

ПРИРОДНЫЕ РЕСУРСЫ АРКТИКИ И СУБАРКТИКИ

(до 2018 г. «Наука и образование»)

Научный журнал

2025, Том 30, № 2

Основан в 1996 г.
Выходит 4 раза в год

Учредители

Академия наук Республики Саха (Якутия)
ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН»
Северо-Восточный федеральный
университет им. М.К. Аммосова
Министерство образования и науки
Республики Саха (Якутия)

В журнале публикуются научные статьи по геологии,
мерзлотоведению, экологии, биологическим ресурсам
и материаловедению арктических и субарктических
регионов

Главный редактор

Л.Н. Владимиров

Член-корреспондент РАН

Заместители главного редактора:

В. Ю. Фридовский, член-корр. РАН

Н.С. Данилова, д-р биол. наук

Ответственный секретарь

З.А. Корнилова

Адрес редакции:

677007, г. Якутск, пр. Ленина, 33, Россия
nras2018@mail.ru

<https://resar.elpub.ru>

Регистрационный номер ПИ № ТУ14-00503
от 15.02.2018 г. выдан Управлением Роскомнадзора
по Республике Саха (Якутия) Федеральной службы
по надзору в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций

Входит в Перечень ВАК Минобрнауки РФ (22.12.2020)
Включен в базу данных Russian Science Citation Index (RSCI)

© Академия наук РС(Я), 2025

© ФИЦ «Якутский научный центр», 2025

© Северо-Восточный федеральный университет
им. М.К. Аммосова, 2025

© Министерство образования и науки РС(Я), 2025

ISSN 2618-9712 (print)
ISSN 2686-9683 (online)

ARCTIC AND SUBARCTIC NATURAL RESOURCES

(until 2018 “Nauka i Obrazovanie”)

Scientific journal

2025, Vol. 30, No. 2

Founded in 1996
4 issues per year

Founders

Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia);
Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre
of the Siberian Branch of the Russian Academy
of Sciences”; M.K. Ammosov North-Eastern Federal
University; Ministry of Education and Science
of the Republic of Sakha (Yakutia)

The journal publishes articles on Geology,
Permafrost Science, Ecology, Biological Resources
and Materials Science of the Arctic and Subarctic regions

Editor-in-Chief

L.N. Vladimirov

Corresponding Member, RAS

Deputy Editors-in-Chief:

V.Yu. Fridovsky

Corresponding Member, RAS

N.S. Danilova

Dr. Sci. (Biol.)

Executive Editor

Z.A. Kornilova

Editorial Office Address:

33 Lenina pr., Yakutsk, 677007 Russia
nras2018@mail.ru

<https://resar.elpub.ru>

The Certificate of Registration of PI No. TU14-00503
of February 15, 2018, issued by the Department
of Federal Service for Supervision in the Sphere
of Communication, Information Technologies
and Mass Communications in the Republic of Sakha (Yakutia)

Enlisted in the Catalogue of Leading Scientific Journals
of the Higher Attestation Commission, RF (22.12.2020)
Included in the Russian Science Citation Index database (RSCI)

© Academy of Sciences of RS (Ya), 2025

© Federal Research Centre “The Yakut
Scientific Centre of SB RAS”, 2025

© M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, 2025

© Ministry of Education and Science of RS (Ya), 2025

ПРИРОДНЫЕ РЕСУРСЫ АРКТИКИ И СУБАРКТИКИ

ARCTIC AND SUBARCTIC NATURAL RESOURCES

Редакционный совет:

Крымский Г.Ф., *акад. РАН, ИКФИА СО РАН; Лебедев М.П., академик РАН, ФИЦ «ЯНЦ СО РАН»;*
Николаев А.Н., *д.б.н., СВФУ им. М.К. Аммосова; Присяжный М.Ю., д.г.н., Минобрнауки РС(Я)*

Редакционная коллегия:

Главный редактор – Владимирова Л.Н., *чл.-корр. РАН*

Науки о Земле

Горячев Н.А., *акад. РАН, СВКНИИ ДВО РАН, Магадан, Россия*
Григорьев М.Н., *д.г.н., ИМЗ СО РАН, Якутск, Россия*
Железняк М.Н., *чл.-корр. РАН, ИМЗ СО РАН, Якутск, Россия*
Колодезников И.И., *д.г.-м.н., проф., АН РС(Я), Якутск, Россия*
Кутыгин Р.В., *к.г.-м.н., ИГАБМ СО РАН, Якутск, Россия*
Матвеев А.И., *д.т.н., ИГДС СО РАН, Якутск, Россия*
Похиленко Н.П., *акад. РАН, ИГМ СО РАН, Новосибирск, Россия*
Романовский В.Е., *д-р, проф., Геофиз. ин-т Ун-та шт. Аляска, Фэрбанк, США*
Толстов А.В., *д.г.-м.н., ИГАБМ СО РАН, Якутск, Россия*
Фридовский В.Ю., *чл.-корр. РАН, ИГАБМ СО РАН, Якутск, Россия*
Шепелев В.В., *д.г.-м.н., проф., ИМЗ СО РАН, Якутск, Россия*
Шахмурдян А.Р., *к.г.-м.н., проф. Ун-та Манитобы, Виннипег, Канада*
Эпов М.И., *акад. РАН, ИНГГ СО РАН, Новосибирск, Россия*
Яковлев В.Л., *чл.-корр. РАН, ИГД УрО РАН, Екатеринбург, Россия*

Биологические науки

Арчибалд Дж., *д-р, Межд. фонд охраны журавлей, Барабу, США*
Будажпов Л.-З.В., *чл.-корр. РАН, АН РС(Я), Якутск, Россия*
Данилова Н.С., *д.б.н., проф., ИБПК СО РАН, Якутск, Россия*
Исаев А.П., *д.б.н., ИБПК СО РАН, Якутск, Россия*
Кершенгольц Б.М., *д.б.н., проф., ИБПК СО РАН, Якутск, Россия*
Хияма Т., *д-р, проф., Ун-т г. Нагоя, Нагоя, Япония*
Убугунов Л.Л., *д.б.н., ИОЭБ СО РАН, Улан-Удэ, Россия*
Хатано Р., *д-р, проф., Ун-т Хоккайдо, Саппоро, Япония*
Шадрина Е.Г., *д.б.н., проф., ИБПК СО РАН, Якутск, Россия*

Материаловедение и химические технологии

Аннин Б.Д., *акад. РАН, ИГиЛ СО РАН, Новосибирск, Россия*
Дэ-Ён Чонг, *д-р, проф., Ун-т Инха, Инчхон, Республика Корея*
Качанов М.Л., *д-р, проф., Ун-т Тафтса, Медфорд, США*
Лепов В.В., *д.т.н., ИФТПС СО РАН, Якутск, Россия*
Мышкин Н.К., *акад. НАН Беларуси, Институт механики металлополимерных систем НАН, Гомель, Республика Беларусь*
Охлопкова А.А., *д.т.н., проф., СВФУ, Якутск, Россия*
Салахов М.Х., *д.ф.-м.н., проф., К(П)ФУ, Казань, Россия*

Editorial Council:

G.F. Krymsky, *Academician, RAS, Yu.G. Shafer Inst. of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS;*
M.P. Lebedev, *Academician, RAS, Federal Research Centre "The Yakut Scientific Centre SB RAS";*
A.N. Nikolaev, *Dr. Sci. (Biol.), M.K. Ammosov NEFU; M.Yu. Prisyazhny, Dr. Sci. (Geogr.), Ministry of Education and Science of RS (Ya)*

Editorial Board:

Editor-in-Chief – L.N. Vladimirov, *Corresponding Member, RAS*

Earth Sciences

N.A. Goryachev, *Academician, RAS, Shilo North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute FEB RAS, Magadan, Russia*
M.N. Grigoriev, *Dr. Sci. (Geogr.), Melnikov Permafrost Inst. SB RAS, Yakutsk, Russia*
M.N. Zhelezniak, *Corresponding Member, RAS, Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia*
I.I. Kolodeznikov, *Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Prof., AS RS(Ya), Yakutsk, Russia*
R.V. Kutugin, *Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Diamond and Precious Metal Geology Inst. SB RAS, Yakutsk, Russia*
A.I. Matveev, *Dr. Sci. (Eng.), Chersky Inst. of Mining of the North SB RAS, Yakutsk, Russia*
N.P. Pokhilenko, *Academician, RAS, V.S. Sobolev Inst. of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia*
V.E. Romanovsky, *Dr., Prof., Geophysical Inst., Univ. of Alaska, Fairbanks, USA*
A.V. Tolstov, *Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Diamond and Precious Metal Geology Inst. SB RAS, Yakutsk, Russia*
V.Yu. Fridovsky, *Corresponding Member, RAS, Prof., Diamond and Precious Metal Geology Inst. SB RAS, Yakutsk, Russia*
V.V. Shepelev, *Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Prof., Melnikov Permafrost Inst. SB RAS, Yakutsk, Russia*
Chakhmouradian A.R., *Dr., Prof., University of Manitoba, Winnipeg, Canada*
Eпов M.I., *Dr. Sci. (Eng.), Academician, RAS, Trofimuk Inst. of Petroleum-Gas Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia*
V.L. Yakovlev, *Corresponding Member, RAS, Inst. of Mining UB RAS, Yekaterinburg, Russia*

Biological Sciences

George Archibald, *Dr., International Crane Foundation, Baraboo, USA*
L.-Z.V. Budazhapov, *Corresponding Member, RAS, AS RS(Ya), Yakutsk, Russia*
N.S. Danilova, *Dr. Sci. (Biol.), Prof., Inst. for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Yakutsk, Russia*
B.M. Kershengolts, *Dr. Sci. (Biol.), Prof., Inst. for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Yakutsk, Russia*
Tetsuya Hiyama, *Dr., Prof., Nagoya Univ., Nagoya, Japan*
A.P. Isaev, *Dr. Sci. (Biol.), Inst. for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Yakutsk, Russia*
L.L. Ubunov, *Dr. Sci. (Biol.), Inst. of General and Experimental Biology SB RAS, Ulan-Ude, Russia*
Ryusuke Hatano, *Dr., Prof., Hokkaido Univ., Sapporo, Japan*
E.G. Shadrina, *Dr. Sci. (Biol.), Prof., Inst. for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Yakutsk, Russia*

Materials Science and Chemical Technologies

B.D. Annin, *Academician, RAS, Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk, Russia*
Dae-Yong Jeong, *Dr., Inha University, Incheon, Republic of Korea*
M.L. Kachanov, *Dr., Prof., Tufts University, Medford, USA*
V.V. Lepov, *Dr. Sci. (Eng.), Lartionov Inst. of Physical and Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk, Russia*
Myshkin N.K., *Academician, NAS of Belarus, Metal-Polymer Research Inst. of National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Republic of Belarus*
A.A. Okhlopova, *Dr. Sci. (Eng.), Prof., M.K. Ammosov NEFU, Yakutsk, Russia*
M.H. Salakhov, *Dr. Sci. (Phys. and Math.), Prof., Kazan Federal Univ. Kazan, Russia*

СОДЕРЖАНИЕ

Науки о Земле

Геология и полезные ископаемые

Равновесные условия и кинетика гидратообразования природного газа в глинистых грунтах Мархинского месторождения <i>Иванова И.К., Калачева Л.П., Портнягин А.С., Бубнова А.Р., Иванов В.К., Лукина Ю.В., Александров А.Р.</i>	177
Условия формирования РЗЭ-содержащих минералов в неопротерозойских углеродсодержащих метаморфических породах хребта Енганэ-Пэ, Полярный Урал <i>Гракова О.В., Попвасев К.С.</i>	186
Применение алгоритмов машинного обучения для прогнозирования золоторудной минерализации Верхнеамгинского щелочного массива, Алдано-Становой щит <i>Чудинов П.Л., Фридовский В.Ю.</i>	205

Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

Влияние условий водонасыщения на прочность карбонатных пород при сжатии <i>Сукнёв С.В.</i>	220
Энергоемкость разрушения карбонатных пород в нивальных условиях при различных уровнях засоленности <i>Захаров Е.В.</i>	231

Биологические науки

Экология

Стратегии жизни плотнодерновинных злаков <i>Festuca lenensis</i> Drob. и <i>Koeleria cristata</i> (L.) Pers. в степных сообществах Центральной Якутии <i>Андреева С.Н.</i>	238
Хемотаксономические исследования деревьев рода <i>Larix</i> на территории Центральной Якутии <i>Рожина С.М., Местникова А.А., Слепцов И.В.</i>	250
Особенности биомониторинга урбанизированных территорий с использованием флуктуирующей асимметрии разных видов древесных растений (на примере Иркутска) <i>Чудновская Г.В., Чернакова О.В.</i>	260
Ископаемые остатки мезофауны четвертичного периода Янского плато как индикаторы палеоландшафтных условий позднего плейстоцена <i>Боескоров В.С., Саввинов Г.Н.</i>	272

Биологические ресурсы

Вопросы реализации Национального проекта «Биоэкономика» в Арктической зоне Российской Федерации <i>Жуков М.А.</i>	282
--	-----

Достижения и перспективы развития микробиотехнологий на Северо-Востоке Евразии <i>Неустроев М.П.</i>	290
Национальный проект России «Биоэкономика» на Северо-Востоке Евразии: биопрепараты из тканей холодоадаптированных дикоросов и аборигенных видов животных <i>Кершенгольц Б.М.</i>	303

Материаловедение и химические технологии

Влияние механохимической активации диоксида церия на структуру и свойства политетрафторэтилена <i>Васильев А.П., Охлопкова А.А., Стручкова Т.С., Алексеев А.Г.</i>	326
Исследование изменения свойств СВМПЭ в натуральных условиях г. Якутска в зависимости от сезона экспонирования <i>Ксю М., Гоголева О.В., Соколова М.Д., Петрова П.Н., Федоров А.Л., Кондаков М.Н., Чжан Д.</i>	337

CONTENTS

Earth sciences

Geology and mineral resources

Equilibrium conditions and kinetics of natural gas hydrate formation in the clay soils of the Markhinskiy deposit <i>Ivanova I.K., Kalacheva L.P., Portnyagin A.S., Bubnova A.R., Ivanov V.K., Lukina Yu.V., Alexandrov A.R.</i>	177
Conditions for the formation of REE-bearing minerals in Neoproterozoic carbonaceous metamorphic rocks of the Engane-Pe Ridge, Polar Urals <i>Grakova O.V., Popvasev K.S.</i>	186
Application of machine learning algorithms to predict gold mineralization in the Verkhneamginsky alkaline massif, Aldan-Stanovoy Shield <i>Chudinov P.L., Fridovsky V.Yu.</i>	205

Engineering geology, permafrost and soil science

Influence of water saturation conditions on the compressive strength of carbonate rocks <i>Suknev S.V.</i>	220
The energy intensity of carbonate rock destruction under nival conditions at varying salinity levels <i>Zakharov E.V.</i>	231

Biological sciences

Ecology

The life strategies of firm-bunch grasses <i>Festuca lenensis</i> Drob. and <i>Koeleria cristata</i> (L.) Pers. in the steppe communities of Central Yakutia <i>Andreeva S.N.</i>	238
Chemotaxonomic investigations of <i>Larix</i> species in Central Yakutia <i>Rozhina S.M., Mestnikova A.A., Sleptsov I.V.</i>	250
An investigation of biomonitoring in urban environments through the assessment of fluctuating asymmetry in diverse species of woody plants: a case study conducted in Irkutsk <i>Chudnovskaya G.V., Chernakova O.V.</i>	260
Fossil specimens of the mesofauna from the Quaternary period of the Yana Plateau as indicators of the paleolandscape conditions during the late Pleistocene <i>Boeskorov V.S., Savvinov G.N.</i>	272

Biological resources

Issues with implementation regarding the National Project “Bioeconomics” in the Arctic zone of the Russian Federation <i>Zhukov M.A.</i>	282
---	-----

Achievements and future opportunities for the advancement of microbiotechnology in the North-East of Eurasia

Neustroev M.P. 290

National project of Russia “Bioeconomics” in the North-East of Eurasia: biopreparations from tissues of cold-adapted wild plants and native animal species

Kershengolts B.M. 303

Materials science and chemical technologies

Effect of mechanochemical activation of cerium dioxide on the structure and properties of polytetrafluoroethylene

Vasiliev A.P., Okhlopko A.A., Struchkova T.S., Alekseev A.G. 326

Study of the changes in the properties of UHMWPE under the natural environmental conditions of Yakutsk based on seasonal exposure

Xu M., Gogoleva O.V., Sokolova M.D., Petrova P.N., Fedorov A.L., Kondakov M.N., Jiang D. 337

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Геология и полезные ископаемые

УДК 622.279.72;622.691.4;631.442.4

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-177-185>



Оригинальная статья

Равновесные условия и кинетика гидратообразования природного газа в глинистых грунтах Мархинского месторождения

**И. К. Иванова^{✉1}, Л. П. Калачева¹, А. С. Портнягин¹, А. Р. Бубнова¹,
В. К. Иванов¹, Ю. В. Лукина², А. Р. Александров¹**

¹*Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация*

²*Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация*

[✉]*iva-izabella@yandex.ru*

Аннотация

Подмерзлотные водоносные горизонты характеризуются низкими пластовыми температурами и давлениями, близкими к условным гидростатическим, что позволяет их рассматривать в качестве геологических формаций для организации подземных хранилищ газа в гидратном состоянии. Для проектирования таких подземных хранилищ газа требуется проведение экспериментальных исследований гидратообразования в пористых средах. В настоящей работе рассматриваются подмерзлотные водоносные горизонты Вилюйской синеклизы, где зона стабильности гидратов охватывает меловые и юрские отложения, которые представляют собой терригенно-глинистые толщи. На условия гидратообразования влияют свойства пористой среды: минералогический и гранулометрический состав, плотность, пористость, наличие органических и неорганических примесей, в особенности глин. Следовательно, исследование гидратообразования в глинистых грунтах – это важная составляющая, которая будет основой для создания подземных хранилищ газа. Для изучения термобарических условий гидратообразования использовался метод дифференциального термического анализа. Образцы пористых сред представляли собой глинистые грунты с различной влажностью в диапазоне от 15 до 40 %. Обнаружено, что в грунтах с влажностью 20 % и более формируется механическая смесь гидратов практически чистого метана и газа с более высокой молекулярной массой. Установлено, что при повышении влажности глинистых грунтов кинетические характеристики гидратообразования снижаются. На основе проведенного исследования можно заключить, что для организации подземных хранилищ газа в гидратном состоянии подходят пористые среды, в которых глинистые прослои обладают минимальной влажностью.

Ключевые слова: природный газ, гидрат, глины, *P–T*-условия образования гидратов, термический анализ, кинетические характеристики гидратообразования

Финансирование. Исследование проведено в рамках выполнения государственного задания Министерства науки и образования РФ (№ 122011100157-5) на научном оборудовании центра коллективного пользования ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Благодарности. Авторы благодарят рецензента за тщательный анализ нашей статьи и полезные рекомендации.

