Agricultural Research Institute – branch of the PFRC of the UB RAS, Perm, Russia, frolova.al87@mail.ru

⁴ Institute of Technical Chemistry UB RAS – branch of the PFRC of the UB RAS, Perm, Russia, agorbunof@mail.ru

Abstract. This study demonstrates the ability of the *Salinicola socius* SMB35^T strain to synthesize the phytohormone indole-3-acetic acid. Moreover, its production depended on the bacterial growth phase. The effect of inoculation with the auxin-synthesizing bacterium *S. socius* SMB35^T on the growth and cold tolerance of winter rapeseed was studied *in vitro*. The effect was found to be dose-dependent: the use of 40 mg of bacterial biomass for treating 1 g of seeds significantly reduced the height of shoots, and a trend towards a decrease in root length was noted, while the use of bacteria at a concentration two times lower leveled the negative effect and formed a trend towards an increase in the average root length and shoot height. The effect of bacterial treatment of rapeseed on growth (germination and biomass) under cold stress was studied. Seed inoculation with a growth-promoting concentration of the bacterium resulted in a 13.3% increase in seed germination and a 15.1% increase in seedling biomass under cold conditions. However, the use of the *S. socius* SMB35^T strain did not increase the levels of osmolytes, such as sucrose and proline, in rapeseed seedlings. On the contrary, a significant decrease in sucrose content by 35.5% was observed. These results suggest other mechanisms of bacterial-plant interaction that lead to increased cold tolerance in early plant development. Thus, determining concentration specificity and subsequently studying alternative molecular mechanisms of bacterial-plant interactions are key to development of effective microbial preparations.

Keywords: *Brassica napus* L., *Salinicola socius*, indole-3-acetic acid, cold, low temperature

For citation: Anan'ina L. N., Shestakova E. A., Startseva A. V., Gorbunov A. A. [Effect of the *Salinicola socius* SMB35^T bacteria on the growth of winter rape at low positive temperature]. *Bulletin of the Perm University. Biology*. Iss. 4 (2025): pp. 396-405. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.17072/1994-9952-2025-4-396-405>.

Acknowledgments: the work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation and the Ministry of Education and Science of Perm krai within the framework of scientific project no. 24-26-20070.

Введение

Успешная перезимовка озимого рапса напрямую связана с достижением растениями оптимального физиологического состояния до наступления зимы [Горлов, Бушнев, Асхадуллин, 2009; Бородько, 2020; Пилюк, 2020; Ториков и др., 2022; Фетюхин, Ахмадов, Алиев, 2023]. Ключевую роль в помощи растениям для преодоления абиотических стрессов, в том числе холода, играют ризосферные бактерии, стимулирующие рост растений (PGPB – Plant Growth-Promoting Bacteria). Большинство этих бактерий обладают способностью улучшать характеристики роста и урожайность в естественных условиях, осуществляя азотфиксацию, синтезируя фитогормоны, а также увеличивая доступность питательных веществ у многих растений, проводя дезаминирование молекулы-предшественника фитогормона этилена, накопление которого в корневой ткани, как известно, вредно для роста и развития корней [Glick, Penrose, Jiping, 1998; Максимов и др., 2015], индуцируя системную устойчивость растений к патогенным микроорганизмам [Lavania et al., 2006] и антагонизм по отношению к вредным микроорганизмам [Singh et al., 2010; ALKahtani et al., 2020]. В связи с этим обработка семенного материала перед посевом биологическими препаратами является перспективным приемом повышения устойчивости растений озимых культур к неблагоприятным условиям зимнего периода [Горьков, 2019; Березнов, Астарханова, Шаповал, 2022; Старцева, Акманаев, Майсак, 2024].

Одними из представителей группы PGPB являются бактерии рода *Salinicola*. В наземных биотопах бактерии рода *Salinicola* являются типичными компонентами микробиомов галофитов и населяют в том числе ткани надземных и подземных органов растений. Представители этого рода влияют на рост и развитие растений, разрушая токсичные органические соединения, увеличивая доступность минеральных компонентов, модулируя выработку или деградацию фитогормонов, а также подавляя патогены или поставляя растениям органические соединения, способствующие солеустойчивости [Plotnikova et al., 2020].

Цель исследования – оценить влияние бактерии *Salinicola socius* SMB35^T на ростовые показатели озимого рапса в опытах *in vitro*.

Материалы и методы исследования

Объект исследования. В работе использовали штамм *S. socius* SMB35^T. В качестве тестового объекта выбрали озимый рапс (*Brassica napus* L.) сорта 'Северянин' категории «первая репродукция» (PC1). Семена рапса предоставлены Пермским НИИСХ.

Среды и условия культивирования бактерий. Штамм бактерии хранили на плотной богатой питательной среде Раймонда [Plotnikova et al., 2011], содержащей хлорид натрия в концентрации 3%. Дальнейшие эксперименты проводили с использованием жидкой минеральной среды Раймонда (MCP) [Plotnikova et al., 2011]. В MCP добавляли хлорид натрия до концентрации 5%. Источником углерода и энергии в MCP служила глюкоза в конечной концентрации 1 г/л. Культивирование проводили в течение 24 ч при 25°C на роторной качалке со скоростью вращения 100 об/мин. Далее биомассу собирали, центрифуги-

гируя суспензию клеток при 10 000 x g в течение 10 мин в условиях комнатной температуры. Культуральную жидкость сливали.

Изучение роста бактерии в условиях низкой температуры. Культивирование бактерии осуществляли на агаризованной МСР [Plotnikova et al., 2011], содержащей 2% хлорида натрия и глюкозу в конечной концентрации 1 г/л. Инокулятом служила культура, выращенная до стационарной фазы в жидкой МСР с тем же количеством хлорида натрия и ростового субстрата. Биомассу на плотную питательную среду наносили штрихом микробиологической петлей. Рост при температуре 5°C оценивали каждые седьмые сутки.

Детекция индол-3-уксусной кислоты. Штамм *S. socius* SMB35^T выращивали в 1% триптоновом бульоне как с добавлением триптофана (150 мг/л), так и без него. Предварительно среду разливали в колбы по 20 мл, автоклавировали при 0.5 АТМ в течение 30 мин. Затем вносили бактерию и инкубировали в течение 2 сут. Из полученной суспензии отбирали 1.5 мл и центрифугировали при 10 000 x g в течение 2 мин. Определение индол-3-уксусной кислоты (ИУК) проводили в 1.5 мл супернатанта согласно методике, описанной Glickmann, Dessaux [1995]. Пробирки инкубировали в темноте при комнатной температуре в течение 30 мин. Развитие розовой окраски свидетельствовало о присутствии ИУК. В качестве отрицательного контроля использовали среду без добавления бактерии.

Обработка семян рапса бактерией. Семена стерилизовали, сначала помещая на 15 мин в 3% раствор перекиси водорода, затем выдерживая в течение 15 мин в 1% растворе перманганата калия. На следующем этапе семена отмывали дистиллированной водой до получения прозрачного раствора. Как правило, инокуляцию семян проводят, выдерживая их в суспензии клеток бактерии. Однако концентрация хлорида натрия в среде культивирования бактерии является слишком высокой для растений. В связи с этим обработку осуществляли сырой биомассой бактерии. К 40 или 20 мг сырой биомассы бактерии добавляли 1 г стерилизованных семян озимого рапса. Выдерживали в течение 30 мин, периодически встряхивая для распределения бактерий по семенам.

Условия культивирования растений. Эксперименты проводили в чашках Петри. 25 семян рапса помещали на фильтровальную бумагу, предварительно увлажненную 5 мл дистиллированной воды. Инкубирование проводили в темноте при 25°C или 5°C. В ходе эксперимента дистиллированную воду добавляли порциями по 1 мл с разной периодичностью в зависимости от температуры: при 25°C – каждые третьи сутки, а при 5°C – каждые седьмые сутки. Всхожесть, высоту побегов и длину корней определяли на седьмые сутки культивирования. Сырую массу (СМ) проростков определяли через 14 дней. Для этого проростки промокали фильтровальной бумагой, затем взвешивали.

Подготовка экстрактов из проростков растений. Проростки, отобранные из одной чашки, промывали 3 раза дистиллированной водой, затем растирали с кварцевым песком. К полученной суспензии добавляли 80% раствор этанола. Экстракцию проводили в течение 2 ч на встряхивателе АВ 30-С (Россия) при комнатной температуре. Остатки клеток и кварцевый песок осаждали, центрифугируя при 10 000 x g в течение 3 мин. Раствор отбирали. Экстракт упаривали при температуре 45°C.

Спектроскопия протонного магнитного резонанса. Определение осмолитов проводили с помощью спектроскопии протонного магнитного резонанса на приборе Bruker Avance Neo 400 (400 МГц). При записи спектров ЯМР ¹H использовали 30-градусные импульсы, релаксационная задержка составляла 1 с, ширина спектрального окна была равна 5.9 кГц. Данные обрабатывали с помощью программного обеспечения Topspin, версия 4.0.8 (Bruker Corporation, США). Высушенный осадок этанольного экстракта растворяли в 0.50 мл D₂O (ООО «Кемикал Лайн», Россия). Спектр предварительно записывали с 8 накоплениями, затем в пробу вносили внутренний стандарт, серную кислоту и записывали спектр с 64 накоплениями, который использовали для количественных расчетов. 0.7–1.0 мг серной кислоты вносили с целью смещения химических сдвигов пролина в слабое поле, в область, свободную от сигналов других веществ. Химические сдвиги (δ) указывали в миллионных долях (м.д.) и измеряли относительно сигнала HDO (4.71 м.д.). В качестве внутреннего стандарта использовали малеиновую кислоту, после подкисления имеющую сигнал при 6.32–6.35 м.д. Идентификацию сигналов в спектре проводили добавлением в исследуемые растворы коммерческих препаратов соответствующих соединений. Химические сдвиги пиков, использованных для интегрирования, составили 4.14 м.д. для пролина (α-CH, дублет дублетов) и 5.40 м.д. – для сахарозы (аномерный протон, дублет). Количества соединений рассчитывали путем сравнения площади пика соединения с площадью пика внутреннего стандарта [Nagata et al., 1996].

Поиск генов в геноме *S. socius* SMB35^T. Поиск генов, кодирующих ферменты синтеза ИУК, осуществляли в геноме *S. socius* SMB35^T, депонированном в Genbank под номером PRJNA357614.

Статистическая обработка результатов. Оценку статистической достоверности различий средних значений проводили с использованием t-критерия Стьюдента в Microsoft Office Excel 2003.

Результаты и их обсуждение

Штамм *S. socius* SMB35^T проверили на способность синтезировать ИУК. Для этого бактерию выращивали в 1% триптовом бульоне с добавлением триптофана. Детекцию ИУК проводили, отбирая образцы клеточной суспензии через 5, 24 и 48 ч культивирования. Добавление реактива Сальковского спустя 5 ч культивирования не привело к изменению цвета культуральной жидкости. После внесения реактива Сальковского в суточную культуру было отмечено изменение цвета культуральной жидкости на розовый, это свидетельствовало о наличии в среде гетероауксина. Спустя 48 ч культивирования также фиксировали положительный результат после добавления реактива. Кроме того, изучена способность исследованного штамма синтезировать ауксин в 1%-ном триптовом бульоне без дополнительного внесения триптофана. Спустя 48 ч инкубирования в культуральную жидкость добавили реактив Сальковского, что привело к развитию розового окрашивания раствора. Зависимость синтеза ИУК от фазы роста описана для представителей разных таксонов прокариот. У большинства из них, за исключением штаммов рода *Pseudomonas*, максимальное количество этого соединения было обнаружено в стационарной фазе роста [Мирзоева, Широких, 2010]. В геноме штамма *S. socius* SMB35^T осуществлен поиск генов, ассоциированных с синтезом ауксинов. В настоящей работе гены, продукты которых идентифицированы как ферменты синтеза гетероауксина, в геноме бактерии *S. socius* SMB35^T не выявлены. Представители многих видов рода *Salinicola*, например, *S. halimionae*, *S. aestuarinus*, *S. endophyticus*, *S. halophyticus*, *S. lusitanus* и *S. salarius*, в том числе штаммы вида *S. socius*, продуцируют гормон ИУК [Fidalgo et al., 2019; Lavanya, Deepika, Sridevi, 2023]. Однако, несмотря на это, конкретные метаболические пути, обеспечивающие выработку ИУК, как и гены, кодирующие ферменты его синтеза, у представителей этого рода до сих пор не описаны. Между тем, в геноме исследованного штамма присутствовал ген, продукт которого осуществляет экскрецию гетероауксина из клетки (GenBank №OLO06226), что также косвенно подтверждает способность бактерии синтезировать ИУК.

Влияние инокуляции семян бактерией *S. socius* SMB35^T на рост озимого рапса. В данной работе изучили влияние разного количества бактерии *S. socius* SMB35^T на морфометрические показатели проростков озимого рапса при оптимальной температуре, соответствующей 25°C (табл. 1).

Таблица 1

Влияние инокуляции семян бактерией *S. socius* SMB35^T на рост озимого рапса при оптимальной температуре

[The effect of seed inoculation with *S. socius* SMB35^T on the growth of winter rapeseed at optimal temperature]

Вариант эксперимента	Параметр			
	Высота стеблей, мм	Длина корней, мм	Мин-Макс высота стеблей, мм	Мин-Макс длина корней, мм
40 мг бактериальной биомассы/г семян				
Контроль	29.4±10.0	44.2±35.9	3–50	5–120
Семена, обработанные бактерией	23.5±11.0*	37.9±31.8	3–50	3–110
20 мг бактериальной биомассы/г семян				
Контроль	37.4±14.3	44.3±36.9	5–75	2–125
Семена, обработанные бактерией	40.2±13.9	48.9±38.8	15–80	4–135

Примечание: * –различия достоверны при $p \leq 0.01$. Три биологических повторности.

Для этого использовали 20 или 40 мг сырой бактериальной биомассы для обработки 1 г семян. Показано, что действие бактерии зависело от количества биомассы. Так, использование 40 мг биомассы значительно снижало высоту побегов, отмечен тренд к уменьшению длины корней (табл. 1). Помимо этого, значения минимальной и максимальной величин корней у проростков, выросших из инокулированных бактерией семян, были ниже, чем в контрольной группе (табл. 1), в то время как снижение количества биомассы бактерии до 20 мг в обработке семян нивелировало негативный эффект. Более того, хотя достоверно значимого различия высоты побегов и длины корней между проростками, выросшими из обработанных бактерией семян, и контролем не получено, очевидна тенденция на увеличение этих показателей в опытной группе (табл. 1). Кроме того, у инокулированных бактерией проростков наблюдалось возрастание минимальных и максимальных значений высоты побегов и длины корней по сравнению с контролем (табл. 1), что указывает на стимуляцию роста. Опираясь на полученные данные, в последующих экспериментах использовали 20 мг биомассы штамма *S. socius* SMB35^T.

Таким образом, характер действия бактерий на рост растений напрямую зависит от их концентрации. Оптимальные концентрации способствуют развитию растений, стимулируя, в частности, рост корней и побегов, вероятно, посредством синтеза фитогормонов. В то же время превышение концентрации может привести к гормональным нарушениям, вызывая угнетение корнеобразования, морфологические аномалии и гибель растений [Li et al., 2022; dos Santos et al., 2022; Васильев и др., 2025].

Влияние инокуляции семян бактерией *S. socius* SMB35^T на всхожесть и биомассу проростков озимого рапса при низкой положительной температуре. Инкубирование штамма *S. socius* SMB35^T в течение длительного периода (мес.) позволило выявить его способность к росту при температуре 5°C. В конце третьей недели культивирования на плотной МСР штамм формировал в основании штриха множество мелких колоний диаметром менее 1 мм. В связи с тем, что исследованный штамм сохраняет физиологическую активность при низкой температуре, исследовали его влияние на рост озимого рапса в условиях холода. Семена озимого рапса обрабатывали бактерией и культивировали в течение 2 недель в темноте при температуре 5°C. В контрольной и опытной группах параметры всхожести семян отличались. Отмечено увеличение всхожести инокулированных бактерией семян на 13.3% (табл. 2). В конце эксперимента оценка сырой биомассы проростков показала ее возрастание на 15.1% в опытной группе.

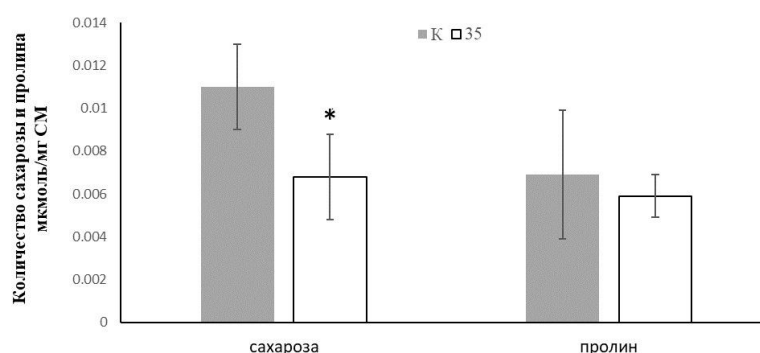
Таблица 2

Всхожесть семян и биомасса проростков озимого рапса при низкой положительной температуре
[Germination and biomass of winter rapeseed at low positive temperature]

Вариант эксперимента	Всхожесть, %	Изменение биомассы относительно контроля, %
Контроль	43.3±13.0	100±13.3
Опыт	56.6±13.3*	115.1±20.3*

Примечание: * – различия достоверны при $p \leq 0.05$. Три независимых эксперимента в 3-х биологических повторностях.

Холодовой стресс сопровождается обезвоживанием, повышением осмотического давления, а также окислительным стрессом. Это приводит к повреждению мембран и ДНК, денатурации белков. Осмолиты в значительной степени снижают негативное действие стрессовых факторов на макромолекулы и компоненты клеток. Известно, что в адаптации растений к низким температурам немаловажную роль играют низкомолекулярные органические соединения, такие как сахара и аминокислоты, в частности сахароза и пролин [Moieni-Korbekandi, Karimzadeh, Sharifi, 2014; Jankovska-Bortcevič et al., 2019; Lei et al., 2019]. Поэтому было исследовано влияние бактерии на синтез клетками растений этих соединений. Сравнение внутриклеточных количеств сахарозы и пролина в проростках из семян, обработанных клетками *S. socius* SMB35^T, и проростках из контрольной группы выявило достоверно значимое снижение количества сахарозы на 35.5% в проростках опытной группы (см. рисунок). В меньшей степени изменилось содержание пролина. Отмечена тенденция к снижению его количества на 13.4% в проростках из семян, обработанных бактерией. Как правило, у инокулированных бактерией растений значительно повышался уровень пролина, но на более поздних стадиях роста [Barka et al., 2006; Mishra et al., 2009].



Влияние инокуляции семян бактерией *S. socius* SMB35^T на аккумуляцию осмолитов проростками рапса при низкой положительной температуре:

К – проростки из семян, необработанных бактерией, 35 – проростки из семян, обработанных бактерией,
* – различия достоверны при $p \leq 0.01$. Три независимых эксперимента в 3-х биологических повторностях

[The effect of seed inoculation with *S. socius* SMB35^T on the accumulation of osmolytes by rapeseed seedlings at low positive temperatures:

K – seedlings from seeds untreated with the bacterium, 35 – seedlings from seeds treated with the bacterium,
* – the differences are significant at $p \leq 0.01$. Three independent experiments in 3 biological replications]

Между тем, к снижению количества пролина в клетках растений в условиях холодового стресса может приводить предварительная обработка ауксинами [Jankauskienė et al., 2022]. В некоторых случаях ауксины могут ингибировать процессы, приводящие к накоплению сахарозы [Тао et al., 2022]. По-видимому, это связано с развитием метаболических изменений, способствующих повышению холодоустойчивости за счет других механизмов. Так, было показано, что ауксины содействуют холодовой акклиматизации, увеличивая выработку дегидринов (термостабильных гидрофильных белков), а также модулируя состав и количество полиаминов, снижая содержание малонового диальдегида и перекиси водорода [Jankauskienė et al., 2022; Jankovska-Bortkevič et al., 2023]. Малоновый диальдегид служит основным маркером перекисного окисления липидов и конечным продуктом повреждения жирных кислот, в то время как перекись водорода сама по себе является свободным радикалом, который генерирует другие более опасные свободные радикалы и участвует в окислительном повреждении клеток.

Поскольку пролин и сахароза играют важную роль в борьбе растений с окислительным стрессом, действуя как эффективные антиоксиданты, удаляя активные формы кислорода и стабилизируя клеточные компоненты, такие как мембраны и белки [Hayat et al., 2012], спад их количества может быть следствием снижения негативного действия окислительного стресса, вызванного низкой температурой.

Растительный гормон гетероауксин является одним из ключевых регуляторов роста и развития растений, занимая ключевое место, обеспечивая интеграцию сигналов абиотического стресса и контроле последующих реакций [Musazade, Mrisho., Fen, 2025]. В условиях холода уровень синтеза ИУК снижается и нарушается его транспорт между клетками. Это обусловлено, в том числе, нарушением работы PIN-белков, которые играют ключевую роль в базипетальном транспорте гетероауксина [Zhu et al., 2015]. Бактерии, продуцирующие ИУК, могут способствовать восстановлению его уровня в клетках растения, тем самым повышая устойчивость к стрессам и стимулируя рост. Это взаимодействие делает ауксинпродуцирующие бактерии перспективным инструментом для создания биопрепаратов, помогающих растениям справляться с неблагоприятными абиотическими факторами внешней среды.

Заключение

Проведенное исследование позволило установить существенное влияние инокуляции семян ауксин-синтезирующей бактерией *S. socius* SMB35^T на рост озимого рапса, который носит дозозависимый характер. Полученные результаты указывают на то, что оптимальная концентрация бактериального штамма SMB35 стимулирует ключевые показатели роста, такие как длина побегов и корней. В то же время превышение оптимальной концентрации приводит к эффекту ингибирования. Применение бактериальных клеток в концентрации, стимулирующей рост, позволило добиться статистически значимого увеличения всхожести семян и биомассы проростков рапса при низкой положительной температуре. Несмотря на это, инокулирование семян бактерией *S. socius* SMB35^T не привело к увеличению количества осмолитов (сахарозы и пролина) в проростках рапса. Таким образом, определение концентрационной специфичности взаимодействия «бактерия – растение» является важным условием для разработки эффективных и экологически безопасных микробных препаратов для сельского хозяйства. Перспективы работы видятся в продолжении исследований молекулярных аспектов взаимодействия растений с бактериями.

Список источников

1. Березнов А.В., Астарханова Т.С., Шаповал О.А. Регуляторы роста растений повышают продуктивность озимого рапса // Защита и карантин растений. 2022. № 10. С. 19–20. DOI: 10.47528/1026-8634_2022_10_19. EDN: YQGBKB.
2. Бородько А.А. Влияние различных сроков сева на развитие растений и перезимовку рапса озимого в условиях центральной части Беларуси // Земледелие и селекция в Беларуси. 2020. Т. 56. С. 124–131. EDN: AUAYJE.
3. Васильев И.А. и др. Влияние активности микроорганизмов, выделенных из ризосферы *Hedysarum zundukii*, на рост и развитие растений пшеницы // Известия ВУЗов. Прикладная химия и биотехнология. 2025. Т. 15, № 1. С. 17–23. DOI: 10.21285/achb.958. EDN: WZTRIV.
4. Горлов С.Л., Бушнев А.С., Асхадуллин Д.Ф. Оптимизация сроков сева озимого рапса в различных зонах // Земледелие. 2009. № 7. С. 34–35. EDN KXCFCR.
5. Горьков А.А. Агробиологическое обоснование применения биопрепаратов для озимой пшеницы // Вестник аграрной науки. 2019. № 5. С. 133–139. DOI: 10.15217/issn2587-666X.2019.5.133. EDN: YIVHXS.
6. Максимов И. и др. Стимулирующие рост растений бактерии в регуляции устойчивости растений к стрессовым факторам // Физиология растений. 2015. Т. 62. С. 763–775. DOI: 10.7868/S0015330315060111. EDN: UIMFKT.
7. Мерзаева О.В., Широких И.Г. Образование ауксинов эндофитными актинобактериями озимой ржи // Прикладная биохимия и микробиология. 2010. Т. 46, № 1. С. 51–57. EDN: KZMAST.

8. Пилюк Я.Э. Перезимовка и продуктивность озимого рапса в Беларуси и пути их повышения // Земледелие и селекция в Беларуси. 2020. № 56. С. 224–235. EDN: RZMWSX.
9. Старцева А.В., Акманаев Э.Д., Майсак Г.П. Особенности осеннего развития тритикале озимой при использовании биологических препаратов в условиях среднего Предуралья // Journal of Agriculture and Environment. 2024. № 4. DOI: 10.23649/JAE.2024.44.5. EDN: CMSVUG.
10. Ториков В.Е. и др. Урожайность масло-семян озимого рапса в зависимости от типа почв и уровня минерального питания // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 6(94). С. 26–33. DOI: 10.52691/2500-2651-2022-94-6-26-33. EDN: EKKYSE.
11. Фетюхин И.В., Ахмадов Б.Р., Алиев В.И. Сроки посева озимого рапса в условиях приазовской зоны Ростовской области // Аграрная наука и производство в условиях становления цифровой экономики Российской Федерации: материалы Междунар. науч.-практ. конф.: в 3 т. Персиановский, 2023. Т. 1. С. 178–182. EDN: QMOIXT.
12. ALKahtani M.D.F. et al. Isolation and characterization of plant growth promoting endophytic bacteria from desert plants and their application bioinoculants for sustainable agriculture // Agronomy. 2020. Vol. 10. Art. 1325. DOI: 10.3390/agronomy10091325. EDN: GKRTDS.
13. Barka A.E., Nowk J., Clement C. Enhancement of chilling resistance of inoculated grapevine plantlets with plant growth promoting rhizobacteria *Burkholderia phytofermans* strain PsJN // Applied and Environmental Microbiology. 2006. Vol. 72. P. 7246–7252.
14. dos Santos R.M. et al. Inoculum concentration and mineral fertilization: effects on the endophytic microbiome of soybean // Frontiers in Microbiology. 2022. Vol. 7, № 13. Art. 900980. DOI: 10.3389/fmicb.2022.900980.
15. Fidalgo C. et al. The endosphere of the salt marsh plant *Halimione portulacoides* is a diversity hotspot for the genus *Salinicola*: description of five novel species *Salinicola halimionae* sp. nov., *Salinicola aestuarinus* sp. nov., *Salinicola endophyticus* sp. nov., *Salinicola halophyticus* sp. nov., *Salinicola lusitanus* sp. nov. // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 2019. Vol. 69, № 1. P. 46–62. DOI: 10.1099/ijsem.0.003061. EDN: UVAKWY.
16. Glick B.R., Penrose D.M., Jiping L. A model for the lowering plant ethylene concentrations by plant growth promoting bacteria // Journal of Theoretical Biology. 1998. Vol. 190. P. 63–68.
17. Glickmann E., Dessaux Y. A critical examination of the specificity of the salkowski reagent for indolic compounds produced by phytopathogenic bacteria // Applied and Environmental Microbiology. 1995. Vol. 61, № 2. P. 793–796. DOI: 10.1128/aem.61.2.793-796.1995.
18. Hayat S. et al. Role of proline under changing environments: a review // Plant Signaling and Behavior. 2012. Vol. 7, № 11. P. 1456–1466. DOI: 10.4161/psb.21949.
19. Jankovska-Bortkevič E. et al. Response of winter oilseed rape to imitated temperature fluctuations in autumn-winter period // Environmental and Experimental Botany. 2019. Vol. 166. Art. 103801. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2019.103801.
20. Jankovska-Bortkevič E. et al. Effects of auxin-type plant growth regulators and cold stress on the endogenous polyamines in pea plants // Horticulturae. 2023. Vol. 9, № 2. Art. 244. DOI: 10.3390/horticulturae9020244.
21. Jankauskienė J. et al. The application of auxin-like compounds promotes cold acclimation in the oilseed rape plant // Life. 2022. Vol. 12, № 8. Art. 1283. DOI: 10.3390/life12081283.
22. Lavana M. et al. Induction of plant defense enzymes and phenolics by treatment with plant growth-promoting rhizobacteria *Serratia marcescens* NBRI1213 // Current Microbiology. 2006. Vol. 52. P. 363–368. DOI: 10.1007/s00284-005-5578-2.
23. Lavanya P.J., Deepika D.S., Sridevi M. Screening and isolation of plant growth promoting, halotolerant endophytic bacteria from mangrove plant *Avicennia officinalis* L. at coastal region of corangi andhra // Agricultural Science Digest. 2023. Vol. 43, № 1. P. 51–56. DOI: 10.18805/ag.D-5607.
24. Lei Y. et al. Physiological and molecular responses to cold stress in rapeseed (*Brassica napus* L.) // Journal of Integrative Agriculture. 2019. Vol. 18, № 12. P. 2742–2752.
25. Li Q. et al. A plant growth-promoting bacteria *Priestia megaterium* JR48 induces plant resistance to the crucifer black rot via a salicylic acid-dependent signaling pathway // Frontiers in Plant Science. 2022. Vol. 10, № 13. Art. 1046181. DOI: 10.3389/fpls.2022.1046181.
26. Mishra P.K. et al. Alleviation of cold stress in inoculated wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings with psychrotolerant *Pseudomonads* from NW Himalayas // Archives of Microbiology. 2011. Vol. 193, № 7. P. 497–513. DOI: 10.1007/s00203-011-0693-x.
27. Moieni-Korbekandi Z., Karimzadeh G., Sharifi M. Cold-induced changes of proline, malondialdehyde and chlorophyll in spring canola cultivars // Journal of Plant Physiology and Breeding. 2014. Vol. 4, № 1. P. 1–11.
28. Musazade E., Mrisho I.I., Fen X. Auxin metabolism and signaling: integrating independent mechanisms and crosstalk in plant abiotic stress responses // Plant Stress. 2025. Vol. 18. DOI: 10.1016/j.stress.2025.101034.

29. Nagata S., Adachi K., Sano H. NMR analyses of compatible solutes in a halotolerant *Brevibacterium* sp. // Microbiology. 1996. Vol. 142. P. 3355–3362.
30. Plotnikova E.G. et al. *Salinicola* // Bergey's Manual of Systematics of Archaea and Bacteria, 2020.
31. Plotnikova E.G. et al. *Thalassospira permensis* sp. nov., a new terrestrial halotolerant bacterium isolated from a naphthalene-utilizing microbial consortium // Mikrobiologiya. 2011. Vol. 80. P. 691–699. EDN: OFAEFV.
32. Singh N. et al. Biological control of *Macrophomina phaseolina* by chemotactic fluorescent *Pseudomonas aeruginosa* PN1 and its plant growth promontory activity in chir-pine // Crop Protection. 2010. Vol. 29, № 10. P. 1142–1147.
33. Tao X. et al. Understanding of exogenous auxin in regulating sucrose metabolism during postharvest tomato fruit ripening // Postharvest Biology and Technology. 2022. Vol. 189. Art. 111913. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2022.111913.
34. Zhu J. et al. Low temperature inhibits root growth by reducing auxin accumulation via ARR1/12 // Plant and Cell Physiology. 2015. Vol. 56, № 4. P. 727–736. DOI: 10.1093/pcp/pcu217.

References

1. Bereznov A.V., Astarkhanova T.S., Shapoval O.A. [Plant growth regulators increase the productivity of winter rape]. *Zaščita i karantin rastenij*. No. 10 (2022): pp. 19-20. (In Russ.). DOI: 10.47528/1026-8634_2022_10_19.
2. Borod'ko A.A. [The influence of different sowing dates on plant development and wintering of winter rape in the conditions of the central part of Belarus]. *Zemledelie i selekcija v Belarusi*. V. 56 (2020): pp. 124-131 (In Russ.).
3. Vasil'yev I.A., Karepova M.S., Markova Yu.A., Petrushin I.S. [Effect of the activity of microorganisms isolated from the rhizosphere of *Hedysarum zundukii* on the growth and development of wheat plants]. *Izvestija VUZov. Prikladnaja chimija i biotehnologija*. V. 15, No. 1 (2025): pp. 17-23 (In Russ.). DOI: 10.21285/achb.958.
4. Gorlov S.L., Bushnev A.S., Askhadullin D.F. [Optimization of sowing dates for winter rapeseed in different zones]. *Zemledelie*. No. 7 (2009): pp. 34-35. (In Russ.).
5. Gor'kov A.A. [Agrobiological justification for the use of biopreparations for winter wheat]. *Vestnik agrarnoj nauki*. No. 5 (2019): pp. 133-139. (In Russ.).
6. Maksimov I., Veselova S., Nuzhnaya T., Sarvarova Ye., Khayrullin R. [Plant growth-stimulating bacteria in the regulation of plant resistance to stress factors]. *Fiziologija rastenij*. V. 62 (2015): pp. 763-775. DOI: 10.7868/S0015330315060111. (In Russ.).
7. Merzaeva O.V., Shirokikh I.G. [Formation of auxins by endophytic actinobacteria of winter rye]. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya*. V. 44, No. 3 (2008): pp. 334-340. (In Russ.).
8. Pilyuk Ya.E. [Overwintering and productivity of winter rapeseed in Belarus and ways to improve them]. *Zemledelie i selekcija v Belarusi*. No. 56 (2020): pp. 224-235. (In Russ.).
9. Startseva A.V., Akmanayev E.D., Maysak G.P. [Features of autumn development of winter triticale using biological preparations in the conditions of the middle Cis-Urals]. *Journal of Agriculture and Environment*. No. 4 (2024). DOI 10.23649/JAE.2024.44.5.
10. Torikov V.Ye., Shakov V.M., Polenok A.V., Samotorov A.R., Sedov D.I. [Yield of winter rapeseed oilseeds depending on soil type and mineral nutrition level]. *Vestnik Brjanskoj gosudarstvennoj sel'skochozajstvennoj akademii*. No. 6(94) (2022): pp. 26-33. (In Russ.). DOI: 10.52691/2500-2651-2022-94-6-26-33. EDN: EKKYSE.
11. Fetyukhin I.V., Akhmadov B.R., Aliyev V.I. [Terms of sowing winter rapeseed in the conditions of the Azov zone of the Rostov region]. *Agrarnaja nauka i proizvodstvo v uslovijach stanovlenija cifrovoj èkonomiki Rossijskoj Federacii* [Agricultural science and production in the context of the formation of the digital economy of the Russian Federation: proceedings of the International Scientific and Practical Conference] Persianovskij, Donskoj agrarnyj universitet Publ., 2023, V. 1, pp. 178-182. (In Russ.). EDN: QMOIXT.
12. ALKahtani M.D.F., Fouda A., Attia K., Al-Otaibi F., Eid A.M., Ewais E., Hijri M., St-Arnaud M., Hassan S., Khan N., Hafez Y.M., Abdelaa K.A.A. Isolation and characterization of plant growth promoting endophytic bacteria from desert plants and their application bioinoculants for sustainable agricultureю. *Agronomy*. V. 10 (2020). Art. 1325. DOI: 10.3390/agronomy10091325.
13. Barka A.E., Nowk J., Clement C. Enhancement of chilling resistance of inoculated grapevine plantlets with plant growth promoting rhizobacteria *Burkholderia phytofermans* strain PsJN. *Applied and Environmental Microbiology*. V. 72 (2006): pp. 7246-7252.
14. dos Santos R.M., Cueva-Yesquén L.G., Garboggini F.F., Desoignies N., Rigobelo E.C. Inoculum concentration and mineral fertilization: effects on the endophytic microbiome of soybean. *Front. Microbiol.* V. 7, No. 13 (2022). Art. 900980. DOI: 10.3389/fmicb.2022.900980.

15. Fidalgo C., Proença D.N., Morais P.V., Henriques I., Alves A. The endosphere of the salt marsh plant *Halimione portulacoides* is a diversity hotspot for the genus *Salinicola*: description of five novel species *Salinicola halimionae* sp. nov., *Salinicola aestuarinus* sp. nov., *Salinicola endophyticus* sp. nov., *Salinicola halophyticus* sp. nov., *Salinicola lusitanus* sp. nov. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*. V. 69, No. 1 (2019): pp. 46-62. DOI: 10.1099/ijsem.0.003061.
16. Glick B.R., Penrose D.M., Jiping L. A model for the lowering plant ethylene concentrations by plant growth promoting bacteria. *Journal of Theoretical Biology*. V. 190 (1998): pp. 63-68.
17. Glickmann E., Dessaux Y. A critical examination of the specificity of the salkowski reagent for indolic compounds produced by phytopathogenic bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*. V. 61, No. 2 (1995): pp. 793-796. DOI: 10.1128/aem.61.2.793-796.1995.
18. Hayat S., Hayat Q., Alyemeni M.N., Wani A.S., Pichtel J., Ahmad A. Role of proline under changing environments: a review. *Plant Signaling and Behavior*. V. 7, No. 11 (2012): pp. 1456-1466. DOI: 10.4161/psb.21949. Epub 2012 Sep 5.
19. Jankovska-Bortkevič E., Gaveliene V., Koryzniene D., Jankauskiene, J., Mockeviciute R., Jurkoniene S. Response of winter 'oilseed rape to imitated temperature fluctuations in autumn-winter period. *Environmental and Experimental Botany*. V. 166 (2019): Art. 103801. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2019.103801.
20. Jankovska-Bortkevič E., Katerova Z., Todorova D., Jankauskienė J., Mockevičiūtė R., Sergiev I., Jurkonienė S. Effects of auxin-type plant growth regulators and cold stress on the endogenous polyamines in pea plants. *Horticulturae*. V. 9, No. 2 (2023). Art. 244. DOI: 10.3390/horticulturae9020244.
21. Jankauskienė J., Mockevičiūtė R., Gavelienė V., Jurkonienė S., Anisimovienė N. The application of auxin-like compounds promotes cold acclimation in the oilseed rape plant. *Life*. V. 12, No. 8 (2022). Art. 1283. DOI: 10.3390/life12081283.
22. Lavania M., Chauhan P.S., Chauhan S.V.S., Singh H.B., Nautiyal C.S. Induction of plant defense enzymes and phenolics by treatment with plant growth-promoting rhizobacteria *Serratia marcescens* NBRI1213. *Current Microbiology*. V. 52 (2006): pp. 363-368. DOI: 10.1007/s00284-005-5578-2.
23. Lavanya P.J., Deepika D.S., Sridevi M. Screening and isolation of plant growth promoting, halotolerant endophytic bacteria from mangrove plant *Avicennia officinalis* L. at coastal region of corangi Andhra. *Agricultural Science Digest*. V. 43, No. 1 (2023): pp. 51-56. DOI: 10.18805/ag.D-5607.
24. Lei Y., Tariq S., Yong C., Yan L., Xue-Kun Z., Xi-ling Z. Physiological and molecular responses to cold stress in rapeseed (*Brassica napus* L.). *Journal of Integrative Agriculture*. V. 18, No. 12 (2019): pp. 2742-2752.
25. Li Q., Hou Z., Zhou D., Jia M., Lu S., Yu J. A plant growth-promoting bacteria *Priestia megaterium* JR48 induces plant resistance to the crucifer black rot via a salicylic acid-dependent signaling pathway. *Front. Plant. Sci*. V. 10, No. 13 (2022). Art. 1046181. DOI: 10.3389/fpls.2022.1046181.
26. Mishra P.K., Bisht S.C., Ruwari P., Selvakumar G., Joshi G.K., Bisht J.K., Bhatt J.C., Gupta H.S. Alleviation of cold stress in inoculated wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings with psychrotolerant *Pseudomonads* from NW Himalayas. *Archives of Microbiology*. V. 193, No. 7 (2011): pp. 497-513. DOI: 10.1007/s00203-011-0693-x.
27. Moieni-Korbekandi Z., Karimzadeh G., Sharifi M. Cold-induced changes of proline, malondialdehyde and chlorophyll in spring canola cultivars. *Journal of Plant Physiology and Breeding*. V. 4, No. 1 (2014): pp. 1-11.
28. Musazade E., Mrisho I.I., Fen X. Auxin metabolism and signaling: integrating independent mechanisms and crosstalk in plant abiotic stress responses. *Plant stress*. V. 18 (2025). DOI: 10.1016/j.stress.2025.101034.
29. Nagata S., Adachi K., Sano H. NMR analyses of compatible solutes in a halotolerant *Brevibacterium* sp. *Microbiology*. V. 142 (1996): pp. 3355-3362.
30. Plotnikova E.G., Anan'ina L.N., Ariskina E.V., Evtushenko L.I. *Salinicola*. Bergey's Manual of Systematics of Archaea and Bacteria, 2020.
31. Plotnikova E.G., Anan'ina L.N., Krausova V.I., Ariskina E.V., Prisyazhnaya N.V., Lebedev A.T., Demakov V.A., Evtushenko L.I. *Thalassospira permensis* sp. nov., a new terrestrial halotolerant bacterium isolated from a naphthalene-utilizing microbial consortium. *Mikrobiologiya*. V. 80 (2011): pp. 691-699.
32. Singh N., Kumar S., Bajpai V.K., Dubey R.C., Maheashwari D.K., Kang S.C. Biological control of *Macrophomina phaseolina* by chemotactic fluorescent *Pseudomonas aeruginosa* PN1 and its plant growth promontory activity in chir-pine. *Crop Protection*. V. 29, No. 10 (2010): pp. 1142-1147.
33. Tao X., Wu Q., Fu X., Zhu B., Chen F., Liu B., Mao L., Luo Z., Li L., Ying T. Understanding of exogenous auxin in regulating sucrose metabolism during postharvest tomato fruit ripening. *Postharvest Biology and Technology*. V. 189 (2022). Art. 111913. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2022.111913.
34. Zhu J., Zhang K.-X., Wang W.-S., Gong W., Liu W.-C., Chen H.-G., H.-H., Lu Y.-T. Low temperature inhibits root growth by reducing auxin accumulation via ARR1/12. *Plant and Cell Physiology*. V. 56, No. 4 (2015): pp. 727-736. DOI: 10.1093/pcp/pcu217.

Статья поступила в редакцию 13.10.2025; одобрена после рецензирования 03.11.2025; принята к публикации 02.12.2025.

The article was submitted 13.10.2025; approved after reviewing 03.11.2025; accepted for publication 02.12.2025.

Информация об авторах

Л. Н. Ананьина – канд. биол. наук, старший научный сотрудник;

Е. А. Шестакова – инженер;

А. В. Старцева – научный сотрудник;

А. А. Горбунов – канд. хим. наук, старший научный сотрудник.

Information about the authors

L. N. Anan'ina, candidate of biology, senior researcher of laboratory;

E. A. Shestakova, engineer;

A. V. Startseva, researcher;

A. A. Gorbunov, candidate of chemical sciences, senior researcher.

Вклад авторов:

Ананьина Л. Н. – научное руководство; разработка концепции; получение финансирования; проведение исследования; формальный анализ; курирование данных; рецензирование; редактирование.

Шестакова Е. А. – проведение исследования.

Старцева А. В. – рецензирование; редактирование.

Горбунов А. А. – курирование данных; рецензирование; редактирование.

Contribution of the authors:

Anan'ina L. N. – supervision; conceptualization; funding acquisition; investigation; formal analysis; data curation; writing – original draft.

Shestakova E. A. – investigation.

Startseva A. V. – writing – review; editing.

Gorbunov A. A. – data curation; writing – review; editing.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

МИКРОБИОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 579.2

EDN: UGJFSX

doi: 10.17072/1994-9952-2025-4-406-414



Биопленки углеводородокисляющих бактерий антропогенно нарушенных почв г. Когалыма

А. С. Коробейникова¹, Д. М. Голубев¹, А. К. Тарасюк¹, О. С. Глинская¹,
Д. В. Уткин¹, О. В. Нечаева², Е. В. Глинская¹

¹ Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, Саратов, Россия

² Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина, Саратов, Россия

Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Михайлович Голубев, dimagolubev2018@yandex.ru

Аннотация. Определены биологические свойства и условия формирования биопленок углеводородокисляющими бактериями для их дальнейшего применения в очистке от нефтезагрязнений и рекультивации антропогенно нарушенных почв. Объектом исследования явились углеводородокисляющие микроорганизмы, выделенные из проб почв г. Когалыма: *Bacillus alcalophilus* WS-3027B, *B. funiculus* LY-2403G, *B. halodurans* MH-3011N, *B. niacini* TC-8101S, *B. psychrodurans* LV-1106E, *Curtobacterium flaccumfaciens* AE-0851V. Для выявления способности бактерий образовывать биопленки использовали метод определения степени формирования биопленок в стационарной фазе роста путем окрашивания кристаллическим фиолетовым по методу O'Toole et al. Обнаружено, что среди нефтеокисляющих микроорганизмов штаммы *B. alcalophilus* WS-3027B и *C. flaccumfaciens* AE-0851V характеризуются плотной продукцией биопленки, штаммы *B. halodurans* MH-3011N, *B. niacini* TC-8101S, *B. funiculus* LY-2403G, *B. psychrodurans* LV-1106E – умеренной продукцией биопленки. Установлены оптимальные условия образования биопленок исследуемыми микроорганизмами. Проведенное изучение биопленкообразования углеводородокисляющих бактерий открывает перспективы использования данных штаммов в качестве активных деструкторов нефтепродуктов при биоремедиации загрязненных почв.

Ключевые слова: биопленки, углеводородокисляющие микроорганизмы, почва, нефтяное загрязнение, биоремедиация

Для цитирования: Биопленки углеводородокисляющих бактерий антропогенно нарушенных почв г. Когалыма / А. С. Коробейникова, Д. М. Голубев, А. К. Тарасюк, Д. В. Уткин, О. В. Нечаева, Е. В. Глинская // Вестник Пермского университета. Сер. Биология. 2025. Вып. 4. С. 406–414. <http://dx.doi.org/10.17072/1994-9952-2025-4-406-414>.

Благодарности: авторы выражают благодарность кандидату географических наук, начальнику Отдела минералогических исследований Управления комплексных исследований керна (г. Когалым) Центра исследования керна и пластовых флюидов Филиала ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» Михаилу Владимировичу Решетникову за отбор образцов почв.

MICROBIOLOGY

Original article

Biofilms of hydrocarbon-oxidizing bacteria from anthropogenic disturbed soils in Kogalym

A. S. Korobeynikova¹, D. M. Golubev¹, A. K. Tarasyuk¹, O. S. Glinskaya¹,
D. V. Utkin¹, O. V. Nechaeva², E. V. Glinskaya¹

¹ Saratov National Research State University named after N.G. Chernyshevsky, Saratov, Russia

² Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin, Saratov, Russia

Corresponding author: Dmitry M. Golubev, dimagolubev2018@yandex.ru

Abstract. The article is devoted to the determination of the biological properties and conditions of biofilm formation by hydrocarbon-oxidizing bacteria for their further use in oil pollution treatment and remediation of anthropogenic disturbed soils. The object of the study is hydrocarbon-oxidizing microorganisms isolated from soil samples from Kogalym: *Bacillus alcalophilus* WS-3027B, *B. funiculus* LY-2403G, *B. halodurans* MH-

3011N, *B. niacini* TC-8101S, *B. psychrodurans* LV-1106E, *Curtobacterium flaccumfaciens* AE-0851V. Biofilm formation activities were evaluated by the crystal violet staining method for assessing biofilm formation degree in the stationary phase according to O'Toole et al. Among the hydrocarbon-oxidizing microorganisms, *B. alcalophilus* WS-3027B and *C. flaccumfaciens* AE-0851V were found to form dense biofilms, while *B. halodurans* MH-3011N, *B. niacini* TC-8101S, *B. funiculus* LY-2403G, and *B. psychrodurans* LV-1106E exhibited moderate biofilm production. Optimal conditions for the formation of biofilms by the studied microorganisms have been established. The conducted study of biofilm formation of hydrocarbon-oxidizing bacteria opens up prospects for the use of these strains as active destructors of petroleum products in the bioremediation of contaminated soils.

Keywords: soils, oil pollution, reclamation, agrochemical properties, phytotoxicity, ecological functions

For citation: Korobeynikova A. S., Golubev D. M., Tarasyuk A. K., Utkin D. V., Nechaeva O. V., Glinskaya E. V. [Biofilms of hydrocarbon-oxidizing bacteria from anthropogenic soils in Kogalym]. *Bulletin of the Perm University. Biology*. Iss. 4 (2025): pp. 405-414. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.17072/1994-9952-2025-4-406-414>.

Acknowledgments: the authors express their gratitude to Mikhail V. Reshetnikov, Candidate of Geographical Sciences, Head of the Department of Mineralogical Research (Kogalym) of the Department of Integrated Core Research (Kogalym) of the Center for Core and Reservoir Fluids Research of the Branch of «LUKOIL-Engineering» «PermNIPIneft» company, for soil sampling.

Введение

Нефть является наиболее востребованным энергетическим ресурсом и основой мирового экономического прогресса и процветания, однако, попадая в окружающую среду, она оказывает негативное воздействие, подвергая риску как качество жизни человечества, так и биосферу в целом [Luo et al., 2024]. Разливы нефти пагубно сказываются на плодородии почвы и приводят к потере сельскохозяйственных угодий [Ajona, Vasanthi, 2021]. Вследствие этого требуется применение современных стратегий в проведении очистительных мероприятий для удаления нефти и нефтепродуктов из почв [Tayyeb et al., 2024; Плешакова и др., 2025].

Углеводородные компоненты нефти, благодаря своей химической стабильности и высокой устойчивости к различным биологическим превращениям, являются опасными загрязнителями окружающей среды, трудности удаления их из почвы связаны со сложностью состава и гидрофобностью [Adeniji, Okoh, Okoh, 2017; Vu, Mulligan, 2022; Hegazy et al., 2024].

Физико-химические подходы к удалению разлитой нефти, несмотря на свое частое применение, обычно оказываются непрактичными как с экономической, так и экологической точки зрения [Rosenberg, 1993]. Поэтому биоремедиация, осуществляемая с помощью микроорганизмов, является наиболее подходящим вариантом очистки почвы от нефти и нефтепродуктов [Ajona, Vasanthi, 2021]. Этот метод основан на способности микроорганизмов вовлекать углеводороды в процессы метаболизма, используя их в качестве источника углерода и энергии и приводя к их минерализации с образованием углекислого газа, воды и безвредных соединений [Bala et al., 2022].

Многие бактерии, обитающие в почве, способны образовывать на поверхности клеточной стенки слизистый слой, защищающий их от действия неблагоприятных факторов окружающей среды (механического повреждения, высушивания, осмотического стресса и т.д.). Кроме того, за счет слизиобразования колонии микроорганизмов прочно удерживаются на твердой поверхности, способны к агрегации и образованию биопленок [Сопрунова, Нгуен Виет Тьен, 2010]. Биопленка представляет собой слой иммобилизованных клеточных полимеров, состоящих из полисахаридов, белков, нуклеиновых кислот, липидов и гумуса [Gupta, Thakur, 2016]. Именно благодаря биопленкам бактерии получают ряд преимуществ, таких как способность к адгезии, возможность обмена метаболитами и устойчивость к стрессам окружающей среды [Santos et al., 2018]. Исследование бактериальных биопленок и условий их формирования позволит глубже изучить экологию микроорганизмов и поможет в разработке биопрепаратов, направленных на очищение загрязненных углеводородами нефти почв [Verma et al., 2023; van Hoogstraten et al., 2024]. Оптимальная температура образования биопленки для большей части бактериальных организмов – в пределах от 20 до 30°C. Снижение температуры ниже 9–10°C резко ухудшает условия деятельности микроорганизмов [Прикладная экобиотехнология, 2012]. Кроме того, pH среды также оказывает влияние на формирование биопленки [Hostaka, Ciznár, Stefkovicová, 2010; Спирина, Русакова, 2021]. Способность углеводородоокисляющих бактерий к образованию биопленок в почвах с различными значениями pH (кислыми, нейтральными, щелочными) в широком диапазоне температур является важным фактором при разработке препаратов для биоремедиации почв от нефтезагрязнений.

Цель исследования – определить биологические свойства и условия формирования биопленок углеводородоокисляющими бактериями.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования явились 6 штаммов углеводородокисляющих бактерий (*Bacillus alcalophilus* WS-3027B, *B. funiculus* LY-2403G, *B. niacini* TC-8101S, *B. psychrodurans* LV-1106E, *B. halodurans* MH-3011N, *Curtobacterium flaccumfaciens* AE-0851V), выделенных из проб почв, отобранных на территории г. Когалыма Ханты-Мансийского автономного округа (ХМАО) Тюменской обл.

Город Когалым расположен в зоне вечной мерзлоты. Климат г. Когалыма, находящийся под непосредственным влиянием Арктики, характеризуется как резко континентальный (субарктический) с суровой продолжительной зимой и коротким теплым летом. Температура почвы на глубине 20 см составляет в среднем 8–9°C [График температуры: эл. ресурс]. Почва на территории г. Когалыма относится к группе дистрик-гистосолей – торфяно-болотных почв верховых болот, характеризующихся кислой средой [Клебанович, 2015; Почвы Когалыма: эл. ресурс; Дистрик-гистосоль: эл. ресурс].

В связи с этим представляет интерес изучение способности к формированию биопленок у представителей указанных выше видов при данных климатических и эдафических факторах.

Для оценки степени формирования биопленок использовали агаровые бактериальные культуры в стационарной фазе роста. Бактерии выращивали на ГРМ-агаре pH 7.2 (ФБУН ГНЦ ПМБ Роспотребнадзора, Оболенск) при температуре 28°C в течение 24 ч. Бактериальные взвеси готовили в 0.9% растворе хлорида натрия в концентрации, соответствующей 10 единицам отраслевого стандартного образца мутности (ОСО 42-28-59-85П (10 МЕ), ФГБУ «НЦЭСМП» Минздрава России), эквивалентной концентрации 1.1×10^8 КОЕ/мл *Bacillus* sp. [СО мутности...: эл. ресурс]. Взвеси микроорганизмов переносили в ГРМ-бульон (ФБУН ГНЦ ПМБ Роспотребнадзора, Оболенск) с pH, равной 3, 5, 7, 8 и 9, до конечной концентрации 5×10^7 КОЕ/мл. Культуры микроорганизмов в бульоне вносили по 200 мкл в лунки полистироловых 96-луночных плоскодонных планшетов для культивирования клеток и тканей (Jet Bio-Filtration, Китай, РУ № ФСЗ 2012/12495 от 02.06.2020 г.) и инкубировали при температурах 6, 28, 37, 42°C без встряхивания в течение 72 ч. В лунки отрицательного контроля вносили 200 мкл ГРМ-бульона pH 7.2. Далее из лунок планшетов отбирали среду с планктонными клетками, лунки промывали в течение 2–3 мин стерильным физиологическим раствором в объеме 200 мкл. Физиологический раствор полностью удаляли из лунок и высушивали планшеты в течение 20 мин. Окраску биопленок на поверхности лунок проводили по методу O'Toole, основанному на способности красителя кристаллического фиолетового связываться с клетками и внеклеточным матриксом биопленок [O'Toole, Kaplan, Kolter, 2000]. Для этого в лунки планшетов вносили по 200 мкл отфильтрованного 0.2% раствора кристаллического фиолетового в 96% этиловом спирте и инкубировали в течение 15 мин при комнатной температуре. Краситель удаляли из лунок. Несвязавшийся краситель отмывали троекратно водопроводной водой. Планшеты высушивали 30 мин. Затем в лунки добавляли 96% раствор этанола в объеме 200 мкл для элюции связанного с биопленкой красителя. Растворитель отбирали, помещали в чистые плоскодонные планшеты и измеряли оптическую плотность при длине волны 595 нм. В качестве контроля использовали лунки, инкубированные с чистой средой, подвергнутые аналогичным манипуляциям.

Количественную оценку образования биопленки в каждой лунке проводили по формуле [Adeniji, Okoh, Okoh, 2017]:

$$OD_{\text{отн}} = OD_{\text{абс}} / OD_{\text{с}},$$

где $OD_{\text{отн}}$ – относительная оптическая плотность красителя, $OD_{\text{абс}}$ – абсолютная оптическая плотность красителя, $OD_{\text{с}}$ – оптическая плотность (OD) отрицательного контроля + $3sd$.

Умеренную продукцию биопленки считали при $2 \times OD_{\text{с}} \leq OD_{\text{отн}} \leq 4 \times OD_{\text{с}}$, плотную продукцию считали при $4 \times OD_{\text{с}} < OD_{\text{отн}}$, слабую – при $OD_{\text{с}} < OD_{\text{отн}} < 2 \times OD_{\text{с}}$.

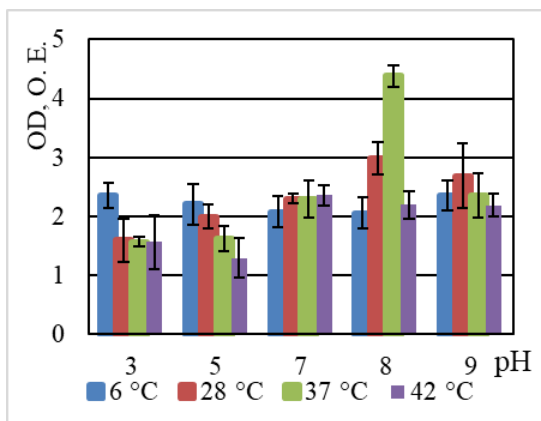
Статистическую обработку полученных данных осуществляли с применением общепринятых статистических методов [Урбах, 1975; Лакин, 1990] в программе Microsoft Office Excel (Microsoft, США).

Результаты и их обсуждение

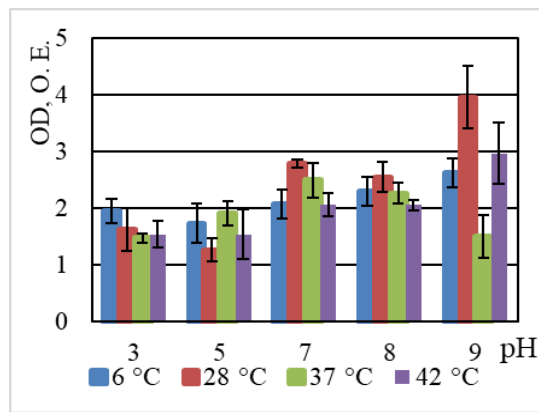
Полученные результаты представлены на рисунке и в таблице.

По нашим данным, максимальная продукция биопленки наблюдается у всех штаммов в температурном оптимуме их роста: *B. halodurans* MH-3011N – при 37°C, *B. niacini* TC-8101S – 30°C, *B. alcalophilus* WS-3027B – 30°C, *B. funiculus* LY-2403G – 22°C, *B. psychrodurans* LV-1106E – 22°C, *C. flaccumfaciens* AE-0851V – 30°C [Bacterial Diversity: эл. ресурс]. Среди изучаемых углеводородокисляющих микроорганизмов 2 штамма – *Bacillus alcalophilus* WS-3027B и *C. flaccumfaciens* AE-0851V – характеризуются плотной продукцией биопленки по (Stepanovic, Vuković, Hola [2007]), остальные 4 штамма – *B. halodurans* MH-3011N, *B. niacini* TC-8101S, *B. funiculus* LY-2403G, *B. psychrodurans* LV-1106E характеризуются умеренной продукцией биопленки (см. таблицу). Для большинства исследованных штаммов максимальная продукция биопленки наблюдалась при нейтральных и щелочных показателях среды. Это согласуется с литературными данными об адаптации гало- и алкалофильных бактерий к высоким значениям pH, к кото-

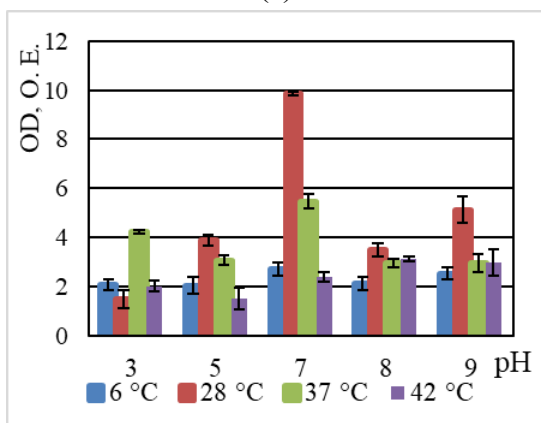
рым относятся *B. halodurans* MH-3011N, *B. alcalophilus* WS-3027B, к высоким значениям pH [Irwin, 2020; *Alkalihalobacillus*: эл. ресурс].



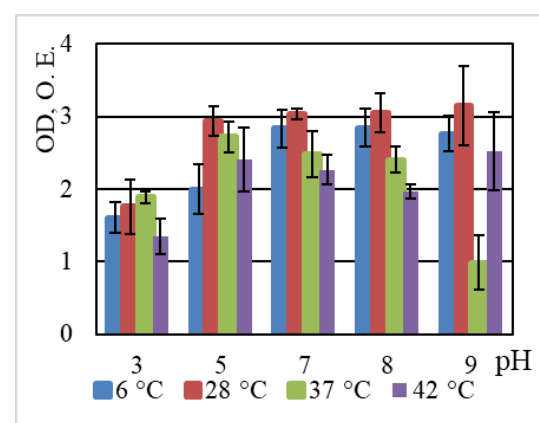
(a)



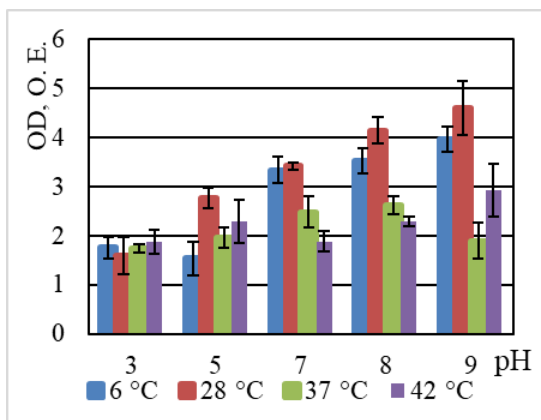
(б)



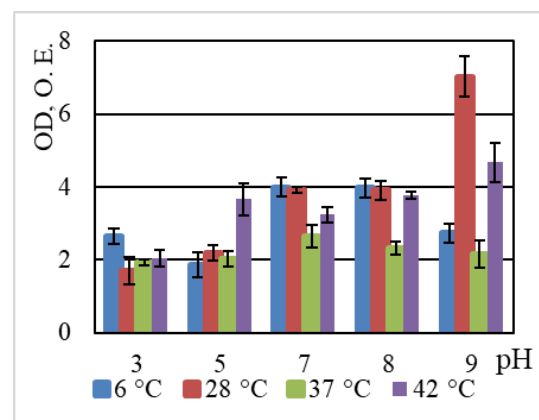
(в)



(г)



(д)



(е)

Способность к биопленкообразованию штаммами:

B. halodurans MH-3011N (a), *B. niacini* TC-8101S (б), *B. alcalophilus* WS-3027B (в),
B. funiculus LY-2403G (г), *B. psychrodurans* LV-1106E (д), *C. flaccumfaciens* AE-0851V (е)

Biofilm-forming capability of the strains:

B. halodurans MH-3011N (a), *B. niacini* TC-8101S (b), *B. alcalophilus* WS-3027B (c),
B. funiculus LY-2403G (d), *B. psychrodurans* LV-1106E (e), *C. flaccumfaciens* AE-0851V (e)]

Условия биопленкообразования микроорганизмами
[Conditions of biofilm formation by microorganisms]

Штамм	Характеристика
<i>B. halodurans</i> MH-3011N	Наибольшая продукция биопленки наблюдается в щелочной среде (pH 8) при температуре 37°C. При кислых pH (pH=3.5) максимальная продукция биопленки наблюдается при температуре 6°C. Продукция биопленки умеренная.
<i>B. niacini</i> TC-8101S	Наибольшая продукция биопленки наблюдается в щелочной среде (pH 9) при температуре 28°C. При кислых pH (pH=3) максимальная продукция биопленки наблюдается при температуре 6°C. Продукция биопленки умеренная.
<i>B. alcalophilus</i> WS-3027B	Наибольшая продукция биопленки наблюдается в нейтральной среде (pH 7) и в щелочной среде (pH 9) при температуре 28°C. Штамм характеризуется плотной продукцией биопленки (OD ₆₀₀ >4).
<i>B. funiculus</i> LY-2403G	Равномерная продукция биопленки наблюдается в широком диапазоне pH (от 5 до 9) при температуре 28 и 6°C. Продукция биопленки умеренная.
<i>B. psychrodurans</i> LV-1106E	Наибольшая продукция биопленки наблюдается в щелочной среде (pH 9) при температуре 28 и 6°C. Продукция биопленки умеренная.
<i>C. flaccumfaciens</i> AE-0851V	Наибольшая продукция биопленки наблюдается в щелочной среде (pH 9) при температуре 28°C. При кислых pH (pH 3) максимальная продукция биопленки наблюдается при температуре 6°C. Штамм характеризуется плотной продукцией биопленки (OD ₆₀₀ >4).

В то же время представляет интерес поиск штаммов, сохраняющих способность к формированию биопленки в экстремальных условиях субарктического пояса при низких температурах и кислой среде подзолистых почв, подзолов и верховых торфяников для практического использования при биоремедиации почв от нефтезагрязнений углеводородами. Установлено, что в кислых средах у всех штаммов сохранялась умеренная продукция биопленки.