Для цитирования: Иванова И.К., Калачева Л.П., Портнягин А.С., Бубнова А.Р., Иванов В.К., Лукина Ю.В., Александров А.Р. Равновесные условия и кинетика гидратообразования природного газа в глинистых грунтах Мархинского месторождения. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(2):177–185. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-177-185>

Equilibrium conditions and kinetics of natural gas hydrate formation in the clay soils of the Markhinskiy deposit

Izabella K. Ivanova^{✉1}, Liudmila P. Kalacheva¹, Albert S. Portnyagin¹,
Alla R. Bubnova¹, Viktor K. Ivanov¹, Yulia V. Lukina², Alexander R. Alexandrov¹

¹*Institute of Oil and Gas Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yakutsk, Russian Federation*

²*Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation*

[✉]*e-mail@mail.ru*

Abstract

Subpermafrost aquifers are distinguished by their low stratum temperatures and pressures that approximate conventional hydrostatic pressures, rendering them suitable geological formations for the organization of underground gas storage facilities in a hydrate state. The design of such facilities requires the execution of experimental studies focused on hydrate formation within porous media. This paper examines the subpermafrost aquifers located in the Vilyui syncline, where the hydrate stability zone covers Cretaceous and Jurassic deposits, specifically terrigenous-clayey strata. The mineralogical and granulometric composition, density, porosity, and moisture content, along with the presence of clays in the porous medium, influence the conditions conducive to hydrate formation. Therefore, the investigation of hydrate formation in clayey soils is a critical component that will support the development of underground gas storage facilities. To analyze the thermobaric conditions associated with hydrate formation, the method of differential thermal analysis was employed. The samples of porous media comprised clayey soils with varying moisture content, ranging from 15% to 40%. The results indicate that in soils with a moisture content of 20% or greater, a mechanical mixture of hydrates consisting of nearly pure methane and gases with higher molecular weights is produced. Additionally, it was observed that an increase in the moisture content of clay soils correlates with a decrease in the kinetic characteristics of hydrate formation. Based on the conducted research, it can be concluded that porous media characterized by clay layers with minimal moisture content are optimal for the establishment of underground gas storage facilities in a hydrated state.

Keywords: natural gas, hydrate, clays, P – T -conditions of the hydrate formation, thermal analysis, kinetic characteristics of the hydrate formation

Funding. This study was conducted within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Education of the Russian Federation (No. 122011100157-5) using the scientific equipment of the Core Shared Research Facilities of the Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”.

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the reviewer for the comprehensive analysis of our article and for the valuable recommendations provided.

For citation: Ivanova I.K., Kalacheva L.P., Portnyagin A.S., Bubnova A.R., Ivanov V.K., Lukina Yu.V., Alexandrov A.R. Equilibrium conditions and kinetics of natural gas hydrate formation in the clay soils of the Markhinskiy deposit. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(2):177–185. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-177-185>

Введение

Климатические условия Якутии, характеризующиеся среднегодовыми температурными показателями в диапазоне $-12...-16$ °C, обуславливают продолжительность отопительного периода, превышающую 9 месяцев в год. В контексте энергоснабжения Центральной Якутии, где доминирующим энергоресурсом выступает природный газ, актуальна задача разработки стратегий

его резервирования через закачку в низкотемпературные водоносные коллекторы с последующей конверсией в гидратную форму. Высокая газоемкость гидратов (до $180 \text{ м}^3 \text{ газа/м}^3 \text{ гидрата}$) делает их перспективными для технологий транспортировки и хранения углеводородов. Выбор геологических формаций для хранения газа зависит от состава и свойств вмещающих пород. Как было показано в работе [1], оптимальными

для подземных гидратных хранилищ являются песчаные формации, обеспечивающие экономически более эффективную регазификацию в сравнении с глинистыми.

Перспективными зонами для гидратного аккумулярования газа в Якутии выступают подмерзлотные водоносные горизонты Вилюйской синеклизы, где, согласно [2], зона стабильности гидратов охватывает отложения мела и юры. По литолого-стратиграфическому анализу:

1. Нижняя юра: терригенно-глинистая толща с преобладанием песчаников, перемежающихся алевролитами и глинами, перекрытая сунтарской свитой глинистого состава.

2. Средняя и верхняя юра: песчано-алевритовые отложения с марыкчанской глинисто-песчаной покрывкой.

3. Мел: континентальные угленосные формации [3, 4].

Таким образом, наличие глинистых толщ в прослоях между терригенными отложениями диктует необходимость экспериментального изучения гидратообразования в глинистых грунтах для проектирования подземных хранилищ газа.

Экспериментальные исследования гидратообразования в глинистых грунтах проведены, например, в работах [5–15], которые показали, что термодинамические условия и кинетические характеристики гидратообразования зависят от состава глин, размера зерен, начальной влажности и т. п.

В работе [5] было исследовано гидратообразование метана в кварцевых песках с разным размером зерен, в бентонитовой глине, а также в их смесях в присутствии чистой и синтетической морской воды (3,55 %). Результаты экспериментов гидратообразования метана во влажных чистых песке и глине показали, что бентонитовая глина термодинамически способствует образованию гидратов, так, гидрат метана начинает образовываться при 284,85 К, что на 12,58 К выше, чем в песке.

Процессы образования и диссоциации гидрата метана в монтмориллоните были исследованы в работе [6]. Установлено, что гидрат метана структуры *sl* образуется как в порах монтмориллонита, так и на поверхности глины. При этом не вся вода переходит в гидрат. Съемки методом рентгеновской дифракции показали, что образование и диссоциация гидрата метана практически не влияют на кристаллическую структуру монтмориллонита.

Исследование образования гидрата метана в поровом пространстве мелкодисперсного песка, в смесях песка с монтмориллонитовой глиной и суглинке при отрицательных температурах показало, что степень гидратонасыщенности максимальна в песке и постепенно снижается с увеличением содержания глины в смесях [7].

Авторами [8] было исследовано разложение гидратов метана, полученных в каолините, иллите и монтмориллоните, при этом они наблюдали снижение газопроницаемости глин в этом же ряду, связанное с набуханием глин. Снижение газопроницаемости происходит также при насыщении гидратами дисперсных пород [9]. Результаты эксперимента показали, что минимальной газопроницаемостью будут характеризоваться низкопористые пылевато-глинистые образцы.

Экспериментальные исследования термодинамических условий гидратообразования газов показали, что дисперсные породы смещают условия образования гидратов в сторону более высоких давлений и низких температур по сравнению с системой вода–газ [11]. ΔT увеличивается при переходе от кварцевого песка к монтмориллонитовой глине, так как увеличивается энергия связи поровой влаги с минеральной поверхностью. В работе [10] показано ингибирование гидратообразования углекислого газа с увеличением дисперсности частиц и начальной влажности. Также ингибирующее действие глин на образование гидрата метана, связанное с понижением активности поровой воды, показано в работе [15]. Так, сдвиг температуры фазового равновесия (ΔT) влево по сравнению с гидратообразованием метана в воде составляет практически 4 К при давлении 10,40 МПа для монтмориллонита, а для каолинита и иллита ΔT составило 0,4 К.

Также на гидратообразование метана влияют различные поверхностные катионы на поверхности монтмориллонитовой глины. Авторами работы [12] показано, что расположение молекул воды в присутствии ионов K^+ имеет более оптимальную тетраэдрическую структуру, чем при наличии катионов Na^+ и Ca^{2+} на поверхности монтмориллонита, для роста гидрата CH_4 в растворе.

На скорость диссоциации гидрата метана значительное влияние может оказывать содержание глин. Так, по сравнению с кварцевым песком в отложениях с иллитом скорость разложения гидратов выше, однако в смеси песок–иллит

в соотношении 1:1 скорость диссоциации снижается до 38 % [13]. Также скорость разложения гидратов возрастает с уменьшением гидратонасыщенности этих отложений.

Нуклеация и рост гидрата метана зависят от содержания монтмориллонита [14]. Было показано, что увеличение массовой доли монтмориллонита (>5,0 мас.%) приводит к снижению значений кинетических параметров гидратообразования. Таким образом, в отложениях в зависимости от содержания глины гидратообразование может быть как ингибировано, так и промотировано, что требует оптимальной стратегии разработки месторождений гидратов в богатых глиной отложениях.

Несмотря на обширные данные по метану, исследования с многокомпонентным природным газом остаются малочисленными. Цель настоящей работы – экспериментальный анализ формирования и диссоциации гидратов природного газа в глинистых грунтах с переменной влажностью для оптимизации технологий подземного хранения.

Материалы и методы

Исследуемые образцы гидратов получали из природного газа Средневилюйского газоконденсатного месторождения. В составе газа (в мольных процентах), определенном на хроматографе GC-2010 Plus (Shimadzu), содержатся следующие компоненты: метан – 92,32; этан – 5,43; пропан – 1,37; изобутан – 0,144; н-бутан – 0,134; диоксид углерода – 0,032; азот – 0,57.

Глинистые грунты, использованные в данной работе, были отобраны на Мархинском месторождении. Глины относятся к гидрослюдистомонтмориллонитовому типу: SiO_2 – 61,56–71,78; Al_2O_3 – 13,96–16,73; Fe_2O_3 – 0,97–4,23; FeO – 0,48–5,35; п.п.п. – 1,42–9,29; TiO_2 – 0,43–0,92; H_2O – 0,92–2,41 % [16].

Гранулометрический состав глин, %: частицы >1 мм – отсутствуют; 1,0–0,05 мм – 10,0–70,0; 0,05–0,002 мм – 11,9–73,3; <0,002 мм – 9,1–27,7.

По размеру частиц преобладает пылеватая фракция, что указывает на принадлежность глин к грубодисперсным. Значение числа пластичности варьирует от 5,3 до 14,9, что соответствует категории умеренно-пластичных глин [16].

Плотность и пористость глинистых грунтов, определенные по методике [17], для рыхлого и плотного сложений составили соответственно

1,00 и 1,21 г/см³, в то время как пористость – 47,44 и 45,62 %.

Для оценки влияния растворимых солей в составах глинистых грунтов на равновесные условия гидратообразования природного газа была проведена оценка содержания и состава водорастворимых солей. Качественный анализ показал наличие анионов первой аналитической группы. Водные вытяжки имеют слабощелочную реакцию, содержание гидрокарбонат-ионов, наличие которых дает такую реакцию среды, составляет 0,052 мг·экв/100 г грунта. Такое количество солей в поровом растворе не вызывает значимого смещения равновесных условий и изменения кинетических характеристик процесса гидратообразования.

Для проведения экспериментов использовался непромытый глинистый грунт, начальная влажность варьировалась от 15 до 40 %. Температуры фазовых переходов в процессе гидратообразования природного газа во влажных глинистых грунтах были зарегистрированы с помощью кривых охлаждения-нагрева на установке дифференциального термического анализа. Подробное описание установки и методики проведения экспериментов приведены в работе [18].

Основные кинетические параметры: Δn_g – количество поглощенного газа, моль; N – количество газа на 1 моль воды, моль/моль; $\frac{dN}{dt}$ – скорость гидратообразования, моль/с, W_h – степень превращения воды в гидрат, %, были рассчитаны по формулам, приведенным в [19]. Для расчета W_h гидратное число n для природного газа Средневилюйского ГКМ было принято равным 5,67, так как этот природный газ образует гидраты структуры КС-II [20].

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены температурная кривая исследуемого образца и дифференциальная кривая охлаждения-нагрева, отражающие фазовые переходы в процессе гидратообразования природного газа в глинистых грунтах. Температурная кривая исследуемого образца включает три основные линии:

Линия АБВГД соответствует процессу охлаждения системы: при постепенном снижении температуры образование гидратов фиксируется как излом на линии в виде отчетливого пика за счет выделения теплоты кристаллизации. При избыт-

ке воды, если не вся вода превратилась в гидрат, наблюдается дополнительный фазовый переход вода – лед.

Линия ДЕ. Изотермическая выдержка – при постоянной температуре в течение установленного временного интервала в системе происходит накопление гидратов.

Линия ЕКЛМ. Нагревание – при постепенном повышении температуры в системе протекают процессы плавления льда (если он образовался при избытке воды) и диссоциации гидрата, которые сопровождаются поглощением теплоты. Тогда на кривой исследуемого образца наблюдаются изломы, причем излом, соответствующий диссоциации гидрата, сопровождается повышением давления при $T = \text{const}$. Температура, соответствующая началу диссоциации гидратов на термической кривой, принимается как равновесная температура гидратообразования.

Дифференциальная кривая показывает разность температур между температурными кривыми образца сравнения и исследуемого образца. В случае фазовых переходов кривая имеет резкие скачки. Как видно из рис. 1, образование гидрата природного газа при охлаждении системы сопровождается выделением теплоты – дифференциальная кривая отклоняется вверх, а при плавлении льда или разложении гидрата теплота поглощается – кривая отклоняется вниз.

Сравнение экспериментальных данных разложения гидратов природного газа Средневилюйского ГКМ, полученных в глинистых грунтах при начальной влажности 15 и 20 %, с расчетными P – T -условиями (использовалось программное обеспечение CSMHyd) проводилось путем построения термобарических профилей (рис. 2).

Анализ термобарических профилей демонстрирует, что разложение гидратов в глинистых грунтах при низком значении начальной влажности происходит в одну ступень (см. рис. 2, а), тогда как в условиях повышенной влажности наблюдается двухступенчатый процесс (см. рис. 2, б). Разложению гидрата на первой ступени соответствует первый перегиб (линия АБ), который начинается в точке А и заканчивается в точке Б (см. рис. 2, б), второй ступени разложения соответствует второй перегиб (линия ВГ), начало в точке В, а конец в точке Г. Точки Б и Г показывают равновесные условия образования гидратов. Такой характер кривой разложения гидратов свидетельствует об образовании смеси гидратов в глинистых грунтах при высокой начальной влажности. Так как точка Б практически располагается

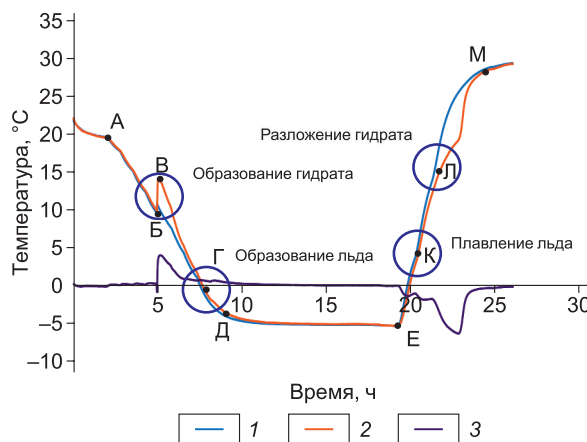


Рис. 1. Термические кривые в системе природный газ – глинистый грунт – вода: температурные кривые образца сравнения (1) и исследуемого образца (2), дифференциальная кривая (3). На кривой охлаждения АД точка Б – начало образования гидрата, точка В – интенсивный рост гидрата, точка Г – образование льда. Сегмент ДЕ соответствует изотермической выдержке при -5°C . На кривой нагрева ЕМ точка К – плавление льда, Л – начало разложения гидрата и точка М – конец разложения гидрата. На термических кривых кругом выделены области фазовых переходов

Fig. 1. Thermal curves in the system “natural gas – clay soil – water”: the temperature curve of the comparison sample (1), the temperature curve of sample (2), and differential curve (3). On the cooling curve АД, point Б marks the beginning of hydrate formation, point В indicates intensive hydrate growth, and point Г signifies ice formation. Segment ДЕ corresponds to isothermal holding at -5°C . On the heating curve ЕМ, point К represents ice melting, point Л denotes the beginning of hydrate decomposition. The regions of phase transitions are highlighted by a circle on the thermal curves

на расчетной равновесной кривой гидрата метана, а точка Г располагается правее относительно P – T -условий образования гидрата природного газа Средневилюйского ГКМ в воде, то можно заключить, что смесь гидратов состоит из гидрата метана и гидрата газа, более тяжелого по молекулярной массе по сравнению с исходным природным газом (рис. 3).

Ранее процессы образования смеси гидратов были зарегистрированы в кварцевом песке [21–24]. В частности, в работе [21] показано формирование смеси гидратов природного газа Средневилюйского газоконденсатного месторождения в кварцевом песке в изохорических условиях и при избытке газа. Интересно отметить, что в кварцевом песке этот же природный газ при избытке воды (недостатке газа) также образует смесь гидратов метана и природного газа [22]. Аналогичные результаты получены в работе [23] при образовании гидратов природного

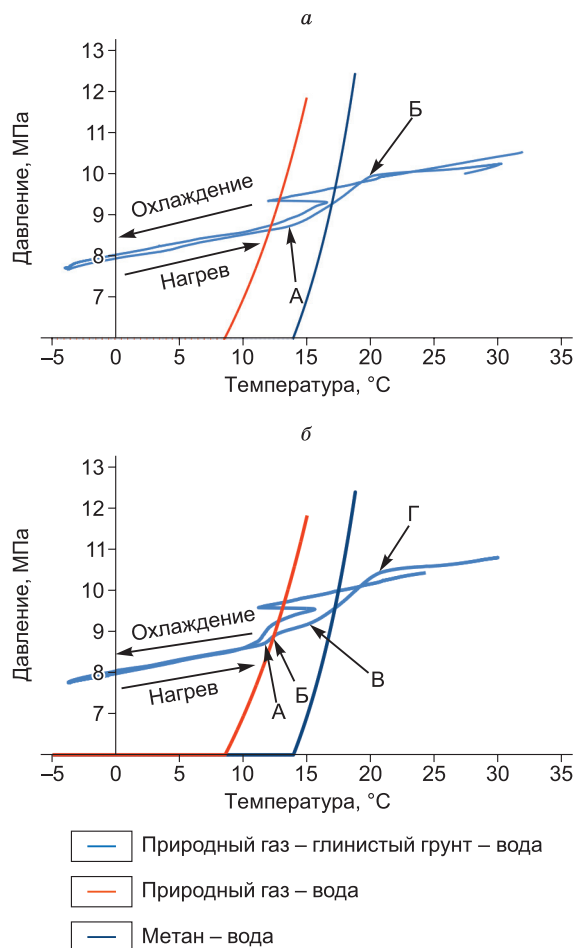


Рис. 2. Сопоставление равновесных условий образования гидратов природного газа в глинистых грунтах с равновесными условиями гидратообразования природного газа и метана в воде: *a* – начальная влажность 15 %; *б* – начальная влажность 20 %; точки А и В – начало, точки Б и Г – конец разложения гидратов

Fig. 2. *P*–*T*-profiles of the natural gas hydrate formation in clay soils at initial moisture contents of 15% (*a*) and 20% (*b*) in comparison with equilibrium conditions of natural gas and methane hydrate formation in water: points A and B – the beginning, points Б and Г – the end of hydrate decomposition

газа Чаяндинского нефтегазоконденсатного месторождения во влажном кварцевом песке. Исследование состава газа в гидратной фазе показало, что в мезо- и макропористых силикагелях происходит концентрирование этана, пропана и бутанов, тогда как метан остается в газовой фазе и образует гидрат на завершающих стадиях процесса [24].