Максимальная продукция биопленки у большинства штаммов наблюдалась при оптимальной температуре роста 28°C. Однако ряд штаммов сохраняли умеренную продукцию биопленки при низких температурах в кислых и слабокислых средах – условиях, имитирующих вечную мерзлоту. Следовательно, наиболее подходящими видами для биоремедиации почв г. Когалыма с учетом биопленкообразования и экологических условий (кислые почвы, низкие температуры) оказались *B. halodurans* MH-3011N, *B. niacini* TC-8101S, *C. flaccumfaciens* AE-0851V (таблица). В то же время вид *C. flaccumfaciens* AE-0851V в качестве свободноживущих бактерий длительно не сохраняется в почве, т. к. не образует спор [*Curtobacterium flaccumfaciens*: эл. ресурс].

Заключение

Таким образом, проведена оценка эффективности биопленкообразования 6 штаммов углеводородокисляющих микроорганизмов родов *Bacillus* и *Curtobacterium*, выделенных из проб почв г. Когалыма. Установлено, что штаммы углеводородокисляющих бактерий способны к максимальной продукции биопленки в оптимальных для своего роста условиях. В то же время отмечено, что представители *B. halodurans* MH-3011N, *B. niacini* TC-8101S, *C. flaccumfaciens* AE-0851V характеризуются умеренной способностью к пленкообразованию при низких температурах и кислых значениях pH среды, что свидетельствует о перспективности их использования при разработке биопрепаратов для биоремедиации почв от нефтезагрязнений в условиях субарктического пояса.

Полученные в результате исследования данные можно использовать для комплексного подхода при биоремедиации урбосистем и прогнозирования состояния антропогенно нарушенных территорий. Проведенное изучение биопленкообразования углеводородокисляющих бактерий, выделенных из проб почв г. Когалыма, открывает перспективы использования представителей данных видов в качестве активных деструкторов нефтепродуктов.

Список источников

1. График температуры грунта за 2022–2023 годы. Ханты-Мансийский авт. окр. Когалым // Климатический справочник Когалым. URL: https://climate-energy.ru/weather/2017/temp/kogalym_t_grunt_2017.php?ysclid=lsebpl6yar847311406 (дата обращения: 17.02.2024).
2. Дистрик-гистосоль // Китайско-русский словарь. URL: <https://www.zhonga.ru/chinese-russian/%E9%85%B8%E6%80%A7%E6%9C%89%E6%9C%BA%E5%9C%9F/7r2u2?mobile=false> (дата обращения: 17.02.2024).
3. Клебанович Н.В. Почвы мира в системе WRB: практикум для студентов. Минск, 2015. 41 с.
4. Лакин Г.Ф. Биометрия. М.: Высшая шк., 1990. 350 с.
5. Почвы Когалыма // Доморост. URL: <https://old.domorost.ru/maps/country/rossiya/region/hanty-mansijskij-avtonomnyj-okrug/district/kogalym/type/soil> (дата обращения: 17.02.2024).
6. Плешакова Е.В. и др. Геохимическая и микробиологическая индикация техногенной трансформации почв города Балаково (Саратовская область) // Трансформация экосистем. 2025. Т. 8, № 3(30). С. 99–117. DOI: 10.23859/estr-240514. EDN: MWDLQH.
7. Прикладная экобиотехнология / А.Е. Кузнецов, Н.Б. Градова, С.В. Лушников и др. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. Т. 1. 638 с.
8. СО мутности бактериальных взвесей (ОСО 42-28-85 + ОСО 42-28-86) // Лабораторная диагностика. URL: <https://www.ld.ru/laboratory/item-663491.html?ysclid=lsqb8w8qdy4552925345> (дата обращения: 17.02.2024).
9. Сопрунова О.Б., Нгуен Виет Тьен. Перспективы использования слизееобразующих бактерий в нефтяной отрасли // Юг России: экология, развитие. 2010. Т. 5, № 4. С. 91–93.
10. Спирина А.А., Русакова М.В. Влияние параметров окружающей среды на образование биопленок // Материалы XIII Междунар. студ. науч. конф. «Студенческий научный форум». 2021. URL: <https://scienceforum.ru/2021/article/2018024230?ysclid=lsqb8w8qdy45047624> (дата обращения: 17.02.2024).
11. Урбах В.Ю. Статистический анализ в биологических и медицинских исследованиях. М.: Медицина, 1975. 297 с.
12. Adeniji A.O., Okoh O.O., Okoh A.I. Analytical methods for the determination of the distribution of total petroleum hydrocarbons in the water and sediment of aquatic systems: A review // Journal of Chemistry. 2017. Vol. 2017. Art. 13. DOI: 10.1155/2017/5178937.
13. Ajona M., Vasanthi P. Bio-remediation of crude oil contaminated soil using recombinant native microbial strain // Environmental Technology & Innovation. 2021. Vol. 23. Art. 101635. DOI: 10.106/j.eti.2021.101635.
14. *Alkalihalobacillus alcalophilus* // BacDive. URL: <https://bacdive.dsmz.de/strain/572> (дата обращения: 17.02.2024).
15. Bacterial Diversity Metadatabase BacDive // BacDive. URL: <https://bacdive.dsmz.de> (дата обращения: 17.02.2024).
16. Bala S. et al. Recent strategies for bioremediation of emerging pollutants: a review for a green and sustainable environment // Toxics. 2022. Vol. 10, № 8. Art. 484. DOI: 10.3390/toxics10080484.
17. *Curtobacterium flaccumfaciens* // BacDive. URL: <https://bacdive.dsmz.de/strain/7309> (дата обращения: 17.02.2024).
18. Gupta A., Thakur I.S. Study of optimization of wastewater contaminant removal along with extracellular polymeric substances (EPS) production by a thermotolerant *Bacillus* sp. ISTVK1 isolated from heat shocked sewage sludge // Bioresource Technology. 2016. Vol. 213. P. 21–30. DOI: 10.1016/j.biotech.2016.02.040.
19. Hegazy G.E. et al. Isolation and characterization of *Candida tropicalis* B: a promising yeast strain for biodegradation of petroleum oil in marine environments // Microbial Cell Factories. 2024. Vol. 23, № 1. Art. 20. DOI: 10.1186/s12994-023-02292-y.
20. Hostacká A., Ciznár I., Stefkovicová M. Temperature and pH affect the production of bacterial biofilm // Folia Microbiologica. 2010. Vol. 55. P. 75–78. DOI: 10.1007/s12223-010-0012-y.
21. Irwin J.A. Overview of extremophiles and their food and medical applications // Physiological and biotechnological aspects of extremophiles. Academic Press, 2020. P. 65–87. DOI: 10.1016/B978-0-12-818322-9.00006-X.
22. Luo Q. et al. Bioremediation of diesel oil polluted seawater by a hydrocarbon-degrading bacterial consortium with oleophilic nutrients // Regional Studies in Marine Science. 2024. Vol. 71. Art. 103412. DOI: 10.21203/rs.3.rs-2637014/v1.
23. O'Toole G.A., Kaplan H.B., Kolter R. Biofilm formation as microbial development // Annual Review of Microbiology. 2000. Vol. 54. P. 49–79. DOI: 10.1146/annurev.micro.54.1.49.
24. Rosenberg E. Exploiting microbial growth on hydrocarbons – new markets // Trends in Biotechnology. 1993. Vol. 11, № 10. P. 419–424.

25. Santos A.L.S. et al. What are the advantages of living in a community? A microbial biofilm perspective! // *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*. 2018. Vol. 113, № 9. Art. 180212. DOI: 10.1590/0074-02760180212.
26. Stepanović S., Vuković D., Hola V. Quantification of biofilm in microtiter plates: overview of testing conditions and practical recommendations for assessment of biofilm production by staphylococci // *APMIS*. 2007. Vol. 115. P. 891–899. DOI: 10/1111/j.1600-0463.2007.apm_630.x.
27. Tayyeb S.R. et al. Microbial community response to biostimulation and bioaugmentation in crude oil-polluted sediments of the Persian Gulf: A microcosm simulation study // *Environmental Research*. 2024. Vol. 249. Art. 118197. DOI: 10.106/j.envres.2024.118197.
28. van Hoogstraten S.W.G. et al. Molecular imaging of bacterial biofilms – a systematic review // *Critical Reviews in Microbiology*. 2024. P. 971–992. DOI: 10.1080/1040841X.2023.2223704.
29. Verma R.K. et al. Role of microbial biofilms in bioremediation: Current perspectives // *Microbial Inoculants*. 2023. P. 253–276. DOI: 10.1016/B978-0323-99043-100001-3.
30. Vu K.A., Mulligan C.N. Remediation of oil-contaminated soil using Fe/Cu nanoparticles and biosurfactants // *Environmental Technology*. 2022. Vol. 44, № 22. P. 3446–3458. DOI: 10.1080/09593330.2022.2061381.

References

1. *Grafik temperatury grunta za 2022-2023 gody* [Graph of ground temperature for 2022-2023. Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug. Kogalym. Kogalym Climate Reference Book]. Available at: https://climate-energy.ru/weather/2017/temp/kogalym_t_grunt_2017.php?ysclid=lsebp6yar847311406 (accessed 17.02.2024). (In Russ.).
2. *Distrik-giistosol'. Kitajsko-russkij slovar'* [District-histosol. Chinese-Russian Dictionary]. Available at: <https://www.zhong.ru/chinese-russian/%E9%85%B8%E6%80%A7%E6%9C%89%E6%9C%BA%E5%9C%9F/7r2u2?mobile=false> (accessed 17.02.2024). (In Russ.).
3. Klebanovich N.V. *Počvy mira v sisteme WRB* [The soils of the world in the WRB system: a workshop for students of specialty 1-56 02 02]. Minsk, BSU Publ., 2015. 41 p. (In Russ.).
4. Lakin G.F. *Biometrija* [Biometrics]. Moscow, Vysšaja škola Publ., 1990. 350 p. (In Russ.).
5. *Počvy Kogalyma* [The soils of Kogalym. Domorost]. Available at: <https://old.domorost.ru/maps/country/rossiya/region/hanty-mansijskij-avtonomnyj-okrug/district/kogalym/type/soil> (accessed 17.02.2024). (In Russ.).
6. Pleshakova E.V. et al. [Geochemical and microbiological indication of technogenic transformation of soils in the city of Balakovo (Saratov region)]. *Transformacija ekosistem*. V. 8, No. 3(30) (2025): pp. 99-117. (In Russ.). DOI: 10.23859/estr-240514. EDN: MWDLQH.
7. Kuznetsov A.E., Gradova N.B., Lushnikov S.V. et al. *Prikladnaja ekobiotehnologija* [Applied ecobiotechnology]. Moscow, BINOM. Laboratorija znaniy Publ., 2012, V. 1. 638 p. (In Russ.).
8. *CO mutnosti bakterijnyh vzvesej* [Standard turbidity samples of bacterial suspensions (CCA 42-28-85 + CCA 42-28-86). Laboratory diagnostics]. Available at: <https://www.ld.ru/laboratory/item-663491.html?ysclid=lsq8f5jm44552925345> (accessed 17.02.2024). (In Russ.).
9. Soprunova O.B., Nguyen Viet Thien. [Prospects for the use of mucus-forming bacteria in the oil industry]. *Jug Russii: ekologija, razvitie*. V. 5, No. 4 (2010): pp. 91-93. (In Russ.).
10. Spirina A.A., Rusakova M.V. [Influence of environmental parameters on biofilm formation]. *Materialy XIII Meždunarodnoj studenčeskoj naučnoj konferencii* [Materials of the XIII International Student Scientific Conference "Student Scientific Forum - 2021"]. Available at: <https://scienceforum.ru/2021/article/2018024230?ysclid=lsqb8w8qdy45047624> (accessed 17.02.2024). (In Russ.).
11. Urbach V.Y. *Statističeskij analiz v biologičeskich i medicinskih issledovanijach* [Statistical analysis in biological and medical research]. Moscow, Medicina Publ., 1975. 297 p.
12. Adeniji A.O., Okoh O.O., Okoh A.I. Analytical methods for the determination of the distribution of total petroleum hydrocarbons in the water and sediment of aquatic systems: A review. *Journal of Chemistry*. V. 2017 (2017). Art. 13. DOI: 10.1155/2017/5178937.
13. Ajona M., Vasanthi P. Bio-remediation of crude oil contaminated soil using recombinant native microbial strain. *Environmental Technology & Innovation*. V. 23 (2021). Art. 101635. DOI: 10.106/j.eti.2021.101635.
14. *Alkalihalobacillus alcalophilus*. BacDive. Available at: <https://bacdive.dsmz.de/strain/572> (accessed 17.02.2024).
15. Bacterial Diversity Metadatabase BacDive. BacDive. Available at: <https://bacdive.dsmz.de> (accessed 17.02.2024).
16. Bala S. et al. Recent strategies for bioremediation of emerging pollutants: a review for a green and sustainable environment. *Toxics*. V. 10, No. 8 (2022). Art. 484. DOI: 10.3390/toxics10080484.
17. *Curtobacterium flaccumfaciens*. BacDive. Available at: <https://bacdive.dsmz.de/strain/7309> (accessed 17.02.2024).

18. Gupta A., Thakur I.S. Study of optimization of wastewater contaminant removal along with extracellular polymeric substances (EPS) production by a thermotolerant *Bacillus* sp. ISTVK1 isolated from heat shocked sewage sludge. *Bioresource Technology*. V. 213 (2016): pp. 21-30. DOI: 10.1016/j.biotech.2016.02.040.
19. Hegazy G.E. et al. Isolation and characterization of *Candida tropicalis* B: a promising yeast strain for biodegradation of petroleum oil in marine environments. *Microbial Cell Factories*. V. 23, No. 1 (2024). Art. 20. DOI: 10.1186/s12994-023-02292-y.
20. Hostacká A., Ciznár I., Stefkovicová M. Temperature and pH affect the production of bacterial biofilm. *Folia Microbiologica*. V. 55 (2010): pp. 75-78. DOI: 10.1007/s12223-010-0012-y.
21. Irwin J. A. Overview of extremophiles and their food and medical applications. In: Physiological and biotechnological aspects of extremophiles. Academic Press, 2020, pp. 65-87. DOI: 10.1016/B978-0-12-818322-9.00006-X.
22. Luo Q. et al. Bioremediation of diesel oil polluted seawater by a hydrocarbon-degrading bacterial consortium with oleophilic nutrients. *Regional Studies in Marine Science*. V. 71 (2024). Art. 103412. DOI: 10.21203/rs.3.rs-2637014/v1.
23. O'Toole G.A., Kaplan H.B., Kolter R. Biofilm formation as microbial development. *Annual Review of Microbiology*. V. 54 (2000): P. 49-79. DOI: 10.1146/annurev.micro.54.1.49.
24. Rosenberg E. Exploiting microbial growth on hydrocarbons – new markets. *Trends in Biotechnology*. V. 11, No. 10 (1993): pp. 419-424.
25. Santos A.L.S. et al. What are the advantages of living in a community? A microbial biofilm perspective! *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*. V. 113, No. 9 (2018). Art. 180212. DOI: 10.1590/0074-02760180212.
26. Stepanović S., Vuković D., Hola V. Quantification of biofilm in microtiter plates: overview of testing conditions and practical recommendations for assessment of biofilm production by staphylococci. *APMIS*. V. 115 (2007): pp. 891-899. DOI: 10.1111/j.1600-0463.2007.apm_630.x.
27. Tayyeb S.R. et al. Microbial community response to biostimulation and bioaugmentation in crude oil-polluted sediments of the Persian Gulf: A microcosm simulation study. *Environmental Research*. V. 249 (2024). Art. 118197. DOI: 10.106/j.envres.2024.118197.
28. van Hoogstraten S.W.G. et al. Molecular imaging of bacterial biofilms – a systematic review. *Critical Reviews in Microbiology*. (2024): pp. 971-992. DOI: 10.1080/1040841X.2023.2223704.
29. Verma R.K. et al. Role of microbial biofilms in bioremediation: Current perspectives. In: Microbial Inoculants, 2023, pp. 253-276. DOI: 10.1016/B978-0323-99043-100001-3.
30. Vu K.A., Mulligan C.N. Remediation of oil-contaminated soil using Fe/Cu nanoparticles and biosurfactants. *Environmental Technology*. V. 44, No. 22 (2022): pp. 3446-3458. DOI: 10.1080/09593330.2022.2061381.

Статья поступила в редакцию 03.11.2025; одобрена после рецензирования 06.11.2025; принята к публикации 02.12.2025.

The article was submitted 03.11.2025; approved after reviewing 06.11.2025; accepted for publication 02.12.2025.

Информация об авторах

Анастасия Сергеевна Коробейникова – korobeinikovaanastasija@yandex.ru, магистрант кафедры микробиологии и физиологии растений;

Дмитрий Михайлович Голубев – dimagolubev2018@yandex.ru, магистрант кафедры микробиологии и физиологии растений;

Анна Константиновна Тарасюк – annatarasyuk011201@gmail.com, аспирант, инженер кафедры микробиологии и физиологии растений;

Ольга Сергеевна Глинская – glinskayolya@gmail.com, студент кафедры романо-германской филологии и переводоведения;

Денис Валерьевич Уткин – twoduck@yandex.ru, д-р биол. наук, профессор, заведующий кафедрой микробиологии и физиологии растений;

Ольга Викторовна Нечаева – olgav.nechaeva@rambler.ru, д-р биол. наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории молекулярной микробиологии отдела молекулярной микробиологии и биоинформатики; профессор кафедры медицинской микробиологии им. акад. З.В. Ермольевой;

Елена Владимировна Глинская – elenavg-2007@yandex.ru, канд. биол. наук, доцент кафедры микробиологии и физиологии растений.

Information about the authors

Anastasia S. Korobeynikova – korobeinikovaanastasija@yandex.ru, master's student of the Department of Microbiology and Plant Physiology;

Dmitry M. Golubev – dimagolubev2018@yandex.ru, master's student of the Department of Microbiology and Plant Physiology;

Anna K. Tarasyuk – annatarasyuk011201@gmail.com, postgraduate student, Laboratory assistant at the Department of Microbiology and Plant Physiology;

Olga S. Glinskaya – glinskayolya@gmail.com, student, Department of Romance and Germanic Philology and Translation Studies;
Denis V. Utkin – twoduck@yandex.ru, Doctor of Biological Sciences, Professor, Head of the Department of Microbiology and Plant Physiology;
Olga V. Nechaeva – olgav.nechaeva@rambler.ru, Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Leading Researcher, Laboratory of Molecular Microbiology; Professor of the Department of Medical Microbiology named after Academician Z.V. Ermolyeva;
Elena V. Glinskaya – elenavg-2007@yandex.ru, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Department of Microbiology and Plant Physiology.

Вклад авторов:

Коробейникова А. С. – сбор материала; выделение и определение видов бактерий; анализ материала; проведение работы и анализ полученных результатов; интерпретация результатов; первичная обработка данных; написание работы; составление текста статьи.
Голубев Д. М. – анализ материала; проведение работы и анализ полученных результатов; написание работы; составление текста статьи.
Тарасюк А. К. – анализ материала; проведение работы и анализ полученных результатов; написание работы; составление текста статьи.
Глинская О. С. – написание работы; составление текста статьи.
Уткин Д. В. – разработка концепции работы; создание идеи исследования и составление плана работы; анализ материала; проведение работы и анализ полученных результатов; интерпретация результатов; первичная обработка данных; написание работы; составление текста статьи; внесение корректуры в обработанные текстовые данные по результатам эксперимента.
Нечаева О. В. – разработка концепции работы; создание идеи исследования и составление плана работы; внесение корректуры в обработанные текстовые данные по результатам эксперимента.
Глинская Е. В. – разработка концепции работы; создание идеи исследования и составление плана работы; сбор материала; выделение и определение видов бактерий; анализ материала; проведение работы и анализ полученных результатов; внесение корректуры в обработанные текстовые данные по результатам эксперимента.

Contribution of the authors:

Korobeynikova A. S. – collection of material; isolation and identification of bacterial species; analysis of the material, carrying out work and result analysis; result interpretation; interpretation of the results; primary data processing; writing the work; drafting the text of the article.
Golubev D. M. – analysis of the material; carrying out the work and analyzing the results obtained; writing the work; drafting the text of the article.
Tarasyuk A. K. – analysis of the material; carrying out the work and analyzing the results obtained; writing the work; drafting the text of the article.
Glinskaya O. S. – writing the work; drafting the text of the article.
Utkin D. V. – development of a work concept; creation of a research idea and drawing up a work plan; analysis of the material; carrying out work and analyzing the results; interpretation of the results; primary data processing; writing a paper; drafting an article; correcting the processed text data based on the results of the experiment.
Nechaeva O. V. – development of a work concept; creation of a research idea and preparation of a work plan; correction of processed text data based on the results of the experiment.
Glinskaya E. V. – development of a work concept; creation of a research idea and preparation of a work plan; collection of material; isolation and identification of bacterial species; analysis of the material; carrying out work and analyzing the results obtained; correction of processed text data based on the results of the experiment.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

МИКРОБИОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 579.26: 579.222

EDN: WLINVR

doi: 10.17072/1994-9952-2025-4-415-423



Штамм-деструктор фталатов *Stutzerimonas* sp. SJ1gcor из почвы береговой зоны техногенного галощелочного водоема

**Юлия Игоревна Нечаева^{1, 2, 3}, Анна Александровна Пьянкова^{2, 4✉},
Елена Генриховна Плотникова^{1, 2, 5}**

¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

² Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН – филиал ПФИЦ УрО РАН, Пермь, Россия

³ ulia-2012@mail.ru

^{4✉} pyankova.a@iegm.ru

⁵ peg@iegm.ru

Аннотация. Галощелочные среды представляют особый интерес для исследований, поскольку характеризуются уникальным разнообразием экстремофильных микроорганизмов, которые приспособлены к условиям высокой солености и щелочности среды. Среди экстремофильных микроорганизмов особенного внимания заслуживают биодеструкторы различных ароматических и алифатических соединений, оказывающих негативное воздействие на экосистемы и здоровье человека. Из почвы береговой зоны техногенного галощелочного водоема, расположенного на территории Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей (г. Березники, Пермский край), выделен штамм SJ1gcor, который идентифицирован как представитель рода *Stutzerimonas*. Анализ гена 16S рРНК данного штамма показал наибольший уровень сходства (99.69%) с гомологичным геном *Stutzerimonas zhaodongensis* NEAU-ST5-21^T. Штамм способен к росту в присутствии фталатов в качестве единственного источника углерода и энергии: дибутилфталата (ДБФ) и диметилфталата (ДМФ), а также возможных продуктов биодеструкции этих соединений: орто-фталевой (ОФК), бензойной кислот (БК) и бутанола. Выделенный штамм может развиваться на ДБФ в качестве субстрата с содержанием в среде культивирования до 70 г/л NaCl. Наиболее высокий показатель удельной скорости роста штамма SJ1gcor выявлен при культивировании клеток в среде с содержанием 30 г/л NaCl, а максимальная оптическая плотность зафиксирована на среде с содержанием 70 г/л NaCl. В геноме штамма выявлен ген *benA*, кодирующий α-субъединицу бензоат 1,2-диоксигеназы – ключевого фермента разложения БК. На основании полученных данных для штамма SJ1gcor предложены 2 альтернативных пути разложения ДБФ. Штамм *Stutzerimonas* sp. SJ1gcor представляет интерес для дальнейших исследований и перспективен для использования в биотехнологических целях.

Ключевые слова: галощелочной водоем, экстремофилы, *Stutzerimonas*, дибутилфталат, биодеструкция

Для цитирования: Нечаева Ю. И., Пьянкова А. А., Плотникова Е. Г. Штамм-деструктор фталатов *Stutzerimonas* sp. SJ1gcor из почвы береговой зоны техногенного галощелочного водоема // Вестник Пермского университета. Сер. Биология. 2025. Вып. 4. С. 415–423. <http://dx.doi.org/10.17072/1994-9952-2025-4-415-423>.

Благодарности: исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 124020500028-4). В работе использовано оборудование ЦКП «Исследования материалов и вещества» ПФИЦ УрО РАН.

MICROBIOLOGY

Original article

Phthalate-degrading strain *Stutzerimonas* sp. SJ1gcor from soil in the coastal zone of a technogenic saline-alkaline reservoir

Yulia I. Nechaeva^{1, 2, 3}, Anna A. Pyankova^{2, 4✉}, Elena G. Plotnikova^{1, 2, 5}

¹ Perm State University, Perm, Russia

² Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms, Perm, Russia

³ ulia-2012@mail.ru

^{4✉} pyankova.a@iegm.ru

⁵ peg@iegm.ru

Abstract. Haloalkaline environments are of particular interest for research, as they are characterized by a unique diversity of extremophilic microorganisms that are adapted to high salinity and alkalinity. Among these extremophilic microorganisms, strains that degrade various aromatic and aliphatic compounds, which have detrimental effects on ecosystems and human health, deserve special attention. Strain SJ1gcor, identified as a member of the genus *Stutzerimonas*, was isolated from the coastal soil of a technogenic saline-alkaline reservoir located within the Verkhnekamsk potassium-magnesium salt deposit (Berezniki, Perm Krai). Analysis of the 16S rRNA gene of the studied strain revealed the highest level of similarity (99.69%) to the homologous gene of *Stutzerimonas zhaodongensis* NEAU-ST5-21^T. The strain is capable of growing as a sole source of carbon and energy on phthalates: dibutyl phthalate (DBP) and dimethyl phthalate (DMP), as well as the possible degradation products of these compounds: *ortho*-phthalic acid (OPA), benzoic acid (BA) and butanol. It was demonstrated that the strain is capable of growing on DBP as a substrate with a NaCl content of up to 70 g/L in the culture medium. The highest specific growth rate of the strain SJ1gcor was found when cultivating in a medium containing 30 g/L NaCl, and the maximum optical density was recorded in a medium containing 70 g/L NaCl. The *benA* gene encoding the α -subunit of benzoate 1,2-dioxygenase, a key enzyme in BA degradation, was identified in the strain's genome. Based on the data obtained, two alternative DBP degradation pathways were proposed for the strain SJ1gcor. Therefore, the strain *Stutzerimonas* sp. SJ1gcor is of interest for further research and holds promise for biotechnological applications.

Keywords: saline-alkaline reservoir, extremophiles, dibutyl phthalate, destruction, *Stutzerimonas*

For citation: Nechaeva Yu. I., Pyankova A. A., Plotnikova E. G. [Phthalate-degrading strain *Stutzerimonas* sp. SJ1gcor from soil in the coastal zone of a technogenic saline-alkaline reservoir]. *Bulletin of Perm University. Biology*. Iss. 4 (2025): pp. 415-423. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.17072/1994-9952-2025-4-415-423>.

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. 124020500028–4). The work was carried out using the equipment of the Core Facilities Center “Research of materials and matter” at the PFRC UB RAS.

Введение

Засоленные и щелочные среды (соленые и щелочные озера, шламохранилища, засоленные и щелочные почвы, промышленные регионы добычи соли и морские отложения) представляют собой уникальные экосистемы с высоким разнообразием экстремофильных микроорганизмов, которые приспособлены к условиям высокой солености и щелочности среды. Данные микроорганизмы обладают высоким биотехнологическим потенциалом, поскольку способны продуцировать биохимически активные ферменты, устойчивые к щелочным показателям pH и высокой концентрации соли. В связи с этим они широко используются в различных областях, таких как медицина, сельское хозяйство и промышленность [Yadav et al., 2018; Varshney et al., 2023].

На территории Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей в г. Березники (Пермский край, Россия) расположен техногенный щелочной водоем, который долгое время использовался в качестве накопителя для производственных отходов. Особенности данного водоема являются высокое содержание водорастворимых солей, сильнощелочной показатель pH (10–12) и высокая концентрация тяжелых металлов, мышьяка и органических загрязнителей [Белкин, 2020; Belkin et al., 2024], к которым относятся и эфиры фталевой кислоты (фталаты).

Эфиры фталевой кислоты (ЭФК) – это синтетические органические соединения, которые повсеместно используются в качестве пластификаторов при производстве различных пластмасс для обеспечения гибкости и прочности материалов, а также при производстве строительных материалов, мебели, косметики, игрушек, медицинских устройств и пестицидов [Sharma et al., 2021]. Поскольку ЭФК связаны с полимерной матрицей только за счет слабых нековалентных связей, они легко мигрируют в окружающую среду и накапливаются в почвах, воде, осадках сточных вод, донных отложениях, воздухе и растениях [Khurshid et al., 2025]. Доказано, что ЭФК оказывают неблагоприятное воздействие как на здоровье человека, так и на экосистемы в целом. Несмотря на это, большая часть стран все еще использует ЭФК в различных сферах производства. В связи с этим актуален поиск наиболее эффективных способов разрушения данных токсичных соединений для уменьшения пагубного влияния на экосистемы и здоровье человека [Wang et al., 2021].

Биодеградация является одним из основных способов разложения различных ЭФК и моно(поли)ароматических соединений, поскольку отличается высокой эффективностью, экологичностью, безопасностью и низкой стоимостью. Доказано, что аэробная деградация более эффективна по сравнению с анаэробной [Benjamin et al., 2015]. Известны бактерии-деструкторы фталатов, являющихся представителями разных таксонов, в частности родов *Achromobacter*, *Agrobacterium*, *Arthrobacter*, *Bacillus*, *Comamonas*, *Enterobacter*, *Gordonia*, *Paracoccus*, *Pseudomonas*, *Rhodococcus*, *Sphingobium* и *Variovorax* [Kaur et al., 2023].

В настоящее время накоплен большой объем данных о штаммах, способных к деградации ЭФК [Kaur et al., 2023], показана сложность и многообразие механизмов биодеградации у различных штаммов бак-

терий, однако данных о деструкции эфиров фталевой кислоты и других ароматических соединений в условиях засоления и высокой щелочности среды недостаточно. Данный факт подчеркивает необходимость более детального изучения механизмов деградации ЭФК в условиях засоления и щелочности среды, а также поиск эффективных галофильных/галотолерантных и алкалофильных штаммов биодеструкторов ЭФК.

Цель исследования – физиологическая и молекулярно-генетическая характеристика галотолерантного штамма-деструктора фталатов, выделенного из почвы береговой зоны галощелочного водоема (г. Березники, Пермский край).

Материалы и методы

Объект исследования. В работе использован бактериальный штамм SJ1gcor, который был выделен из почвы береговой зоны техногенного галощелочного водоема, расположенного на территории Верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей в г. Березники (Пермский край, Россия). Образцы почвы для исследований были предоставлены сотрудниками ЕНИ ПГНИУ. Данный водоем использовался в качестве резервного накопителя производственных отходов на время строительства основного шламохранилища и отличается высокой концентрацией легкорастворимых солей, тяжелых металлов, а также щелочным показателем pH [Belkin et al., 2024]. В почве, из которой выделен исследованный штамм, обнаружен дибутилфталат (неопубликованные данные).

Среды и условия культивирования. При получении накопительной культуры и изучении способности штамма к деструкции ароматических и алифатических углеводов использовали минеральную среду Раймонда (МСР) [Raymond, 1961]. В качестве субстратов в МСР добавляли дибутилфталат (ДБФ), диметилфталат (ДМФ), диэтилфталат (ДЭФ), *орто*-фталевую, терефталевую (ТФК) и бензойную кислоты, дизельное топливо, бутанол, нафталин, бифенил и фенантрен в концентрации 1.0 г/л. Для приготовления богатой среды Раймонда (БСР) в МСР добавляли 2.5 г/л дрожжевого экстракта («Biospringer», Франция) и 5 г/л триптона («VWR Life Science Amresco», США) в качестве ростовых субстратов. Агар («Helicon», Россия) в количестве 15 г/л использовали для приготовления твердых сред. В экспериментах использовали среды без добавления соли, а также среды с концентрацией NaCl до 100 г/л. Для проверки способности штамма к росту при различных значениях pH использовали буферные системы, приготовленные на основе БСР. Бактериальные клетки выращивали на агаризованной среде БСР при pH 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0. Рост оценивали на седьмой день культивирования [Методы ..., 1983].

Накопительное культивирование и выделение бактерий. Образец почвы (5 г) ресуспендировали в 10 мл МСР, далее 200 мкл почвенной суспензии добавляли в 50 мл МСР с *орто*-фталевой кислотой (1 г/л) в качестве единственного источника углерода и энергии в колбу объемом 100 мл. Культивирование проводили на термостатируемом шейкере Environmental Shaker Incubator ES-20/60 («BioSan», Латвия) при 100 об/мин в течение 2 мес., после этого проводили последовательные пересевы полученной накопительной культуры на МСР с *орто*-фталевой кислотой (1 г/л). Полученную путем 3-х последовательных пересевов суспензию высевали на агаризованную БСР с содержанием 30 г/л NaCl и инкубировали при температуре 28°C до появления отдельных колоний. Описание морфологии колоний бактерий проводили при росте клеток на агаризованной БСР (30 г/л NaCl). Чистые бактериальные культуры для долгосрочного хранения замораживали при температуре –80°C в 20% растворе глицерола [Нетрусов, 2005].