На основании проведенных в настоящей работе исследований можно заключить, что образование смеси гидратов метана и газа, обогащенного углеводородами C_2 – C_4 , в глинистых грунтах

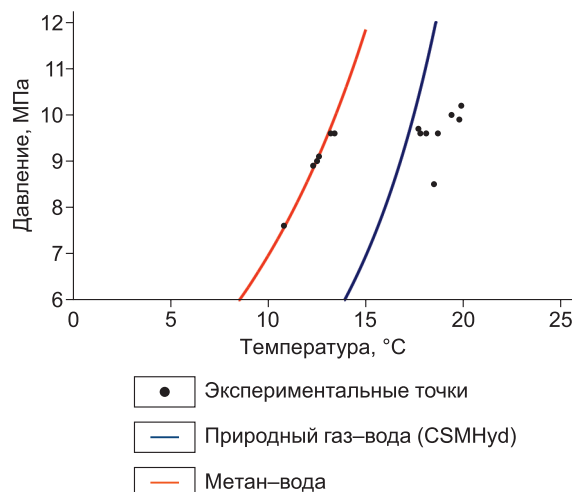


Рис. 3. Равновесные условия образования гидратов в системе природный газ – глинистый грунт – вода

Fig. 3. Equilibrium conditions of the hydrates formation in the system “natural gas – clay soil – water”

с начальной влажностью более 15 % в отличие от образования только гидрата газа с более высокой молекулярной массой по сравнению с исходным природным газом (см. рис. 3), вероятно, связано с дефицитом воды, что приводит к переходу в гидратную фазу преимущественно более тяжелых углеводородов, в то время как метан остается в газовой фазе над гидратом. Тем не менее, для подтверждения данной гипотезы необходимо провести дополнительные газохроматографические анализы состава газа в гидратах, что является перспективным направлением будущих исследований.

Для рассматриваемых систем по методике, приведенной в работе [25], была рассчитана степень заполнения пор водой (*WS*) и определены параметры процесса гидратообразования в зависимости от начальной влажности (см. таблицу).

Анализ таблицы свидетельствует о том, что с увеличением влажности глинистых грунтов и степени заполнения пор водой все кинетические параметры гидратообразования снижаются по сравнению с аналогичными процессами в кварцевом песке [21]. В частности, скорость образования гидратов уменьшается на один порядок: при влажности 15 % она составляет $1,7 \times 10^{-5}$ моль/с, тогда как при 40 % – $3,9 \times 10^{-6}$ моль/с.

Полученные результаты согласуются с выводами ряда других исследований [7, 10, 14, 15], в которых подчеркивается ингибирующее влияние

**Влияние начальной влажности грунтов на степень заполнения пор водой
и характеристики гидратообразования в глинах**

**The influence of the initial soil moisture on the degree of filling pores with water
and the characteristics of hydrate formation in clays**

Начальная влажность, %	WS	Δn_g , моль	N , моль/моль	W_h , %	$\frac{dN}{dt}$, моль/с
15	0,38	0,078	0,113	64,1	$1,7 \times 10^{-5}$
20	0,56	0,102	0,099	56,9	$1,5 \times 10^{-5}$
30	0,83	0,055	0,034	19,3	$8,2 \times 10^{-6}$
40	1,79	0,090	0,028	15,0	$3,9 \times 10^{-6}$

глины на кинетику гидратообразования. Более того, увеличение начальной влажности глинистых грунтов приводит к росту степени заполнения пор водой (см. таблицу), что влечет уменьшение площади контакта между газовой и водной фазами и, следовательно, замедление кинетики образования гидратов.

Таким образом, для организации подземных хранилищ газа в гидратной форме оптимальным вариантом являются пористые отложения, содержащие прослой глинистых грунтов с минимальной влажностью.

Заключение

В работе изучены процессы образования и разложения гидратов природного газа Средневилюйского газоконденсатного месторождения в системах глинистый грунт – вода – природный газ – гидрат в зависимости от начальной влажности, установлены равновесные условия гидратообразования природного газа в них и определены их кинетические параметры. Установлено, что влажность грунтов способствует пространственному разделению гидратов различных по составу газов, так в системах с начальной влажностью, превышающей 15 %, образуется механическая смесь гидратов метана и газа, богатого углеводородами C_2-C_4 .

Протекание процесса гидратообразования зависит от начальной влажности глинистых грунтов, и с ее увеличением кинетические характеристики гидратообразования природного газа Средневилюйского ГКМ гидрат уменьшаются.

Полученные результаты могут быть использованы для выбора оптимальных пористых коллекторов с учетом их влажности в рамках разработки научных основ подземного хранения природного газа в гидратном состоянии.

Перспективными направлениями для дальнейших исследований являются анализ состава

газа в гидратах природного газа, образующихся в глинистых грунтах с различной влажностью, а также уточнение фильтрационно-емкостных характеристик пористых сред, пригодных для создания хранилищ газа в гидратной форме.

Список литературы / References

1. Malagar B.R.C., Lijith K.P., Singh D.N. Formation & dissociation of methane gas hydrates in sediments: A critical review. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2019;65:168–184. <http://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.03.005>
2. Kalacheva L.P., Ivanova I.K., Portnyagin A.S., et al. Determination of the lower boundaries of the natural gas hydrates stability zone in the subpermafrost horizons of the Yakut arch of the Vilyui syncline, saturated with bicarbonate-sodium type waters. *SOCAR Proceedings, Special*. 2021;(2):1–11. <http://doi.org/10.5510/OGP2021SI200549>
3. Сафронов А.Ф. *Геология нефти и газа*. Якутск: ЯФ Издательства СО РАН; 2000. 166 с.
4. Железняк М.Н., Семенов В.П. *Геотемпературное поле и криолитозона Вилюйской синеклизы*. Новосибирск: Издательство СО РАН; 2020. 123 с.
5. Zheleznyak M.N., Semenov V.P. *Geotemperature Field and Cryolithozone of the Vilyui Syncline*. Novosibirsk: Publishing House SB RAS; 2020. 123 p. (In Russ.)
6. Saw V.K., Udayabhanu G., Mandal A., Laik S. Methane hydrate formation and dissociation in the presence of silica sand and bentonite clay. *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP Energies nouvelles*. 2015; 70(6):1087–1099. <http://doi.org/10.2516/ogst/2013200>
7. Yan K., Li X., Chen Z., et al. Methane hydrate formation and dissociation behaviors in montmorillonite. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2019;27(5): 1212–1218. <http://doi.org/10.1016/j.cjche.2018.11.025>
8. Давлетшина Д.А., Чувилин Е.М. Экспериментальная оценка возможности газогидратообразования в тонкодисперсных грунтах при отрицательных температурах. *Криосфера Земли*. 2020;24(4):25–33. [http://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-4\(25-33](http://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-4(25-33)

- Davletshina D.A., Chuvilin E.M. Estimation of potential gas hydrate formation in finely dispersed soils at negative temperatures: Experimental modeling. *Earth's Cryosphere*. 2020;24(4):25–33. [\(http://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-4\(25-33\)\)](http://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-4(25-33)) (In Russ.)
8. Wu Z., Li Y., Sun X., et al. Experimental study on the effect of methane hydrate decomposition on gas phase permeability of clayey sediments. *Applied Energy*. 2018;230:1304–1310. [\(http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.053\)](http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.053)
9. Гурьева О.М. Процессы гидратообразования при захоронении CO₂ в криолитозоне: Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. М.; 2011. 173 с.
- Gur'eva O.M. Hydrate formation processes during CO₂ burial in the cryolithozone: Abstr. ... Diss. Cand. Sci., Moscow; 2011. 173 p. (In Russ.)
10. Чувилин Е.М., Гурьева О.М. Экспериментальное исследование образования гидрата газа CO₂ в пористых средах из замороженных и замерзающих отложений. *Криосфера Земли*. 2009;13(3):70–79.
- Chuvilin E.M., Gur'eva O.M. Experimental investigation of CO₂ gas hydrate formation in porous media of frozen and freezing sediments. *Earth's Cryosphere*. 2009;13(3):70–79. (In Russ.)
11. Yu C., Sun B., Hasan M., et al. Experimental investigation and modeling on the dissociation kinetics of methane hydrate in clayey silt cores in depressurization. *Chemical Engineering Journal*. 2024;486(4):150325. [\(http://doi.org/10.1016/j.cej.2024.150325\)](http://doi.org/10.1016/j.cej.2024.150325)
12. Li Y., Chen M., Song H., et al. Effect of cations (Na⁺, K⁺, and Ca²⁺) on methane hydrate formation on the external surface of montmorillonite: insights from molecular dynamics simulation. *ACS Earth and Space Chemistry*. 2020;4(4):572–582. [\(https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.9b00323\)](https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.9b00323)
13. Chen C., Zhang Y., Li X., et al. Experimental investigation into gas production from methane hydrate in sediments with different contents of illite clay by depressurization. *Energy*. 2024;296:131181. [\(https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131181\)](https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131181)
14. Ren J., Liu X., Niu M., Yin Z. Effect of sodium montmorillonite clay on the kinetics of CH₄ hydrate-implication for energy recovery. *Chemical Engineering Journal*. 2022;437:135368. [\(https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.135368\)](https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.135368)
15. Ren J., Yin Z., Chen G., et al. Effect of marine clay minerals on the thermodynamics of CH₄ hydrate: Evidence for the inhibition effect with implications. *Chemical Engineering Journal*. 2024;488:151148. [\(https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.151148\)](https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.151148)
16. Объяснительная записка к обзорной карте месторождений строительных материалов Якутской АССР масштаба 1:2 500 0000. В двух томах. Министерство геологии СССР, объединение «Союзгеолфонд», 1 том. М.; 1988. 422 с.
- Explanatory note to the overview map of the deposits of building materials of the Yakut ASSR on a scale of 1:2,500 0000. In two volumes. Ministry of Geology of the USSR, Soyuzgeolfond association, 1 volume. Moscow; 1988. 422 p. (In Russ.)
17. ГОСТ 25584-2016 Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации. Взамен ГОСТ 25584-90; введ. 01.05.2017. М.: Стандартинформ; 2019. 25 с.
- GOST 25584-2016 Soils. Methods of laboratory determination of the filtration coefficient. Instead of GOST 25584-90; introduced. 01.05.2017. Moscow: Standartinform; 2019. 25 p. (In Russ.)
18. Kalacheva L.P., Ivanova I.K., Portnyagin A.S., et al. Determination of the lower boundaries of the natural gas hydrates stability zone in the subpermafrost horizons of the Yakut arch of the Vilyui syncline, saturated with bicarbonate-sodium type waters. *SOCAR Proceedings, Special*. 2021;(2):1–11. [\(http://doi.org/10.5510/OGP2021SI200549\)](http://doi.org/10.5510/OGP2021SI200549)
19. Linga P., Daraboina N., Ripmeester J.A., Englezos P. Enhanced rate of gas hydrate formation in a fixed bed column filled with sand compared to a stirred vessel. *Chemical Engineering Science*. 2012;68(1):617–623. [\(https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.10.030\)](https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.10.030)
20. Истомин В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях. М.: Недра; 1992. 236 с.
- Istomin V.A., Yakushev V.S. *Gas Hydrates in Natural Conditions*. Moscow: Nedra; 1992. 236 p. (In Russ.)
21. Ivanova I.K., Kalacheva L.P., Portnyagin A.S., et al. Experimental study of natural gas hydrate formation in a porous medium in the presence of aqueous solutions of sodium chloride and sodium bicarbonate. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2023;59(4):679–685. [\(http://doi.org/10.1007/s10553-023-01570-0\)](http://doi.org/10.1007/s10553-023-01570-0)
22. Макогон Ю.Ф. Гидраты природных газов. М.: Недра; 1974. 208 с.
- Makogon YU.F. *Natural Gas Hydrates*. Moscow: Nedra; 1974. 208 p. (In Russ.)
23. Булейко В.М., Вовчук Г.А., Григорьев Б.А. и др. Фазовое поведение углеводородных систем в водонасыщенном песчаном коллекторе при условиях гидратообразования. *Вести газовой науки*. 2014;20(4):156–163.
- Bulejko V.M., Vovchuk G.A., Grigor'ev B.A., et al. Phase behavior of hydrocarbon systems in a water-saturated sand reservoir under hydrate formation conditions. *Vesti Gazovoy Nauki*. 2014;20(4):156–163. (In Russ.)
24. Kang S.P., Lee J.W. Formation characteristics of synthesized natural gas hydrates in meso- and macroporous silica gels. *The Journal of Physical Chemistry B*. 2010;114(20):6973–6978. [\(http://doi.org/10.1021/jp100812p\)](http://doi.org/10.1021/jp100812p)
25. Zaripova Y., Yarkovoi V., Varfolomeev M., et al. Influence of water saturation, grain size of quartz sand and hydrate-former on the gas hydrate formation. *Energies*. 2021;14(5):1272. [\(https://doi.org/10.3390/en14051272\)](https://doi.org/10.3390/en14051272)

Об авторах

ИВАНОВА Изабелла Карловна, доктор химических наук, доцент, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-4839-1384>, ResearcherID: K-7120-2017, Scopus Author ID: 55867199100, SPIN: 9238-8901, e-mail: iva-izabella@yandex.ru

КАЛАЧЕВА Людмила Петровна, кандидат химических наук, исполняющий обязанности заведующего лабораторией техногенных газовых гидратов, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-6346-0456>, ResearcherID: I-8374-2018, Scopus Author ID: 15839298100, SPIN: 9740-3569, e-mail: lpko@mail.ru

ПОРТНЯГИН Альберт Серафимович, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-5257-0142>, ResearcherID: I-8448-2018, Scopus Author ID: 51562176000, SPIN: 2976-2560, e-mail: al220282@mail.ru

БУБНОВА Алла Родионовна, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0009-0009-1445-4787>, ResearcherID: JWP-9863-2024, Scopus Author ID: 58627018000, SPIN: 9371-7051, e-mail: bubnova03121999@gmail.com

ИВАНОВ Виктор Климентьевич, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-4253-1400>, ResearcherID: HKN-9909-2023, Scopus Author ID: 58455764300, SPIN: 5147-5675, e-mail: viktorklimentievich@gmail.com

ЛУКИНА Юлия Вячеславовна, студент, e-mail: yulechka-lukina-2000@mail.ru

АЛЕКСАНДРОВ Александр Романович, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-6459-8951>, ResearcherID: AAD-8376-2021, SPIN: 5062-9473, e-mail: sutuka56@mail.ru

Вклад авторов

Иванова И.К. – разработка концепции, методология, верификация данных, проведение исследования, ресурсное обеспечение исследования, создание черновика рукописи, визуализация, руководство исследованием; **Калачева Л.П.** – разработка концепции, методология, верификация данных, проведение исследования, ресурсное обеспечение исследования, создание черновика рукописи, визуализация, руководство исследованием; **Портнягин А.С.** – методология, верификация данных, проведение исследования, ресурсное обеспечение исследования; **Бубнова А.Р.** – проведение исследования; **Иванов В.К.** – проведение исследования; **Лукина Ю.В.** – проведение исследования; **Александров А.Р.** – проведение исследования, ресурсное обеспечение исследования

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

IVANOVA, Izabella Karlovna, Dr. Sci. (Chem.), Associate Professor, Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-4839-1384>, ResearcherID: K-7120-2017, Scopus Author ID: 55867199100, SPIN: 9238-8901, e-mail: iva-izabella@yandex.ru

KALACHEVA, Liudmila Petrovna, Cand. Sci. (Chem.), Acting Head of the Laboratory of Technogenic Gas Hydrates, Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-6346-0456>, ResearcherID: I-8374-2018, Scopus Author ID: 15839298100, SPIN: 9740-3569, e-mail: lpko@mail.ru

PORTNYAGIN, Albert Serafimovich, Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-5257-0142>, ResearcherID: I-8448-2018, Scopus Author ID: 51562176000, SPIN: 2976-2560, e-mail: al220282@mail.ru

Bubnova, Alla Rodionovna, Junior Researcher, <https://orcid.org/0009-0009-1445-4787>, Researcher ID: JWP-9863-2024, Scopus Author ID: 58627018000, registry number: 9371-7051, e-mail: bubnova03121999@gmail.com

IVANOV, Viktor Klimentyevich, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-4253-1400>, ResearcherID: HKN-9909-2023, Scopus Author ID: 58455764300, SPIN: 5147-5675, e-mail: viktorklimentievich@gmail.com

LUKINA, Yulia Vyacheslavovna, student, e-mail: yulechka-lukina-2000@mail.ru

ALEXANDROV, Alexander Romanovich, Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-6459-8951>, ResearcherID: AAD-8376-2021, SPIN: 5062-9473, e-mail: sutuka56@mail.ru

Authors' contribution

Ivanova I.K. – conceptualization, methodology, validation, investigation, resources, writing – original draft, visualization, supervision; **Kalacheva L.P.** – conceptualization, methodology, validation, investigation, resources, writing – original draft, visualization, supervision; **Portnyagin A.S.** – methodology, validation, investigation, resources; **Bubnova A.R.** – investigation; **Ivanov V.K.** – investigation; **Lukina Yu.V.** – investigation, visualization; **Alexandrov A.R.** – investigation, resources

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 27.08.2024

Поступила после рецензирования / Revised 18.04.2025

Принята к публикации / Accepted 24.05.2025



Оригинальная статья

Условия формирования РЗЭ-содержащих минералов в неопротерозойских углеродсодержащих метаморфических породах хребта Енганэ-Пэ, Полярный Урал

О. В. Гракова[✉], К. С. Попвасев

Институт геологии им. Н.П. Юшкина Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар, Российская Федерация
[✉]ovgrakova@geo.komisc.ru

Аннотация

В статье приводятся данные о типохимических особенностях и условиях образования минералов редкоземельных элементов (РЗЭ) из метаморфических углеродсодержащих вулканогенно-осадочных и осадочных отложений манюкуяхинской свиты (RF₃) хр. Енганэ-Пэ арктических территорий Урала. Среди минералов, содержащих РЗЭ во всех типах исследуемых пород, установлены алланит-(Ce), монацит-(Ce) и ксенотим-(Y). В метапелитах хр. Енганэ-Пэ впервые установлены фторкарбонат редких земель – синхизит-(Ce) и редкая разновидность гидратированного торита с повышенными содержаниями РЗЭ, Р, As ((Th_{0,44–0,55}Y_{0,21–0,24}Ca_{0,11–0,12}Zr_{0,08–0,09}Ce_{0,04}Fe_{0,03–0,04}Nd_{0,03}U_{0,05}Yb_{0,01–0,02}Gd_{0,01})_{Σ1,05–1,11}(Si_{0,70–0,72}P_{0,19–0,20}As_{0,06}V_{0,03})_{Σ1}O₄OH). В вулканогенно-осадочных породах хр. Енганэ-Пэ установлен редкоземельный водосодержащий силикат кайнозит-(Y) в ассоциации с карбонатами, на поверхности халькопирита обнаружен водный силикат меди, свинца и железа, определенный нами как кризейит. Изучение типоморфных и кристаллохимических особенностей позволило построить схему эволюции составов РЗЭ-содержащих минералов в исследуемых образованиях. В качестве основных минералов-концентраторов РЗЭ и Th в осадочных и вулканогенно-осадочных углеродсодержащих породах манюкуяхинской свиты выступают циркон, апатит, алланит-(Ce), монацит-(Ce) и ксенотим-(Y). В результате гидротермально-метаморфических преобразований пород редкоземельные элементы перераспределились, образуя собственные минеральные формы: торит, синхизит-(Ce), кайнозит-(Y), гидротермально измененные зерна и каймы монацита-(Ce) и ксенотима-(Y).

Ключевые слова: Полярный Урал, неопротерозой, осадочные и вулканогенно-осадочные породы, РЗЭ-содержащие минералы

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме НИР: «Глубинное строение, геодинамическая эволюция, взаимодействие геосфер, магматизм, метаморфизм и изотопная геохронология Тимано-Североуральского сегмента литосферы» (№ 122040600012-2) и «Развитие минерально-сырьевого комплекса Тимано-Североуральско-Баренцевоморского региона на основе эффективного прогноза, геологического моделирования, геолого-экономической оценки ресурсного потенциала и новых технологий переработки полезных ископаемых» (№ 122040600011-5).

Благодарности. Выражаем благодарность рецензенту за рекомендации и аналитикам А.С. Шуйскому, Е.В. Тропникову, В.А. Лобанову.

Для цитирования: Гракова О.В., Попвасев К.С. Условия формирования РЗЭ-содержащих минералов в неопротерозойских углеродсодержащих метаморфических породах хребта Енганэ-Пэ, Полярный Урал. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(2):186–204. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-186-204>

Conditions for the formation of REE-bearing minerals in Neoproterozoic carbonaceous metamorphic rocks of the Engane-Pe Ridge, Polar Urals

Oksana V. Grakova✉, Konstantin S. Popvasev

*Institute of Geology of Komi Science Centre of the Ural Branch, Russian Academy of Sciences,
Syktyvkar, Russian Federation
✉ovgrakova@geo.komisc.ru*

Abstract

This article presents data on rare earth element (REE) minerals, highlighting their typochemical characteristics and the specific geological conditions that promote their formation. The minerals investigated in this study originate from the metamorphic carbonaceous volcanogenic-sedimentary and sedimentary deposits found in the Manyukuyakhinskaya suite (RF₃), located in the Engane-Pe Ridge within the Arctic regions of the Ural Mountains. The study identifies several REE-bearing minerals across all examined rock types, including allanite-(Ce), monazite-(Ce), and xenotime-(Y). Notably, within the metapelites of the Engane-Pe Range, the rare earth fluorocarbonate synchysite-(Ce) and a rare variety of hydrated thorite with increased contents of REE, phosphorus (P), and arsenic (As) have been documented for the first time. The chemical formula for this specific variety of thorite is represented as follows: (Th_{0,44–0,55}Y_{0,21–0,24}Ca_{0,11–0,12}Zr_{0,08–0,09}Ce_{0,04}Fe_{0,03–0,04}Nd_{0,03}U_{0,05}Yb_{0,01–0,02}Gd_{0,01})_{Σ1,05–1,11}(Si_{0,70–0,72}P_{0,19–0,20}As_{0,06}V_{0,03})_{Σ1}O₄OH. Moreover, a rare-earth water-containing silicate, known as krizeyite, has been discovered in association with carbonates in volcanic-sedimentary rocks from the Engane-Pe Ridge. In addition, an aqueous silicate containing copper, lead, and iron, referred to as krizeyite, has been observed on the surface of chalcopyrite. The investigation of typomorphic and crystallochemical characteristics has enabled the development of a schematic representation illustrating the evolutionary processes that influence the compositions of REE-bearing minerals within the studied formations. The primary minerals that concentrate REE and thorium (Th) in the sedimentary and volcanogenic-sedimentary carbonaceous rocks of the Manyukuyakhinskaya suite include zircon, apatite, allanite-(Ce), monazite-(Ce), and xenotime-(Y). Hydrothermal-metamorphic transformations of the rocks resulted in the redeposition of REE, leading to the formation of distinct mineral forms such as thorite, synchysite-(Ce), and kainosite-(Y), along with hydrothermally modified grains and rims of monazite-(Ce) and xenotime-(Y).

Keywords: Polar Urals, Neoproterozoic, sedimentary and volcanogenic-sedimentary rocks, REE-bearing minerals

Funding. This study was conducted within the state assignment for the Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, focusing on the following topics: “Deep structure, geodynamic evolution, interaction of geospheres, magmatism, metamorphism, and isotopic geochronology of the Timan-North Ural segment of the lithosphere” (No. 122040600012-2) and “Development of the mineral resource complex of the Timan-North Ural-Barents Sea region through effective forecasting, geological modeling, geological and economic assessment of resource potential, and the implementation of new mineral processing technologies” (No. 122040600011-5).

Acknowledgements. We extend our gratitude to the reviewer for their recommendations, as well as to analysts A. S. Shuisky, E. V. Tropnikov, and V. A. Lobanov for their contributions.

For citation: Grakova O.V., Popvasev K.S. Conditions for the formation of REE-bearing minerals in Neoproterozoic carbonaceous metamorphic rocks of the Engane-Pe Ridge, Polar Urals. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(2):186–204. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-186-204>

Введение

Редкоземельные элементы находят широкое применение в разных современных отраслях промышленности. В земной коре эти элементы встречаются в составе минералов, формирующихся в щелочных комплексах пород, карбонатитах,

гранитах повышенной щелочности и пегматитах. РЗЭ-содержащие минералы могут формироваться в процессе кристаллизации из насыщенных РЗЭ расплавов; могут являться продуктами постмагматического метасоматоза; возникать при поздней гидротермальной переработке или обра-

зовываться на поздней окислительной стадии в гипергенных условиях. Выявление механизмов преобразования минералов помогает восстановить физико-химические условия (температура, давление, состав флюидов) их образования.

В настоящее время в мире наблюдается дефицит редкоземельного сырья, что способствует активизации деятельности по их обнаружению и формированию новых источников. В частности, в Республике Саха (Якутия) проведен анализ минерально-сырьевой базы редких металлов, выделены наиболее перспективные проекты добычи редкоземельных и редких металлов, разработаны технологические схемы их первичного обогащения, глубокой переработки и сети промышленных производств по их извлечению, представлена модель создания единого редкометалльного кластера [1]. В докембрийских породах Башкирского антиклинория Южного Урала в последние годы обнаружено большое количество РЗЭ-содержащих минералов, уточнены условия их образования, а также взаимосвязь с процессами метаморфизма и магматизма [2, 3].

На севере Урала основные исследования были сосредоточены на изучении типоморфизма и химического состава РЗЭ-содержащих минералов в магматических породах [4–8; и др.]. В метаморфизованных древних толщах такие исследования практически не проводились. Вопросы о природе РЗЭ-минерализации: возрасте, термодинамических параметрах, условиях формирования РЗЭ-минералов в том числе приуроченных к метаморфизованным образованиям, зачастую остаются открытыми.

Первые сведения об условиях образования РЗЭ-минералов из докембрийских толщ Северного Урала были получены нами при изучении комплексов пород в северной части Ляпинского антиклинория (Приполярный Урал). Здесь ранее нами были описаны типохимические особенности редкоземельных карбонатов и титанониобатов, построена схема их формирования [9]. В слюдяных гранатсодержащих кристаллических сланцах няртинского комплекса впервые были установлены анкилит-(Ce) и гидроксилбастнезит-(Ce), в актинолитсодержащих кварцальбит-эпидот-хлоритовых сланцах пуйвинской свиты – гидроксилбастнезит-(La), в метариолитах саблегорской свиты – бастнезит-(Ce), кайнозит-(Y) и эшинит-(Y). На Полярном Урале в неопротерозойских углеродсодержащих мета-

терригенных породах няровейской серии Харбейского комплекса нами были изучены ксенотим-(Y), монацит-(Ce) и коффинит [10]. В метабазитах севера Урала был установлен Ce–Cu–Ni-содержащий ферросапонит, изучены его типохимизм и возможные источники исходных компонентов [11].

В 2023 г. нами были проведены экспедиционные работы в южной (руч. Изъявож) и северной (руч. Манюкуяха) частях хр. Енганэ-Пэ. Здесь широко представлены разнообразные петротипы слабометаморфизованных пород: магматические (риолиты, базальты, андезиты, граниты) и осадочные (конгломераты, песчаники, аргиллиты, алевролиты), что представляет большой интерес для изучения видового разнообразия и типохимических особенностей редкоземельной минерализации. В поздневендских экструживно-субвулканических образованиях кислого состава лядгейского комплекса были описаны монацит и неидентифицированный РЗЭ-минерал, предположительно, эшинит-(Y) [12].

Целью работы является характеристика видового разнообразия, особенностей химического состава и условий образования РЗЭ-минерализации из углеродсодержащих метаморфизованных вулканогенно-осадочных и осадочных образований манюкуяхинской свиты (RF₃) хребта Енганэ-Пэ.

Материалы и методы

Химические составы и фотографии минералов были получены с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM–6400 с энергетическим спектрометром Link и Tescan Vega 3 LMN с энергодисперсионной приставкой Instruments X-Max (аналитик Тропников Е. М.). Дополнительно проведен химический анализ пород на содержание органического углерода (аналитик Лобанов Д.А.). Все анализы выполнены в ЦКП «Геонаука» Института геологии Коми НЦ УрО РАН. Формулы минералов рассчитывались по методике [13, 14].

Геологическое строение района исследований

Изучение и отбор проб проводилось в районе хр. Енганэ-Пэ, расположенного к северо-западу от Главного Уральского надвига. В районе исследований распространены верхнепротерозойские и палеозойские отложения (рис. 1). Верхнепротерозойские отложения принадлежат Центрально-Уральской мегазоне байкалит, Полярноуральской структурно-формационной зоне, Енганэпэйско-

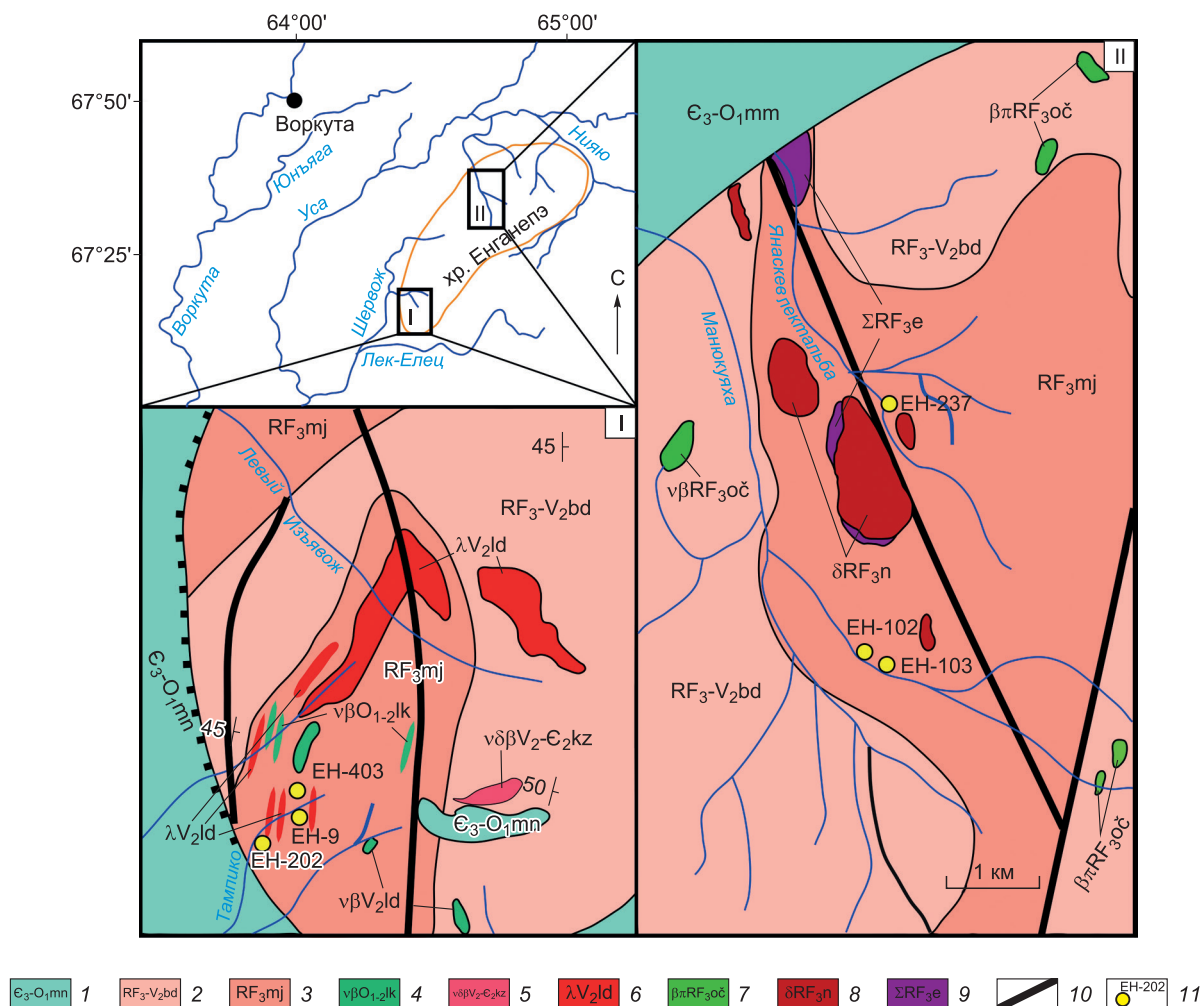


Рис. 1. Схема геологического строения южной (I) и северной (II) частей хр. Енганэ-Пэ [15]. 1 – манитаньрдская серия (E_3-O_1mn) – песчаники, гравелиты, конгломераты, алевриты, в нижней части базальты; 2 – бедамельская серия (RF_3-V_2bd) – туфоконгломераты, туфогравелиты, базальты, андезиты, дациты, риолиты, их кластолавы и туфы; 3 – манюкуяхинская свита (RF_3mj) – металавропесчаники, металавролиты, углеродисто-кремнисто-глинистые сланцы, фтаниты, углистые известняки; 4 – леквозжский комплекс – оливинные габбро и долериты; 5 – кызыгейский комплекс габбро-диоритовый плутонический – диориты, гранодиориты, плагиограниты; 6 – лядгейский комплекс вулканический – экструзивно-субвулканические образования кислого состава; 7 – нижнебедамельский (очетывисский) комплекс – экструзивно-субвулканические образования основного состава; 8 – нияуский комплекс плагиогранит-тоналитовый плутонический – диориты, тоналиты; 9 – енганэпейский комплекс гипербазитовый – гипербазиты, серпентиниты; 10 – разломы; 11 – места отбора и номера образцов

Fig. 1. Scheme of the geological structure of the southern (I) and northern (II) parts of the Engane-Pe Ridge [15]. 1. Manitanyrd series (E_3-O_1mn) – sandstones, gravelites, conglomerates, siltstones, basalts in the lower part; 2. Bedamel series (RF_3-V_2bd) – tuff conglomerates, tuff gravelites, basalts, andesites, dacites, rhyolites, their clastolaves and tufts; 3. Manyukuyakhinskaya suite (RF_3mj) – meta-siltstones, meta-siltstones, carbonaceous-siliceous-clayey shales, phtanites, carbonaceous limestones; 4. Lekvozhsky complex – olivine gabbros and dolerites; 5. Kyzhygeysky gabbro-diorite plutonic complex – diorites, granodiorites, plagiogranites; 6. Lyadgeysky volcanic complex – extrusive-subvolcanic formations of acid composition; 7. Nizhnebedamelsky (Ochetyvisky) complex – extrusive-subvolcanic formations of basic composition; 8. Niyayusky plagiogranite-tonalite plutonic complex – diorites, tonalites; 9. Enganepeysky ultramafic complex – ultramafics, serpentinites. 10. Faults. 11. Sampling locations and sample numbers

Манитаньрдской подзоне. В их составе принимают участие осадочные и вулканогенно-осадочные образования верхнерифейского (манюкуяхинская свита) и верхнерифей-поздневендского (бедамельская серия) возраста.

Манюкуяхинская свита (RF_3mj) представлена металавропесчаниками, металавролитами, углеродисто-кремнисто-глинистыми сланцами и фтанитами, в верхней части с прослоями известняков. В нижней части изредка встречаются

ся прослои афировых и порфировых базальтов и андезитобазальтов. Возраст манюкуяхинской свиты подтвержден U–Pb-методом датирования цирконов из гранодиоритов нияюского комплекса, прорывающих ее в ядре Манюкуяхинской антиклинали, абсолютный возраст которых установлен в пределах 719 ± 10 млн лет. Нижняя граница свиты не определена, верхняя проведена по подошве горизонта туфоконгломератов и туфогравелитов бедамельской серии, содержащих гальку пород манюкуяхинской свиты [15].

Бедамельская серия нерасчлененная (RF₃-V₂bd) в нижней части разреза включает базальты, андезитобазальты, андезиты, трахибазальты, их кластолавы, лавобрекчии, дациты и их туфы, туфоконгломераты и туфогравелиты. Верхняя часть разреза представлена лавами кислого состава, их кластолавами и туфами. Среди эффузивных и пирокластических пород кислого состава встречаются ксенотуфы и ксенокластолавы, содержащие обломки андезитового и андезибазальтового состава. Позднерифейский возраст низов разреза бедамельской серии обосновывается залеганием на манюкуяхинской свите, подтверждается содержанием микрофоссилий и нитчатых водорослей. Верхняя часть серии имеет поздневендский возраст; по единичным определениям U–Pb-методом датирования цирконов абсолютный возраст риолитов экструзивно-субвулканической фации фиксируется в пределах от 555 до 547 млн лет. Контакт с вышезалегающими отложениями енганэпейской свиты согласный. Верхняя граница бедамельской серии проводится по кровле пачки туфов и кластолав риолитов. Общая мощность бедамельской серии – более 2500 м.

Палеозойские отложения принадлежат к палеоконтинентальному сектору уралид (см. рис. 1). Манитанырдская серия (C₃–O₁mn) представлена мощной терригенной толщей, залегающей с угловым несогласием на рифейско-вендских отложениях или на кембрийской коре выветривания. В составе серии обычно выделяются две части: нижняя – преимущественно красноцветная и верхняя – зеленоцветно-сероцветная. Нижняя часть состоит из ритмично переслаивающихся кварцевых и олигомиктовых песчаников, кварцито-галечных гравелитов и конгломератов, окрашенных в лиловые и сиреневые тона. Красноцветная окраска, наличие косой слоистости, изменчивость по простиранию указывают на преимущественно субконтинентальные условия формирования отложений. Верхняя часть схожа по составу

с нижележащей терригенной толщей, окрашенной в серо-зеленоцветные тона, в алевролитовых прослоях среди песчаников часто содержатся органические остатки (брахиоподы, мшанки, криноидеи). Появление морской фауны и знаки ряби могут указывать на мелководно-морские условия осадкообразования верхней толщи. Мощность манитанырдской серии от 150 до 1500 м, в связи с такой изменчивостью мощностей и с учетом присутствия в разрезе серии рифтогенных высокотитанистых базальтоидов сделан вывод о ее возможной рифтогенной природе [15].

Образцы углеродсодержащих метапелитов и вулканогенно-осадочных пород манюкуяхинской свиты были отобраны на руч. Тампико (южная часть хр. Енганэ-Пэ) и ручьях Манюкуяха и Янескеулектальба (северная часть хр. Енганэ-Пэ) (см. рис.1).