Идентификация бактерий. Выделение ДНК из чистой культуры бактерий проводили общепринятым методом [Ausbel et al., 1995]. Амплификацию гена 16S рРНК осуществляли с использованием универсальных бактериальных праймеров 8F и 1492R [Lane, 1991] на амплификаторе C1000 Touch™ Thermal Cycler («Bio-Rad Laboratories», США).

Исследование гена деструкции бензойной кислоты (*benA*). Амплификацию фрагмента гена *benA* (длина – 521 п.н.), который кодирует α -субъединицу бензоат 1,2-диоксигеназы, проводили с использованием праймеров *benA*-F (5'-GCCACGAGAGCCAGATTCCC-3') и *benA*-R (5'-GGTGGCGGCGTAGTTCAGTG-3') [Baggi et al., 2008]. В качестве положительного контроля использовали ДНК штамма-деструктора бензойной кислоты *Rhodococcus wratislaviensis* KT112-7 [Егорова и др., 2013].

Для детекции ПЦР-продуктов использовали горизонтальный электрофорез в 1% агарозном геле с использованием 1× буфера ТВЕ (Трис – 10.8 г/л, борная кислота – 5.5 г/л, 0.5М ЭДТА – 4 мл, вода дистиллированная – 79.7 мл/л) при комнатной температуре, напряжении 5–15 В/см в течение 20–40 мин. Агарозные гели окрашивали раствором бромистого этидия (0.5 мкг/мл) в течение 15 мин и фотографировали в УФ-свете с помощью системы геледокументирования BioDocAnalyze («Bio-Rad Laboratories»),

США). Для определения размеров полученных фрагментов использовали маркер длин ДНК 100+ bp DNA Ladder («Евроген», Россия).

Секвенирование и анализ генов. Определение нуклеотидных последовательностей генов 16S рПНК и *benA* проводили с применением набора реактивов «GenSeq-100» («Синтол», Россия) на автоматическом секвенаторе Нанофор 05 («Синтол», Россия) согласно рекомендациям производителя. Анализ полученных последовательностей осуществляли с использованием программ Sequence Scanner v. 2.0, MEGA v. 10 (<http://www.megasoftware.net>). Поиск гомологичных последовательностей осуществляли по международным базам данных EzBioCloud (<http://www.ezbiocloud.net>) и GenBank (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov>).

Рост штамма на ДБФ оценивали с использованием культивирования в жидкой МСР с ДБФ (1 г/л) без добавления соли и в присутствии 30, 50 и 70 г/л NaCl. В качестве инокулята использовали культуру в экспоненциальной фазе роста, предварительно выращенную в жидкой МСР с ДБФ в концентрации 1.0 г/л. Оптическую плотность (ОП₆₀₀) культуральной жидкости определяли на спектрофотометре UV-Visible BioSpec-mini («Shimadzu», Япония) при длине волны 600 нм в кювете с длиной оптического пути 1 см. Удельную скорость роста (μ, ч⁻¹) рассчитывали по стандартной формуле:

$$\mu = (\ln B_2 - \ln B_1) / (t_2 - t_1),$$

где B_1 и B_2 – оптическая плотность культуры в момент времени t_1 и t_2 , соответственно [Нетрусов, 2005].

Статистическая обработка результатов. Все эксперименты были выполнены в трехкратной повторности. Для обработки полученных данных использовали среду программирования R.

Результаты и их обсуждение

С использованием метода накопительного культивирования на МСР с добавлением *орто*-фталевой кислоты в качестве единственного источника углерода и энергии из образца почвы, отобранной в береговой зоне галошелоного техногенного водоема, изолирован бактериальный штамм SJ1gcor. Выделенный штамм имел округлые бежево-желтые прозрачные колонии, размером около 1–2 мм, с гладкой блестящей поверхностью.

Согласно анализу фрагмента гена 16S рПНК (647 п.н.), штамм SJ1gcor имеет наибольшее (99.69%) сходство со штаммом *Stutzerimonas zhaodongensis* NEAU-ST5-21^T (ранее *Pseudomonas zhaodongensis*). Представители вида *S. zhaodongensis* были выделены из засоленных и щелочных почв [Zhang et al., 2015], морских отложений [Xu et al., 2022], морской воды [Zhao et al., 2024] и загрязненных нефтью грунтовых вод [Khodaei et al., 2017]. Показано, что штаммы вида *Stutzerimonas (Pseudomonas) zhaodongensis* способны к биоремедиации загрязненных нефтью отложений [Qiao et al., 2024], деградации дизельного топлива [Xu et al., 2022], смеси углеводородов (бензол, толуол, этилбензол и ксилен) [Khodaei et al., 2017] и гербицида Хизалофоп-П-этил (QPE) [Zhang et al., 2017].

При культивировании штамма на среде БСР с разной концентрацией соли показано, что штамм способен к росту на среде как без добавления NaCl, так и в присутствии NaCl до 70 г/л. Также выявлено, что штамм способен к росту на среде с pH 6–8.

Поскольку штамм был выделен из накопительной культуры с добавлением в качестве субстрата ОФК, в первую очередь была проведена проверка способности штамма к росту на *орто*-фталевой кислоте, эфирах фталевой кислоты – дибутилфталате (ДБФ), диметилфталате (ДМФ), диэтилфталате (ДЭФ) и терефталевой кислоте (ТФК). Также проведена проверка роста штамма на бензойной кислоте, нафталине, фенантрене, бифениле, дизельном топливе (ДТ) и бутаноле. Установлено, что штамм способен к эффективному росту на ДБФ, ДМФ, *орто*-фталевой и бензойной кислотах, а также бутаноле. При этом он не растет на ДЭФ, терефталевой кислоте, бифениле, нафталине, фенантрене и ДТ.

Согласно литературным данным, *орто*-фталевая кислота – ключевой метаболит разложения фталатов. В частности, основной путь деградации ДБФ (один из представителей ЭФК) включает: гидролиз ДБФ через образование монобутилфталата до ОФК с использованием различных гидролаз; разложение ОФК до протокатеховой кислоты (ПКК), которая далее метаболизируется по *орто*- и *мета*-пути до соединений цикла Кребса [Hu et al., 2021]. Бензойная кислота является промежуточным метаболитом при разложении различных ароматических соединений (бифенил, фенол, толуол), кроме того, известно, что данное соединение может быть метаболитом при разложении ОФК. Ранее путь разложения *орто*-фталевой кислоты через образование бензоата упоминался для штаммов *Glutamicibacter* sp. 0426 [Ren et al., 2024] и *Pseudarthrobacter defluvii* E5 [Chen et al., 2021]. Также известно, что возможным метаболитом при разложении ДБФ может быть бутанол, который преобразуется в масляную кислоту. Образующийся ацетил-КоА при окислении жирной кислоты вступает в цикл Кребса [Mahajan et al., 2019].

Ростовой эксперимент был проведен на МСР с добавлением ДБФ в качестве субстрата с содержанием NaCl до 70 г/л и без нее. Среди эфиров фталевых кислот ДБФ представляет особый интерес, поскольку

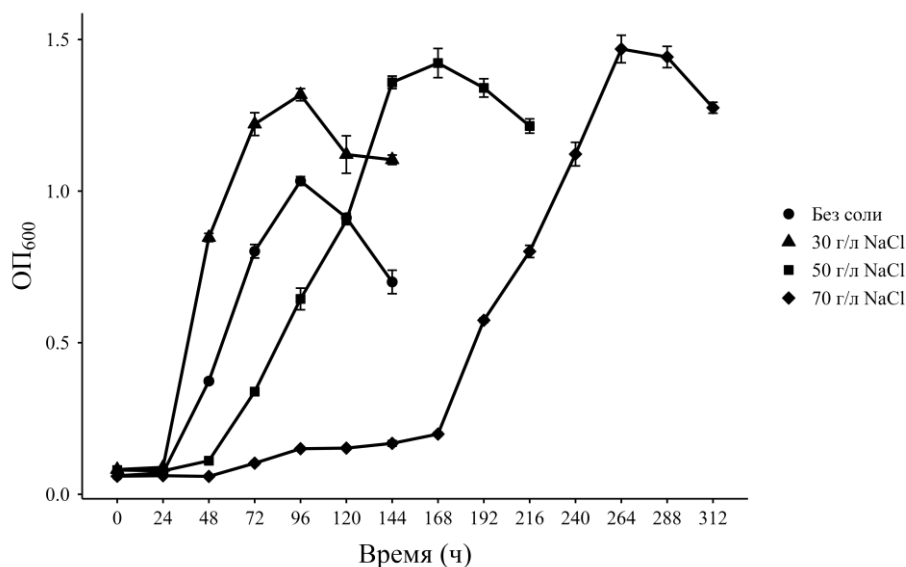
обладает мутагенными и канцерогенными свойствами даже в минимальных концентрациях, а также является одним из наиболее используемых ЭФК во всем мире [Peng et al., 2025]. В связи с тем, что ДБФ обладает высокой токсичностью, биоаккумуляционным потенциалом и низкой скоростью биodeградации в окружающей среде, он включен в списки приоритетных загрязнителей Агентством по охране окружающей среды США, Европейского союза, Канады, Японии, а также Китайским национальным центром мониторинга окружающей среды [Lakshmikandan et al., 2025]. Поэтому изучение ростовых показателей штамма при использовании ДБФ в качестве единственного источника углерода и энергии может быть полезно для разработки мероприятий по биоремедиации загрязненных местообитаний.

Нами при культивировании бактериальных клеток на ДБФ в качестве субстрата в среде без содержания соли и в присутствии NaCl показано, что наиболее высокий показатель удельной скорости роста наблюдался при культивировании бактерий в среде с содержанием 30 г/л NaCl, а максимальная ОП₆₀₀ зафиксирована на среде с содержанием 70 г/л NaCl (табл. 1, рисунок).

Таблица 1

Параметры роста штамма SJ1gcor в МСР с ДБФ (1.0 г/л) при разных концентрациях NaCl
[Growth parameters of the strain SJ1gcor in MMR and DBP (1.0 g/L) at different concentrations of NaCl]

Концентрация NaCl, г/л	Удельная скорость роста, ч ⁻¹	Максимальное значение ОП ₆₀₀
Без NaCl	0.018±0.001	1.04
30	0.030±0.002	1.29
50	0.015±0.001	1.39
70	0.012±0.001	1.45



Рост штамма SJ1gcor в МСР с ДБФ (1.0 г/л) при разных концентрациях NaCl

[Growth of the strain SJ1gcor in MMR and DBP (1.0 g/L) at different concentrations of NaCl]

Поскольку штамм способен к росту на бензойной кислоте, являющейся возможным метаболитом разложения ЭФК, проведена амплификация гена *benA*, кодирующего α -субъединицу бензоат 1,2-диоксигеназы, которая является ключевым ферментом начального пути окисления бензоата [Parales et al., 2006]. Проведено секвенирование и анализ амплифицированного *benA*-гена. Сравнительный анализ *benA*-гена с гомологичными последовательностями из базы данных GenBank (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov>) показал, что наибольшее сходство данная последовательность имеет с последовательностями гена *benA* бактерий-представителей родов *Stutzerimonas*. В таблице 2 представлены гомологичные последовательности гена *benA*, которые имеют наибольшее сходство с геном штамма SJ1gcor. Сходство на уровне 94.07% сравниваемая последовательность имеет с геном *benA* штамма *Stutzerimonas kunmingensis* 7850S, который был выделен из донных отложений Марианской впадины (табл. 2).

На основании полученных данных можно предположить, что разложение ДБФ идет до орто-фталевой кислоты через образование монобутилфталата. По литературным данным, в преобразовании ДБФ до монобутилфталата участвуют альфа/бета гидролазы, эстеразы, карбоксилэстеразы или липазы [Ren et al., 2018]. Способность штамма SJ1gcor к росту на бензойной кислоте и наличие гена *benA* могут свидетельствовать о том, что у данного штамма может быть 2 альтернативных пути разложения орто-фталевой кислоты: либо с помощью кластера генов, участвующих в разложении орто-фталевой кислоты

до протокатеховой кислоты, либо через преобразование ОФК до бензойной кислоты за счет декарбоксилирования и разложения бензоата с использованием кластера генов *benABCDE*.

Таблица 2

**Сравнительный анализ гена *benA* штамма *Stutzerimonas* sp. SJ1gcor
с ближайшими гомологичными последовательностями из базы данных GenBank
[Comparative analysis of the *benA* gene of the strain *Stutzerimonas* sp. SJ1gcor
with the closest homologous sequences from the GenBank database]**

Гомологичные гены в GenBank	Номер в GenBank	Сходство, (%)	Место выделения
Ген <i>benA</i> , <i>Stutzerimonas kunmingensis</i> 7850S	CP090366	94.07	Донные отложения Марианской впадины
Ген <i>benA</i> , <i>Stutzerimonas chloritidismutans</i> ABH-495	CP085257	93.01	Донные отложения озера: Китай
Ген <i>benA</i> , <i>Pseudomonas stutzeri</i> 19SMN4 ^T	CP007509	93.01	Загрязненные морские донные отложения: Испания
Ген <i>benA</i> , <i>Pseudomonas knackmussii</i> B09-2	CP096208	92.58	Вода: Индийский океан, Китай
Ген <i>benA</i> , <i>Stutzerimonas chloritidismutans</i> 6L11	CP086067	91.74	Галощелочная ризосферная почва: Китай
Ген <i>benA</i> , <i>Pseudomonas stutzeri</i> CCUG 29243	CP003677	91.53	Загрязненные морские отложения: Средиземное море

Для получения более полных данных о метаболических путях штамма и кластерах генов, участвующих в разложении различных ароматических соединений, необходимо проведение дополнительных исследований, в частности полногеномное секвенирование и анализ транскриптомных данных.

Заключение

В результате проведенных исследований из почвы береговой зоны галощелочного водоема, расположенного на территории Верхнекамского месторождения солей (г. Березники, Пермский край), изолирован штамм-деструктор фталатов (дибутилфталата, диметилфталата) *Stutzerimonas* sp. SJ1gcor. Кроме эффективного роста на среде с дибутилфталатом и диметилфталатом, штамм способен к росту на орто-фталевой, бензойной кислотах и бутаноле в качестве субстрата. Необходимо отметить, что штамм способен к росту на ДБФ в условиях повышенного содержания NaCl (до 70%). В геноме штамма выявлен ген *benA*, который участвует в первой стадии разложения бензойной кислоты. Нуклеотидная последовательность гена имеет наибольший процент идентичности с геном *benA* штамма *Stutzerimonas kunmingensis* 7850S, который изолирован из донных отложений Марианской впадины. На основании полученных данных выдвинуто предположение о том, что у штамма могут быть 2 альтернативных пути разложения орто-фталевой кислоты до соединений цикла Кребса: 1) через образование бензойной кислоты и последующее разложение бензоата, 2) через разложение с использованием кластера фталатных генов.

Таким образом, исследованный штамм *Stutzerimonas* sp. SJ1gcor представляет интерес для дальнейших исследований, поскольку обладает высоким биodeградационным потенциалом. Данный штамм может быть использован в качестве бактериального агента при планировании мероприятий, направленных на очистку окружающей среды от эфиров фталевой кислоты, в том числе биоремедиации местообитаний, характеризующихся высоким содержанием NaCl.

Список источников

- Белкин П.А. Химический состав родникового стока в районе складирования отходов разработки и обогащения калийных солей // Вестник Пермского университета. Геология. 2020. Т. 19(3). С. 232–240. DOI: 10.17072/psu.geol.19.3.232. EDN: DMUFJO.
- Егорова Д.О. и др. Деструкция ароматических углеводородов штаммом *Rhodococcus wratislaviensis* KT112-7, выделенным из отходов соледобывающего предприятия // Прикладная биохимия и микробиология. 2013. Т. 49(3). С. 267–278. DOI: 10.7868/S0555109913030070. EDN: PXPZZB.
- Методы общей бактериологии: в 3 т. / под ред. Ф. Герхардта и др. М.: Мир, 1983. Т. 1–3.
- Нетрусов А.И. Практикум по микробиологии. М.: Академия, 2005. 608 с.
- Ausbel F.M. Short Protocols in Molecular Biology. 3rd ed. N.Y.: John Wiley & Sons, 1995. 450 p.

6. Baggi G. et al. Co-metabolism of di- and trichlorobenzoates in a 2-chlorobenzoate-degrading bacterial culture: Effect of the position and number of halo-substituents // *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2008. Vol. 62(1). P. 57–64. DOI: 10.1016/j.ibiod.2007.12.002.
7. Belkin P. et al. Sediment microbial communities of a technogenic saline-alkaline reservoir // *Heliyon*. 2024. Vol. 10(13). Art. e33640. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e33640.
8. Benjamin S. et al. A monograph on the remediation of hazardous phthalates // *Journal of Hazardous Materials*. 2015. Vol. 298. P. 58–72. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.05.004.
9. Chen F. et al. High-efficiency degradation of phthalic acid esters (PAEs) by *Pseudarthrobacter defluvii* E5: performance, degradative pathway, and key genes // *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 794. Art. 148719. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148719.
10. Hu R. et al. Bacteria-driven phthalic acid ester biodegradation: current status and emerging opportunities // *Environment International*. 2021. Vol. 154. Art. 106560. DOI: 10.1016/j.envint.2021.106560.
11. Kaur R. et al. Biodegradation of phthalates and metabolic pathways: an overview // *Environmental Sustainability*. 2023. Vol. 6. P. 303–318. DOI: 10.1007/s42398-023-00268-7.
12. Khodaei K. et al. BTEX biodegradation in contaminated groundwater using a novel strain (*Pseudomonas* sp. BTEX-30) // *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2017. Vol. 116. P. 234–242. DOI: 10.1016/j.ibiod.2016.11.001.
13. Khurshid S. et al. Di-butyl phthalates (DBP) in the environment: health risks and advances in treatment technologies // *Environ. Geochem. Health*. 2025. Vol. 47. Art. 371. DOI: 10.1007/s10653-025-02707-2.
14. Lakshmikanandan M. et al. Efficient biodegradation of elevated di-*n*-butyl phthalate levels by microalga *Coelastrella terrestris* MLUN1 and its post-treatment potential // *Journal of Water Process Engineering*. 2025. Vol. 73. Art. 107694. DOI: 10.1016/j.jwpe.2025.107694.
15. Lane D.J. 16S/23S rRNA sequencing // *Nucleic acid techniques in bacterial systematics*. 1991. P. 115–175.
16. Mahajan R. et al. Biodegradation of di-*n*-butyl phthalate by psychrotolerant *Sphingobium yanoikuyae* strain P4 and protein structural analysis of carboxylesterase involved in the pathway // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2019. Vol. 122. P. 806–816. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2018.10.225.
17. Parales R.E., Resnick S.M. Aromatic ring hydroxylating dioxygenases // *Pseudomonas: Volume 4 Molecular Biology of Emerging Issues*. Boston, MA: Springer US, 2006. P. 287–340.
18. Peng C. et al. Biodegradation of various phthalic acid esters at high concentrations by *Gordonia alkanivorans* GH-1 and its degradation mechanism // *Environmental Technology & Innovation*. 2025. Vol. 38. Art. 104066. DOI: 10.1016/j.eti.2025.104066.
19. Qiao Y. et al. Novel agents consisting of *Pseudomonas zhaodongensis* and dimethylsulfoniopropionate (DMSP) enhancing bioremediation of oil-contaminated sediments at deep-sea condition // *Environmental Technology & Innovation*. 2024. Vol. 36. Art. 103744. DOI: 10.1016/j.eti.2024.103744.
20. Raymond R.L. Microbial oxidation of *n*-paraffinic hydrocarbons // *Developments in Industrial Microbiology*. 1961. Vol. 2(1). P. 23–32.
21. Ren C. et al. Complete degradation of di-*n*-butyl phthalate by *Glutamicibacter* sp. strain 0426 with a novel pathway // *Biodegradation*. 2024. Vol. 35(1). P. 87–99. DOI: 10.1007/s10532-023-10032-7.
22. Ren L. et al. Bacteria-mediated phthalic acid esters degradation and related molecular mechanisms // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2018. Vol. 102(3). P. 1085–1096. DOI: 10.1007/s00253-017-8687-5.
23. Sharma N. et al. DBP biodegradation kinetics by *Acinetobacter* sp. 33F in pristine agricultural soil // *Environmental Technology & Innovation*. 2021. Vol. 21. Art. 101240. DOI: 10.1016/j.eti.2020.101240.
24. Varshney S., Bhattacharya A., Gupta A. Halo-alkaliphilic microbes as an effective tool for heavy metal pollution abatement and resource recovery: challenges and future prospects // *3 Biotech*. 2023. Vol. 13(12). Art. 400. DOI: 10.1007/s13205-023-03807-5.
25. Wang Y., Qian H. Phthalates and their impacts on human health // *Healthcare (Basel)*. 2021. Vol. 9(5). Art. 603. DOI: 10.3390/healthcare9050603.
26. Xu W. et al. Bacterial communities and culturable petroleum hydrocarbon degrading bacteria in marine sediments in the northeastern South China Sea // *Frontiers in Environmental Sciences*. 2022. Vol. 10. Art. 865636. DOI: 10.3389/fenvs.2022.865636.
27. Yadav A.N., Saxena A.K. Biodiversity and biotechnological applications of halophilic microbes for sustainable agriculture // *Journal of Applied Biology and Biotechnology*. 2018. Vol. 6(1). P. 48–55. DOI: 10.7324/JABB.2018.60109.
28. Zhang H. et al. Purification and properties of a novel quizalofop-*p*-ethyl-hydrolyzing esterase involved in quizalofop-*p*-ethyl degradation by *Pseudomonas* sp. J-2 // *Microbial Cell Factories*. 2017. Vol. 16. Art. 80. DOI: 10.1186/s12934-017-0695-8.
29. Zhang L. et al. *Pseudomonas zhaodongensis* sp. nov., isolated from saline and alkaline soils // *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*. 2015. Vol. 65(Pt 3). P. 1022–1030. DOI: 10.1099/ijs.0.000057.

30. Zhao Z. et al. Diversity and potential metabolic characteristics of culturable copiotrophic bacteria that can grow on low-nutrient medium in Zhenbei Seamount in the South China Sea // *Microbial Ecology*. 2024. Vol. 87. Art. 157. DOI: 10.1007/s00248-024-02475-z.

References

1. Belkin P.A. [Chemical composition of spring discharge in the area of mining waste storage and potassium salt enrichment]. *Bulletin of Perm University. Geology*. V. 19(3) (2020): pp. 232-240. (In Russ.). DOI: 10.17072/psu.geol.19.3.232.
2. Egorova D.O. et al. [Degradation of aromatic hydrocarbons by the *Rhodococcus wratislaviensis* KT112-7 isolated from waste products of a salt-mining plant]. *Applied Biochemistry and Microbiology*. V. 49(3) (2013): pp. 244–255. DOI: 10.7868/S0555109913030070.
3. Gerhardt F., ed. *Metody obščej bakteriologii* [Methods of general bacteriology]. Moscow, Mir Publ., 1983. V. 1–3. (In Russ.).
4. Netrusov A.I. *Praktikum po mikrobiologii* [Practicum on microbiology]. Moscow, Akademija Publ., 2005. 608 p. (In Russ.).
5. Ausbel F.M. *Short Protocols in Molecular Biology*. 3rd ed. N.Y., John Wiley & Sons, 1995. 450 p.
6. Baggi G. et al. Co-metabolism of di- and trichlorobenzoates in a 2-chlorobenzoate-degrading bacterial culture: Effect of the position and number of halo-substituents. *International Biodeterioration & Biodegradation*. V. 62(1) (2008): pp. 57-64. DOI: 10.1016/j.ibiod.2007.12.002.
7. Belkin P. et al. Sediment microbial communities of a technogenic saline-alkaline reservoir. *Heliyon*. Vol. 10(13) (2024). Art. e33640. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e33640.
8. Benjamin S. et al. A monograph on the remediation of hazardous phthalates. *Journal of Hazardous Materials*. V. 298 (2015): pp. 58-72. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.05.004.
9. Chen F. et al. High-efficiency degradation of phthalic acid esters (PAEs) by *Pseudarthrobacter defluvii* E5: performance, degradative pathway, and key genes. *Science of the Total Environment*. V. 794 (2021). Art. 148719. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148719.
10. Hu R. et al. Bacteria-driven phthalic acid ester biodegradation: current status and emerging opportunities. *Environment International*. V. 154 (2021). Art. 106560. DOI: 10.1016/j.envint.2021.106560.
11. Kaur R. et al. Biodegradation of phthalates and metabolic pathways: an overview. *Environmental Sustainability*. V. 6 (2023): pp. 303-318. DOI: 10.1007/s42398-023-00268-7.
12. Khodaei K. et al. BTEX biodegradation in contaminated groundwater using a novel strain (*Pseudomonas* sp. BTEX-30). *International Biodeterioration & Biodegradation*. V. 116 (2017): pp. 234-242. DOI: 10.1016/j.ibiod.2016.11.001.
13. Khurshid S. et al. Di-butyl phthalates (DBP) in the environment: health risks and advances in treatment technologies. *Environ. Geochem. Health*. V. 47 (2025). Art. 371. DOI: 10.1007/s10653-025-02707-2.
14. Lakshmikanandan M. et al. Efficient biodegradation of elevated di-*n*-butyl phthalate levels by microalga *Coelastrrella terrestris* MLUN1 and its post-treatment potential. *Journal of Water Process Engineering*. V. 73 (2025). Art. 107694. DOI: 10.1016/j.jwpe.2025.107694.
15. Lane D.J. 16S/23S rRNA sequencing. *Nucleic acid techniques in bacterial systematics*. 1991, pp. 115-175.
16. Mahajan R. et al. Biodegradation of di-*n*-butyl phthalate by psychrotolerant *Sphingobium yanoikuyae* strain P4 and protein structural analysis of carboxylesterase involved in the pathway. *International Journal of Biological Macromolecules*. V. 122 (2019): pp. 806-816. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2018.10.225.
17. Parales R.E., Resnick S.M. Aromatic ring hydroxylating dioxygenases. *Pseudomonas: Volume 4 Molecular Biology of Emerging Issues*. Boston, MA, Springer US, 2006, pp. 287-340.
18. Peng C. et al. Biodegradation of various phthalic acid esters at high concentrations by *Gordonia alkanivorans* GH-1 and its degradation mechanism. *Environmental Technology & Innovation*. V. 38 (2025). Art. 104066. DOI: 10.1016/j.eti.2025.104066.
19. Qiao Y. et al. Novel agents consisting of *Pseudomonas zhaodongensis* and dimethylsulfoniopropionate (DMSP) enhancing bioremediation of oil-contaminated sediments at deep-sea condition. *Environmental Technology & Innovation*. V. 36 (2024). Art. 103744. DOI: 10.1016/j.eti.2024.103744.
20. Raymond R.L. Microbial oxidation of *n*-paraffinic hydrocarbons. *Developments in Industrial Microbiology*. V. 2(1) (1961): pp. 23-32.
21. Ren C. et al. Complete degradation of di-*n*-butyl phthalate by *Glutamicibacter* sp. strain 0426 with a novel pathway. *Biodegradation*. V. 35(1) (2024): pp. 87-99. DOI: 10.1007/s10532-023-10032-7.
22. Ren L. et al. Bacteria-mediated phthalic acid esters degradation and related molecular mechanisms. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* V. 102(3) (2018): pp. 1085-1096. DOI: 10.1007/s00253-017-8687-5.
23. Sharma N. et al. DBP biodegradation kinetics by *Acinetobacter* sp. 33F in pristine agricultural soil. *Environmental Technology & Innovation*. V. 21 (2021). Art. 101240. DOI: 10.1016/j.eti.2020.101240.

24. Varshney S., Bhattacharya A., Gupta A. Halo-alkaliphilic microbes as an effective tool for heavy metal pollution abatement and resource recovery: challenges and future prospects. *3 Biotech.* V. 13(12) (2023). Art. 400. DOI: 10.1007/s13205-023-03807-5.
25. Wang Y., Qian H. Phthalates and their impacts on human health. *Healthcare (Basel).* V. 9(5) (2021). Art. 603. DOI: 10.3390/healthcare9050603.
26. Xu W. et al. Bacterial communities and culturable petroleum hydrocarbon degrading bacteria in marine sediments in the northeastern South China Sea. *Frontiers in Environmental Sciences.* V. 10 (2022). Art. 865636. DOI: 10.3389/fenvs.2022.865636.
27. Yadav A.N., Saxena A.K. Biodiversity and biotechnological applications of halophilic microbes for sustainable agriculture. *Journal of Applied Biology and Biotechnology.* V. 6(1) (2018): pp. 48-55. DOI: 10.7324/JABB.2018.60109.
28. Zhang H. et al. Purification and properties of a novel quinalofop-*p*-ethyl-hydrolyzing esterase involved in quinalofop-*p*-ethyl degradation by *Pseudomonas* sp. J-2. *Microbial Cell Factories.* V. 16 (2017). Art. 80. DOI: 10.1186/s12934-017-0695-8.
29. Zhang L. et al. *Pseudomonas zhaodongensis* sp. nov., isolated from saline and alkaline soils. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology.* V. 65(Pt 3) (2015): pp. 1022-1030. DOI: 10.1099/ijs.0.000057.
30. Zhao Z. et al. Diversity and potential metabolic characteristics of culturable copiotrophic bacteria that can grow on low-nutrient medium in Zhenbei Seamount in the South China Sea. *Microbial Ecology.* V. 87 (2024). Art. 157. DOI: 10.1007/s00248-024-02475-z.

Статья поступила в редакцию 13.10.2025; одобрена после рецензирования 03.11.2025; принята к публикации 02.12.2025.

The article was submitted 13.10.2025; approved after reviewing 03.11.2025; accepted for publication 02.12.2025.

Информация об авторах

Ю. И. Нечаева – инженер ИЭГМ УрО РАН, аспирант ПГНИУ;
А. А. Пьянкова – младший научный сотрудник ИЭГМ УрО РАН;
Е. Г. Плотникова – д-р биол. наук, доцент, зав. лабораторией ИЭГМ УрО РАН, профессор ПГНИУ.

Information about the authors

Yu. I. Nechaeva – engineer at IEGM UB RAS, postgraduate student at Perm State University;
A. A. Pyankova – junior researcher at IEGM UB RAS;
E. G. Plotnikova – doctor of biological sciences, associate professor, head of laboratory at IEGM UB RAS, professor of Perm State University.

Вклад авторов:

Нечаева Ю. И. – экспериментальная работа; статистическая обработка материала; написание исходного текста.
Пьянкова А. А. – экспериментальная работа; доработка текста.
Плотникова Е. Г. – научное руководство; концепция исследования; доработка текста.

Contribution of the authors:

Nechaeva Yu. I. – experimental work; statistical processing of material; writing the source text.
Pyankova A. A. – experimental work; text revision.
Plotnikova E. G. – research supervision; research concept; text revision.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

ЭКОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 631.41, 631.43

EDN: XVQOKX

doi: 10.17072/1994-9952-2025-4-424-433



**Эколого-биологические свойства литостратов
рекультивированных отвалов Кизеловского угольного бассейна**

Наталья Васильевна Митракова^{1✉}, Наталья Сергеевна Султанова²

^{1, 2} Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

^{1✉} mitrakovanatalya@mail.ru

² natasulta777@gmail.com

Аннотация. Влияние отвалов угледобывающей промышленности на окружающую среду носит чаще всего негативный характер. Рекультивация отвалов и восстановление почвенно-растительного покрова является актуальной задачей на территории горнодобывающих комплексов. Исследование проведено в центральной части Кизеловского угольного бассейна Пермского края. Изучены литостраты рекультивированных отвалов. Для определения свойств почв использованы традиционные методы химического и физического анализа, а также фитотестирование. Возраст литостратов от 7 до 10 лет, профиль маломощный, на большей части отвалов отсутствует растительность. Литостраты слабокислые и кислые, кислотность с глубиной увеличивается. Содержание органического вещества ниже фонового уровня, увеличивается с глубиной. Литостраты плотные, имеют глинистый и суглинистый гранулометрический состав. Активность ферментов свидетельствует о низкой биологической активности. Высота и масса тест-культуры показала удовлетворительное состояние литостратов. Интегральные геохимические индексы загрязнения свидетельствуют о допустимом уровне содержания тяжелых металлов в литостратах.

Ключевые слова: литострат, угольный отвал, рекультивация, кислотность, ферменты, фитотестирование, тяжелые металлы

Для цитирования: Митракова Н. В., Султанова Н. С. Эколого-биологические свойства литостратов рекультивированных отвалов Кизеловского угольного бассейна // Вестник Пермского университета. Сер. Биология. 2025. Вып. 4. С. 424–433. <http://dx.doi.org/10.17072/1994-9952-2025-4-424-433>.

Благодарности: работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 24-27-00324, <https://rscf.ru/project/24-27-00324/>.

ECOLOGY

Original article

**Ecological and biological properties of lithostrats
of recultivated dumps in the Kizel coal basin**

Natalya V. Mitrakova^{1✉}, Natalya S. Sultanova²

^{1, 2, 3, 4} Perm State University, Perm, Russia

^{1✉} mitrakovanatalya@mail.ru

² natasulta777@gmail.com

Abstract. The impact of coal mining waste dumps on the environment is predominantly negative. Reclaiming these dumps and restoring the soil-plant cover is a critical task in mining complexes. This study was conducted in the central part of the Kizel Coal Basin in Perm Krai. The lithostrats of reclaimed dumps were investigated. Traditional methods of chemical and physical analysis, as well as phytotesting, were used to determine soil properties. The lithostrats are 7 to 10 years old, feature a thin profile, and lack vegetation on most of the dumps. The lithostrats are slightly acidic to acidic, with acidity increasing with depth. The organic matter content is below the background level and increases with depth. The lithostrats are dense, with clayey and loamy granulometric composition. Enzyme activity indicates low biological activity. The height and mass of the test culture suggested satisfactory condition of the lithostrats. Integral geochemical pollution indices indicate an acceptable level of heavy metal content in lithostrats.

Keywords: lithostrate, coal dump, reclamation, soil acidity, enzymes, phytotesting, heavy metals

For citation: Mitrakova N. V., Sultanova N. S. [Ecological and biological properties of lithostrats of recultivated dumps in the Kizel coal basin]. *Bulletin of the Perm University. Biology*. Iss. 4 (2025): pp. 424-433. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.17072/1994-9952-2025-4-424-433>.

Acknowledgments: funding the study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-27-00324, <https://rscf.ru/project/24-27-00324/>.

Введение

Горнодобывающая деятельность оказывает значительное негативное воздействие на окружающую среду. Нарушения ландшафтной структуры имеют место на всех этапах недропользования: разведке, подземной и открытой добыче, строительстве коммуникаций и переработке полезных ископаемых [Li et al., 2015; Dutta, Jain, Kumar, 2025; Thakur et al., 2025]. В результате происходят прямое изъятие земель под хранение твердых и жидких отходов, изменение рельефа, гидрологического режима территории, загрязнение поверхностных и подземных вод, почв и атмосферного воздуха [Максимович, Пьянков, 2018; Arefieva et al., 2019; Kostin et al., 2021]. При эксплуатации шахт и горной инфраструктуры отмечается трансформация структуры и состава поверхностного слоя земной коры, в частности почвенно-растительного покрова. При отсутствии мероприятий по рекультивации земель в техногенно-нарушенных ландшафтах усиливаются процессы эрозии [Харионовский, Данилова, 2020], увеличиваются ареалы загрязненных земель.

Рекультивация отвалов в угледобывающих ландшафтах способствует снижению негативного воздействия. Так, рекультивация предотвращает горение и загрязнение воздуха полиароматическими углеводородами [Bragina et al., 2014]. Покрытие отвалов на месторождениях сернокислых углей помогает снижению объемов кислых шахтных дренажей, обогащенных микроэлементами и тяжелыми металлами [Соколов, Камахина, 2011; Mitrakova et al., 2024]. Кроме того, рекультивация отвалов содействует более быстрому восстановлению почвенно-растительного покрова. Нормативными документами регламентирована рекультивация нарушенных земель, в том числе в горнодобывающих районах, она включает два этапа – технический и биологический¹.

Процесс почвообразования на отвалах затруднен и продолжителен в связи с бедностью субстрата отвала или его токсичностью. На Кузбассе на отвалах антрацитового месторождения происходит формирование почв непосредственно на субстратах вскрышных пород, образуются почвы – эмбриоземы, со временем происходит накопление в них органического вещества, мелкозема и восстановления травяного покрова [Андроханов, Соколова, 2022]. На токсичных отвалах вскрышных пород восстановление растительности невозможно без его покрытия плодородным или потенциально плодородным слоем, при этом применение мелиоративных мероприятий ускоряет восстановление почвенно-растительного покрова [Осинцева, Дюкова, 2024]. Ученые предлагают новые способы рекультивации земель на территориях, нарушенных горной добычей. Так, предложен способ формирования откоса породного отвала с формированием пионерной отвальной насыпи вдоль раздвоенной границы отвала слева и справа навстречу друг к другу с последующей посадкой саженцев древесных растений [Галайко, Зеньков, 2024]. В качестве наносимого на отвал материала предлагаются мелкодисперсные грунты, такие как мелкодисперсные (без крупных включений) моренные отложения, хвосты флотационного обогащения руд, илы и сапропели водоемов, илы очистных сооружений [Архипов, Земцовская, 2016]. Устойчивый фитоценоз предотвращает эрозионные процессы на отвалах, горение и загрязнение прилегающих территорий. Для наибольшей эффективности рекультивации необходимо проводить два этапа – технический и биологический, с включением мелиоративных и агротехнических мероприятий.

Цель работы – изучение биолого-экологических свойств литостратов рекультивированных отвалов Кизеловского угольного бассейна. Задачами являются анализ физико-химических, биологических свойств литостратов и оценка их экологического состояния.

Объекты и методы исследования

Кизеловский угольный бассейн (КУБ) расположен в восточной части Пермского края. КУБ находится в пределах Западно-Уральской зоны складчатости, прилегающей к Предуральскому краевому прогибу [Геология месторождений ..., 1967]. Территория КУБа относится к Западному предгорному району тяжелосуглинистых подзолистых, дерново-подзолистых и заболоченных почв; район исследования расположен в средне- и южнотаежных предгорных пихтово-еловых и елово-пихтовых лесах. Для территории месторождения характерен умеренно-континентальный климат [Атлас Пермского края, 2012].

¹ ГОСТ Р 57446-2017 Наилучшие доступные технологии. Рекультивация нарушенных земель и земельных участков. Восстановление биологического разнообразия. Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2019; ГОСТ Р 59057-2020 Охрана окружающей среды. Земли. Общие требования по рекультивации нарушенных земель. Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2020.

Площадь КУБа около 1500 км². Добыча на месторождении велась подземным способом на протяжении 200 лет, в начале 2000-х годов месторождение было ликвидировано. В настоящее время на территории КУБа насчитывается несколько десятков отвалов вскрышных пород. Угли бассейна характеризуются повышенной зольностью и высоким содержанием серы, в основном пиритной [Максимович, Пьянков, 2018]. Наличие серы обуславливает образование кислых шахтных вод, которые поступают на поверхность из скважин, штолен шахт и стоков с отвалов.

Объекты исследования – техногенные поверхностные образования (литостраты) (рис. 1). Литостраты образованы в результате отсыпки глинистого материала на поверхность спланированных угольных отвалов. Рекультивация отвалов вскрышных пород на КУБе имеет очень важное значение в связи с уменьшением объемов кислых шахтных вод.

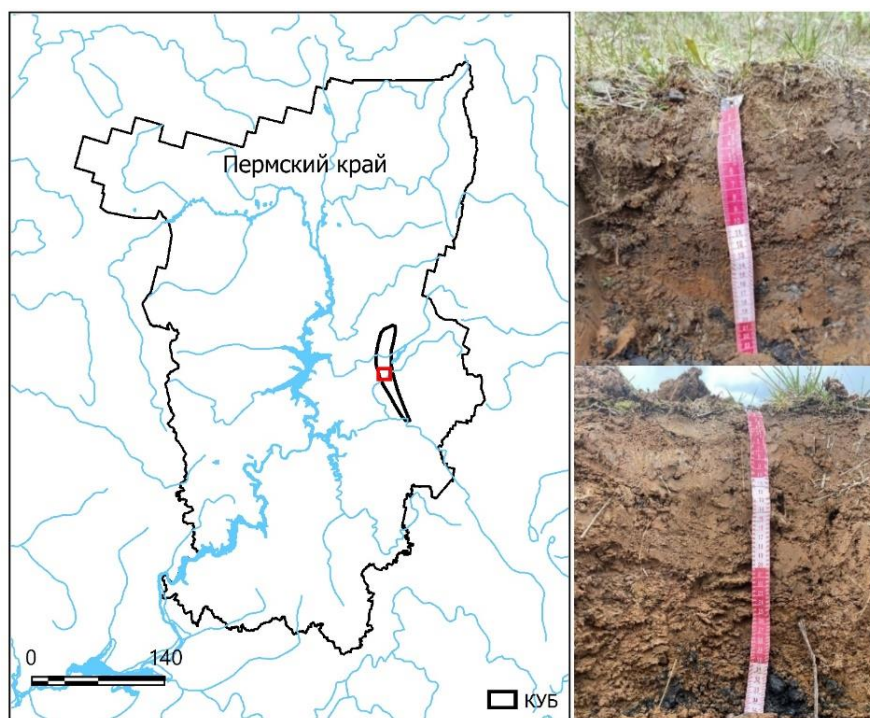


Рис. 1. Территория исследования и литостраты на отвалах
[Study area and lithostrats on dumps]

Территория отбора проб включала центральную часть КУБа. Пробы почв отобраны на отвалах шахт Шумихинская (пос. Юбилейный) (1Ю, 3Ю), Гореловская (пос. Шумихинский) (4Г), Усьва (пос. Усьва) (2У), Нагорная (пос. Нагорнский) (1Н). Литостраты отобраны по слоям с шагом 10 см, глубина прикопок обусловлена мощностью насыпного грунта. Фоновые почвы территории исследования – серогумусовые глинистые.

Актуальную и обменную кислотность почв определяли потенциометрическим методом. Содержание органического вещества (ОВ) определено по методу Тюрина, гидролитическая кислотность – по методу Каппена; активность каталазы (АК) – по перманганатному методу Джонсона и Темпле; определение активности уреазы (АУ) (карбамид-амидогидролаза) выполнено колориметрическим методом Щербакова и Райхинштейна; активность инвертазы (АИ) определена по методу Бертрона с последующим колориметрированием [Практикум по агрохимии, 2001]; проведение эксперимента по фитотестированию осуществлено с использованием кресс-салата в качестве тест-культуры [Еремченко, Митракова, 2017]. Для изучения биологических свойств литостратов заложен опыт по фитотестированию. В качестве тест-культуры использован кресс-салат *Lepidium sativum* L. сорта 'Весенний'. В качестве контрольного варианта кресс-салат выращивали на вермикулите с раствором Кнопа. Тест-культуру выращивали в течении 10 дней при температуре 25°C под фитолампами. Определение плотности проводили пикнометрическим методом; определение гранулометрического состава – по методу пипетки Н.А. Качинского (фракции диаметром более 1 см были определены ситовым методом, а фракции менее 1 см – ареометрическим). Микроэлементный состав (Ni, Cu, Zn, Cd, Hg, Pb) определен методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на Elan 900.

Для эколого-геохимической оценки поверхностных слоев почв использовали суммарный индекс загрязнения Zс и индекс геологического накопления элементов в почвах (Igeo). Igeo связывает содержание

элементов природного фона почвы с влиянием деятельности человека на содержание элементов в техногенно-нарушенной почве. I_{geo} рассчитывается для каждого элемента по уравнению [Martinez, Poleto, 2014]:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{(K \times B_n)} \right),$$

где C_n – содержание микроэлемента в почве; B_n – локальное природное фоновое содержание микроэлемента в почве; коэффициент K – компенсация фонового содержания за счет литогенных факторов, обычно устанавливаемый равным 1.5 [Martinez, Poleto, 2014]. I_{geo} делится на семь классов: 1) $I_{geo} \leq 0$ – практически незагрязненный; 2) $0 < I_{geo} < 1$ – незагрязненный до умеренно загрязненного; 3) $1 < I_{geo} < 2$ – умеренно загрязненный; 4) $2 < I_{geo} < 3$ – средне загрязненный; 5) $3 < I_{geo} < 4$ – сильно загрязненный; 6) $4 < I_{geo} < 5$ – сильно загрязненный до чрезмерно загрязненного; 7) $5 < I_{geo}$ – чрезмерно загрязненный.

Программное обеспечение MS Excel, Past и Statistica 4.03 использовалось для расчета статистических показателей. Показатели растений проанализированы с использованием t-теста, показатели почв сравнивались дисперсионным непараметрическим методом (критерий Крускала – Уоллиса). Значимые различия между сравниваемыми средними значениями считались с уровнем достоверности 95% и выше ($p < 0.05$). Для анализа полученных данных использовали регрессионный и корреляционный анализы с доверительной вероятностью 95%.

Результаты и их обсуждение

Верхние слои литостратов характеризуются кислой и слабокислой реакцией ($pH_{вод}=4.1-6.2$; $pH_{сол}=5.5-3.2$), при этом с глубиной кислотность увеличивается. Это связано с наличием в нижней части почв включений пород отвала, имеющих очень кислую реакцию за счет сульфидных минералов. Гидролитическая кислотность (Нгк) также свидетельствует о возрастании кислотности с глубиной (табл. 1). Кислотность верхнего слоя литостратов не отличается от кислотности фоновых почв; судя по всему, глинистый материал для отсыпки отвалов представляет собой местную породу. Известно, что кислотность негативно влияет на питание растений, их рост и развитие. При проведении рекультивации необходимо учитывать мелиоративные мероприятия, например известкование почв.

Таблица 1

Химические свойства литостратов
[Chemical properties of lithostrats]

Почва	Горизонт, глубина, см	pH водное	pH солевое	Нгк, ммоль/100 г	ОВ, %
Серогумусовая глинистая почва 1Ф	0-10	4.50	3.60	12.40	5.14
	10-20	4.90	3.70	15.50	3.96
	20-30	5.10	3.80	11.60	2.61
Литострат 1Ю	0-10	5.43	3.60	7.35	4.87
	10-17	4.35	3.70	14.70	8.40
Литострат 3Ю	0-10	6.20	5.54	2.80	5.14
	10-20	4.67	3.34	10.50	1.86
Литострат 4Г	0-10	5.47	4.19	3.50	1.95
	10-20	5.34	3.91	12.95	1.56
	20-38	3.28	2.64	19.25	2.98
Литострат 1Н	0-10	4.70	3.60	14.90	3.92
	10-20	4.50	3.60	17.30	4.31
	20-30	4.90	3.60	11.00	2.13
Литострат 2У	0-10	4.10	3.20	13.90	2.28
	10-20	3.50	3.10	23.90	2.07
	20-30	2.60	2.30	27.80	19.50

Содержание ОВ в литостратах увеличивается вниз по профилю (табл. 1). Увеличение ОВ с глубиной связано со смешиванием отсыпанной глины и углистых частиц, количество которых увеличивается с глубиной. Уменьшение количества органического вещества с глубиной может быть признаком того, что отсыпку глины на поверхность отвала произвели сравнительно недавно. Содержание ОВ в фоновой серогумусовой почве уменьшается с глубиной. Количество ОВ в верхнем слое серогумусовой почвы достоверно превышает содержание ОВ в верхних слоях литостратов. Это связано с молодостью почв на отвалах и отсутствием устойчивого растительного покрова. Накопление ОВ со временем развития почв подтверждает публикация [Bandyopadhyay et al, 2020], в которой приведены данные по исследова-

нию почв в районах угледобычи. В почвах деградированных земель угольных шахт через 5, 10 и 25 лет после добычи запасы углерода и азота увеличивались по сравнению с первоначальным состоянием.

Информативными показателями эколого-биологического состояния почв являются почвенные ферменты. Ферменты участвуют в процессах разложения органики и образования гумуса. Активность ферментов используется как интегральный показатель активности биологических процессов. Также активность ферментов можно использовать в качестве индикаторов развития процессов восстановления почв в промышленных районах [Li et al., 2015], ферменты чувствительны к загрязнению тяжелыми металлами [Сайранова, Еремченко, 2024]. Каталаза относится к группе ферментов оксидоредуктаз, она катализирует окислительно-восстановительную реакцию расщепления молекулы перекиси водорода до воды и кислорода. Каталаза является чувствительным ферментом к изменению почвенных условий: температуры, кислотности, аэрации и др. [Новоселова, Волкова, 2017]. Инвертаза гидролизует сахарозу, рафинозу, генцианозу, стахиозу: катализирует фруктофосфотрансферные реакции на глюкозу и фруктозу. По активности инвертазы можно судить о скорости разложения углеродсодержащих органических соединений [Саетталиева, 2014]. Фермент уреазы катализирует гидролиз мочевины до аммиака, углекислого газа и воды.

Активность каталазы в верхних слоях серогумусовой почвы достоверно превышает показатели АК в литостратах 1Ю, 4Г и 2У (табл. 2). Активность каталазы имеет тенденцию к снижению с глубиной, однако в некоторых литостратах АК с глубиной увеличивается. Возможно, это связано с содержанием ОВ и слабокислой реакцией почв.

Активность уреазы в верхних слоях фоновой серогумусовой почвы (1.9 мг N-NH на 10 г почвы за 24 ч) в несколько десятков раз превышает АУ в литостратах (0.01–0.75 мг N-NH на 10 г почвы за 24 ч). Активность уреазы в большинстве литостратов снижается с глубиной. Показатели активности уреазы в литостратах свидетельствуют о низком содержании органического вещества и нарушении способности почвы эффективно осуществлять азотный обмен.

Статистический анализ показал достоверные отличия в активности инвертазы в верхних слоях фоновой серогумусовой почвы и литостратов (табл. 2). Активность инвертазы максимальна в поверхностном слое почвы, далее вниз по профилю ее активность снижается, что соответствует снижению содержания гумуса и численности микрофлоры [Магда, Мазиров, Зинченко, 2022].

Таблица 2

Биологические свойства литостратов и морфометрические показатели тест-культуры

[Biological properties of lithostrats and morphometric parameters of the test culture]

Почва	Глубина, см	АК, мл 0,1 КМnO ₄ на 1 г почвы	АУ, мг N-NH на 10 г/24 ч	АИ, мг глюкозы на 10г/24 ч	Высота, мм	Масса, мг
Серогумусовая глинистая почва 1Ф	0-10	0.34	1.90	192.84	28	11
	10-20	0.23	0.63	98.11	-	-
	20-30	0.14	0.03	51.79	-	-
Литострат 1Ю	0-10	0.30*	0.05*	167.58*	33	13
	10-17	0.31	0.02	34.95	-	-
Литострат 3Ю	0-10	0.35	0.75*	180.91*	32	13
	10-20	0.15	0.02	30.74	-	-
Литострат 4Г	0-10	0.26*	0.04*	32.84*	35*	13
	10-20	0.19	0.02	30.74	-	-
	20-38	0.12	0.01	110.74	-	-
Литострат 1Н	0-10	0.26	0.03*	142.32*	26	8*
	10-20	0.34	0.02	43.39	-	-
	20-30	0.35	0.03	53.89	-	-
Литострат 2У	0-10	0.12*	0.03*	114.95*	32*	13
	10-20	0.17	0.02	209.68	-	-
	20-30	0.36	0.03	45.47	-	-

Примечание: * – достоверные отличия от фона.

Фитотестирование применяется для оценки экологического состояния почв разных ландшафтов и при различном антропогенном воздействии. Так, с помощью фитотестирования проведена оценка эффективности технической рекультивации нефтезагрязненных почв и способности создавать условия для роста и развития культурных растений [Еремченко и др., 2022]. При изучении состояния почв в урбанизированных и техногенных ландшафтах применение фитотестирования явилось информативным методом оценки экологических свойств почв [Еремченко, Митракова, 2016]. В настоящем исследовании фитотестирование показало достоверное отличие массы и высоты кресс-салата, выращенного на вермикулите, от массы кресс-салата, выращенного на пробах верхних слоев литостратов и фоновой почвы. Масса растений,

выращенных на фоновой серогумусовой почве, достоверно превышает массу растений, выращенных на литострате 1Н (табл. 2). Высота кресс-салата, выращенного на фоновой почве, достоверно ниже, чем высота растений, выращенных на литостратах 2У и 4Г (рис. 2). В целом фитотестирование свидетельствует об удовлетворительном состоянии как литостратов, так и фоновой почвы по отношению к контрольному варианту на вермикулите, т. к. разница в показателях не превышает 30% [Еремченко, Митракова, 2017].

Гранулометрический состав определяет физические, химические, биологические свойства почвы, а также ее плодородие. Литостаты на отвалах плотные, удельная плотность верхних слоев составляет около 2.6 г/см^3 , что соответствует минеральным горизонтам почв. С глубиной плотность снижается до $2.0\text{--}2.3 \text{ г/см}^3$, что связано с воздействием техники на горнотехническом этапе рекультивации. Плотность серогумусовой почвы в верхнем слое достоверно ниже, чем в литостратах.

Литостраты по всей глубине профиля имеют глинистый гранулометрический состав, как и фоновая почва (рис. 2). Содержание физической глины и физического песка составило в основном 60 на 40%. Верхние слои почв характеризуются как глина легкая и глина тяжелая крупнопылевато-иловатая или суглинок тяжелый крупнопылевато-иловатый. Нижние слои менее плотные за счет большого количества включений в виде угля, гальки и минералов, составляющих породный отвал. Гранулометрический состав нижних слоев чаще всего представлен суглинком тяжелым мелкопесчано-иловатым, а также глиной легкой крупнопылевато-иловатой. Уплотнение неблагоприятно сказывается на водном и воздушном режиме почвы, способствует снижению биологической активности и препятствует восстановлению растительности. Плотность имеет большое влияние на урожайность сельскохозяйственных культур [Дриггер, Стукалов, Матвеев, 2017], а также на восстановление почвенно-растительного покрова на отвалах горной добычи. Так в работе [Гуркова, Андроханов, Лавриненко, 2020] показано, что низкая плотность отсыпанных на рекультивированные отвалы угледобычи в Хакасии потенциально плодородных пород способствует более эффективному восстановлению растительности. Механическая обработка почвы оказывает влияние на подавляющее большинство биохимических почвенных процессов, ее отсутствие способствует замедлению процессов разложения органического вещества [Магда, Мазиров, Зинченко, 2022]. Таким образом, механическая обработка поверхности литостратов в период рекультивации будет играть важную роль для произрастания растений.

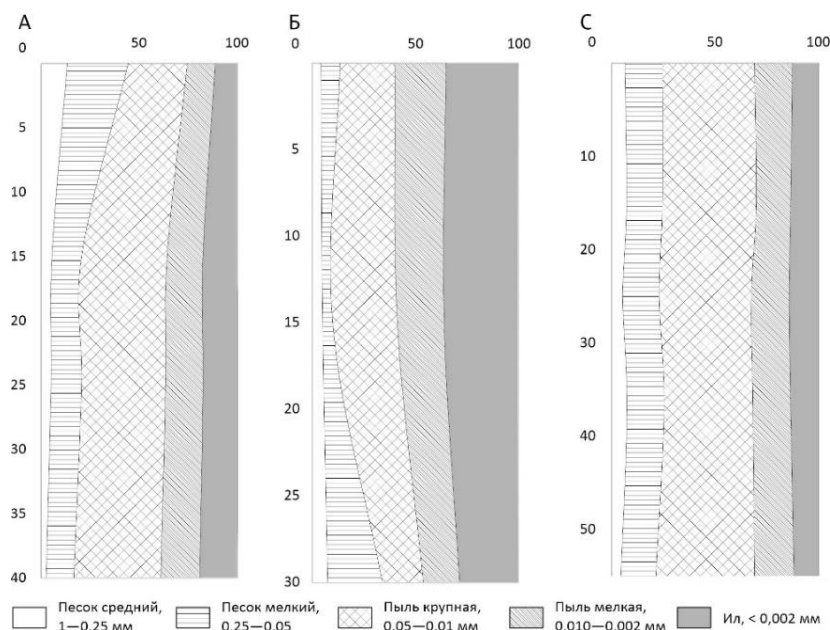


Рис. 2. Гранулометрический состав почв (А – серогумусовая почва, Б- литострат 2У, С – литострат 1Н)
[Granulometric composition of soils (A – gray humus soil, B – lithostrat 2U, C – lithostrat 1N)]

Исследование тяжелых металлов обусловлено их токсичностью для живых организмов и значительным распространением. Содержание таких элементов, как Cd, Cu, Zn, Hg Pb в почвах данной территории связано с его халькофильной природой и геохимическими особенностями данного ландшафта [Копылов, 2013]. Минералы вскрышных пород угольных отвалов обогащены рядом тяжелых металлов, что также является причиной их появления в почвах угледобывающих территорий [Yiwei et al., 2008; Lewinska-Preis et al., 2021].

Содержание тяжелых металлов в корнеобитаемом слое литостратов превышает фоновые значения (табл. 3). Количество Cd и Pb в литостратах также превышает кларк и ОДК, что, по-видимому, связано с

халькофильной природой элементов. Так, согласно [Bragina et al., 2014], кадмий и свинец являются одними из наиболее распространенных элементов, накапливающихся в почвах в угледобывающих районах.

Таблица 3

Содержание тяжелых металлов в корнеобитаемом слое почв (0–10 см), мг/кг
[Heavy metal content in the root layer of soils (0-10 cm), mg/kg]

Почва	Cd	Cu	Zn	Hg	Ni	Pb	Zc
1Ф	1.25	15.30	46.72	0.04	25.8	15.72	-
1Ю	1.58	40.74	108.76	0.15	47.19	18.87	7.0
3Ю	2.41	47.01	97.52	0.15	53.98	22.28	8.3
4Г	2.08	48.80	81.72	0.09	66.97	17.96	6.6
1Н	4.06	68.37	97.24	0.04	31.79	38.84	8.5
2У	4.98	38.66	60.02	0.04	29.80	17.60	5.1
Кларк*	0.13	47.00	83.00	0.083	58.00	16.00	-
ОДК/ПДК **	1.0/	66.0/	110.0/	/2.1	40.0/	65.0/	-

Примечание: * – кларк по Виноградову (1962); ** – СанПин 1.2.3685-21 (рН-КCl <5.5); Zc – интегральный показатель загрязнения; жирным шрифтом превышения относительно кларка, курсивом – относительно ОДК/ПДК.

Суммарный показатель загрязнения Zc варьирует от 5.1 до 8.3, что указывает на допустимый уровень содержания тяжелых металлов. Индекс геоаккумуляции (*Igeo*) показал умеренное загрязнение Hg верхних слоев литостратов 1Ю и 3Ю, для литострата 1Н выявлено загрязнение Cu, для почвы 2У – умеренное загрязнение Cd. Для данных почв значение *Igeo* составило 1.3–1.6.

Закключение

Литостраты на отвалах Кизеловского угольного бассейна характеризуются слабокислой реакцией поверхностных слоев, с глубиной кислотность увеличивается до сильнокислой. Содержание органического вещества очень низкое, что объясняется молодостью данных почв. Активность каталазы и инвертазы почти во всех почвах незначительно меньше фоновых значений. Активность уреазы в фоновой почве в десятки раз превышает АУ в литостратах, что может быть обусловлено низким содержанием азота в почвах и фрагментарным растительным покровом. Фитотестирование в целом свидетельствует об удовлетворительном состоянии поверхностных слоев литостратов. Несмотря на то, что содержание тяжелых металлов превышает фоновые значения, индексы загрязнения свидетельствуют о допустимом уровне загрязнения. Однако, кроме отсыпки на поверхность отвалов глинистого материала, необходимы мелиоративные и агротехнические мероприятия, такие как вспашка, внесение минеральных и органических удобрений, посадка травянистых культур.

Список источников

1. Андроханов В.А., Соколова Н.А. Почвенно-экологическое состояние поверхности отвалов антрацитовых месторождений (на примере Горловского антрацитового месторождения, Новосибирская область) // Достижения науки и техники АПК. 2022. Т. 36, № 5. С. 31–36. DOI: 10.53859/02352451_2022_36_5_31. EDN: JXGJMT.
2. Архипов А.В., Земцовская Е.В. Возможность рекультивации породных отвалов в условиях Заполярья и влияние рекультивации на отвалообразование // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 4. С. 110–121. EDN: VPLZRF.
3. Атлас Пермского края / под ред. А.М. Тартаковского. Пермь, 2012. 124 с.
4. Галайко В.В., Зеньков И.В. Патент № 2828496 С1 Российская Федерация, МПК E21C 41/32, A01C 11/02. Способ формирования откоса породного отвала с экологичной направленностью с биологической рекультивацией : № 2024112186 : заявл. 04.05.2024; опублик. 14.10.2024.
5. Геология месторождений угля и горючих сланцев СССР. Т. 4. Угольные бассейны и месторождения Урала / под ред. Л.Д. Башаркевич и др. М.: Недра, 1967. Т. 4. 476 с.
6. Гуркова Е.А., Андроханов В.А., Лавриненко А.Т. Ресурсы и специфика рекультивации отвалов угледобывающей промышленности Хакасии // Почвы и окружающая среда. 2020. Т. 3, № 4. Art. e127. DOI: 10.31251/pos.v3i4.127. EDN: NJEMNK.
7. Дригидер В.К., Стукалов Р.С., Матвеев А.Г. Влияние типа почвы и ее плотности на урожайность озимой пшеницы, возделываемой по технологии no-till в зоне неустойчивого увлажнения Ставропольского края // Земледелие. 2017. № 2. С. 19–22. EDN: YLMWNR.

8. Еремченко О.З., Митракова Н.В. Способ оценки биологической активности и токсичности почв и техногенных почвогрунтов: пат. 2620555 Рос. Федерация. № 2016113050; заявл. 05.04.2016; опубл. 26.05.2017, Бюл. № 15.
9. Еремченко О.З., Митракова Н.В. Фитотестирование почв и техногенных поверхностных образований в урбанизированных ландшафтах // Вестник Пермского университета. Сер. Биология. 2016. Вып. 1. С. 60–67. EDN: VVMYRT.
10. Еремченко О.З. и др. Оценка эффективности рекультивации нефтезагрязненных почв // Вестник Пермского университета. Сер. Биология. 2022. Вып. 1. С. 64–71. DOI: 10.17072/1994-9952-2022-1-64-71. EDN: UYMHVC.
11. Копылов И.С. Закономерности формирования почвенных ландшафтов Приуралья, их геохимические особенности и аномалии // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 4. С. 395. EDN: ROFXZP.
12. Магда Е.В., Мазиров М.А., Зинченко М.К. Активность каталазы и инвертазы при различной интенсивности механической обработки почвы // Владимирский земледелец. 2022. № 2(100). С. 24–30. DOI: 10.24412/2225-2584-2022-2-24-30. EDN: FJFLUX.
13. Максимович Н.Г., Пьянков С.В. Кизеловский угольный бассейн: экологические проблемы и пути решения. Пермь, 2018. 288 с. EDN: JSJQPX.
14. Новоселова Е.И., Волкова О.О. Влияние тяжелых металлов на активность каталазы разных типов почв // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2017. № 2. С. 190–193. EDN: YMHNIZ.
15. Осинцева М.А., Дюкова Е.А. Изучение особенностей почвенного покрова и биорекультивации угольных отвалов // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер. Естественные и медицинские науки. 2024. № 4. С. 86–98. DOI: 10.5922/vestniknat-2024-4-6. EDN: IBZCNN.
16. Практикум по агрохимии / под ред. В.Г. Минеева. М.: Изд-во МГУ, 2001. 689 с.
17. Саегалиева Г.Э. Ферментативная активность почвы как показатель ее плодородия // Молодой ученый. 2014. № 2(61). С. 277–278. EDN: RVNMBP.
18. Сайранова П.Ш., Еремченко О.З. Свойства псаммоземов камских надпойменных террас и оценка их устойчивости к загрязнению Cu и Cd // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2024. № 119. С. 66–97. DOI: 10.19047/0136-1694-2024-119-66-97. EDN: TLEBSH.
19. Соколов Э.М., Камахина С.А., Влияние почвенного покрова Подмосковского угольного бассейна на развитие растительных культур // Известия ТулГУ. Технические науки. 2011. Вып. 6, ч. 2. С. 521–530. EDN: PXTKJN.
20. Харионовский А.А., Данилова М.Ю. Долевое участие угольной промышленности в негативном воздействии на окружающую среду // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2020. № 1. С. 86–93. EDN: FJNDHO.
21. Arefieva O. et al. Impact of mine waters on chemical composition of soil in the Partizansk Coal Basin, Russia // International Soil and Water Conservation Research. 2019. Vol. 7, iss. 1. P. 57–63. DOI: 10.1016/j.iswcr.2019.01.001. EDN: KPTOMM.
22. Bandyopadhyay S. et al. Assessment of forest ecosystem development in coal mine degraded land by using Integrated Mine Soil Quality Index (IMSQI): the evidence from India // Forests. 2020. Vol. 11(12). Art. 1310. DOI: 10.3390/f11121310. EDN: YBQAGV.
23. Bragina P.S. et al. Soils on overburden dumps in the forest steppe and mountain taiga zones of the Kuzbass // Eurasian Soil Science. 2014. Vol. 47. P. 723–733. DOI: 10.1134/S1064229314050032. EDN: UEOVUP.
24. Dutta S., Jain M. K., Kumar D. Evaluation of soil heavy metals in Raniganj open-cast coal mines in India: Spatial distribution, Positive Matrix Factorization and Monte Carlo Simulation // Process Safety and Environmental Protection. 2025. Vol. 194. P. 1038–1055. DOI: 10.1016/j.psep.2024.12.039. EDN: IBMPFS.
25. Kostin A.S. et al. Data on physico-chemical characteristics and elemental composition of gray forest soils (Greyzemic Phaeozems) in natural-technogenic landscapes of Moscow brown coal basin // Data in Brief. 2021. Vol. 35. Art. 106817. DOI: 10.1016/J.DIB.2021.106817. EDN: OHXBLG.
26. Lewinska-Preis L. et al. Selected ions and major and trace elements as contaminants in coal-waste dump water from the Lower and Upper Silesian Coal Basins (Poland) // International Journal of Coal Science and Technology. 2021. Vol. 8. P. 790–814. DOI: 10.1007/s40789-021-00421-9. EDN: XYUOAZ.
27. Li J. et al. Effects of regenerating vegetation on soil enzyme activity and microbial structure in reclaimed soils on a surface coal mine site // Applied Soil Ecology. 2015. Vol. 87. P. 56–62. DOI: 10.1016/j.apsoil.2014.11.010. EDN: UOEVB.
28. Martinez L.L.G., Poleto C. Assessment of diffuse pollution associated with metals in urban sediments using the geoaccumulation index (Igeo) // Journal of Soils and Sediments. 2014. Vol. 14, iss. 7. P. 1251–1257. DOI: 10.1007/s11368-014-0871-y. EDN: DZWADP.