Метапелиты представлены метааргиллитами и метаалевролитами. Метааргиллиты (обр. ЕН-9, ЕН-237) характеризуются тонкозернистой основной тканью с прожилками, выполненными пелитизированным полевошпатовым агрегатом и микроагрегатом кварца. Тонкозернистая ткань представлена кварцем, серицитом, хлоритом. Текстура пород сланцеватая. В небольших количествах присутствует эпидот (рис. 2, а, б). В метаалевролитах (ЕН-103) отмечаются прослои тонкозернистых песчаников, возможно, с примесью туфогенного кластического материала. Текстура сланцеватая, за счет ориентировки слюдистых минералов и длинных осей обломков. В основной ткани просматриваются фрагменты микрофельзитовой текстуры. Обломки (до 10 %) присутствуют как слабоокатанные (их большинство), так и хорошоокатанные. Они представлены преимущественно кварцем, полевыми шпатами, хлоритом. Основная ткань состоит из агрегата кварца, плагиоклаза, серицита и хлорита. Встречаются единичные чешуйки буровато-коричневого биотита (рис. 2, в, г, е).

Вулканогенно-осадочные породы (обр. ЕН-403, ЕН-202, ЕН-102) представлены туфопесчаниками. На микроуровне имеют обломочную, неравномерно-зернистую структуру, массивную, неявнополосчатую текстуру. Обломки средне-слабоокатанные, размерностью 0,05–0,25 мм, представлены преимущественно кварцем, плагиоклазом и калиевым полевым шпатом.

Содержание обломков около 25–40 %. Преимущественно присутствует основной плагио-

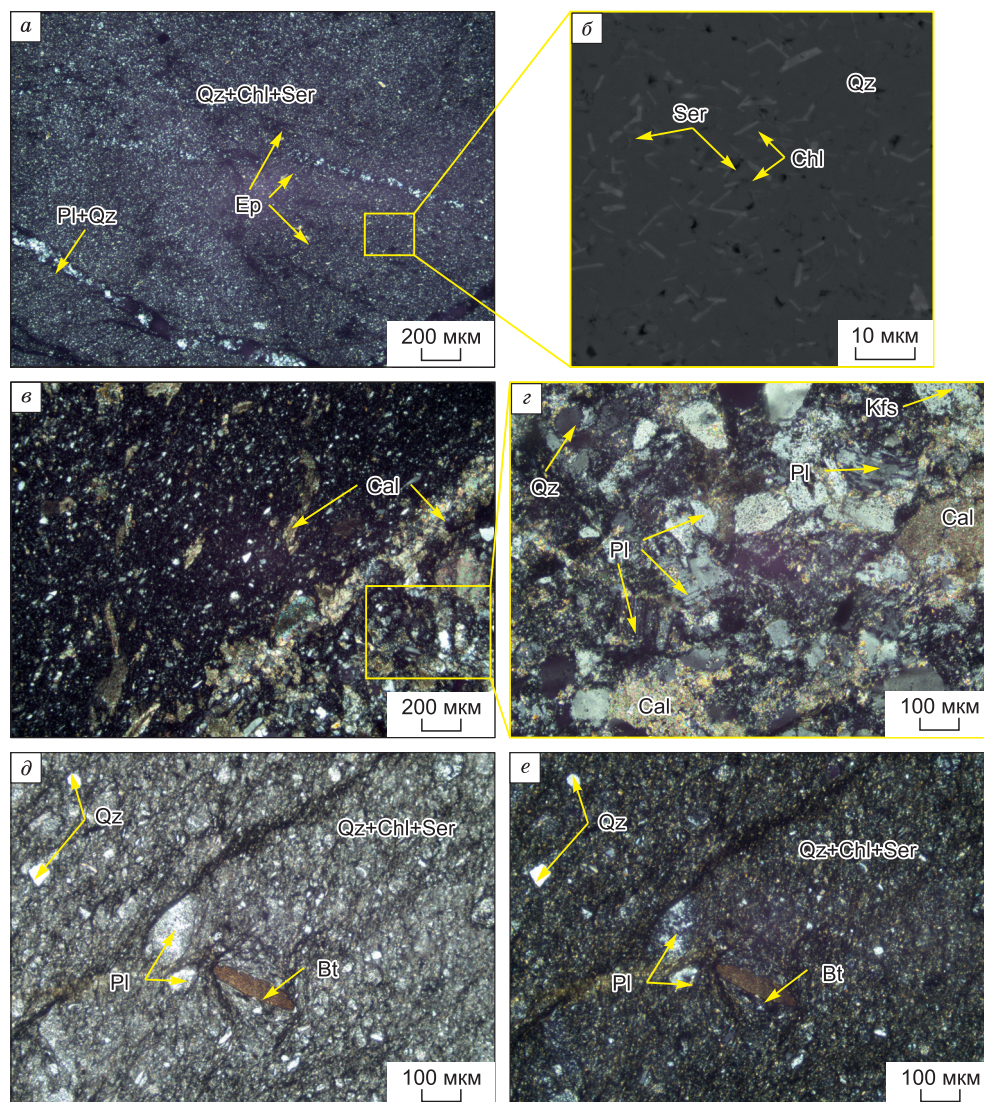


Рис. 2. Микрофотографии шлифов (*a, в–e*), и СЭМ-изображение (*б*) углеродсодержащих пород манюкуяхинской свиты. *a, б* – метааргиллит (ЕН-9); *в, з* – туфопесчаник (ЕН-202); *д, e* – метаалевролит (ЕН-103). Bt – биотит, Cal – кальцит, Chl – хлорит, Ep – эпидот, Kfs – калиевый полевой шпат, Pl – плагиоклаз, Ser – серицит, Qz – кварц

Fig. 2. Micrographs of thin sections (*a, в–e*) and SEM image (*б*) of carbon-bearing rocks of the Manyukuyakhinskaya suite. *a, б* – meta-argillite (EN-9); *в, з* – tuff-sandstone (EN-202); *д, e* – meta-siltstone (EN-103). Bt – biotite, Cal – calcite, Chl – chlorite, Ep – epidote, Kfs – potassium feldspar, Pl – plagioclase, Ser – sericite, Qz – quartz

клаз, но отмечается и кислый. Калиевый полевой шпат серицитизирован, пелитизирован. Хлорит выделяется в нескольких генерациях: в виде отдельных чешуек в составе цемента, где совместно с серицитом замещает частично девитрифицированное вулканическое стекло, а также присутствуют обломки минералов, полностью замещенные хлоритом. В матриксе отмечается кальцит, развивающийся по основным плагиоклазам и тонкозернистому агрегату – хлорит-серицит-кварцевого состава и углеродистого вещества (см. рис. 2 *в, з*). Присутствие углерода

в терригенных породах манюкуяхинской свиты темно-серого до черного цвета установлено при петрографическом описании шлифов и подтверждено анализом на C_{org} : в вулканогенно-осадочных породах его содержание составляет 0,19–1,98 %, в метапелитах – 0,38–0,53 %.

РЗЭ-содержащие минералы из метапелитов

В метааргиллитах южной части хр. Енганэ-Пэ (ЕН-9) ксенотим-(Y), ассоциирующий с кварцем, мусковитом, рутилом и ильменитом, присутствует в двух типах (рис. 3).

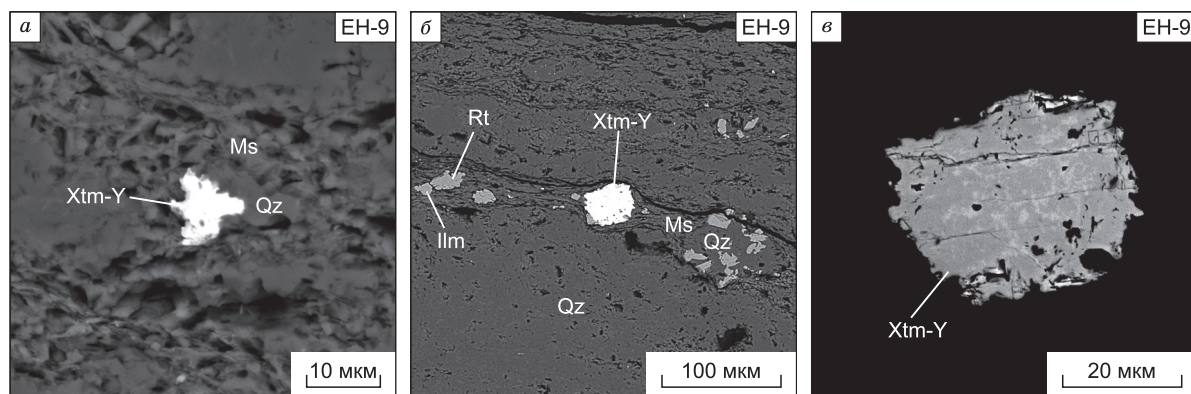


Рис. 3. Ксенотим-(Y) в метапелитах южной части хр. Енганэ-Пэ. а–в см. в тексте

Fig. 3. Xenotime-(Y) in metapelites of the southern part of the Engane-Pe Ridge. а–в see in text

Ксенотим-(Y) 1 типа представлен мелкими образованиями с неровными краями, размером 10–20 мкм (см. рис. 3, а). Химический состав приведен в табл. 1, ан. 3. Сумма оксидов РЗЭ в ксенотиме составляет 63,47 мас. %.

Ксенотим-(Y) 2 типа образует более крупные (40–50 мкм) изометричные кристаллы в мусковитовом матриксе (см. рис. 3, б). При большем увеличении наблюдается неоднородность в кристаллах – появляется вкрапленность светло-серого оттенка на фоне основной массы серого цвета (см. рис. 3, в). Ксенотимы-(Y) 2 типа отличаются по химическому составу от ксенотимов-(Y) 1 типа присутствием U и Th. Причем в более светлой части отмечается повышение содержания U и Th до 1,17 мас. % и до 2,06 мас. % (см. табл. 1, ан. 1), по сравнению с составом основной массы, где содержание U составляет 0,42 мас. %, Th – 0,80 мас. % (см. табл. 1, ан. 2). Сумма оксидов РЗЭ в ксенотиме-(Y) в светлой части – 61,78 %, основной массы – 64,57 мас. %.

Метаалевролиты северной части хр. Енганэ-Пэ (ЕН-103) содержат монацит-(Ce) и ксенотим-(Y) (рис. 4). РЗЭ-содержащие минералы здесь ассоциируют с хлоритом, мусковитом, альбитом, кварцем и рутилом.

Монацит-(Ce) представлен рассеянными по пространству породы кристаллами размерами 1–10 мкм и их скоплениями (см. рис. 4, а–г). Химические составы монацитов приведены в табл. 2. Сумма оксидов РЗЭ в монаците составляет 61,43–68,05 мас. %.

Ксенотим-(Y) присутствует в виде отдельных зерен размером около 10 мкм (см. рис. 4, д). Сумма редких земель – 60,66 мас. %. Встречается ксенотим-(Y), в котором наблюдаются более светлые участки (см. рис. 4, е). Мы считаем, что

эти участки еще не полностью замещившегося ксенотимом-(Y) монацита, так как известно, что минералы, обогащенные РЗЭ цериевой группы, выделяются раньше минералов, содержащих преимущественно РЗЭ иттриевой группы, которые накапливаются во время гидротермального процесса [16]. В химическом составе этих участков ксенотима в монаците почти в два раза уменьшается содержание оксида иттрия и появляются оксиды легких РЗЭ (см. табл. 1, ан. 6). Сумма оксидов РЗЭ в монаците составляет 61,43–68,05 мас. %.

Метааргиллиты северной части хр. Енганэ-Пэ (ЕН-237) содержат алланит-(Ce), REE-Y-P-As-содержащий торит и синхизит-(Ce). РЗЭ-минералы ассоциируют с альбитом, хлоритом, мусковитом, кварцем и апатитом (рис. 5).

Алланит-(Ce) образует крупные мелкозернистые скопления на площади более 10 мм² (см. рис. 5, а). Содержание оксидов РЗЭ достигает 23,62 – 26,47 мас. % (табл. 3, ан. 7, 8).

Обнаружен минерал, представленный удлиненными и изометричными зернами с однородным внутренним строением, диагностированный нами как гидротированный торит. Размеры зерен 15–20 мкм (см. рис. 5, б, табл. 3, ан. 5, 6). Минерал содержит повышенные значения РЗЭ (до 13,14–13,36 мас. %), фосфора (до 4,77 мас. %) и мышьяка (до 2,19 мас. %). Мы полагаем, что минерал представляет собой твердый раствор ряда торит–гаспарит–монацит, аналогичный установленному в 1962 церфосфорхаттониту, промежуточному элементу серии твердых растворов монацита-(Ce) и хаттонита с соотношениями Th:LREE и Si:P, близкими к 1:1 [17]. Содержание оксидов РЗЭ варьирует от 13,14 до 13,36 мас. %.

Таблица 1

Химические составы ксенотима-(Y) и кайнозита-(Y) (мас.%)

Table 1

Chemical compositions of xenotime-(Y) and cainosite-(Y) (wt.%)

Компонент	Метапелит						Вулканогенно-осадочная порода			
	ЕН-9			ЕН-103			ЕН-202			
	ксенотим-(Y)						кайнозит-(Y)			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	1,21	—	1,58	—	2,69	3,36	—	—	25,9	26,24
CaO	—	—	—	—	—	0,35	—	—	3,01	3,07
P ₂ O ₅	33,33	34,55	34,20	33,20	33,19	31,59	34,41	34,36	—	—
FeO	—	—	—	—	—	0,88	0,80	0,70	—	—
Fe ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	5,16	5,02
Al ₂ O ₃	—	—	—	—	—	0,49	—	—	—	—
Y ₂ O ₃	44,92	47,25	46,35	44,22	42,63	22,02	44,19	44,76	22,58	23,82
La ₂ O ₃	—	—	—	—	—	7,90	—	—	—	—
Ce ₂ O ₃	—	—	—	—	—	14,30	—	—	2,60	2,38
Pr ₂ O ₃	—	—	—	—	—	1,46	—	—	0,91	0,79
Nd ₂ O ₃	—	—	—	—	—	5,30	—	—	5,91	5,42
Sm ₂ O ₃	0,51	0,63	0,82	—	—	1,40	0,44	0,62	4,14	3,75
Eu ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	1,39	1,51
Gd ₂ O ₃	2,99	2,88	3,79	3,39	3,26	2,67	3,67	3,26	6,87	6,27
Tb ₂ O ₃	0,61	0,46	0,58	—	—	—	0,78	—	1,70	1,22
Dy ₂ O ₃	5,52	5,23	6,02	6,21	5,78	3,41	7,45	7,12	6,24	6,18
Ho ₂ O ₃	1,07	1,37	0,85	1,14	1,31	—	1,05	1,38	0,96	1,02
Er ₂ O ₃	3,46	3,66	3,13	3,63	3,67	1,51	3,83	4,10	1,41	1,48
Yb ₂ O ₃	2,70	3,09	1,93	2,07	2,63	1,09	2,11	2,95	—	—
ThO ₂	2,06	0,80	—	0,76	—	0,52	0,59	—	—	—
UO ₂	1,17	0,42	—	—	—	—	—	—	—	—
CO ₂ *	—	—	—	—	—	—	—	—	5,38	5,42
H ₂ O*	—	—	—	—	—	—	—	—	2,20	2,22
Σ _{REE}	61,78	64,57	63,47	60,66	59,28	61,06	63,52	64,19	54,71	53,84
Σ	99,55	100,34	99,25	94,62	95,16	98,25	99,32	99,25	96,36	95,81

1. (Y_{0,81}Dy_{0,06}Er_{0,04}Gd_{0,03}Yb_{0,03}Th_{0,02}Sm_{0,01}Tb_{0,01}Ho_{0,01}U_{0,01})_{Σ1,02}(P_{0,96}Si_{0,04})_{Σ1,00}O₄

2. (Y_{0,86}Dy_{0,06}Gd_{0,03}Er_{0,04}Yb_{0,03}Sm_{0,01}Tb_{0,01}Ho_{0,01}Th_{0,01})_{Σ1,06}P_{1,00}O₄

3. (Y_{0,81}Dy_{0,06}Gd_{0,04}Er_{0,03}Yb_{0,02}Sm_{0,01}Tb_{0,01}Ho_{0,01})_{Σ0,99}(P_{0,95}Si_{0,05})_{Σ1,00}O₄

4. (Y_{0,84}Dy_{0,07}Gd_{0,04}Er_{0,04}Yb_{0,02}Ho_{0,01}Th_{0,01})_{Σ1,03}P_{1,00}O₄

5. (Y_{0,74}Dy_{0,06}Gd_{0,04}Er_{0,04}Yb_{0,03}Ho_{0,01})_{Σ0,91}(P_{0,91}Si_{0,09})_{Σ1,00}O₄

6. (Y_{0,38}Ce_{0,17}La_{0,10}Nd_{0,06}Dy_{0,04}Gd_{0,03}Sm_{0,02}Pr_{0,02}Er_{0,02}Fe_{0,02}Yb_{0,01}Ca_{0,01})_{Σ0,87}(P_{0,87}Si_{0,11}Al_{0,02})_{Σ1,00}O₄

7. (Y_{0,81}Dy_{0,08}Gd_{0,04}Er_{0,04}Yb_{0,02}Fe_{0,02}Sm_{0,01}Tb_{0,01}Ho_{0,01})_{Σ1,05}P_{1,00}O₄

8. (Y_{0,82}Dy_{0,08}Gd_{0,04}Er_{0,04}Yb_{0,03}Ho_{0,02}Fe_{0,02}Sm_{0,01})_{Σ1,05}P_{1,00}O₄

9. (Y_{1,52}Ca_{0,44}Gd_{0,31}Nd_{0,29}Dy_{0,27}Sm_{0,19}Ce_{0,13}Tb_{0,08}Eu_{0,06}Er_{0,06}Pr_{0,05}Ho_{0,04})_{Σ3,56}(Si_{3,47}Fe_{0,53})_{Σ4}O₁₂(CO₃) · H₂O

10. (Y_{1,71}Ca_{0,46}Gd_{0,28}Dy_{0,27}Nd_{0,26}Sm_{0,17}Ce_{0,12}Eu_{0,07}Er_{0,06}Tb_{0,05}Pr_{0,04}Ho_{0,04})_{Σ3,54}(Si_{3,49}Fe_{0,51})_{Σ4}O₁₂(CO₃) · H₂O

Примечание: * – здесь и далее содержание H₂O и CO₂ – расчетные данные. Прочерк – ниже предела обнаружения.

Note: * – hereafter, the contents of H₂O and CO₂ are calculated values. The dash indicates that the value is below the detection limit.