29. Mitrakova N.V. et al. Chemical and ecological properties of soils and the NDVI analysis on reclaimed sulfide coal waste dumps in the boreal zone // *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024. Vol. 9, № 4. P. 406–419. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-04-206. EDN: UXEJYX.
30. Thakur T.K. et al. A geospatial analysis of coal mine overburden reclamation: Land use, carbon stock, biomass, and soil genesis in chronosequence plantations // *Journal of Geochemical Exploration*. 2025. Vol. 271. Art. 107674. DOI: 10.1016/j.gexplo.2025.107674. EDN: VOGYUA.
31. Yiwei C. et al. Occurrence and fate of some trace elements during pyrolysis of Yima coal China // *Energy and fuels*. 2008. Vol. 22, № 6. P. 3877–3882.

References

1. Androkhanov V.A., Sokolava N.A. [Soil and ecological state of the surface of anthracite deposit dumps (using the Gorlovskoye anthracite deposit, Novosibirsk region as an example)]. *Dostiženija nauki i tehniki APK*. V. 36, No. 5 (2022): pp. 31-36. (In Russ.). DOI 10.53859/02352451_2022_36_5_31.
2. Arkhipov A.V., Zemtsovskaya E.V. [Possibility of reclamation of waste dumps in Arctic conditions and the influence of reclamation on waste dump formation]. *Gornyj informacionno-analitičeskij bjulleten'*. No. 4 (2016): pp. 110-121. (In Russ.). EDN: VPLZR.
3. Tartakovskii A.M., ed. *Atlas Permskogo kraja* [Atlas of the Perm Territory]. Perm, 2012. 124 p. (In Russ.).
4. Galayko V.V., Zenkov I.V. Patent No. 2828496 C1 Russian Federation, IPC E21C 41/32, A01C 11/02. *Metod formirovaniya otkosa porodnogo otvala s ècologičeskoj napravlennoš'ju s biologičeskoj rekultivaciej* [Method for forming a slope of a rock dump with an environmentally friendly focus and biological reclamation]. No. 2024112186: declared 04.05.2024; published 14.10.2024. (In Russ.).
5. Basharkevich L.D., Kalmykov G.S., Lushnikov V.A., Mironov K.V., Tarkhaneev B.F., eds. *Geologija mes-toroždenij uglja i gorjučich slancev SSSR* [Geology of coal and oil shale deposits of the USSR]. Moscow, Nedra Publ., 1967, V. 4. 476 p. (In Russ.).
6. Gurkova E.A., Androkhanov V.A., Lavrinenko A.T. [Resources and specifics of reclamation of coal mining waste dumps in Khakassia]. *Počvy i okružajuščaja sreda*. V. 3, No. 4 (2020). Art. e127. DOI: 10.31251/pos.v3i4.127. (In Russ.).
7. Dridiger V.K., Stukalov R.S., Matveev A.G. [The influence of soil type and its density on the yield of winter wheat cultivated using no-till technology in the zone of unstable moisture in the Stavropol Territory]. *Zemledelecie*. No. 2 (2017): pp. 19-22 (In Russ.).
8. Eremchenko O.Z., Mitrakova N.V. *Metod otsenki biologičeskoj aktivnosti i toksičnosti pochv i tehnogennih gruntov* [Method for assessing the biological activity and toxicity of soils and technogenic soil grounds: patent 2620555 Russian Federation]. No. 2016113050; declared 05.04.2016; published 26.05.2017, Bulletin No. 15. (In Russ.).
9. Eremchenko O.Z., Mitrakova N.V. [Phytotesting of soils and technogenic surface formations in urban landscapes]. *Bulletin of Perm University. Biology*. No. 1 (2016): pp. 60-67. (In Russ.). EDN: VVMYRT.
10. Eremchenko O.Z., Sapsyn R.V., Lozhkina E.A., Tyrshu E.V. [Evaluation of the effectiveness of reclamation of oil-contaminated soils]. *Bulletin of Perm University. Biology*. No. 1 (2022): pp. 64-71. DOI 10.17072/1994-9952-2022-1-64-71. (In Russ.). EDN: UYMHVC.
11. Kopylov I.S. [Patterns of formation of soil landscapes of the Urals, their geochemical features and anomalies]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija*. No. 4 (2013): pp. 395. (In Russ.). EDN: ROFXZP.
12. Magda E.V., Mazirov M.A., Zinchenko M.K. [Activity of catalase and invertase at different intensities of mechanical tillage]. *Vladimirskij zemledelec*. No. 2(100) (2022): pp. 24-30. DOI:10.24412/2225-2584-2022-2-24-30 (In Russ.). EDN: FJFLUX.
13. Maksimovich N.G., Pyankov S.V. *Kizelovskij ugolnyj Bassejn* [Kizelovsky coal basin: environmental problems and solutions]. Perm, 2018. 288 p. (In Russ.). EDN: JSJQPX.
14. Novoselova E.I., Volkova O.O. [The influence of heavy metals on the activity of catalase in different types of soils]. *Izvestija Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. No. 2 (2017): pp. 190-193. (In Russ.). EDN: YMXHIZ.
15. Osintseva M.A., Dyukova E.A. [Study of soil cover features and bioreclamation of coal dumps]. *Vestnik Baltijskogo federalnogo universiteta im. I. Kanta. Ser.: Estestvennye i medicinskie nauki*. No. 4 (2024): pp. 86-98. DOI: 10.5922/vestniknat-2024-4-6. (In Russ.).
16. Mineev V.G., ed. *Praktikum po agrochimii* [Workshop on agrochemistry]. Moscow, MGU Publ., 2001. 689 p. (In Russ.).
17. Saetgalieva G.E. [Enzymatic activity of soil as an indicator of its fertility]. *Molodoj učenij*. No. 2(61) (2014): pp. 277-278. (In Russ.). EDN: RVNMBP.
18. Sayranova P.Sh., Eremchenko O.Z. [Properties of psammozems of Kama floodplain terraces and assessment of their resistance to Cu and Cd pollution]. *Bulleten Počvennogo instituta im. V.V. Dokučaeva*. No. 119 (2024): pp. 66-97. DOI: 10.19047/0136-1694-2024-119-66-97 (In Russ.). EDN: TLEBSH.

19. Sokolov E.M., Kamakhina S.A. [The influence of the soil cover of the Moscow coal basin on the development of plant crops]. *Izvestija TulGU. Techničeskie nauki*. V. 6, Iss. 2 (2011): pp. 521-530. (In Russ.).
20. Kharionovsky A.A., Danilova M.Yu. [The coal industry's share of negative environmental impacts]. *Vestnik naučnogo centra po bezopasnosti rabot v ugol'noi promyšlennosti*. No. 1 (2020): pp. 86-93. (In Russ.).
21. Arefieva O., Nazarkina A.V., Gruschakova N.V., Skurikhina J.E., Kolycheva V.B. Impact of mine waters on chemical composition of soil in the Partizansk Coal Basin, Russia. *International Soil and Water Conservation Research*. V. 7, Iss. 1 (2019): pp. 57-63. DOI: 10.1016/j.iswcr.2019.01.001.
22. Bandyopadhyay S., Novo L.A.B., Pietrzykowski M., Maiti S. K. Assessment of forest ecosystem development in coal mine degraded land by using Integrated Mine Soil Quality Index (IMSQI): the evidence from India. *Forests*. V. 11(12) (2020). Art. 1310. DOI: 10.3390/f11121310.
23. Bragina P.S., Tsibart A.S., Zavadskaya M.P., Sharapova A.V. Soils on overburden dumps in the forest steppe and mountain taiga zones of the Kuzbass. *Eurasian Soil Science*. V. 47 (2014): pp. 723-733. DOI: 10.1134/S1064229314050032.
24. Dutta S., Jain M. K., Kumar D. Evaluation of soil heavy metals in Raniganj open-cast coal mines in India: Spatial distribution, Positive Matrix Factorization and Monte Carlo Simulation. *Process Safety and Environmental Protection*. V. 194 (2025): pp 1038-1055. DOI: 10.1016/j.psep.2024.12.039.
25. Kostin A.S., Krechetov P.P., Chernitsova O.V., Terskaya E.V. Data on physico-chemical characteristics and elemental composition of gray forest soils (Gryezemic Phaeozems) in natural-technogenic landscapes of Moscow brown coal basin. *Data in Brief*. V. 35 (2021). Art. 106817. DOI: 10.1016/j.dib.2021.106817.
26. Lewinska-Preis L., Szram E., Fabianska M.J., Nadudvari A., Misz-Kennan M., Abramowicz A., Kruszwski L., Kita A. Selected ions and major and trace elements as contaminants in coal-waste dump water from the Lower and Upper Silesian Coal Basins (Poland). *International Journal of Coal Science and Technology*. V. 8 (2021): pp. 790-814. DOI: 10.1007/s40789-021-00421-9.
27. Li J., Zhou X., Yan J., Li H., He J. Effects of regenerating vegetation on soil enzyme activity and microbial structure in reclaimed soils on a surface coal mine site. *Applied Soil Ecology*. V. 87 (2015): pp. 56-62. DOI: 10.1016/j.apsoil.2014.11.010.
28. Martinez L.L.G., Poletto C. Assessment of diffuse pollution associated with metals in urban sediments using the geoaccumulation index (Igeo). *Journal of Soils and Sediments*. Vol. 14, Iss. 7 (2014): pp. 1251-1257. DOI: 10.1007/s11368-014-0871-y.
29. Mitrakova N. V., Khayrulina E. A., Perevoshchikova A. A., Poroshina N. V., Malysheva E. E., Yakovleva E. S., Kobelev N. A. Chemical and ecological properties of soils and the NDVI analysis on reclaimed sulfide coal waste dumps in the boreal zone. *Mining Science and Technology (Russia)*. V. 9, No. 4 (2024): pp. 406-419. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-04-206.
30. Thakur T.K., Patel D.K., Saini S., Thakur A., Swamy S. L., Bakshi S., Kumar A., Husain F.M., Kumar R. A geospatial analysis of coal mine overburden reclamation: Land use, carbon stock, biomass, and soil genesis in chronosequence plantations. *Journal of Geochemical Exploration*. V. 271 (2025). Art. 107674. DOI: 10.1016/j.gexplo.2025.107674.
31. Yiwei C., Guijian L., Lei W., Yu K., Jianli Y. Occurrence and fate of some trace elements during pyrolysis of Yima coal China. *Energy and fuels*. V. 22, No. 6 (2008): pp. 3877-3882.

Статья поступила в редакцию 16.10.2025; одобрена после рецензирования 25.11.2025; принята к публикации 02.12.2025.

The article was submitted 16.10.2025; approved after reviewing 25.11.2025; accepted for publication 02.12.2025.

Информация об авторах

Н. В. Митракова – канд. биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории биогеохимии техногенных ландшафтов;

Н. С. Султанова – магистрант кафедры физиологии растений и экологии почв.

Information about the authors

N. V. Mitrakova – PhD, Senior Researcher, Laboratory of Biogeochemistry of Technogenic Landscapes;

N. S. Sultanova – Master's Student, Department of Plant Physiology and Soil Ecology.

Вклад авторов:

Митракова Н. В. – научное руководство; концепция исследования; написание исходного текста; итоговые выводы.

Султанова Н. С. – выполнение аналитических работ; поиск литературы; формулировка предварительных выводов.

Contribution of the authors:

Mitrakova N. V. – research supervision; methodology development; writing the draft; final conclusions.

Sultanova N. S. – performing analytical work; literature search; preliminary conclusions.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Научная статья

УДК 504.64.3

EDN: ZKBMVD

doi: 10.17072/1994-9952-2025-4-434-444



Мониторинг изменений зеленых зон на основе многовременных данных спутника Sentinel-2 в городе Тхайнгуен, Вьетнам

Тхань Фонг Нгуен^{1✉}, Елена Александровна Парахина²

^{1, 2} Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, Москва, Россия

^{1✉} thanhphong.dhtt@gmail.com

² parakhina-ea@rudn.ru

Аннотация. Городские зеленые зоны играют важную роль в улучшении городской среды, повышении качества жизни населения, и вносят значительный вклад в устойчивое развитие. Однако стремительная урбанизация привела к существенным изменениям в землепользовании, особенно к сокращению площадей зеленых насаждений в городах. Настоящее исследование использует спутниковые изображения Sentinel-2 и алгоритмы обработки данных для мониторинга и анализа изменений в зеленых пространствах города Тхайнгуен, Вьетнам. Наиболее точные результаты классификации были использованы для повторной классификации территории на две группы: городские зеленые зоны (зеленые насаждения) и прочие объекты (нерастительные объекты и водная поверхность). Сегментация осуществлялась с помощью программного обеспечения QGIS, MapInfo, eCognition и алгоритмов коррекции объектов. Анализ выявил значительные изменения в структуре городских зеленых зон во времени, что подчеркивает влияние расширения городской застройки на распределение зеленых насаждений. Полученные данные отражают как процессы развития, так и деградации зеленых насаждений в пределах города. Результаты исследования могут быть использованы городскими планировщиками и органами власти для разработки стратегий устойчивого развития, направленных на поддержание баланса между урбанизацией и охраной окружающей среды в Тхайнгуене и аналогичных городских районах.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, Sentinel-2, городские зеленые зоны, NDVI, устойчивое развитие, Вьетнам

Для цитирования: Нгуен Т. Ф., Парахина Е. А. Мониторинг изменений зеленых зон на основе многовременных данных спутника Sentinel-2 в городе Тхайнгуен, Вьетнам // Вестник Пермского университета. Сер. Биология. 2025. Вып. 4. С. 434–444. <http://dx.doi.org/10.17072/1994-9952-2025-4-434-444>.

ECOLOGY

Original article

Monitoring of green zone changes based on multitemporal Sentinel-2 satellite data in the city of Thai Nguyen, Vietnam

Thanh Phong Nguyen^{1✉}, Elena A. Parakhina²

^{1, 2} Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia

^{1✉} thanhphong.dhtt@gmail.com

² parakhina-ea@rudn.ru

Abstract. Urban green spaces play an important role in improving the urban environment, enhancing the quality of life for residents, and contributing significantly to sustainable development. However, rapid urbanization has led to substantial changes in land use, particularly the reduction of green areas in cities. This study utilizes Sentinel-2 satellite imagery and data processing algorithms to monitor and analyze changes in green spaces in the city of Thai Nguyen, Vietnam. The most accurate classification results were used to reclassify the area into two groups: urban green zones (vegetation) and other objects (non-vegetative areas and water bodies). Segmentation was carried out using QGIS, MapInfo, eCognition software, and object-based correction algorithms. The analysis revealed significant changes in the structure of urban green spaces over time, highlighting the impact of urban expansion on the distribution of vegetation. The data obtained reflect both the development and degradation processes of green spaces within the city. The research results can be used by urban planners and local authorities to develop sustainable development strategies aimed at maintaining a balance between urbanization and environmental protection in Thai Nguyen and similar urban areas.

Keywords: remote sensing, Sentinel-2, urban green spaces, NDVI, sustainable development, Vietnam

For citation: Thanh Phong N., Parakhina E. A. [Monitoring of green zone changes based on multitemporal Sentinel-2 satellite data in the city of Thai Nguyen, Vietnam]. *Bulletin of the Perm University. Biology*. Iss. 4 (2025): pp. 434-444. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.17072/1994-9952-2025-4-434-444>.

Введение

Охрана и развитие городских зеленых зон представляет собой важную задачу в условиях стремительного урбанизационного роста и влияния изменения климата. Зеленые насаждения не только способствуют улучшению качества урбанизированной среды и снижению эффекта городского теплового острова, но и повышают биологическое разнообразие, оказывая положительное влияние на здоровье населения [Grimm et al., 2008; Прохоренко, Демина, Мингазова, 2017; Бессмольная и др., 2023; Парахина, Риттер, 2024; Manika, Dhyani, 2024].

Во Вьетнаме такие города, как Ханой, Хошимин, Дананг и Тхайнгуен, сталкиваются с растущим давлением в части сохранения зеленых зон в условиях интенсивного роста городской инфраструктуры. В частности, в г. Тхайнгуен урбанизация увеличивает нагрузку на зеленые территории, ухудшая экологическую обстановку и оказывая влияние на здоровье общества.

Несмотря на повышающееся экологическое сознание населения и органов управления в Тхайнгуене, возможности мониторинга городских зеленых насаждений остаются ограниченными из-за высоких затрат и сложности охвата больших территорий. Технологии дистанционного зондирования и спутниковые данные, особенно Sentinel-2, предоставляют эффективное решение благодаря многовременной съемке с высоким пространственным разрешением, что позволяет отслеживать изменения городских зеленых зон в динамике.

Многоспектральный инструмент (MSI) спутника Sentinel-2 предоставляет информацию о площади и состоянии растительного покрова, позволяя выявлять тенденции и изменения во времени. Цель настоящего исследования – применить данную технологию для анализа изменений площади и качества зеленых зон г. Тхайнгуен, а также предоставить данные для устойчивого городского планирования.

Настоящая статья фокусируется на использовании данных Sentinel-2 MSI для оценки изменений в структуре зеленых зон Тхайнгуена, выявлении тенденций развития и деградации, а также на формулировании рекомендаций по сохранению и устойчивому развитию городской зеленой инфраструктуры. Исследование направлено на поддержку градостроительной политики, улучшение качества окружающей среды и здоровья населения в условиях урбанизации.

Город Тхайнгуен – административный, экономический и культурный центр одноименной провинции, расположен в северо-восточном среднегорном и горном регионе Вьетнама, примерно в 75 км к северу от столицы Ханой по трассе № 3 (рис. 1). Географические координаты города находятся в диапазоне от 21°25' до 21°45' северной широты и от 105°45' до 106°00' восточной долготы. Город граничит:

- на севере – с провинцией Баккан,
- на западе – с провинциями Виньфук и Туенкуанг,
- на востоке – с провинциями Лангшон и Бакзянг,
- на юге – с провинциями Футхо и Ханой.

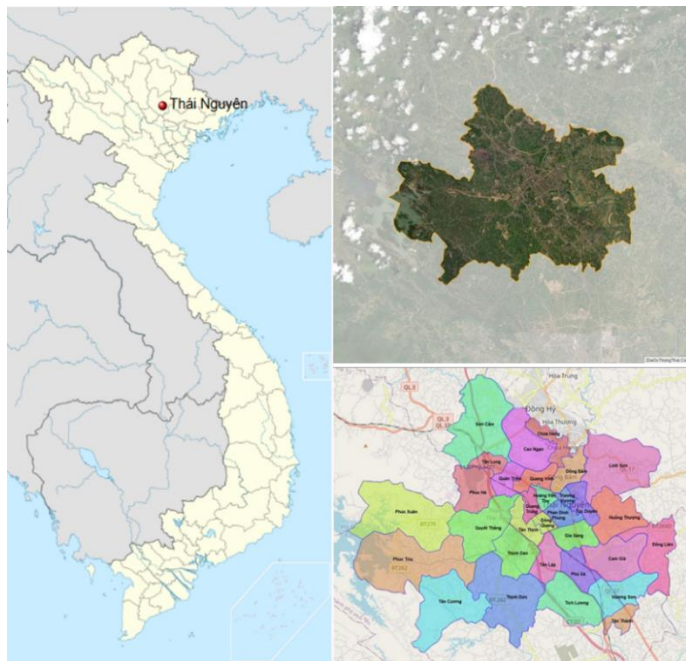


Рис. 1. Географическое положение г. Тхайнгуен [Thai Nguyen Province]
[Geographical location of Thai Nguyen]

Благодаря своему географическому положению Тхайнгуен играет роль моста между дельтой Красной реки и северными горными провинциями, одновременно выступая как важный промышленный и образо-

вательный центр северо-восточного региона. Как индустриальный и академический центр Тхайнгуен сталкивается с необходимостью развивать зеленую инфраструктуру и обеспечивать наличие городских зеленых зон с целью снижения загрязнения окружающей среды и повышения качества жизни населения.

По состоянию на 2023 г. численность населения провинции Тхайнгуен составляла около 1.3 млн человек, из них около 350 тыс. проживают в г. Тхайнгуен. Средняя плотность населения в городской зоне составляет около 1 500 человек на км².

Город Тхайнгуен характеризуется тропическим муссонным климатом (табл. 1). Среднегодовая температура колеблется от 23 до 25°C. Лето жаркое и влажное, температура может достигать 35°C, а зима прохладная, с минимальными температурами около 10°C. Среднегодовое количество осадков составляет от 2 000 до 2 500 мм, основная часть которых выпадает в сезон дождей – с мая по октябрь. Продолжительность солнечного сияния составляет от 1 300 до 1 750 часов в год, что создает благоприятные условия для сельского хозяйства, особенно для выращивания чая и плодовых культур.

Таблица 1

Климат г. Тхайнгуен [Thai Nguyen Province]
[Climate in the city of Thai Nguyen]

Показатель	Янв.	Фев.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сент.	Окт.	Нояб.	Дек.	Год
Абсолютный максимум, °C	31.1	40.7	35.7	37.7	39.4	39.5	38.8	38.4	37.4	34.9	34.0	30.6	40.7
Средний суточный максимум, °C	19.7	20.2	22.8	27.0	31.3	32.6	32.8	32.4	31.7	29.1	25.6	22.2	27.3
Средняя температура, °C	16.0	17.0	19.8	23.6	27.1	28.4	28.6	28.1	27.1	24.5	20.9	17.6	23.2
Средний суточный минимум, °C	13.6	14.9	17.8	21.3	24.0	25.4	25.5	25.2	24.1	21.3	17.6	14.6	20.4
Абсолютный минимум, °C	3.0	1.3	6.1	12.6	16.4	19.7	20.5	21.7	16.3	10.2	7.2	3.2	1.3
Среднее число солнечных часов в месяц	69	46	46	80	170	164	189	184	192	174	147	125	1585
Среднее число дней с осадками	10.4	12.4	17.8	17.5	15.3	17.0	17.7	18.1	13.5	10.7	7.3	5.7	163.5
Норма осадков, мм	25	35	62	121	232	338	410	347	237	146	49	24	2025
Средняя влажность, %	79.7	81.3	85.1	85.8	82	82.8	83.6	85.1	82.5	80.1	77.7	76.9	81.9

Методы исследования

Процесс пространственного анализа городских зеленых насаждений с использованием многовременных изображений Sentinel-2 представлен на рис. 2. Прежде всего отбираются спутниковые снимки, соответствующие району исследования, обеспечивая полное пространственное покрытие и устанавливая временные рамки анализа – сезонные или годовые, в зависимости от целей исследования. Для исключения чрезмерных атмосферных искажений устанавливается порог облачного покрытия, что позволяет повысить качество данных (табл. 2).

Таблица 2

Информация о спутниковых изображениях
[Information about satellite images]

Регион исследования	Путь зоны	Покрывтие облаками, %	Дата получения	ID сцены/продукта
Тхайнгуен	T48QWJ	1.91	27.04.2020	S2A_MSIL2A_20200428T032541_R018_T48QWJ_20200922T095403
Тхайнгуен	T48QWJ	0.08	28.04.2024	S2A_MSIL2A_20240427T032521_R018_T48QWJ_20240427T101549

После отбора изображения Sentinel-2 проходят этапы предварительной обработки, включая фильтрацию облачности, атмосферную коррекцию для нормализации значений отражательной способности, а также повторную дискретизацию спектральных каналов до единого пространственного разрешения.

Причина выбора изображений 2020 и 2024 гг. Для оценки изменений зеленых насаждений на протяжении временного периода были выбраны спутниковые снимки 2020 и 2024 гг., т. к. эти годы отражают важные фазы изменений в развитии городских зеленых зон, что обусловлено активной урбанизацией и изменениями в землепользовании в исследуемом регионе. Выбор этих лет также был продиктован доступностью высококачественных данных и минимальным облачным покрытием, что обеспечило точность и надежность анализа. Сравнение с более ранними изображениями было ограничено из-за недостаточной точности или плохого качества доступных снимков. Кроме того, изображения 2020 и 2024 гг. дают возможность оценить изменения на уровне растительности и преобразования растительного покрова за последние несколько лет, что критично для дальнейшего планирования устойчивого развития.

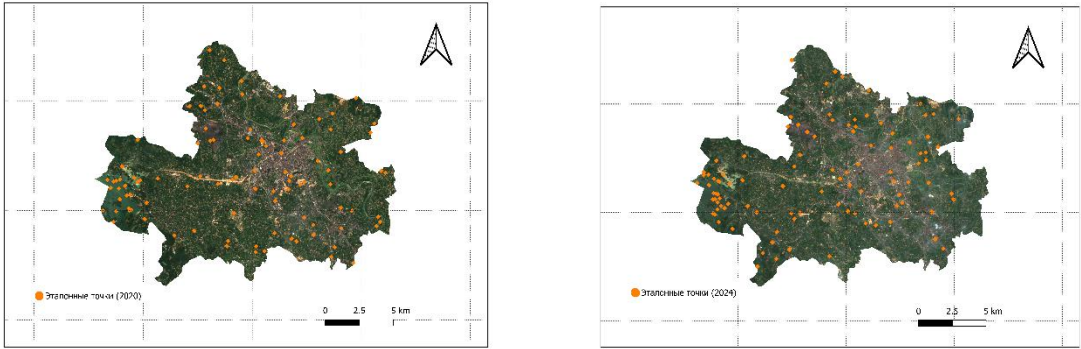


Рис. 2. Сравнение случайных контрольных точек (100 образцов) на карте NDVI и спутниковых изображениях Sentinel-2, Google Earth и Forest Height 2020, полученных в один и тот же период времени

[Comparison of random control points (100 samples) on the NDVI map and Sentinel-2, Google Earth and Forest Height 2020 satellite images obtained during the same time period]

Данный процесс обеспечивает согласованность и точность данных, создавая надежную основу для пространственного анализа. Используемые в исследовании данные доступны на платформе Microsoft STAC API, где уже была проведена предварительная обработка, необходимая для последующего анализа. Расчет NDVI (Normalized Difference Vegetation Index – нормализованный индекс растительного покрова) осуществляется по следующей формуле:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}.$$

где: NIR – ближний инфракрасный канал (Near Infrared); Red – красный спектральный канал [Afirah, Sharifah, Asmala, 2017; Климанова, Колбовский, Илларионова, 2020; Ismayilova, Timpf, 2022; Trinh et al., 2024].

Значения NDVI варьируются в диапазоне от -1 до +1. Согласно классификации, предложенной Т. Afirah и соавт. [Afirah, Sharifah, Asmala, 2017], текущее состояние растительного покрова делится на четыре категории (табл. 3).

Таблица 3

Классификация растительного покрова на основе значений NDVI
[Land cover classification based on NDVI values]

Значение NDVI	Категория
$-1 \leq NDVI < 0$	Отсутствие растительности
$0 \leq NDVI < 0.2$	Низкая степень покрытия
$0.2 \leq NDVI < 0.6$	Средняя степень покрытия
$0.6 \leq NDVI < 1$	Высокая степень покрытия

Индекс NDVI является основным инструментом для оценки состояния растительности и ее динамики в рамках данного исследования. Высокие значения NDVI соответствуют зонам с густым растительным покровом, таким как леса, парки и экологические зоны, в то время как низкие значения указывают на наличие застроенных территорий, пустырей или открытых земель. В исследовании использованы определенные пороговые значения NDVI, которые были адаптированы с учетом особенностей района Тхайнгуена за 2020 и 2024 гг. Эти пороги были установлены на основе данных Sentinel-2, а также проверены с использованием изображений Google Earth и данных Forest Height, что позволило более точно соотнести значения NDVI

с реальными изменениями на местности [Potapov et al., 2022; Zanaga et al. 2022].

Вместо использования нескольких аналитических индексов, исследование сосредоточено на применении единой классификации NDVI, основанной на выбранных пороговых значениях, что позволяет достичь высокой точности в анализе растительного покрова и изменений землепользования. Данный индекс использует актуальные данные и является надежным для мониторинга изменений зеленых зон, учитывая факторы урбанизации и изменения в землепользовании в Тхайнгуене в период с 2020 по 2024 гг.

Обучающая выборка формировалась из исследуемой территории и включала 3 основных класса покрытия: растительность, нерастительные объекты и водные поверхности. Класс “растительность” охватывает как густые насаждения, так и кустарники; нерастительные объекты включают застроенные зоны и открытые земли; водные объекты охватывают реки, озера и водно-болотные угодья. Эти данные использовались для обучения и валидации индексов классификации.

Результаты классификации по каждому из трех индексов оценивались по общему коэффициенту точности (Overall Accuracy). Лучший индекс был выбран для дальнейшего анализа, при этом класс “растительность” интерпретировался как зеленое городское пространство, а остальные классы — как прочие объекты.

Индекс Каппа используется для оценки точности карт NDVI, построенных в рамках данного исследования. Для каждой карты NDVI за 2020 и 2024 гг. было случайным образом выбрано 100 контрольных точек (рис. 2, визуальная интерпретация), охватывающих все классы NDVI: высокая растительность (3), средняя (2), низкая (1) и отсутствие растительности (0). Каждая точка была сопоставлена с фактическим классом, определенным визуально на спутниковых изображениях Google Earth и Forest Height, полученных в тот же период времени. После сопоставления была построена матрица ошибок (confusion matrix), отражающая точность классификации NDVI, включающих 3 элемента: рассчитанное значение NDVI, наблюдаемое значение NDVI и значение коэффициента Каппа. Значения коэффициента Каппа варьируются от 0 до 1, где 1 соответствует полной точности (100%). При значении Каппа > 0.75 модель считается высокоточной и хорошо отражающей реальность [Xiong et al., 2022].

Индекс Каппа рассчитывается по следующей формуле:

$$\kappa = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e}.$$

или:

$$\kappa = \frac{N \sum_{i=j=1}^r x_{ij} - \sum_{i=j=1}^r (x_{i \cdot} \cdot x_{\cdot j})}{N^2 - \sum_{i=j=1}^r (x_{i \cdot} \cdot x_{\cdot j})} \quad (\text{табл. 4}),$$

где: P_o – наблюдаемая согласованность (*Observed agreement*) – доля совпадений между классификацией и проверкой; P_e – ожидаемая согласованность (*Expected agreement*) – вероятность совпадения между двумя источниками классификации случайным образом.

Таблица 4

Расшифровки обозначений
[Interpretation of the symbols]

Обозначение	Значение
κ	Значение индекса Каппа (от 0 до 1)
N	Общее количество контрольных точек (количество выборок)
r	Количество классов классификации (в данном случае 4 класса NDVI)
x_{ij}	Количество точек, правильно классифицированных в класс ij (значения главной диагонали матрицы ошибок)
x_i	Общее количество точек, наблюдаемых в классе i (сумма по строке i)
x_j	Общее количество точек, классифицированных в класс j (сумма по столбцу j)
$\sum_{i=j=1}^r x_{ij}$	Общее количество правильно классифицированных точек (сумма главной диагонали)
$\sum_{i=j=1}^r (x_{i \cdot} \cdot x_{\cdot j})$	Ожидаемая согласованность ($P_e \cdot N^2$)

Точность классификации зависит не только от качества спутниковых изображений, но и от специфики исследуемой территории, а также от правильного выбора объектов для обучения индекса интерпретации. Автоматическая классификация может привести к ошибкам, особенно при путанице между схожими типами покрытий, например, сельскохозяйственные земли без растительности могут быть ошибочно отнесены к разреженным лесам или застроенным территориям без зеленого покрова.

Тем не менее, карты NDVI за 2020 и 2024 гг. продемонстрировали удовлетворительную точность классификации (табл. 5) с коэффициентами Каппа, равными 0.84 и 0.86667 соответственно, а также общей точностью классификации 88% и 90% соответственно. Эти результаты подтверждают высокую точность проведенной классификации, которая отражает реальные изменения растительного покрова в период с 2020 по 2024 гг.

Таблица 5

Матрица ошибок интерпретации за 2020 и 2024 гг.
[Interpretation Error Matrix for 2020 and 2024]

Год	Классификация	0	1	2	3	Итого	Точность	Каппа
2020	0	25	0	0	0	25	0.88	0.84
	1	2	22	1	0	25		
	2	0	5	20	0	25		
	3	0	0	4	21	25		
	Итого	27	27	25	21	100		
2024	0	23	2	0	0	25	0.9	0.86667
	1	2	23	0	0	25		
	2	0	2	23	0	25		
	3	1	0	3	21	25		
	Итого	26	27	26	21	100		

Сравнение с ранее опубликованными исследованиями, например, работой Norovsuren и соавт. [Norovsuren et al., 2019], где точность классификации карт землепользования (LULC) достигала 86.5% и 89%, показывает, что результаты данного исследования сопоставимы, несмотря на некоторые различия в методах классификации и используемых данных. Таким образом, построенные карты NDVI в настоящем исследовании являются надежным инструментом для анализа изменений зеленых пространств в динамике.

Результаты и их обсуждение

В исследовании использовались спутниковые изображения Sentinel-2, полученные в разные временные периоды. Изображения отбирались с учетом высокого качества данных, минимального облачного покрытия и соответствия сезонности вегетационного цикла растений, что обеспечивало высокую точность расчета вегетационного индекса NDVI. На основе спектральных каналов этих снимков был рассчитан индекс растительности NDVI.

Результаты классификации NDVI и пространственного анализа зеленых зон за 2020 и 2024 гг. демонстрируют значительные изменения в степени покрытия на территории г. Тхайнгуен. Диапазон значений NDVI в 2020 г. составил от -0.529223 до 0.888698, а в 2024 – от -0.215541 до 0.634081. На основе порогов, представленных на рис. 3, значения NDVI были классифицированы следующим образом: 0 – отсутствие растительности, 1 – низкая степень покрытия, 2 – средняя степень покрытия, 3 – высокая степень покрытия (рис. 4).

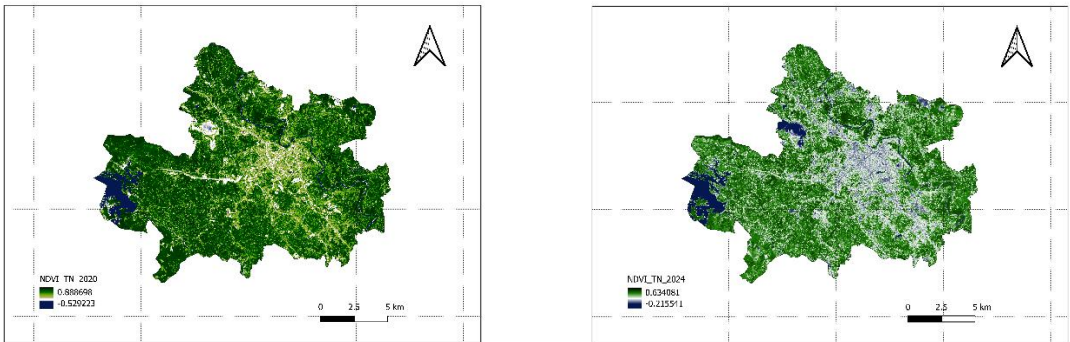


Рис.3. Значения NDVI г. Тхайнгуен по годам
[NDVI values of Thai Nguyen city by year]

Области без растительности обычно соответствуют водным объектам или полностью застроенным территориям. Характерным примером является северо-запад города, где активно ведется добыча угля, что препятствует развитию растительности или делает его крайне слабым. Участки с низким уровнем

покрытия (класс 1) соответствуют жилым зонам, пастбищам, кустарникам и спортивным площадкам. Участки со средней степенью покрытия (класс 2) охватывают сельскохозяйственные земли, сады, цветники и зеленые коридоры в городском ландшафте (табл. 6, рис. 5).. Зоны с высокой степенью покрытия (класс 3) включают леса, природоохранные территории и крупные городские парки.

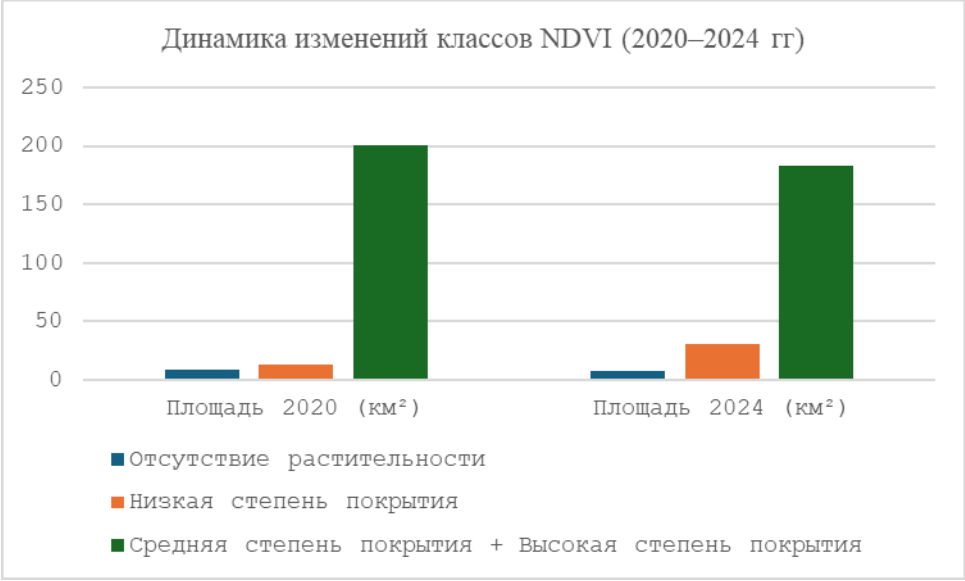


Рис.4. Диаграмма изменений классификаций покрова по уровням NDVI во временной динамике
[Diagram of changes in land cover classifications by NDVI levels over time]

Таблица 6

Площади NDVI-классов (км²) [Areas of NDVI classes (km²)]					
Класс NDVI	Описание покрытия	Площадь 2020 (км²)	Площадь 2024 (км²)	Изменение (км²)	Изменение (%)
0	Отсутствие растительности	8.5849	8.2573	-0.3276	-3.82
1	Низкая степень покрытия	13.5425	31.1282	17.5857	129.86
2	Средняя и Высокая степень покрытия	200.4113	183.1532	-17.2581	-8.61
Итого		222.5387	222.5387	0	0

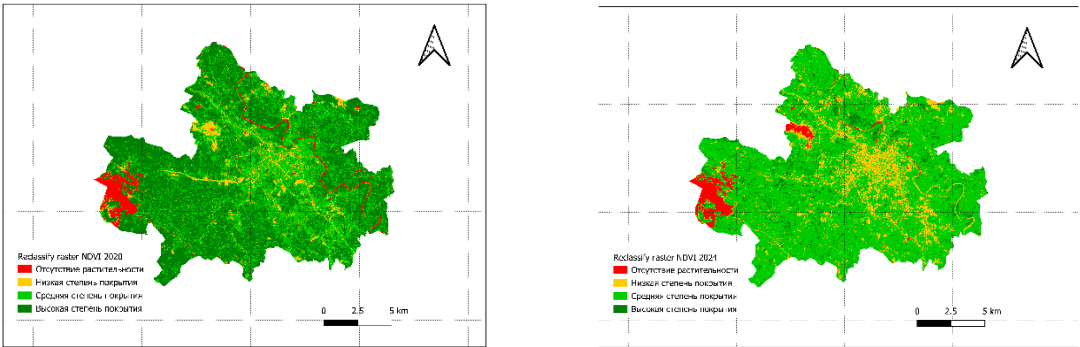


Рис.5. Пространственное распределение плотности растительности
[Spatial distribution of vegetation density]

Анализ пространственного распределения растительности на основе индекса NDVI за 2020 и 2024 гг. выявил следующие изменения в степени покрытия на территории г. Тхайнгуен. Результаты показывают

значительные изменения в структуре растительного покрова, которые можно детализировать следующим образом:

- Отсутствие растительности (класс 0). Площадь участков без растительности в 2020 г. составила 8.5849 км², а в 2024 г. – 8.2573 км², что соответствует уменьшению на 3.82%. Это может свидетельствовать о небольшом снижении площади территорий, лишенных растительности, таких как полностью застроенные участки и водоемы. Однако такие изменения могут быть связаны с природными и человеческими факторами. Например, несмотря на стабилизацию общего числа земель без растительности, в отдельных районах городского развития может наблюдаться увеличение застроенных территорий или преобразования земель в объекты инфраструктуры. В то же время на некоторых территориях может происходить восстановление растительности, что также влияет на эти показатели.
- Низкая степень покрытия (класс 1). Площадь участков с низким уровнем растительности увеличилась с 13.5425 км² в 2020 г. до 31.1282 км² в 2024 г., что представляет собой значительное увеличение – на 129.86%. Это увеличение отражает активную урбанизацию и изменения в землепользовании. В частности, увеличение площади данной категории связано с расширением жилых и коммерческих зон, а также увеличением площадей сельскохозяйственных угодий и пустырей, которые ранее могли быть зелеными территориями. Расширение городской застройки и развитие инфраструктуры, вероятно, являются главными факторами этого процесса. Кроме того, увеличение площади с низким уровнем растительности может указывать на преобразование природных и полуприродных территорий в урбанизированные или сельскохозяйственные зоны с меньшим растительным покрытием.
- Средняя и высокая степень покрытия (классы 2 и 3). Площадь этих классов была объединена в одну категорию для упрощения анализа, поскольку на исследуемой территории наблюдаются схожие тенденции в изменениях этих типов покрытия. В 2020 г. суммарная площадь классов 2 и 3 составила 200.4113 км², а в 2024 г. – 183.1532 км², что означает сокращение на 8.61%. Такое снижение площади растительности связано с процессами урбанизации и возможным расширением сельскохозяйственных угодий, что приводит к частичной утрате природного растительного покрова. Снижение площади с высокой степенью растительного покрова связано с интенсивной урбанизацией и расширением инфраструктуры, что может свидетельствовать о деградации экосистем, включая вырубку лесов и изменение природных экосистем в ответ на климатические изменения. Такие изменения в структуре растительности требуют особого внимания, поскольку они могут повлиять на биоразнообразие, качество воздуха и воды, а также на создание природных коридоров для фауны.

Результаты классификации на основе данных NDVI за 2020 и 2024 гг. позволяют заключить, что на территории г. Тхайнгуен наблюдается заметная динамика изменений растительности в контексте расширения урбанизированных территорий и сельскохозяйственных угодий, что непосредственно влияет на структуру растительного покрова. Применение индекса NDVI обеспечило точную и своевременную оценку этих изменений, позволяя выявить ключевые тенденции в развитии зеленых зон города.

Заключение

Настоящее исследование представляет собой одно из первых комплексных исследований изменений зеленых зон в г. Тхайнгуен (Вьетнам) с использованием многовременных спутниковых изображений Sentinel-2 L2A и индекса NDVI для оценки динамики растительного покрова в период с 2020 по 2024 гг. В работе использованы атмосферно скорректированные данные Sentinel-2 L2A, что позволяет обеспечить высокую точность отражающих свойств поверхности. Индекс NDVI был рассчитан для двух отдельных временных точек, а затем классифицирован на четыре уровня: отсутствие растительности (класс 0), низкая степень покрытия (класс 1), средняя степень покрытия (класс 2) и высокая степень покрытия (класс 3). После этого были проведены пространственные анализы и оценка точности классификации с использованием матрицы ошибок и коэффициента Каппа ($\kappa \approx 0.84$ и 0.86667), что подтверждает стабильность и высокую надежность интерпретации данных.

Результаты анализа изменений растительного покрова показывают, что общая площадь зеленых зон в городе практически не изменилась за период с 2020 по 2024 гг., однако произошли значительные изменения в структуре их распределения. Особенно заметно увеличение площади с низким уровнем покрытия растительностью, что связано с расширением урбанизированных территорий и активным развитием сельскохозяйственных земель. Эти изменения свидетельствуют о процессе деградации зеленых территорий, вызванного интенсивной урбанизацией и утратой природных экосистем в условиях роста города. Преобразования в распределении растительности требуют особого внимания, так как они могут свидетельствовать о потерях экосистемных услуг, таких как поддержание биоразнообразия, улучшение качества воздуха и воды, а также создание природных коридоров для фауны.

Результаты исследования подчеркивают важность интеграции анализа NDVI с использованием многовременных спутниковых данных для мониторинга динамики зеленых инфраструктур на городских территориях. Такой подход позволяет надежно отслеживать пространственно-временные изменения и в дальнейшем использовать эти данные для выработки рекомендаций по устойчивому градостроительному планированию и сохранению экосистемных функций.

Для повышения эффективности управления зелеными зонами в условиях интенсивной урбанизации в качестве приоритетных направлений можно выделить следующие меры.

- Интеграция мониторинга зеленых зон в процессы территориального планирования с использованием вегетационных индексов для оценки состояния и эффективности озеленения.
- Создание и правовая защита зеленых коридоров, соединяющих природные и полустественные экосистемы в городской среде, что поможет сохранить биоразнообразие и улучшить экологическое качество городской среды.
- Внедрение принципов «зеленой архитектуры» и устойчивого урбанизма с акцентом на вертикальное озеленение и озеленение крыш, что позволит увеличить долю зеленых территорий в городах.
- Общественное участие в управлении зелеными территориями, включая создание цифровых платформ для мониторинга состояния зеленых зон и активное участие местных жителей в инициативах по озеленению.
- Разработка локальных нормативов по минимальным стандартам зеленого покрытия на душу населения, что обеспечит равномерное распределение зеленых зон и улучшение качества жизни горожан.

Реализация этих мер позволит не только повысить экологическую устойчивость городской среды, но и улучшить качество жизни населения, способствуя достижению целей Повестки дня ООН по устойчивому развитию (SDG 11: Устойчивые города и населенные пункты). Более того, такие подходы помогут создать сбалансированную экологическую инфраструктуру, содействующую долгосрочной устойчивости городов в условиях изменения климата и роста населения. Таким образом, результаты исследования подчеркивают важность применения спутниковых технологий для мониторинга изменений в городской среде и планирования устойчивых решений для будущих поколений.

Список источников

1. Бессмольная М.Я. и др. Озеленение как фактор устойчивого развития городской среды. М.: Ай Пи Ар Медиа, 2023. 291 с. DOI: 10.23682/124290. EDN: FAWZUD.
2. Климанова О.А., Колбовский Е.Ю., Илларионова О.А. Зеленая инфраструктура города: оценка состояния и проектирование развития. М.: КМК, 2020. 324 с. EDN: PBPUTV.
3. Парахина Е.А., Риттер А.С. Динамика ландшафтов города Воронежа // Вестник евразийской науки. 2024. Т. 16, № 1. С. 1–12. URL: <https://esj.today/PDF/79NZVN124.pdf>.
4. Прохоренко Н.Б., Демина Г.В., Мингазова Д.Н. Оценка жизненного состояния деревьев в урбанизированных условиях Казани // Известия Самарского научного центра РАН, 2017. Т. 2–3. С. 507–512.
5. Afirah T., Sharifah S.S.A., Asmala A. Classification of Landsat 8 satellite data using NDVI thresholds // Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering. 2017. Vol. 8, № 4. P. 37–40.
6. Grimm N.B. et al. The changing landscape: Ecosystem responses to urbanization and pollution across climatic and societal gradients // Frontiers in Ecology and the Environment. 2008. Vol. 6. P. 264–272. DOI: 10.1890/070147.
7. Ismayilova I., Timpf S. Classifying urban green spaces using a combined Sentinel-2 and random forest approach // AGILE: GIScience Series. 2022. Vol. 3. Art. 38. DOI: 10.5194/agile-giss-3-38-2022.
8. Manika N., Dhyani S. Rampant Urbanization, Loss of Green Spaces, Depleting Foraging Wisdom for Nutrition, Health, and Protecting Urban Greenscapes: Lessons from Populous Uttar Pradesh, India // Urban Foraging in the Changing World. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024. P. 79–102. DOI: 10.1007/978-981-97-0345-6_6.
9. Norovsuren B. et al. Land cover classification using maximum likelihood method (2000 and 2019) at Khandgait valley in Mongolia // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 381. Art. 012054. DOI: 10.1088/1755-1315/381/1/012054.
10. Potapov P. et al. The Global 2000–2020 Land Cover and Land Use Change Dataset Derived from the Landsat Archive: First Results // Frontiers in Remote Sensing. 2022. Vol. 3. P. 1–22. Art. 856903. DOI: 10.3389/frsen.2022.856903. EDN: QSFGEW.
11. Thai Nguyen Province E-Portal – Народный совет и Народный комитет города Тхайнгуен. Официальный информационный портал города Тхайнгуен. URL: <https://thainguyen.gov.vn> (дата обращения: 01.01.2025).

12. Trinh L.H. et al. Monitoring of coastline change using Sentinel-2 MSI data. A case study in Thanh Hoa Province, Vietnam // *Bulletin of Geography. Physical Geography Series*. 2024. № 26. P. 77–87. DOI: 10.12775/bgeo-2024-0006.
13. Xiong N. et al. Land use and land cover changes and prediction based on multi-scenario simulation: A case study of Qishan County, China // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14(16). Art. 4041. DOI: 10.3390/rs14164041.
14. Zanaga D. et al. ESA WorldCover 10 m 2021 v200 // *Zenodo*. 2022. DOI: 10.5281/zenodo.7254221.

References

1. Bessmolnaya M.Y., Imeskenova E.G., Kisova S.V., Mankhanov A.D. *Ozelenenie kak factor rrazvitija go-rodskoj sredy* [Greening as a factor of sustainable urban development: monograph]. Moscow, IPR MediaPubl., 2023. 291 p. (In Russ.). DOI: 10.23682/124290. EDN: FAWZUD.
2. Klimanova O.A., Kolbovsky E.Y., Illarionova O.A. *Zelenaja infrastruktura goroda* [Urban green infrastructure: condition assessment and development planning]. Moscow, KMK Publ., 2020. 324 p. (In Russ.). EDN: PBPUTV.
3. Parakhina E.A., Ritter A.S. [Landscape dynamics of the city of Voronezh]. *Vestnik evrazijskoj nauki*. V. 16, No. 1 (2024): pp. 1-12. (In Russ.). URL: <https://esj.today/PDF/79NZVN124.pdf>.
4. Prokhorenko N.B., Demina G.V., Mingazova D.N. [Assessment of tree vitality under urban conditions of Kazan]. *Izvestija Samarskogo naučnogo centra RAN*. V. 2-3 (2017): pp. 507-512. (In Russ.).
5. Afirah T., Sharifah S.S.A., Asmala A. Classification of Landsat 8 satellite data using NDVI thresholds. *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering*. V. 8, No. 4 (2017): pp. 37-40.
6. Grimm N.B., Foster D., Groffman P., Grove J.M., Hopkinson C.S., Nadelhoffer K.J., Pataki D.E., Peters D.P. The changing landscape: Ecosystem responses to urbanization and pollution across climatic and societal gradients. *Frontiers in Ecology and the Environment*. V. 6 (2008): pp. 264-272. DOI: 10.1890/070147.
7. Ismayilova I., Timpf S. Classifying urban green spaces using a combined Sentinel-2 and random forest approach. *AGILE: GIScience Series*. V. 3 (2022). Art. 38. DOI: 10.5194/agile-giss-3-38-2022.
8. Manika N., Dhyani S. Rampant Urbanization, Loss of Green Spaces, Depleting Foraging Wisdom for Nutrition, Health, and Protecting Urban Greenspaces: Lessons from Populous Uttar Pradesh, India. In: *Urban Foraging in the Changing World*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024, pp. 79-102. DOI: 10.1007/978-981-97-0345-6_6.
9. Norovsuren B., Tseveen B., Batomunkuev V., Renchin T., Natsagdorj E., Yangiv A., Mart Z. Land cover classification using maximum likelihood method (2000 and 2019) at Khandgait valley in Mongolia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. V. 381 (2019). Art. 012054. DOI: 10.1088/1755-1315/381/1/012054.
10. Potapov P., Hansen M.C., Pickens A., Hernandez-Serna A., Tyukavina A., Turubanova S., Zalles V., Li X., Khan A., Stolle F., Harris N., Song X., Baggett A., Kommareddy I., Kommareddy A. The Global 2000-2020 Land Cover and Land Use Change Dataset Derived from the Landsat Archive: First Results. *Frontiers in Remote Sensing*. V. 3 (2022): pp. 1-22. Art. 856903. DOI: 10.3389/frsen.2022.856903. EDN: QSFGEW.
11. Thai Nguyen Province E-Portal – The People's Council and the People's Committee of Thainguayen City. The official information portal of the city of Thainguayen. Available at: <https://thainguayen.gov.vn> (accessed 01.01.2025)
12. Trinh L.H., Le T.G., Tran X.B., Tran Q.V., Le V.P., To T.P. Monitoring of coastline change using Sentinel-2 MSI data. A case study in Thanh Hoa Province, Vietnam. *Bulletin of Geography. Physical Geography Series*. No. 26 (2024): pp. 77-87. DOI: 10.12775/bgeo-2024-0006.
13. Xiong N., Yu R., Yan F., Wang J., Feng Z. Land use and land cover changes and prediction based on multi-scenario simulation: A case study of Qishan County, China. *Remote Sensing*. V. 14(16) (2022). Art. 4041. DOI: 10.3390/rs14164041.
14. Zanaga D., Van De Kerchove R., Daems D., De Keersmaecker W., Brockmann C., Kirches G., Wevers J., Cartus O., Santoro M., Fritz S., Lesiv M., Herold M., Tsendbazar N.-E., Xu P., Ramoino F., Arino O. ESA WorldCover 10 m 2021 v200: global earth coverage map. *Zenodo*. (2022). DOI: 10.5281/zenodo.7254221.

Статья поступила в редакцию 25.08.2025; одобрена после рецензирования 19.11.2025; принята к публикации 02.12.2025.

The article was submitted 25.08.2025; approved after reviewing 19.11.2025; accepted for publication 02.12.2025.

Информация об авторах

Т. Ф. Нгуен – аспирант, кафедра рационального природопользования, Институт экологии, РУДН;

Е. А. Парахина – канд. биол. наук, доцент кафедры рационального природопользования, Институт экологии, РУДН.

Information about the authors

T. P. Nguyen – PhD candidate, Department of Rational Nature Management, Institute of Ecology, RUDN;

E. A. Parakhina – candidate of biological sciences, associate professor of the Department of Rational Nature Management, Institute of Ecology, RUDN.

Вклад авторов:

Нгуен Т. Ф. – научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; написание исходного текста; статистическая обработка материала; итоговые выводы.

Парахина Е. А. – доработка текста; итоговые выводы.

Contribution of the authors:

Nguyen T. P. – research supervision; research concept; methodology development; writing the draft; statistical processing of the material; final conclusions.

Parakhina E. A. – text revision; final conclusions.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.



Влияние натриевых солей пирроло[3,4-с]-пиразол-3-онов и 1-фенилпиразол-3-карбоксамидов на функциональную активность клеток врожденного иммунитета в экспериментальных моделях патологических состояний у мышей

О. Н. Гейн^{1, 3}, О. В. Бобровская³, М. В. Ибатуллин², В. Л. Гейн³, С. В. Гейн²

¹ Пермский государственный медицинский университет им. акад. Е.А. Вагнера, Пермь, Россия

² Институт экологии и генетики микроорганизмов, филиал ФГБУН ПФИЦ УрО РАН, Пермь, Россия

³ Пермская государственная фармацевтическая академия, Пермь, Россия

Автор, ответственный за переписку: Оксана Николаевна Гейн, heinon77@mail.ru

Аннотация. Основная функция клеток-эффекторов врожденного иммунитета – элиминация экзогенных и эндогенных патогенов. Однако в ряде случаев поглотительная и микробицидная активность фагоцитов может быть нарушена, что ведет к развитию патологических состояний. В связи с этим создание иммуномодулирующих препаратов с мягкой модулирующей активностью в отношении фагоцитарной функции лейкоцитов актуально. В этом плане перспективными являются натриевые соли пирроло[3,4-с]-пиразол-3-онов (1а-б) и 1-фенилпиразол-3-карбоксамидов (2а), которые в ранее проводимых исследованиях проявили модулирующее влияние на функции фагоцитирующих клеток. В данном исследовании нами было изучено влияние натриевых солей пирроло[3,4-с]-пиразол-3-онов (1а-б) и 1-фенилпиразол-3-карбоксамидов (2а) на изменение поглотительной активности перитонеальных лейкоцитов и их микробицидный потенциал в условиях двух- и шестичасового иммобилизационного стресса и острого воспаления. В ходе исследования были получены следующие результаты: натриевые соли пирроло[3,4-с]-пиразол-3-онов (1а-б) и 1-фенилпиразол-3-карбоксамидов (2а) нивелировали вызванное шестичасовой иммобилизацией угнетение поглотительной активности лейкоцитов, а также угнетение продукции активных кислородных радикалов, вызванное двух- и шестичасовым иммобилизационным стрессом. Исследуемые соединения (1а-б, 2а), введенные на фоне зимозана, отменяли стимулирующее влияние последнего на поглотительную активность лейкоцитов, однако не вызывали модуляции продукции активных радикалов лейкоцитами в стимулированных зимозаном культурах.

Ключевые слова: фагоцитоз, микробицидный потенциал, стресс, зимозановый перитонит, натриевые соли пирроло[3,4-с]-пиразол-3-онов, натриевые соли 1-фенилпиразол-3-карбоксамидов

Для цитирования: Влияние натриевых солей пирроло[3,4-с]-пиразол-3-онов и 1-фенилпиразол-3-карбоксамидов на функциональную активность клеток врожденного иммунитета в экспериментальных моделях патологических состояний у мышей / О. Н. Гейн, О. В. Бобровская, М. В. Ибатуллин, В. Л. Гейн, С. В. Гейн // Вестник Пермского университета. Сер. Биология. 2025. Вып. 4. С. 445–453. <http://dx.doi.org/10.17072/1994-9952-2025-4-327-453>.

Благодарности: исследования проведены в рамках государственного задания Института экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН (номер государственной регистрации темы 124020500027-7).

IMMUNOLOGY

Original article

The effect of sodium salts of pyrrolo[3,4-c]-pyrazol-3-ones and 1-phenylpyrazole-3-carboxamides on the functional activity of innate immune cells in experimental models of pathological conditions in mice

O. N. Gein^{1, 3}, O. V. Bobrovskaya³, M. V. Ibatullin², V. L. Gein³, S. V. Gein²

¹ Perm State Medical University named after Academician E.A. Wagner, Perm, Russia

² Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms, Perm, Russia

³ Perm State Pharmaceutical Academy, Perm, Russia

Corresponding author: Oksana N. Gein, heinon77@mail.ru

Abstract. The primary function of innate immune effector cells is the elimination of exogenous and endogenous pathogens. However, in some cases, the absorptive and microbicidal activity of phagocytes can be impaired, leading to the development of pathological conditions. In this regard, the creation of immunotropic drugs with mild modulating activity in relation to the phagocytic function of leukocytes is relevant. In this regard, sodium salts of pyrrolo[3,4-*c*]-pyrazol-3-ones (1a-b) and 1-phenylpyrazole-3-carboxamide (2a) are promising; in previous studies, they showed a modulating effect on the functions of phagocytic cells. In this study, we investigated the effect of sodium salts of pyrrolo[3,4-*c*]-pyrazol-3-ones (1a-b) and 1-phenylpyrazole-3-carboxamide (2a) on changes in the absorptive activity of peritoneal leukocytes and their microbicidal potential under conditions of two- and six-hour immobilization stress and acute inflammation. The following results were obtained during the study: sodium salts of pyrrolo[3,4-*c*]-pyrazol-3-ones (1a-b) and 1-phenylpyrazole-3-carboxamide (2a) neutralized the inhibition of leukocyte scavenging activity caused by six-hour immobilization, as well as the inhibition of the production of active oxygen radicals caused by two- and six-hour immobilization stress. The studied compounds (1a-b, 2a), introduced against the background of zymosan, abolished the stimulating effect of the latter on the absorptive activity of leukocytes, but did not cause modulation of the production of active radicals by leukocytes in zymosan-stimulated cultures.

Keywords: phagocytosis, microbicidal potential, stress, sodium salts of pyrrolo[3,4-*c*]-pyrazol-3-ones, sodium salts of 1-phenylpyrazole-3-carboxamide

For citation: Gein O. N., Bobrovskaya O. V., Ibatullin M. V., Gein V. L., Gein S. V. [The effect of sodium salts of pyrrolo[3,4-*c*]-pyrazol-3-ones and 1-phenylpyrazole-3-carboxamides on the functional activity of innate immune cells in experimental models of pathological conditions in mice]. *Bulletin of Perm University. Biology*. Iss. 4 (2025): pp. 445-453. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.17072/1994-9952-2025-4-445-453>.

Acknowledgments: the research was conducted within the framework of the state assignment of the Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (state registration number of the topic 124020500027-7).

Введение

Как известно, нейтрофильные гранулоциты, а также моноциты, макрофаги являются основными эффекторами врожденного иммунитета, участвующими в элиминации экзогенных и эндогенных патогенов. Нейтрофилы, моноциты, макрофаги являются основными участниками и модуляторами воспалительной реакции. Привлекаемые хемоаттрактантами, они мигрируют в очаг воспаления, участвуют в фагоцитозе разрушенных клеток организма, а также проникших в организм патогенов, выделяя в окружающие ткани провоспалительные медиаторы, активные радикалы. Результатом чрезмерной активации провоспалительных механизмов может явиться генерализация воспалительного процесса. Однако снижение функциональной активности эффекторов воспаления может приводить к хронизации течения воспалительной реакции [Черешнев, Гусев, 2012].

Функциональная активность эффекторов врожденного иммунитета может быть детерминирована как генетически, так и изменяться под воздействием ряда экзогенных и эндогенных факторов. Известно, что различные стрессорные воздействия оказывают значимое влияние на функциональную активность лейкоцитов, как на поглотительную активность, так и на микробицидный потенциал, что обусловлено присутствием на мембране лейкоцитов рецепторов для основных гормонов стресса – катехоламинов и глюкокортикоидов [Szefer, 1987; Stern, Kunos, 1988; Шилов, Орлова, 2001].

Снижение функциональной активности фагоцитирующих клеток несет в себе риск развития вторичных иммунодефицитных состояний, сопровождающихся хроническими инфекционными осложнениями. Снижение функциональной активности фагоцитирующих клеток и, прежде всего, механизмов микробицидности наблюдается при хронической гранулематозной болезни, при которой вследствие дефекта фермента НАДН-оксидазы лейкоциты не способны образовывать активные формы кислорода [Шарапова и др., 2011]. Также установлено, что при туберкулезе значительно снижаются такие показатели, как процент активных нейтрофилов и завершенность фагоцитоза [Филинчук и др., 2005].

В связи с этим присутствует необходимость в создании иммуностропных препаратов, обладающих мягкой корригирующей направленностью в отношении поглотительной способности лейкоцитов и их микробицидного потенциала. Также важно, чтобы, помимо фармакологической эффективности, препараты не являлись бы токсичными, и получение их активных субстанций было бы возможно с помощью простых методов. В этом плане перспективными являются натриевые соли пирроло[3,4-*c*]-пиразол-3-онов и 1-фенилпиразол-3-карбоксамида, которые в ранее проводимых исследованиях проявили иммуностропную активность в отношении функций фагоцитирующих клеток [Гейн и др., 2022; Гейн и др., 2025].

Цель работы – исследование влияния натриевых солей пирроло[3,4-*c*]-пиразол-3-онов и 1-фенилпиразол-3-карбоксамида на функциональную активность клеток врожденного иммунитета в экспериментальных моделях патологических состояний у мышей.

Материалы и методы исследования

Для оценки влияния натриевых солей пирроло[3,4-*c*]-пиразол-3-онов и 1-фенилпиразол-3-карбоксамидов на функциональную активность клеток врожденного иммунитета при иммобилизационном стрессе были взяты 3 соединения (рис. 1), которые по ранее проведенным исследованиям оказывали влияние на поглотительную активность лейкоцитов и их микробицидный потенциал [Гейн и др., 2022].