Синхизит-(Ce) образует вытянутые тонко таблитчатые формы, расположенные в альбите (см. рис. 5, в) или кварце (см. рис. 5, г), которые, в свою очередь, приурочены к трещинам. В его

составе содержится значительное количество РЗЭ (47,93–50,49 мас.%) и CO₂ (26,80–27,13 мас.%) (см. табл. 3, ан. 1–4). Расчет вхождения в формулу SiO₂ и FeO не проводился, так как эти оксиды

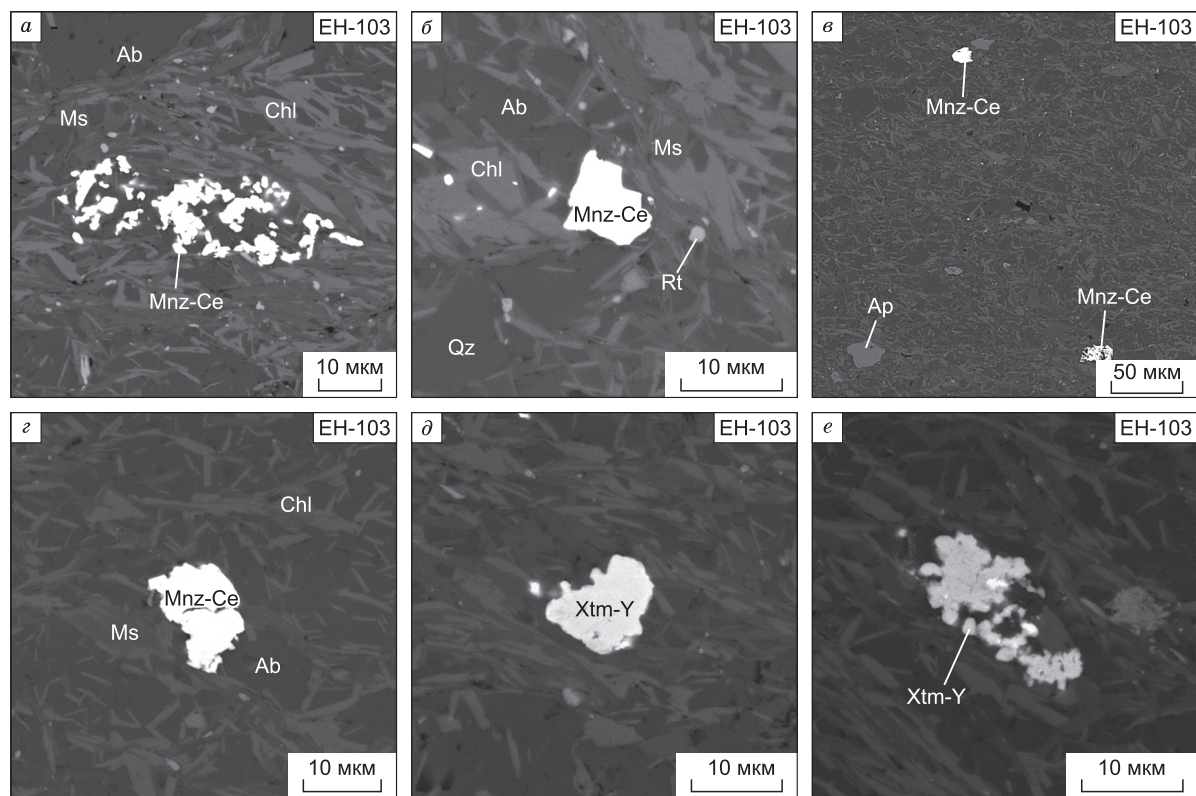


Рис. 4. Монацит-(Ce) и ксенотим-(Y) в углеродсодержащих металаевролитах северной части хребта Енганэ-Пэ. *a–e* см. в тексте

Fig. 4. Monazite-(Ce) and xenotime-(Y) in carbonaceous meta-siltstones of the northern part of the Engane-Pe Ridge. *a–e* see in text

не входят в эмпирические формулы, а нахождение минерала в кварце может обусловить влияние вмещающего матрикса. Расчетные значения $F < 1,0$, вероятно, из-за замещения части F на OH, так как минерал чаще всего имеет гидротермальное происхождение. Содержание оксидов РЗЭ составляет 47,93–50,49 мас. %.

РЗЭ-содержащие минералы в вулканогенно-осадочных породах

Южная часть хр. Енганэ-Пэ (ЕН-202, ЕН-403).

В этих породах РЗЭ-содержащие минералы представлены монацитом-(Ce), алланитом-(Ce), ксенотимом-(Y) и кайнозитом-(Y). Встречен минерал – гидросиликат меди, свинца и железа, содержащий неодим – кризейит (?). Эти минералы ассоциируют с хлоритом, кальцитом, альбитом и апатитом (рис. 6).

Монацит-(Ce) в пробе ЕН-202 присутствует в двух типах. Первый тип – это отдельные зерна (см. рис. 6, *a*), второй тип – гидротермально-измененные образования, развивающиеся по алланиту, выявленные в виде включений в кайно-

зите-(Y) (см. рис. 6, *a*, *b*), а также в сростках с халькопиритом (см. рис. 6, *b*). В образце ЕН-403 с противоположного борта руч. Тампико монацит-(Ce) образует мелкозернистые скопления, выполняющие трещины и пустоты в альбите (см. рис. 6, *в*). По химическому составу монацит цериевый (см. табл. 2, ан. 7–10). Содержание РЗЭ оксидов находится в пределах от 59,81 до 69,55 мас. %.

Алланит-(Ce) образует мелкозернистые скопления, размером около 2 мм, содержит включения монацита и халькопирита (см. рис. 6, *a*). Во внутренней структуре зерен отмечаются пустоты, связанные с гидратированностью минерала, расчетное содержание H_2O достигает 3,10 мас. % (см. табл. 3, ан. 9). Содержание оксидов РЗЭ достигает 23,96 мас. %.

Ксенотим-(Y) представлен почти полностью замещенными кайнозитом-(Y) зернами, реже присутствует в сростках с халькопиритом (см. рис. 6, *b*). Химический состав минерала приведен в табл. 1, ан. 7, 8. Содержание оксидов РЗЭ – 63,52–64,19 мас. %.

Таблица 2

Химические составы монацита-(Ce) (мас.%)

Table 2

Chemical compositions of monazite-(Ce) (wt.%)

Компонент	Метапелит					Вулканогенно-осадочная порода								
	ЕН-103					ЕН-202				ЕН-403	ЕН-102			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
SiO ₂	3,80	0,54	—	—	—	—	—	—	—	0,89	1,29	1,29	1,22	0,50
CaO	0,36	0,35	1,49	—	0,37	—	0,47	0,18	0,62	0,49	0,22	—	1,27	—
P ₂ O ₅	28,98	28,82	29,54	29,06	29,64	29,59	28,86	32,02	28,96	26,90	29,77	30,62	28,29	29,03
FeO	0,54	0,72	0,49	0,52	0,68	0,55	0,79	0,89	0,44	6,49	0,48	—	—	0,45
Al ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,61	—	—	—	—
Y ₂ O ₃	—	—	2,24	—	—	—	—	10,32	—	—	—	—	—	—
La ₂ O ₃	14,50	28,63	13,24	17,59	13,61	13,15	17,06	11,12	13,23	12,80	14,41	14,17	13,56	22,91
Ce ₂ O ₃	30,08	31,31	28,12	32,69	30,92	30,64	32,40	26,14	28,65	27,14	31,34	31,31	29,54	34,88
Pr ₂ O ₃	3,46	1,76	3,03	3,11	3,92	4,17	4,04	3,08	3,27	2,99	3,83	3,76	3,29	3,29
Nd ₂ O ₃	13,64	5,77	10,74	12,42	14,75	15,89	11,80	13,11	13,22	12,93	14,78	14,51	11,38	8,80
Sm ₂ O ₃	2,64	0,58	2,26	1,47	2,73	3,78	2,48	2,86	2,13	2,66	2,73	2,62	1,39	—
Eu ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	0,63	—	—	—	—	—
Gd ₂ O ₃	1,63	—	1,80	—	1,46	1,92	1,05	1,77	1,78	1,29	1,06	1,58	0,78	—
ThO ₂	0,37	—	7,64	—	0,74	—	0,83	—	2,60	—	—	—	9,20	—
Σ _{REE}	65,95	68,05	61,43	67,28	67,39	69,55	68,83	68,40	62,91	59,81	68,15	67,95	59,94	69,88
Σ	99,99	98,48	100,59	96,86	98,82	99,69	99,78	101,49	95,53	95,19	99,91	99,86	99,92	99,86

1. (Ce_{0,39}La_{0,19}Nd_{0,17}Pr_{0,04}Sm_{0,03}Gd_{0,02}Fe_{0,02}Ca_{0,01})Σ_{0,88}(P_{0,87}Si_{0,13})Σ_{1,00}O₄
2. (Ce_{0,46}La_{0,42}Nd_{0,08}Pr_{0,03}Fe_{0,02}Ca_{0,02}Sm_{0,01})Σ_{1,04}(P_{0,98}Si_{0,02})Σ_{1,00}O₄
3. (Ce_{0,41}La_{0,20}Nd_{0,15}Th_{0,07}Ca_{0,06}Y_{0,05}Pr_{0,04}Sm_{0,03}Gd_{0,02}Fe_{0,02})Σ_{1,06}P_{1,00}O₄
4. (Ce_{0,49}La_{0,26}Nd_{0,18}Pr_{0,05}Sm_{0,02}Fe_{0,02})Σ_{1,02}P_{1,00}O₄
5. (Ce_{0,45}Nd_{0,21}La_{0,20}Pr_{0,06}Sm_{0,04}Gd_{0,02}Ca_{0,02}Fe_{0,02}Th_{0,01})Σ_{1,02}P_{1,00}O₄
6. (Ce_{0,45}Nd_{0,23}La_{0,19}Pr_{0,06}Sm_{0,05}Gd_{0,03}Sm_{0,02}Fe_{0,02})Σ_{1,03}P_{1,00}O₄
7. (Ce_{0,49}La_{0,26}Nd_{0,17}Pr_{0,06}Sm_{0,04}Fe_{0,03}Ca_{0,02}Gd_{0,01}Th_{0,01})Σ_{1,08}P_{1,00}O₄
8. (Ce_{0,35}Y_{0,20}Nd_{0,17}La_{0,15}Pr_{0,04}Sm_{0,04}Fe_{0,03}Gd_{0,02}Ca_{0,01}Si_{0,01})Σ_{1,01}P_{1,00}O₄
9. (Ce_{0,43}La_{0,20}Nd_{0,19}Pr_{0,05}Ca_{0,03}Sm_{0,03}Gd_{0,02}Th_{0,02}Eu_{0,01}Fe_{0,01})Σ_{1,00}P_{1,00}O₄
10. (Ce_{0,41}Fe_{0,22}La_{0,19}Nd_{0,19}Pr_{0,04}Sm_{0,04}Gd_{0,02}Ca_{0,02})Σ_{1,14}(P_{0,93}Si_{0,04}Al_{0,03})Σ_{1,00}O₄
11. (Ce_{0,43}La_{0,20}Nd_{0,20}Pr_{0,05}Sm_{0,04}Fe_{0,02}Gd_{0,01}Ca_{0,01})Σ_{0,96}(P_{0,95}Si_{0,05})Σ_{1,00}O₄
12. (Ce_{0,42}La_{0,19}Nd_{0,19}Pr_{0,05}Sm_{0,03}Gd_{0,02})Σ_{0,91}(P_{0,95}Si_{0,05})Σ_{1,00}O₄
13. (Ce_{0,43}La_{0,20}Nd_{0,16}Th_{0,08}Pr_{0,05}Ca_{0,05}Sm_{0,02}Gd_{0,01})Σ_{1,01}(P_{0,95}Si_{0,05})Σ_{1,00}O₄
14. (Ce_{0,51}La_{0,34}Nd_{0,13}Pr_{0,05}Fe_{0,01})Σ_{1,04}(P_{0,98}Si_{0,02})Σ_{1,00}O₄

Кайнозит-(Y) образует отдельные зерна с неровными краями размером около 50 мкм (см. рис. 6, а) и встречается в виде ксенотим-кайнозитового агрегата, где он почти полностью замещает *ксенотим-(Y)*, а также содержит включения галенита и монацита (см. рис. 6, б). Результаты химического анализа *кайнозита-(Y)* приведены в табл. 1, ан. 9, 10. Содержание оксидов РЗЭ составляет 53,84–54,71 мас.%.

На поверхности халькопирита отмечаются вторичные изменения (см. рис. 6, б). Вторичный минерал почти полностью окислился и содержит большое количество оксида железа, но по оставшимся элементам сделано предположение,

что первоначальный кристаллохимический состав минерала соответствовал *кризейиту (?)* – водному силикату меди, свинца и железа. Химический состав окисленного минерала, мас. %: SiO₂ – 8,08, CaO – 1,30, FeO – 48,42, CuO – 13,51, PbO – 5,14, Σ – 78,52. Этот же минерал развивается и на поверхности кайнозита-(Y) (см. рис. 6, а). Химические составы окисленного кризейита (?), мас. %: SiO₂ – 10,52, CaO – 1,77, FeO – 45,82, CuO – 9,94, PbO – 5,88, Y₂O₃ – 1,44, Nd₂O₃ – 0,62, Σ – 76,00. Идеальная кристаллохимическая формула кризейита – Cu₂Pb₂Fe₂Si₅O₁₇ · 6H₂O.

В северной части хр. Енганэ-Пэ (ЕН-102) породы содержат монацит-(Ce) и ксенотим-(Y)

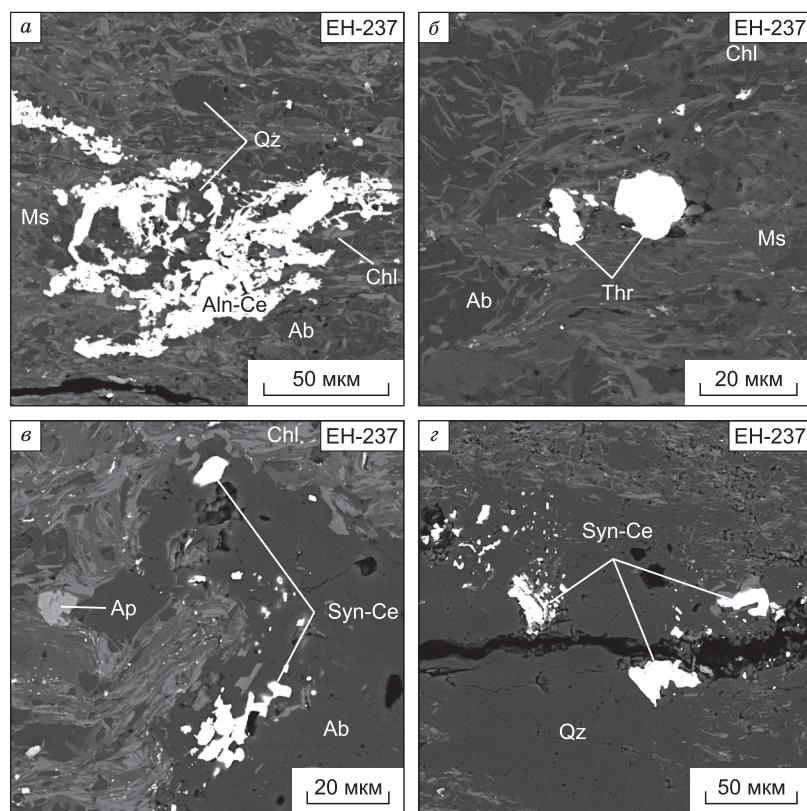


Рис. 5. Алланит-(Ce), торит и синхизит-(Ce) в метааргиллите северо-восточной части хребта Енгане-Пэ. *а–г* см. в тексте
Fig. 5. Allanite-(Ce), thorite and synchysite-(Ce) in meta-argillite of the northeastern part of the Enganepe Ridge. *a–г* see in text

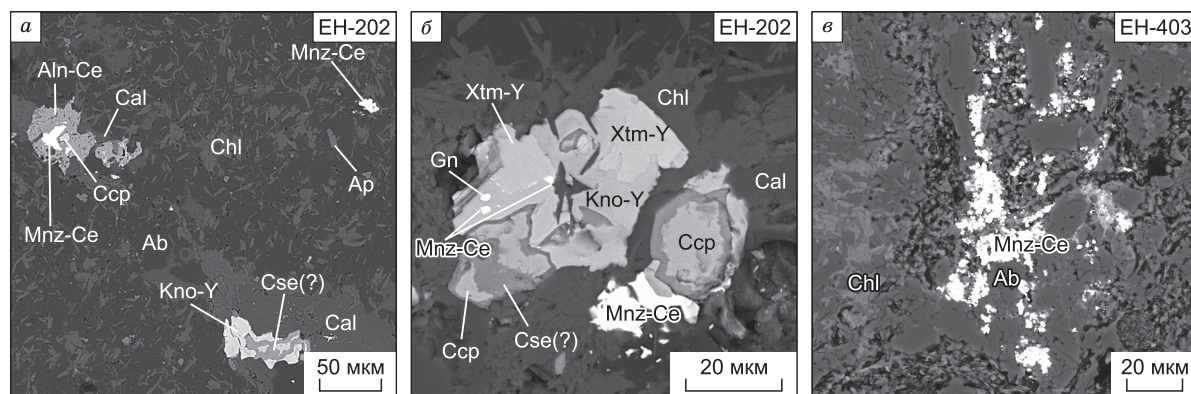


Рис. 6. Монацит-(Ce), алланит-(Ce), ксенотим-(Y) и кайнозит-(Y) в углеродсодержащих вулканогенно-осадочных породах южной части хр. Енганэ-Пэ. *а–в* см. в тексте
Fig. 6. Monazite-(Ce), allanite-(Ce), xenotime-(Y) and kinosite-(Y) in carbonaceous volcanogenic-sedimentary rocks of the southern part of the Engane-Pe Range. *a–e* see in text

(рис. 7). РЗЭ-содержащие минералы ассоциируют с хлоритом, мусковитом, альбитом, кварцем и рутилом.

Монацит-(Ce) представлен двумя типами. Первый тип образует мелкие зерна размером 1–10 мкм, рассеянные по пространству породы

или группирующиеся в небольшие скопления (см. рис. 7, *а, б*). Второй тип представлен пористыми образованиями в виде гидротермально измененных кайм вокруг хорошо окатанных зерен более яркого цвета (см. рис. 7, *в*). В химическом составе ядерной части монацита (см. табл. 2, ан. 13)

Таблица 3

Химические составы алланита-(Ce), синхизита-(Ce) и REE-Y-P-As-содержащего торита (мас.%)

Table 3

Chemical compositions of allanite-(Ce), synchysite-(Ce) and REE-Y-P-As-bearing thorite (wt.%)

Компонент	Метапелит								Вулканогенно-осадочная порода
	ЕН-237								ЕН-202
	синхизит-(Ce)				торит		алланит-(Ce)		9
	1	2	3	4	5	6	7	8	
SiO ₂	0,77	1,41	0,48	0,52	14,24	15,64	32,25	32,45	31,57
CaO	16,95	17,35	17,14	17,40	2,21	2,20	10,08	11,00	10,29
ZrO ₂	—	—	—	—	3,24	3,89	—	—	—
MnO	—	—	—	—	—	—	0,35	0,59	0,47
FeO	0,64	0,44	—	—	0,80	1,06	—	—	—
Fe ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	14,37	13,23	13,84
Al ₂ O ₃	—	—	—	—	—	0,82	17,98	19,63	17,51
P ₂ O ₅	—	—	—	—	4,77	4,71	—	—	—
V ₂ O ₅	—	—	—	—	1,04	0,98	—	—	—
As ₂ O ₃	—	—	—	—	2,07	2,19	—	—	—
Y ₂ O ₃	1,54	1,02	1,58	1,14	8,88	8,62	—	—	—
La ₂ O ₃	10,92	16,71	13,9	11,18	—	—	6,64	5,66	4,67
Ce ₂ O ₃	21,11	21,89	21,31	21,33	2,18	1,62	12,92	11,33	12,07
Pr ₂ O ₃	2,33	1,99	2,82	2,20	—	—	1,18	1,39	1,42
Nd ₂ O ₃	9,50	6,32	8,22	10,06	1,46	1,15	4,99	4,51	4,79
Sm ₂ O ₃	2,09	—	1,59	1,45	—	—	0,74	0,73	1,01
Gd ₂ O ₃	1,04	—	1,07	1,44	—	0,61	—	—	—
Yb ₂ O ₃	—	—	—	—	0,84	1,14	—	—	—
ThO ₂	—	—	—	—	48,64	44,35	—	—	—
UO ₂	—	—	—	—	0,95	4,60	—	—	—
F	4,90	4,31	4,21	4,68	—	—	—	—	—
CO ₂ *	26,82	26,87	27,13	26,80	—	—	—	—	—
H ₂ O*	—	—	—	—	5,99	5,99	3,19	3,30	3,10
Σ _{REE}	48,53	47,93	50,49	48,8	13,36	13,14	26,47	23,62	23,96
Σ	98,61	98,31	99,45	98,20	97,31	99,57	104,70	103,82	100,74

1. Ca_{0,99}(Ce_{0,42}La_{0,22}Nd_{0,19}Pr_{0,05}Y_{0,05}Sm_{0,04}Gd_{0,02})Σ_{0,98}(CO₃)₂F_{0,85}2. Ca_{1,01}(Ce_{0,44}La_{0,34}Nd_{0,12}Pr_{0,04}Y_{0,03})Σ_{0,97}(CO₃)₂F_{0,74}3. Ca_{0,99}(Ce_{0,42}La_{0,28}Nd_{0,16}Pr_{0,06}Y_{0,05}Sm_{0,03}Gd_{0,02})Σ_{1,01}(CO₃)₂F_{0,72}4. Ca_{1,02}(Ce_{0,43}La_{0,23}Nd_{0,20}Pr_{0,04}Y_{0,03}Sm_{0,03}Gd_{0,03})Σ_{0,98}(CO₃)₂F_{0,81}5. (Th_{0,55}Y_{0,24}Ca_{0,12}Zr_{0,08}Ce_{0,04}Fe_{0,03}Nd_{0,03}U_{0,05}Yb_{0,01})Σ_{1,11}(Si_{0,70}P_{0,20}As_{0,06}V_{0,03})Σ₁O₄OH6. (Th_{0,44}Y_{0,21}Ca_{0,11}Zr_{0,09}Ce_{0,04}Fe_{0,04}Nd_{0,03}U_{0,05}Yb_{0,02}Gd_{0,01})Σ_{1,05}(Si_{0,72}P_{0,19}As_{0,06}V_{0,03})Σ₁O₄OH7. (Ca_{1,01}Ce_{0,44}La_{0,23}Nd_{0,17}Pr_{0,04}Mn_{0,03}Sm_{0,02})Σ_{1,95}(Al_{1,52}Fe_{1,48})Σ_{3,00}(SiO₄)(Si₂O₇)O(OH)8. (Ca_{1,07}Ce_{0,38}La_{0,19}Nd_{0,15}Pr_{0,05}Mn_{0,05}Sm_{0,02})Σ_{1,90}(Al_{1,52}Fe_{1,48})Σ_{3,00}(SiO₄)(Si₂O₇)O(OH)9. (Ca_{1,07}Ce_{0,43}La_{0,17}Nd_{0,17}Pr_{0,05}Mn_{0,04}Sm_{0,03})Σ_{1,95}(Al_{1,52}Fe_{1,48})Σ_{3,00}(SiO₄)(Si₂O₇)O(OH)

отмечается повышенное содержание оксида Th (9,20 мас.%) и появление CaO (1,27 мас.%). Содержание оксидов РЗЭ составляет 59,94–69,88 мас.%.

Обсуждение результатов

В углеродсодержащих породах хребта Енганэ-Пэ установлена следующая РЗЭ-содержащая ми-

нерализация: алланит-(Ce), монацит-(Ce), ксенотим-(Y), синхизит-(Ce), торит и кайнозит-(Y). Распределение суммы оксидов РЗЭ в этих минералах приведено на рис. 8. В монаците-(Ce) и ксенотиме-(Y) максимальная сумма оксидов РЗЭ достигает 69,55 и 64,57 мас.% соответственно. В кайнозите-(Y) и синхизите-(Ce) ее зна-

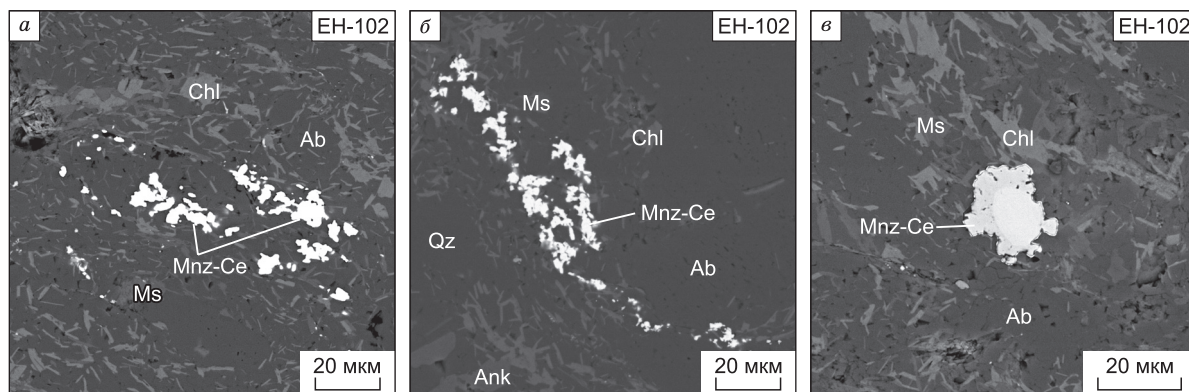


Рис. 7. Монацит-(Ce) в углеродсодержащих вулканогенно-осадочных породах северо-восточной части хр. Енганэ-Пэ. а–в см. в тексте

Fig. 7. Monazite-(Ce) in carbonaceous volcanogenic-sedimentary rocks of the north-eastern part of the Engane-Pe Ridge. а–в see in text

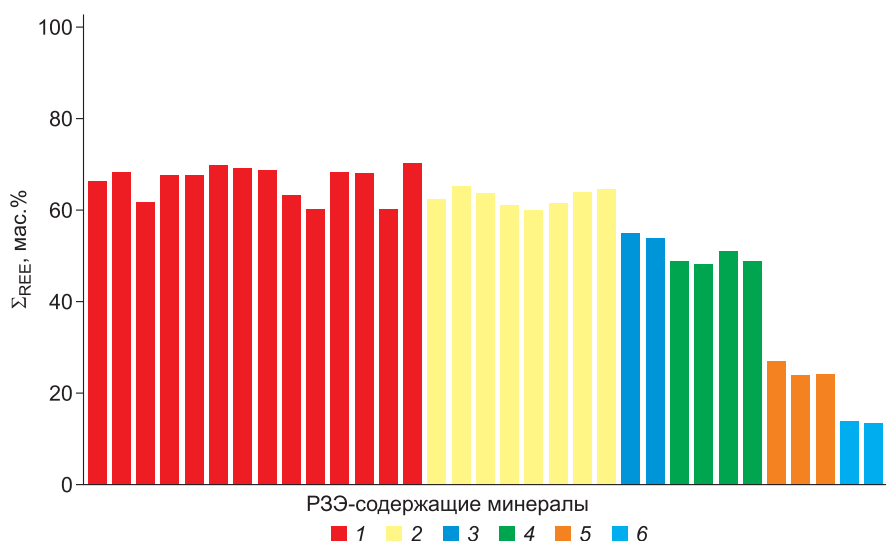


Рис. 8. Распределение суммы оксидов редких земель в РЗЭ-содержащих минералах: 1 – монацит-(Ce), 2 – ксенотим-(Y), 3 – кайнозит-(Y), 4 – синхизит-(Ce), 5 – алланит-(Ce), 6 – торит

Fig. 8. Distribution of the sum of rare earth oxides in REE-bearing minerals: 1 – monazite-(Ce), 2 – xenotime-(Y), 3 – kainosite-(Y), 4 – synchysite-(Ce), 5 – allanite-(Ce), 6 – thorite

чения немного меньше – до 54,71 мас.% в первом минерале и до 50,49 мас.% – во втором. Меньше всего РЗЭ содержится в алланите-(Ce) – до 26,47 мас.% и торите – до 13,36 мас.%.

Алланит-(Ce) типичный акцессорный минерал магматитов и метаморфитов в породах манюкуяхинской свиты. Он представлен цериевой разновидностью (см. табл. 3, ан. 7–9).

Составы монацита-(Ce) были нанесены на Ce–La–Nd-диаграмму. Химические составы монацитов осадочных и вулканогенно-осадочных пород по содержанию La разделились на два поля (рис. 9). Монациты, отнесенные нами к ги-

дротермальному типу (на рисунке обозначены треугольником), практически не имеют различий в составе с монацитами из осадочных или вулканогенно-осадочных пород. Они характеризуются немного пониженным содержанием Nd. Монациты, образованные в гидротермальную стадию образования, отличаются повышенным содержанием Th (см. табл. 2, ан. 3, 13).

Ксенотим-(Y) установлен в двух разновидностях, различающихся по химическому составу. Первая разновидность характеризуется повышенными содержаниями U и Th. На бинарной диаграмме ксенотим, изученный в осадочных и вул-

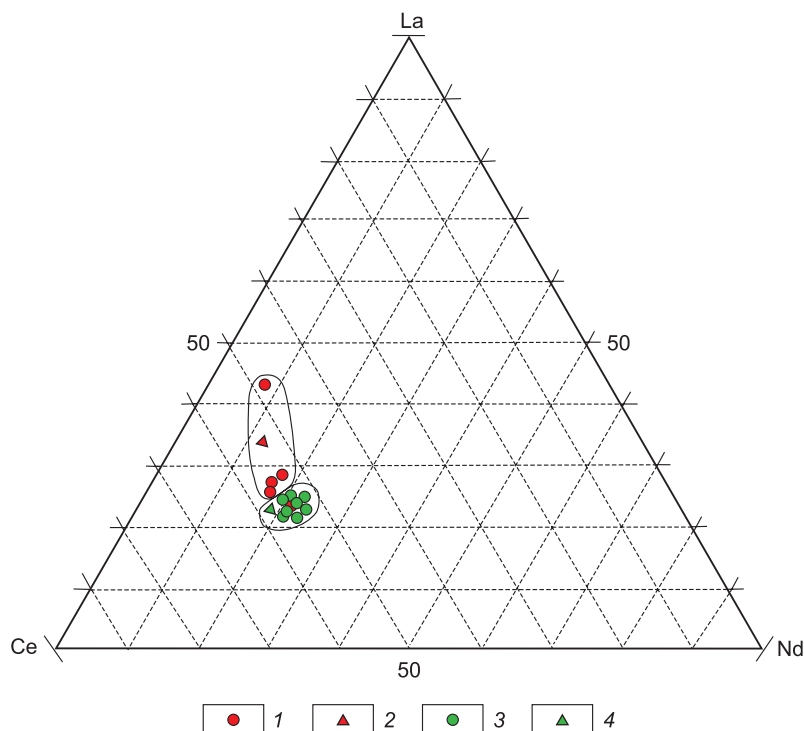


Рис. 9. Ce-La-Nd-диаграмма составов монацита из неопротерозойских пород хр. Енганэ-Пэ. Минералы из: 1, 2 – осадочных пород, 3, 4 – вулканогенно-осадочных пород; кружочек – неизменный, треугольник – гидротермально измененный

Fig. 9. Ce-La-Nd diagram of monazite compositions from Neoproterozoic rocks of the Engane-Pe Range. Minerals from: 1, 2 – sedimentary rocks, 3, 4 – volcanic-sedimentary rocks; circle – unaltered, triangle – hydrothermally altered

каногенно-осадочных породах, образует разные отстоящие друг от друга поля по содержанию Y (рис. 10). Гидротермальный ксенотим-(Y) установлен только в вулканогенно-осадочных толщах, на диаграмме он характеризуется пониженным содержанием Y.

Синхизит-(Ce) чаще всего встречается как гидротермальный акцессорный минерал в гранитах, щелочных сиенитах и карбонатитах. Синхизит обнаруживается на всем протяжении Урала. На Южном Урале этот минерал известен в виде включений в кварцитсодержащих прожилках кальцитов в Вишневогорском миаскитовом массиве [18] и метаморфитах Шатакского комплекса [19]. На Среднем Урале – в метасоматитах Сафьяновского медноколчеданного месторождения [20]. На Приполярном Урале минерал найден в кварц-серицитовых сланцах неопротерозойской пуйвинской свиты [21]. В метапелитах манюкуяхинской свиты безводный фторкарбонат РЗЭ синхизит-(Ce), вероятно, образовался в результате замещения алланита в процессе гидротермально-метаморфических преобразований. Процесс замещения алланита фторкарбона-

тами РЗЭ (синхизитом в частности) описан в достаточном количестве публикаций [22–25]. В нашем случае он, вероятнее всего, реализуется на этой же стадии по реакции [23]: $\text{REEF}^{2+} + \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^{3-} = \text{Ca}(\text{REE})(\text{CO}_3)_2\text{F} + 2\text{H}^+$.

Торит представлен мелкими скоплениями зерен (см. рис. 5, б). В его составе содержатся РЗЭ (до 4,42 мас.%), Р (до 4,77 мас.%), Y (до 8,88 мас.%), As (до 2,19 мас.%), содержание H_2O до 5,99 мас.%. Стехиометрическая формула торита (формула рассчитана на: $\text{Si} + \text{P} + \text{As} + \text{V} = 1$): $(\text{Th}_{0,44-0,55}\text{Y}_{0,21-0,24}\text{Ca}_{0,11-0,12}\text{Zr}_{0,08-0,09}\text{Ce}_{0,04}\text{Fe}_{0,03-0,04}\text{Nd}_{0,03}\text{U}_{0,05}\text{Yb}_{0,01-0,02}\text{Gd}_{0,01})_{\Sigma 1,05-1,11}(\text{Si}_{0,70-0,72}\text{P}_{0,19-0,20}\text{As}_{0,06}\text{V}_{0,03})_{\Sigma 1}\text{O}_4\text{OH}$ (см. табл. 1). Внутреннее строение однородное. Вероятно, этот минерал представляет собой твердый раствор ряда торит-гаспарит-монацит, по аналогии с установленным в 1962 г. церфосфорхаттонитом из амазонитового пегматита юго-восточной Сибири (промежуточный элемент серии твердых растворов монацита-(Ce) и хаттонита с соотношениями Th : LREE и Si : P, близкими к 1:1 [17]).

Кайнозит-(Y). Впервые типохимические особенности кайнозита-(Y) были изучены нами

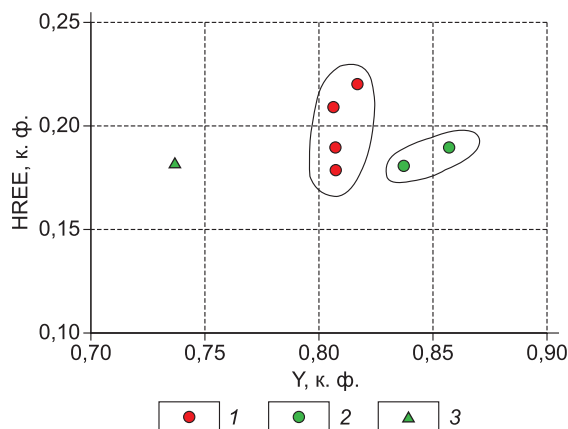


Рис. 10. Бинарная диаграмма (Y-HREE) ксенотима-(Y) из неопротерозойских пород хр. Енганс-Пэ. Усл. обозн. см. на рис. 8.

Fig. 10. Binary diagram (Y-HREE) of xenotime-(Y) from Neoproterozoic rocks of the Enganepe Range. Legend see to Fig. 8.

в метариолитах верхнерифей-вендской саблегорской свиты на Приполярном Урале – $(Y_{1,52}Ca_{0,88}Nd_{0,34}Gd_{0,20}Ce_{0,19}Sm_{0,18}Dy_{0,12}Pr_{0,06}La_{0,02})_{\Sigma 3,51}(Si_{3,59}Fe_{0,41})_{\Sigma 4}O_{12,49}(CO_3) \cdot H_2O$. На основании морфологии (в виде скоплений зерен, как и алланит-(Ce)) и химического состава кайнозита-(Y), а именно преобладание легких РЗЭ, нами был сделан вывод о том, что он образовался за счет перекристаллизации алланита-(Ce) при распаде эшинита-(Y) с участием гидротермальных растворов. Здесь в районе хр. Енганс-Пэ Полярного Урала его формула имеет следующий вид: $(Y_{1,52-1,71}Ca_{0,44-0,46}Gd_{0,28-0,31}Nd_{0,26-0,29}Dy_{0,27}Sm_{0,17-0,19}$

$Ce_{0,12-0,13}Tb_{0,05-0,08}Eu_{0,06-0,07}Er_{0,06}Pr_{0,04-0,05}Ho_{0,04})_{\Sigma 3,54-3,56}(Si_{3,47-3,49}Fe_{0,51-0,53})_{\Sigma 4}O_{12}(CO_3) \cdot H_2O$.

Минерал – гидросиликат меди, свинца и железа, содержащий Nd, определенный нами как кризейит (?), установлен нами в вулканогенно-осадочных породах и определен как продукт вторичных изменений халькопирита, также он развивается и по кайнозиту-(Y) (см. рис. 6, а, б). Кризейит был обнаружен в андезитовой брекчии, сцементированной флюоритом в зоне окисления на месторождении Сент-Энтони, Аризона, США. Совместно с кризейитом в брекчии были установлены кварц, барит, хлорит, гематит, окисленные, иногда почти полностью, пирит, галенит, сфалерит и халькопирит [26]. Нанопористый кризейит также установлен на рудниках в карьере Сога на севере Чили [27], а также в Италии, Шотландии, Мексике и др., в России этот минерал еще не был описан. Известно, что кризейит полностью разрушается при температуре выше 550 °C [27]. Так как в нашем случае минерал не окислился полностью, вероятнее всего, температура его существования не превышала этот предел.

Учитывая, что этот минерал развивается и по халькопириту, и по кайнозиту-(Y), а также условия его образования, описанные выше, можно считать, что он формировался на самой поздней стадии формирования РЗЭ-минерализации в экзогенных условиях.

Проведенные исследования показали, что в осадочных и вулканогенно-осадочных углеродсодержащих породах присутствует, как минимум, две разновозрастных РЗЭ-содержащих минеральных ассоциации (рис. 11).