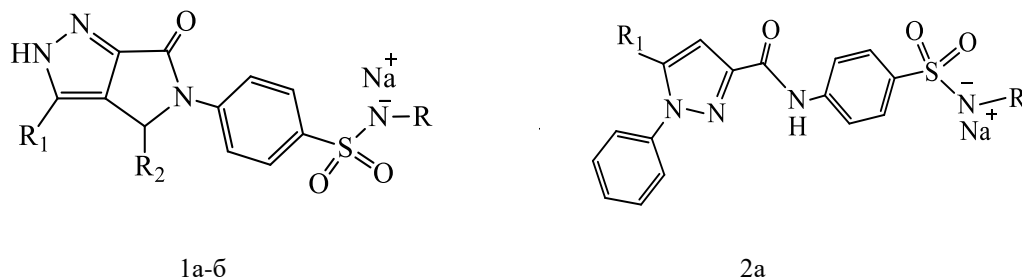


Рис. 1. Структурные формулы изучаемых соединений.

Натриевые соли пирроло[3,4-*c*]-пиразол-3-онов: $R^1=4\text{-BrC}_6\text{H}_4$, $R^2=3\text{-CH}_3\text{OC}_6\text{H}_4$, $R=\text{MeCO}$ (**1a**);
 $R^1=4\text{-BrC}_6\text{H}_4$, $R^2=2\text{-NO}_2\text{C}_6\text{H}_4$, $R=\text{MeCO}$ (**1b**); натриевая соль 1-фенилпиразол-3-карбоксамидов:
 $R^1=4\text{-CH}_3\text{OC}_6\text{H}_4$, $R=\text{C}_6\text{H}_5\text{NS}$ (**2a**)

[Structural formulas of the compounds studied]

Эксперименты в системе *in vivo* проведены на белых нелинейных половозрелых мышах массой 21–26 г. Все исследовательские работы с лабораторными животными выполнялись в соответствии с общепринятыми этическими нормами обращения с животными, принятыми Европейской конвенцией по защите позвоночных животных, используемых для исследовательских и иных научных целей [Европейская ..., 1986].

В качестве моделей патологических состояний использовали двух- и шестичасовой иммобилизационный стресс и острое воспаление. Иммобилизацию животных проводили на спине, за 30 мин до начала иммобилизации вводили внутривенно соединения натриевых солей пирроло[3,4-*c*]-пиразол-3-онов (**1a-b**) и 1-фенилпиразол-3-карбоксамидов (**2a**) в дозе 100 мг/кг. Острую воспалительную реакцию индуцировали внутривенным введением мышам стерильной суспензии опсонизированного зимозана А (нерастворимый полисахарид клеточной стенки грибов *Saccharomyces cerevisiae*) в дозе 50 мг/кг. Исследуемые соединения вводились внутривенно за 1 ч до введения зимозана.

Для оценки поглотительной активности перитонеальных лейкоцитов мышей к 80 мкл клеток добавляли 10 мкл суспензии FITC-меченого *St. cohnii* в конечной концентрации 10^8 кл/мл, пробы инкубировали 30 мин при температуре 37°C. Затем к клеткам добавляли лизирующий раствор (0.15M NH_4Cl ; 0.01M NaHCO_3 ; 0.0001M ЭДТА (этилендиаминтетрауксусная кислота)) и после 5 мин инкубации центрифугировали 5 мин при 250 g с охлаждением при температуре 4°C. После снимали супернатант, добавляли 0.02% ЭДТА в PBS (phosphate buffered saline – фосфатно-буферный солевой раствор) и снова центрифугировали 5 мин при 250 g с охлаждением при температуре 4°C. Далее вновь снимали супернатант, добавляли 100 мкл 0.02% ЭДТА в PBS. После этого пробы анализировали на проточно-лазерном цитометре («Bio Sino», Китай) [Nielsen et al., 1995].

Микробицидный потенциал перитонеальных лейкоцитов оценивался на основании продукции ими активных кислородных радикалов, оценку которых производили с помощью реакции люминолзависимой хемилюминесценции (ЛЗХЛ). Реакцию проводили в 96-луночных плоскодонных планшетах («Greiner», Германия), каждая лунка содержала клетки в концентрации 2×10^5 клеток/0.2 мл р-ра Хенкса. Индуктором ЛЗХЛ был выбран опсонизированный зимозан в концентрации 150 мкг/мл. В качестве маркера выраженности реакции ЛЗХЛ использовался люминол 10^{-5} М. Регистрация результатов велась в течение 1 часа с интервалом в 5 мин с помощью люциметра («Tecan Trading AG», Швейцария) [Фримель, 1987].

Статистическую обработку данных проводили методами вариационной статистики с помощью *t*-критерия Стьюдента. Эффект считали достоверным при $p < 0.05$ по сравнению с контролем. Результаты представляли в виде средней и ее стандартной ошибки ($M \pm m$).

Результаты и их обсуждение

В ходе исследований было установлено, что двухчасовая иммобилизация приводила к угнетению поглотительной активности лейкоцитов. Исследуемые соединения **1a**, **1b** и **2a** не отменяли угнетающего влияния двухчасового иммобилизационного воздействия на поглотительную активность лейкоцитов (рис. 2А). Угнетение поглотительной активности лейкоцитов было выявлено и на фоне шестичасовой иммобилизации, и это угнетение носило более выраженный характер по сравнению с двухчасовым стрессом. Снижение поглотительной активности лейкоцитов относительно контроля при двухчасовом стрессорном воздействии составило 31%, а при шестичасовом – около 48%. Соединения **1a** и **1b**, являющиеся натриевыми солями пирроло[3,4-с]-пиразол-3-онов, нивелировали выраженное угнетение поглотительной активности лейкоцитов, вызванное шестичасовым стрессорным воздействием (рис.2Б). В ранее проведенных исследованиях было показано, что при самостоятельном введении натриевые соли пирроло[3,4-с]-пиразол-3-онов (**1a-б**) и 1-фенилпиразол-3-карбоксамид (**2a**) стимулировали поглотительную активность лейкоцитов и прежде всего нейтрофильных гранулоцитов, увеличивая количество активных нейтрофилов в среднем более чем на 50%, а количество поглощенных ими объектов – на 8.6% и более [Гейн и др., 2022].

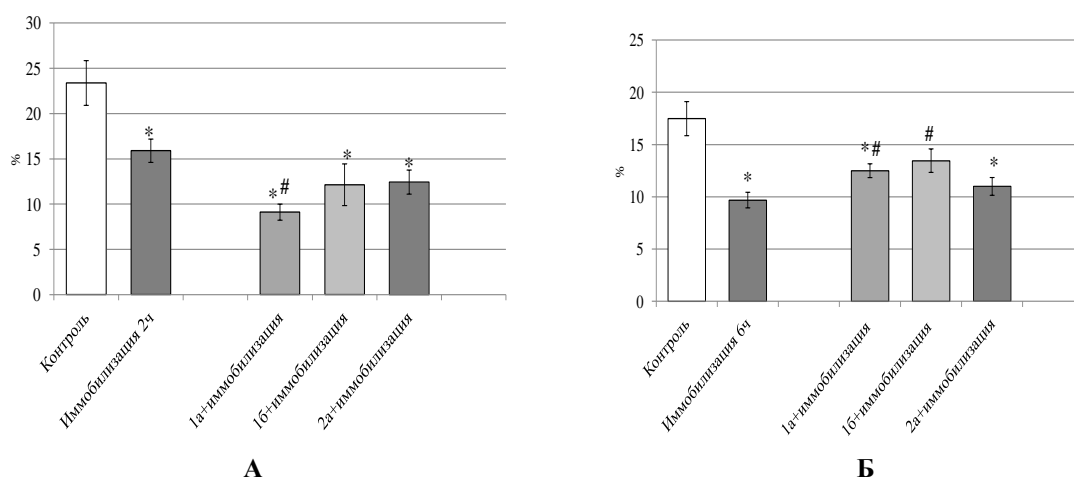


Рис. 2. Влияние соединений **1a**, **1b**, **2a** на фагоцитарную активность лейкоцитов (процент фагоцитоза) в условиях двухчасовой (А) и шестичасовой (Б) иммобилизации.

* - $p < 0.05$ по сравнению с контролем, # - $p < 0.05$ по сравнению иммобилизаций, количество животных в группах: $n=7$ (для 2-часовой иммобилизации) и $n=8$ (для 6-часовой иммобилизации)

[The effect of compounds **1a**, **1b**, **2a** on the phagocytic activity of leukocytes (percentage of phagocytosis) under conditions of two-hour (A) and six-hour (B) immobilization]

Оценивая стимулированную продукцию активных форм кислорода (АФК), было выявлено угнетение микробицидного потенциала лейкоцитов в условиях двухчасовой иммобилизации, начиная с 20-й мин и до 40-й мин включительно, а также на 55-й мин наблюдения. Соединение **1b** на фоне 2-часового стрессорного воздействия ингибировало продукцию АФК лейкоцитами только в первые 10 мин, отменяя в последующем угнетающий эффект стресса на продукцию активных радикалов. Соединение **1a** на фоне 2-часовой иммобилизации приводило к более ранней и продолжительной депрессии микробицидного потенциала лейкоцитов – с 5-й по 30-ю мин наблюдения по сравнению со стрессом. Введение **2a** на фоне 2-часовой иммобилизации оказывало стимулирующее влияние на выраженность и пролонгированность продукции активных форм кислорода лейкоцитами как по сравнению с контролем, так и по сравнению со стрессорным воздействием (рис. 3А).

Шестичасовой иммобилизационный стресс, как и 2-часовой стресс, приводил к угнетению стимулированной зимозаном продукции АФК лейкоцитами. Угнетение продукции активных радикалов было более продолжительным и регистрировалось с 25 мин по 60 мин наблюдения. Исследуемые соединения (**1a**, **1b**, **2a**), введенные на фоне шестичасовой иммобилизации, значительно увеличивали интенсивность продукции активных радикалов, начиная с 5-й мин и до конца наблюдения. Интенсивность продукции активных радикалов возрастала как по сравнению с животными, которые подвергались только стрессорному воздействию, так и по сравнению с контролем. Пик продукции АФК при введении на фоне стресса соединений **1a**, **1b** приходился на период с 15 по 25 мин эксперимента, в то время как у соединения **2a** он был несколько смещен и регистрировался с 25 по 35 мин эксперимента (рис. 3Б).

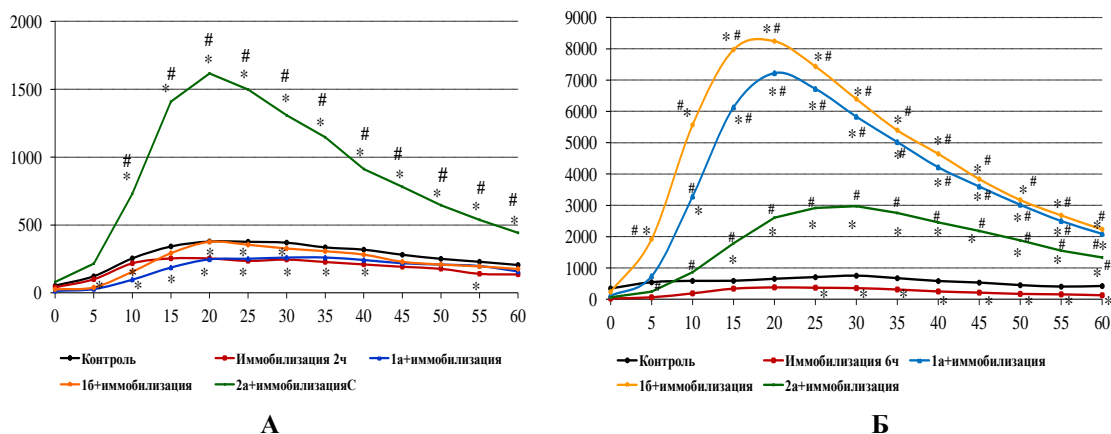


Рис. 3. Влияние соединений 1а, 1б, 2а на стимулированную продукцию активных форм кислорода лейкоцитами в условиях двухчасовой (А) и шестичасовой (Б) иммобилизации.

* - $p < 0.05$ к контролю, # - $p < 0.05$ к стрессу, количество животных: в контрольной при двухчасовой иммобилизации $n=8$, в остальных группах $n=9$. По оси у – относительные единицы люминисценции, по оси х – время

[The effect of compounds 1a, 1b, 2a on the stimulated production of reactive oxygen species by leukocytes under conditions of two-hour (A) and six-hour (B) immobilization]

Таким образом, введение натриевых солей пирроло[3,4-с]-пиразол-3-онов (**1а-б**) и 1-фенилпиразол-3-карбоксиамида (**2а**) нивелировало вызванное шестичасовой иммобилизацией угнетение поглотительной активности лейкоцитов и отменяло угнетение продукции АФК, вызванное двух- и шестичасовым иммобилизационным воздействием.

Через 15 ч после индукции острого воспаления внутрибрюшинным введением зимозана количество активных фагоцитов увеличивалось по сравнению с контролем. Исследуемые соединения (**1а-б**, **2а**), введенные на фоне зимозана, отменяли стимулирующее влияние последнего на поглотительную активность лейкоцитов и возвращали функциональную активность фагоцитов к показателям контроля (рис. 4).

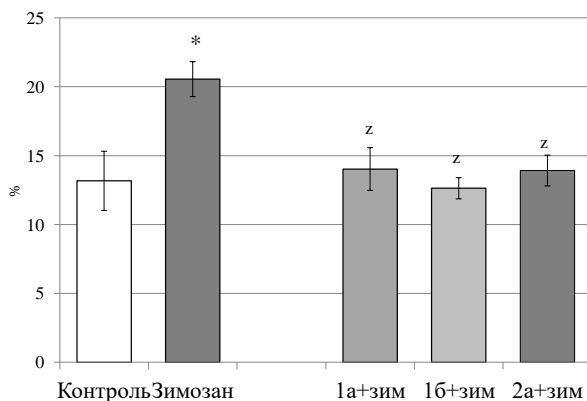


Рис. 4. Влияние соединений 1а, 1б, 2а на поглотительную активность перитонеальных лейкоцитов в модели острого воспаления.

По оси ординат – процент лейкоцитарного фагоцитоза, * - $p < 0.05$ к контролю, ^z - $p < 0.05$ к группе «зимозан», ^a - $p < 0.05$ к группе «1б+зимозан», количество животных в каждой группе $n=10$

[Effect of compounds 1a, 1b, 2a on the absorptive activity of peritoneal leukocytes in an acute inflammation model]

На фоне зимозанового перитонита продукция активных форм кислорода повышалась, что вполне объяснимо и связано со стимулирующим влиянием введенного зимозана на функциональную активность фагоцитирующих клеток [Шилов и др., 2021]. Соединение **1б**, введенное на фоне зимозанового перитонита, не отменяло стимулирующего эффекта последнего и, начиная с 25 мин наблюдения, усиливало активирующее влияние зимозана на продукцию АФК. На фоне самостоятельного введения **1б** продукция активных кислородных радикалов была выше значений контроля (рис. 5А). Натриевая соль пирроло[3,4-с]-пиразол-3-она **1а** как при самостоятельном введении, так и при введении на фоне зимозанового перитонита стимулировала продукцию активных радикалов по сравнению с контролем (рис. 5Б). Соединение

2a проявляло сходную с **1a** и **16** направленность влияния на динамику изменения продукции активных кислородных радикалов лейкоцитами (рис. 5В).

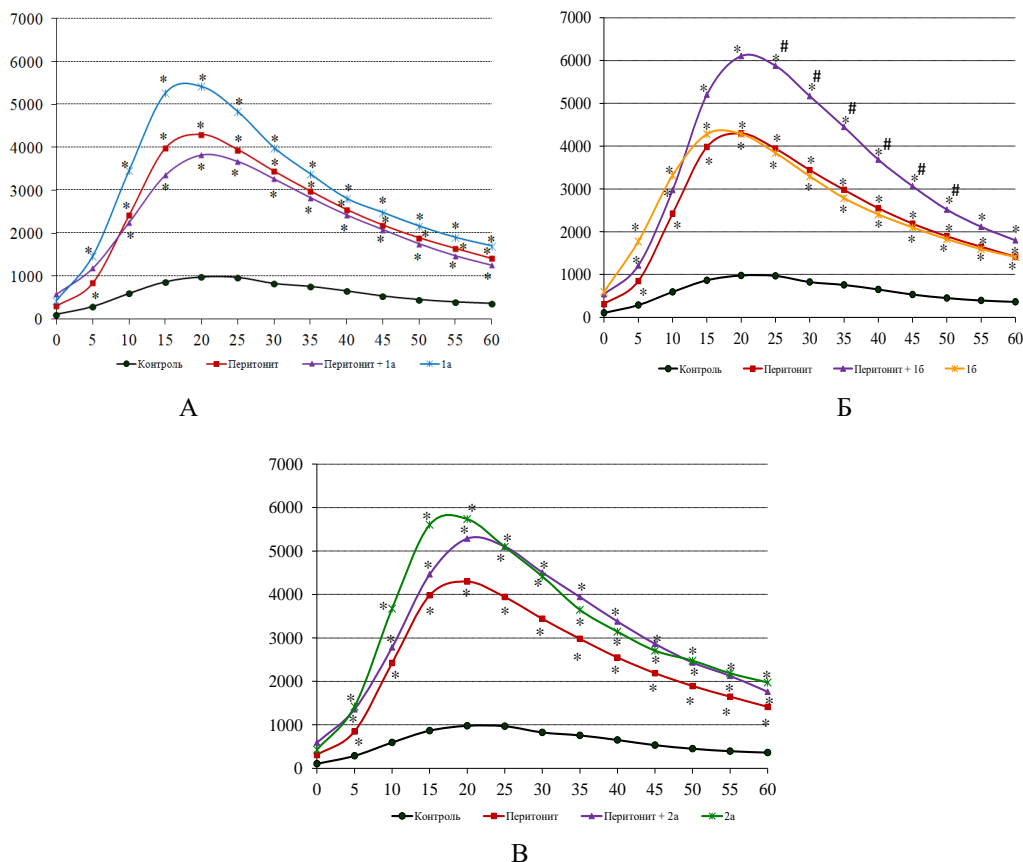


Рис. 5. Влияние соединений **1a** (А), **16** (Б), **2a** (В) на стимулированную продукцию активных форм кислорода лейкоцитами в модели острого воспаления.

* – $p < 0,05$ к контролю, # – $p < 0,05$ к стрессу; количество животных в группах: контрольной – 8, с зимозановым перитонитом – 10, в опытных для **1a**, **16** – 10, в опытных для **2a** – 7. По оси у – относительные единицы люминесценции, по оси х – время

[The effect of compounds **1a** (A), **1b** (B), **2a** (C) on the stimulated production of reactive oxygen species by leukocytes in a model of acute inflammation]

Таким образом, в модели острого воспаления натриевые соли пирроло[3,4-*c*]-пиразол-3-онов (**1a-6**) и 1-фенилпиразол-3-карбоксамид (**2a**) отменяли стимулирующий эффект зимозана на поглотительную активность лейкоцитов и не приводили к изменению повышенной продукции активных радикалов.

Заключение

В целом результаты исследования продемонстрировали возможность натриевых солей пирроло[3,4-*c*]-пиразол-3-онов (**1a**, **16**) и 1-фенилпиразол-3-карбоксамид (**2a**) модулировать изменения фагоцитарной активности перитонеальных лейкоцитов. Не отменяя стресс-индуцированной супрессии поглотительной активности лейкоцитов в модели двухчасового стресса, исследуемые соединения **1a**, **16**, **2a** нивелировали угнетение поглотительной активности лейкоцитов, вызванное шестичасовым стрессом. Наблюдаемое угнетение на фоне стресса, вероятно, связано с выбросом основных стрессорных гормонов – катехоламинов и глюкокортикоидов. Адреналин через β_2 -рецепторы, присутствующие на мембране лейкоцитов, способен оказывать ингибирующее влияние на их поглотительную активность [Szefer, 1987; Шилов, Орлова, 2001]. Глюкокортикоиды, повышая экспрессию и чувствительность адренорецепторов к катехоламинам, способствуют более выраженному проявлению эффектов адреналина в отношении поглотительной активности лейкоцитов [Stern, Kunos, 1988].

Модулирующий эффект исследуемых нами соединений, предположительно, может быть связан с их влиянием на Toll-рецепторы, присутствующие на мембране лейкоцитов, экспрессия которых изменяется под влиянием выбрасываемых при стрессе глюкокортикоидов [Park et al., 2009]. Отсутствие модулирующих эффектов исследуемых соединений **1a**, **16**, **2a** на фоне двухчасового иммобилизационного стресса

может быть связано с недостаточным изменением экспрессии TLR рецепторов на лейкоцитах и/или недостаточностью трансдукции с них внутриклеточного сигнала.

В модели острого воспаления активация фагоцитирующих клеток обусловлена использованием в эксперименте опсонизированного зимозана, который распознается экспрессированными на фагоцитах рецепторами CR3 и CR4 к iC3b-фрагменту комплемента, рецепторами к Fc-фрагменту антител [Шилов, 2021], а также Toll-подобными рецепторами – TLR2. Исследуемые соединения, введенные на фоне зимозана, отменяли стимулирующее влияние последнего на поглотительную активность лейкоцитов, что может быть связано с их влиянием на Toll-подобные рецепторы, прежде всего, TLR2 и TLR4, либо с изменением экспрессии этих рецепторов на фоне вызываемого зимозаном воспаления [Kim et al., 2009]. Не исключено, что изменение функциональной активности лейкоцитов при воздействии на них натриевых солей пирроло[3,4-с]-пиазол-3-онов (**1a**, **16**) и 1-фенилпиазол-3-карбоксамид (**2a**) может быть связано и с влиянием исследуемых соединений на активность натриевых каналов, присутствующих в мембранах лейкоцитов [Chow, Demaurex, Grinstein, 1995].

В целом, полученные данные позволяют говорить о наличии иммуномодулирующих эффектов у натриевых солей пирроло[3,4-с]-пиазол-3-онов (**1a**, **16**) и 1-фенилпиазол-3-карбоксамид (**2a**) в отношении их влияния на функциональную активность клеток врожденного иммунитета. В связи с этим органические соединения натриевых солей пирроло[3,4-с]-пиазол-3-онов и 1-фенилпиазол-3-карбоксамид являются перспективными в плане создания на их основе иммуномодулирующих средств, корректирующих вторичные иммунодефицитные состояния, связанные с нарушениями функциональной активности клеток врожденного иммунитета.

Список источников

1. Европейская конвенция по защите позвоночных животных, используемых в экспериментальных и других научных целях, Страсбург, 1986. 13 с.
2. Гейн О.Н. и др. Иммунобиологическая и противовоспалительная активность натриевых солей пирроло[3,4-с]-пиазол-3-онов и пиазол-3-карбоксамидов в эксперименте // Экспериментальная и клиническая фармакология. 2022. Т. 85, № 2. С. 21–25. DOI: 10.30906/0869-2092-2022-85-2-21-25. EDN: JGSWUG.
3. Гейн С.В. и др. Влияние натриевых и серебряных солей пиазолкарбоксамидов на реакции врожденного иммунитета in vivo // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 2025. Т. 180, № 9. С. 322–326. DOI: 10.47056/0365-9615-2025-180-9. EDN: QBZDJJ.
4. Филинчук О.В. и др. Функциональные и цитохимические особенности фагоцитов у больных туберкулезом легких // Бюллетень сибирской медицины. 2005. № 1. С. 24–27. EDN: KGDFAF.
5. Фримель Г.И. Иммунологические методы. М.: Медицина, 1987. 472 с.
6. Черешнев В.А., Гусев Е.Ю. Иммунологические и патофизиологические механизмы системного воспаления // Медицинская иммунология. 2012. Т. 14, № 1–2. С. 9–20. DOI: 10.15789/1563-0625-2012-1-2-9-20. EDN: OPHJZJ.
7. Шарапова С.О. и др. Повышенная чувствительность к *Mycobacterium tuberculosis* у пациентов с Х-сцепленной хронической гранулематозной болезнью // Пульмонология. 2011. № 1. С. 50–54. DOI: 10.18093/0869-0189-2011-0-1-50-54. EDN: NQTJBV.
8. Шилов Ю.И. и др. Нейроэндокринная и фармакологическая регуляция функций фагоцитирующих клеток при экспериментальном зимозановом перитоните // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. 2021. № 2. С. 15–26. DOI: 10.7242/2658-705X/2021.2.2. EDN: LEZUGH.
9. Шилов Ю.И., Орлова Е.Г. Адренергические механизмы регуляции функций фагоцитирующих клеток периферической крови крыс при остром стрессе // Медицинская иммунология. 2001. Т. 4, № 1. С. 29–36.
10. Chow C.W., Demaurex N, Grinstein S. Ion transport and the function of phagocytic cells // Current Opinion in Hematology. 1995. Vol. 2, № 1. P. 89–95.
11. Kim S.Y. et al. Hypoxic stress up-regulates the expression of Toll-like receptor 4 in macrophages via hypoxia-inducible factor // Immunology. 2009. Vol. 129. P. 516–524.
12. Nielsen S.L. et al. Evaluation of a method for measurement of intracellular killing of *Staphylococcus aureus* in human neutrophil granulocytes // APMIS. 1995. № 103(6). P. 460–468.
13. Park J.W. et al. Regulation of toll-like receptors expression in muscle cells by exercise-induced stress // Animal Bioscience. 2009. Vol. 34, № 10. P. 1590–1599.
14. Szeffler S.J. et al. Effects of cell isolation procedures and radioligand selection on the characterization of human leukocyte beta-adrenergic receptors // Biochemical Pharmacology. 1987. Vol. 36, № 10. P. 1589–1597.
15. Stern L., Kunos G. Synergistic regulation of pulmonary beta-adrenergic receptors by glucocorticoids and interleukin-1 // The Journal of Biological Chemistry. 1988. Vol. 263, № 31. P. 15876–15899.

References

1. European Convention for the Protection of Vertebrate Animals used for Experimental and Other Scientific Purposes, Strasbourg, 1986.
2. Gein O.N. et al. [Immunobiological and anti-inflammatory activity of sodium salts of pyrrolo[3,4-c]-pyrazol-3-ones and pyrazole-3-carboxamides in the experiment]. *Ekspperimental'naja i kliničeskaja farmakologija*. V. 85, No. 2 (2022): pp. 21-25. (In Russ). DOI: 10.30906/0869-2092-2022-85-2-21-25. EDN: JGSWUG.
3. Gein S.V. et al. [Effect of sodium and silver salts of pirazolecarboxamides on innate immune responses in vivo]. *Bjulleten' èksperimental'noj biologii i mediciny*. V. 180, No. 9 (2025): pp. 322-326. (In Russ). DOI: 10.47056/0365-9615-2025-180-9. EDN: QBZDJJ.
4. Filinyuk O.V. et al. [Functional and cytochemical features of phagocytes in patients with pulmonary tuberculosis]. *Biulleten' sibirskoj mediciny*. No. 1 (2005): pp. 24-27. (In Russ). EDN: KGDFAF.
5. Frimel G.I. *Immunologičeskie metody* [Immunological methods]. Moscow, Meditsina Publ., 1987. 472 p. (In Russ).
6. Chereshev V.A., Gusev E.Yu. [Immunological and pathophysiological mechanisms of systemic inflammation]. *Medicinskaja immunologija*. V. 14, No. 1-2 (2012): pp. 9-20. (In Russ). DOI: 10.15789/1563-0625-2012-1-2-9-20. EDN: OPHJZJ.
7. Sharapova S.O. et al. [Increased sensitivity to Mycobacterium tuberculosis in patients with X-linked chronic granulomatous disease]. *Pulmonologija*. No. 1 (2011): pp. 50-54. (In Russ). DOI: 10.18093/0869-0189-2011-0-1-50-54. EDN: NQTJBV.
8. Shilov Yu.I. et al. [Neuroendocrine and pharmacological regulation of phagocytic cell functions in experimental zymosan peritonitis]. *Vestnik Permskogo federal'nogo issledovatel'skogo centra*. No. 2 (2021): pp. 15-26. (In Russ). DOI: 10.7242/2658-705X/2021.2.2. EDN: LEZUGH.
9. Shilov Yu.I., Orlova E.G. [Adrenergic mechanisms of regulation of functions of phagocytic cells of peripheral blood of rats under acute stress]. *Medicinskaja immunologija*. V. 4, No. 1 (2001): pp. 29-36. (In Russ).
10. Chow C.W., Demaurex N., Grinstein S. Ion transport and the function of phagocytic cells. *Current Opinion in Hematology*. V. 2, No. 1 (1995): pp. 89-95.
11. Kim S.Y. et al. Hypoxic stress up-regulates the expression of Toll-like receptor 4 in macrophages via hypoxia-inducible factor. *Immunology*. V. 129 (2009): pp. 516-524.
12. Nielsen S.L. et al. Evaluation of a method for measurement of intracellular killing of Staphylococcus aureus in human neutrophil granulocytes. *APMIS*. No. 103(6) (1995): pp.460-468.
13. Park J.W. et al. Regulation of toll-like receptors expression in muscle cells by exercise-induced stress. *Animal Bioscience*. V. 34, No. 10 (2009): pp.1590-1599.
14. Szeffler S.J. et al. Effects of cell isolation procedures and radioligand selection on the characterization of human leukocyte beta-adrenergic receptors. *Biochemical Pharmacology*. V. 36, No. 10 (1987): pp. 1589-1597.
15. Stern L., Kunos G. Synergistic regulation of pulmonary beta-adrenergic receptors by glucocorticoids and interleukin-1. *The Journal of Biological Chemistry*. V. 263, No. 31 (1988): pp.15876-15989.

Статья поступила в редакцию 31.10.2025; одобрена после рецензирования 06.11.2025; принята к публикации 02.12.2025.

The article was submitted 31.10.2025; approved after reviewing 06.11.2025; accepted for publication 02.12.2025.

Информация об авторах

Оксана Николаевна Гейн – heinon77@mail.ru, канд. биол. наук, доцент кафедры фармакологии;
Ольга Васильевна Бобровская – bobban@mail.ru, д-р фарм. наук, профессор кафедры фармацевтической химии;
Матвей Викторович Ибатуллин – manovvi@yandex.ru, инженер лаборатории биохимии развития микроорганизмов;
Владимир Леонидович Гейн – geinvl48@mail.ru, д-р хим. наук, профессор, заведующий кафедрой общей и органической химии;
Сергей Владимирович Гейн – gein@iegm.ru, д-р мед. наук, директор.

Information about the authors

Oksana N. Gein – heinon77@mail.ru, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Pharmacology;
Olga V. Bobrovskaya – bobban@mail.ru, Doctor of Pharmaceutical Sciences, Professor of the Department of Pharmaceutical Chemistry;
Matvey V. Ibatullin – manovvi@yandex.ru, engineer at the Laboratory of Biochemistry of Microorganism Development;
Vladimir L. Gein – geinvl48@mail.ru, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Head of the Department of General and Organic Chemistry;
Sergey V. Gein – gein@iegm.ru, Doctor of Medical Sciences, Director.

Вклад авторов:

Гейн О. Н. – концепция исследования; предоставление исходных данных; статистическая обработка полученных результатов; написание текста.

Бобровская О. В. – химический синтез исследуемых соединений; подтверждение их структуры.

Ибатуллин М. В. – предоставление исходных данных.

Гейн В. Л. – концепция и руководство химическим синтезом изучаемых соединений.

Гейн С. В. – научное руководство; концепция исследования; доработка текста.

Contribution of the authors:

Gein O. N. – providing initial data; the concept of the study; statistical processing of the results; writing the text.

Bobrovskaya O. V. – chemical synthesis of the studied compounds; confirmation of their structure.

Ibatullin M. V. –provision of initial data.

Gein V. L. – concept and guidance of chemical synthesis of the compounds under study.

Gein S. V. – scientific guidance; concept of research; revision of the text.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

***Вестник Пермского университета.
Серия БИОЛОГИЯ =
2025. Выпуск 4***

***Bulletin of Perm University.
BIOLOGY
2025. Issue 4***

Научное издание

Редактор *А. С. Беляева*

Корректор *Е. Г. Ефимик*

Компьютерная верстка *С. А. Овеснова*

Подписано в печать 02.12.2025. Выход в свет12.2025.
Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 15,3. Тираж 28 экз. Заказ № 1768.
Свободная цена.

Издательский центр Пермского государственного
национального исследовательского университета
614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии издательства
Пермского национального исследовательского политехнического университета
614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, к. 113.

Подписка на журнал осуществляется онлайн на сайте агентства «Урал-Пресс»
<https://www.ural-press.ru/catalog/97266/8940022/>
Подписной индекс 41000