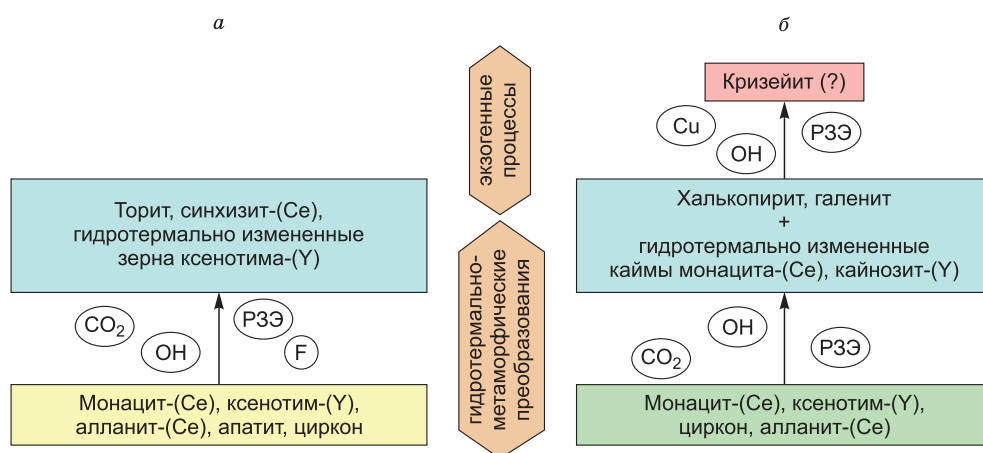


Рис. 11. Эволюция составов РЗЭ-содержащих минералов в породах хр. Енганс-Пэ: а – осадочные, б – вулканогенно-осадочные образования. В овалах приведены элементы, которые содержали гидротермальные растворы

Fig. 11. Evolution of the compositions of REE-bearing minerals in the rocks of the Enganepe Ridge: а – sedimentary, б – volcanogenic-sedimentary formations. The elements contained in hydrothermal solutions are indicated in ovals

На начальном этапе происходили кристаллизация минералов из магматического расплава и переотложение их в осадочные и вулканогенно-осадочные породы, где основными концентраторами РЗЭ послужили монацит-(Ce), ксенотим-(Y) и алланит-(Ce). В дальнейшем при гидротермально-метаморфических преобразованиях формировались гидротермальные карбонаты – кайнозит-(Y) и синхизит-(Ce), а также гидротермально измененные зерна и каймы ксенотима-(Y), монацита-(Ce) и торита. В это же время или чуть позднее мог образовываться и минерал – гидросиликат меди, свинца и железа, содержащий неодим (определенный нами как кризейит (?), частично замещенный гидроокислами железа), образованный в результате замещения халькопирита.

О гидротермально-метаморфических преобразованиях РЗЭ-содержащих минералов из углеродсодержащих пород неопротерозойской манюкуяхинской свиты Полярного Урала свидетельствует и частое присутствие вкрапленности РЗЭ-минерализации по типу звездного неба (см. рис. 4, а, 5, в, з, 6, в, 7, а), когда РЗЭ высвобождаются из состава ранних минералов (поставщиков и концентраторов РЗЭ), часть из них группируется и образует собственные минеральные фазы, а другая часть остается все еще в неконцентрированном виде. Еще одним аргументом в пользу гидротермально-метаморфического происхождения исследуемых минералов свидетельствует их тяготение к прожилкам и трещинам в породах, а также присутствие гидротермального галенита в сульфидях.

Заключение

Изучена редкоземельная минерализация в разных петротипах углеродсодержащих пород хр. Енганэ-Пэ. Среди РЗЭ-содержащих минералов из отложений неопротерозойской манюкуяхинской свиты во всех исследуемых породах хр. Енганэ-Пэ на Полярном Урале обнаруживаются алланит-(Ce), монацит-(Ce) и ксенотим-(Y). В метапелитах хр. Енганэ-Пэ впервые установлен фторкарбонат РЗЭ – синхизит-(Ce) и редкая разновидность гидратированного торита с повышенными содержаниями REE, P, As – $(\text{Th}_{0,44-0,55}\text{Y}_{0,21-0,24}\text{Ca}_{0,11-0,12}\text{Zr}_{0,08-0,09}\text{Ce}_{0,04}\text{Fe}_{0,03-0,04}\text{Nd}_{0,03}\text{U}_{0,05}\text{Yb}_{0,01-0,02}\text{Gd}_{0,01})_{\Sigma 1,05-1,11}(\text{Si}_{0,70-0,72}\text{P}_{0,19-0,20}\text{As}_{0,06}\text{V}_{0,03})_{\Sigma 1}\text{O}_4\text{OH}$. В вулканогенно-осадочных породах хр. Енганэ-Пэ впервые установлен РЗЭ-водосодержащий силикат с карбоната-

ми – кайнозит-(Y), на поверхности халькопирита обнаружен водный силикат меди, свинца и железа, диагностированный нами как кризейит (?).

В качестве основных минералов-концентраторов РЗЭ и Th в осадочных и вулканогенно-осадочных углеродсодержащих породах манюкуяхинской свиты выступают циркон, апатит, алланит-(Ce), монацит-(Ce) и ксенотим-(Y). Синхизит-(Ce), торит, кайнозит-(Y), а также гидротермальные зерна и каймы ксенотима-(Y) и монацита-(Ce) образовались позднее, в результате замещения циркона и алланита под воздействием растворов, содержащих повышенные концентрации РЗЭ и P, в процессе гидротермально-метаморфических преобразований.

Список литературы / References

1. Матвеев А.И., Толстов А.В., Петров И.М. Схема создания редкометалльного кластера в Республике Саха (Якутия). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(1):7–27. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-1-7-27>
- Matveev A.I., Tolstov A.V., Petrov I.M. The proposal for developing a rare metal cluster in the Republic of Sakha (Yakutia). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(1):7–27. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-1-7-27>.
2. Ковалев С.Г., Маслов А.В., Ковалев С.С. Минералого-геохимические аспекты поведения редкоземельных элементов при метаморфизме (на примере верхнедокембрийских структурно-вещественных комплексов Башкирского мегантиклинория, Южный Урал). *Георесурсы*. 2020;22(2):56–66. <https://doi.org/10.18599/grs.2020.2.56-66>
- Kovalev S.G., Maslov A.V., Kovalev S.S. Mineralogical and geochemical aspects of rare earth-elements behavior during metamorphism (on the example of Upper Precambrian structural-material complexes of the Bashkir megaanticlinorium, Southern Urals). *Georesources*. 2020;22(2):56–66. (In Russ.) <https://doi.org/10.18599/grs.2020.2.56-66>.
3. Ковалев С.Г., Ковалев С.С., Шарипова А.А. Первые данные о редкоземельной минерализации в кислых разновидностях пород шатакского комплекса (Южный Урал). *Литосфера*. 2023;23(5):910–929. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-5-910-929>
- Kovalev S.G., Kovalev S.S., Sharipova A.A. First data on rare earth mineralization in acid rock varieties of the Shatak complex (Southern Urals). *Lithosphere (Russia)*. 2023;23(5):910–929. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-5-910-929>.
4. Юдович Я.Э., Ефанова Л.И., Швецова И.В. и др. *Зона межформационного контакта в каре оз. Грубепендиты*. Сыктывкар: Геопринт; 1998. 97 с.

- Yudovich Ya.E., Efanova L.I., Shvetsova I.V. et al. *Zone of interformation contact in the lake's Grubependites crust*. Syktyvkar: Geoprint; 1998. 97 p. (In Russ.)
5. Козырева И.В., Швецова И.В., Попова Т.Н. Находка Nd-таленита на Приполярном Урале. *Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН*. 2004; 114(6):2–3.
- Kozyreva I.V., Shvetsova I.V., Popova T.N. Find of Nd-talenite in the Subpolar Urals. *Vestnik Instituta geologii Komi NTs UrO RAN*. 2004;114(6):2–3. (In Russ.)
6. Ковальчук Н.С. Редкоземельная минерализация в метаморфических сланцах пуйвинской свиты (RF₂), Приполярный Урал. *Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН*. 2015;250(10):38–44.
- Kovalchuk N.S. Rare-earth mineralization in metamorphic schists of the Puivinskaya suite (RF₂), Subpolar Urals. *Vestnik IG Komi SC UB RAS*. 2015;250(10):38–44. (In Russ.)
7. Удоратина О.В., Капитанова В.А. Геохронология пород субстрата и руд редкометалльно-редкоземельных месторождений и рудопроявлений на севере Урала и Тимане. *Известия Коми НЦ УрО РАН*. 2016; 28(4):85–100.
- Udoratina O.V., Kapitanova V.A. Geochronology of the rocks of substrate and ores of rare metal – rare earth deposits and ore occurrences in the north of the Urals and Timan. *Proceedings of the Komi Science Centre Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2016; 28(4):85–100. (In Russ.)
8. Онищенко С.А., Кузнецов С.К. Палладий-золотосульфидная минерализация в андезитах на месторождении Чудное (Приполярный Урал). *Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН*. 2019;6:20–27. <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2019-6-20-27>
- Onishchenko S.A., Kuznetsov S.K. Palladium-gold-sulfide mineralization in andesites at Chudnoye deposit (Subpolar Urals). *Vestnik IG Komi SC UB RAS*. 2019; 6:20–27. (In Russ.) <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2019-6-20-27>
9. Гракова О.В., Попвасев К.С. Редкоземельные минералы в докембрийских породах северной части Ляпинского антиклинория (Приполярный Урал). *Литосфера*. 2024;24(4):661–674. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-4-661-674>
- Grakova O.V., Popvasev K.S. Rare-earth minerals in pre-Cambrian rocks of the Lyapinskii anticlinorium (Subpolar Urals). *Lithosphere (Russia)*. 2024;24(4):661–674. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-4-661-674>
10. Гракова О.В., Уляшева Н.С. Металлогенические особенности верхнепротерозойских углеродсодержащих сланцев няровейской серии (Полярный Урал). *Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН*. 2016;9-10:16–21. <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2016-10-16-21>
- Grakova O.V., Ulyasheva N. S. Metallogeny of features of carbonaceous shales of the Nyarovei series (Polar Urals). *Vestnik IG Komi SC UB RAS*. 2016;9-10:16–21. (In Russ.) <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2016-10-16-21>
11. Гракова О.В., Попвасев К.С., Уляшева Н.С. Типохимизм и возможные источники исходных компонентов Ce–Cu–Ni-содержащего ферросапонита из метабазитов севера Урала. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(3):372–383. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-3-372-383>
- Grakova O.V., Popvasev K.S., Ulyasheva N.S. Typochemistry and possible sources of ferrosaponite with Ce–Cu–Ni from the metabasalts of the Northern Ural. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(3):372–383. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-3-372-383>
12. Вовчина Т.А., Шуйский А.С. Редкоземельная минерализация в риолитах Лядгейского комплекса хребта Енганепэ, Полярный Урал. В кн.: *Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента: Материалы 32-й научной конференции, г. Сыктывкар, 21–22 ноября 2023 г.* Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН. С. 16–19.
- Vovchina T.A., Shuysky A.S. Rare earth mineralization in rhyolites of the Lyadgei complex of the Enganepe ridge, Polar Urals. In: *Structure, substance, history of the lithosphere of the Timan-Severouralsk segment: Proceedings of the 32nd scientific conference, Syktyvkar, November 21–22, 2023*. Syktyvkar: IG Komi Scientific Center Ural Branch RAS, pp. 16-19. (In Russ.)
13. Булах А.Г., Золотарев А.А., Кривовичев В.Г. *Структура, изоморфизм, формулы, классификация минералов*. СПб.: Изд-во СПбГУ; 2014. 133 с.
- Bulakh A.G., Zolotarev A.A., Krivovichev V.G. *Structure, isomorphism, formulas, classification of minerals*. St. Petersburg: St. Petersburg State University Publishing House; 2014. 133 p. (In Russ.)
14. Кривовичев В.Г., Гульбин Ю.Л. Рекомендации по расчету и представлению формул минералов по данным химических анализов. *Записки Российского минералогического общества*. 2022;151(1):114–124. <https://doi.org/10.31857/S0869605522010087>
- Krivovichev V.G., Gulbin Yu.L. Recommendations for the calculation and presentation of mineral formulas based on chemical analysis data. *Proceedings of the Russian Mineralogical Society*. 2022;151(1):114–124. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0869605522010087>
15. *Государственная геологическая карта РФ масштаба 1:200 000*. Издание второе. Серия Полярно-Уральская. Лист Q-41-XI (Елецкий). Объяснительная записка. Ред. М. А. Шишкин. М.: МФ ВСЕГЕИ; 2013. 217 с.
- State Geological Map of the Russian Federation, scale 1:200,000. Second edition. Polar-Ural Series. Sheet Q-41-XI (Eletsky). Explanatory note. Ed. M. A. Shishkin. Moscow: MF VSEGEI; 2013. 217 p. (In Russ.)
16. Гинзбург А.И., Журавлева Л.Н., Иванов И.Б. и др. *Геология месторождений редких элементов. Выпуск 3. Редкоземельные элементы и их место-*

рождения. М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по геологии и охране недр; 1959. 126 с.

Ginzburg A.I., Zhuravleva L.N., Ivanov I.B., et al. *Geology of rare element deposits. Issue 3. Rare earth elements and their deposits*. Moscow: State Scientific and Technical Publishing House of Literature on Geology and Subsoil Conservation; 1959. 126 p. (In Russ.)

17. Mineral database Mindat.org Access mode: <https://www.mindat.org/min-35958.html> (accessed: 24.02.2025)

18. Попова В.И., Попов В.А., Макагонов Е.П. и др. *Вишневые Горы. Том 25, Выпуск 3*. М.: Минералогический Альманах; 2021. 128 с.

Popova V.I., Popov V.A., Makagonov E.P., et al. *Vishnevyye Gory. Volume 25, Issue 3*. Moscow: Mineralogical Almanac; 2021. 128 p. (In Russ.)

19. Ковалев С.Г., Ковалев А.А., Шарипова А.А. Редкоземельная минерализация в терригенных отложениях Шатакского комплекса (Южный Урал): видовое разнообразие и особенности химического состава. *Литология и полезные ископаемые*. 2024;1:19–33. <https://doi.org/10.31857/S0024497X24010027>

Kovalev S.G., Kovalev A.A., Sharipova A.A. Rare-earth mineralization in terrigenous deposits of the Shatak complex (Southern Urals): species diversity and features of chemical composition. *Litologiya i poleznyye iskopayemye*. 2024;1:19–33. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0024497X24010027>

20. Сорока Е.И., Притчин М.Е., Леонова Л.В., Булатов В.А. Редкоземельные фторкарбонаты в породах Сафьяновского медно-цинково-колчеданного месторождения (Средний Урал). *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. 2023;508(1):50–57. <https://doi.org/10.31857/S2686739722600552>

Soroka E.I., Pritchinn M.E., Leonova L.V., Bulatov V.A. Rare earth fluorocarbonates in rocks of the Safyanovsky copper-zinc-pyrite deposit (Middle Urals). *Doklady*

Rossiyskoy akademii nauk. Nauki o Zemle. 2023; 508(1):50–57. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S2686739722600552>.

21. Юхтанов П.П., Бурлаков Е.В. Анкилит и синхизит из хрусталеносных гнезд Приполярного Урала. *Труды Института геологии, Коми филиал АН СССР*. 1985;50(14):99–104.

Yukhtanov P.P., Burlakov E.V. Ankyllitis and synchisitis from crystal-bearing nests of the Subpolar Urals. *Trudy Instituta geol., Komi filial AN SSSR*. 1985; 50(14):99–104. (In Russ.)

22. Littlejohn A.L. Alteration products of accessory allanite in radioactive granites from the Canadian shield. *Geological Survey of Canada*. 1981;81:95–104.

23. Lira R., Ripley E. Fluid inclusion studies of the Rodeo de Los Molles REE and Th deposit, Las Chacras Batholith, Central Argentina. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1990;54(3):663–671. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)90362-O](https://doi.org/10.1016/0016-7037(90)90362-O)

24. Gieré R., Sorenses S.S. Allanite and ther REE-Rich Epidote-Group Minerals. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2004;56(1):431–493. <https://doi.org/10.2138/gsrng.56.1.431>

25. Alles J., Ploch A.-M., Schirmer T., Nolte N., et al. Rare-earth-element enrichment in post-Variscan polymetallic vein systems of the Harz Mountains, Germany. *Mineralium Deposita*. 2019;54(2):307–328. <https://doi.org/10.1007/s00126-018-0847-8>

26. Williams S.A., Bideaux R.A. Creaseyite, $\text{Cu}_2\text{Pb}_2(\text{Fe},\text{Al})_2\text{Si}_5\text{O}_{17}\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ a new mineral from Arizona and Sonora. *Mineralogical Magazine*. 1975;40(311):227–231. <https://doi.org/10.1180/minmag.1975.040.311.02>

27. Malcherek T., Köslin B., Schlüter J. The crystal structure of creaseyite: a disordered, nanoporous lead iron copper aluminosilicate. *Zeitschrift für Kristallographie - Crystalline Materials*. 2013;228(3):134–139. <https://doi.org/10.1524/zkri.2013.1572>

Об авторах

ГРАКОВА Оксана Васильевна, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-5917-9218>, ResearcherID: K-8365-2018, Scopus Author ID: 57192210915, SPIN: 9767-2911, e-mail: ovgrakova@geo.komisc.ru

ПОПВАСЕВ Константин Степанович, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-2005-5901>, ResearcherID: HKV-8452-2023, Scopus Author ID: 58064830100, SPIN: 5466-4404, e-mail: kspopvasev@geo.komisc.ru

Вклад авторов

Гракова О.В. — разработка концепции, руководство исследованием, проведение исследования, верификация данных, создание черновика рукописи; редактирование рукописи; **Попвасев К.С.** — проведение исследования; верификация данных, создание черновика рукописи; редактирование рукописи

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

GRAKOVA, Oksana Vasil'evna, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-5917-9218>, ResearcherID: K-8365-2018, Scopus Author ID: 57192210915, SPIN: 9767-2911, e-mail: ovgrakova@geo.komisc.ru

О. В. Гракова, К. С. Попвасев ♦ Условия формирования РЗЭ-содержащих минералов...

POPVASEV, Konstantin Stepanovich, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-2005-5901>, ResearcherID: HKV-8452-2023, Scopus Author ID: 58064830100, SPIN: 5466-4404, e-mail: kspopvasev@geo.komisc.ru

Authors' contribution

Grakova O.V. – conceptualization, supervision, investigation, validation, writing – original draft, writing – review & editing; **Popvasev K.S.** – investigation, validation, writing – original draft, writing – review & editing

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 14.04.2025

Поступила после рецензирования / Revised 14.05.2025

Принята к публикации / Accepted 21.05.2025



Оригинальная статья

Применение алгоритмов машинного обучения для прогнозирования золоторудной минерализации Верхнеамгинского щелочного массива, Алдано-Становой щит

П. Л. Чудинов^{1,✉}, В. Ю. Фридовский²

¹АО «Полюс Алдан», п. Нижний Куранах, Российская Федерация

²Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

✉Paulenotov@gmail.com

Аннотация

Приводятся результаты применения методов машинного обучения для прогнозирования золоторудной минерализации на поисковой стадии геологоразведочных работ на примере Верхнеамгинского щелочного массива Алдано-Станового щита. Использованы данные анализа 403 штучных проб методом ICP-AES на 25 химических элементов. Протестированы восемь алгоритмов классификации: Random Forest, Support Vector Machine, Neural Network (Multilayer Perceptron), Boosting (AdaBoost), Decision Tree, K-Nearest Neighbors, Linear Discriminant Analysis и Naive Bayes. Наивысшую точность (до 89,6 %) продемонстрировали Random Forest и Support Vector Machine, основанные на выявлении взаимосвязей между рудными элементами (Au, Ag, As, Cu, Sb) и элементами с отрицательной корреляцией (Mg, Ca, Ti). Результаты подтверждены ROC-анализом. При создании модели машинного обучения в качестве целевой переменной приняты значения «рудного» фактора для каждой пробы, использованные в качестве предиктора. С помощью построения аномальных полей значений «рудного» фактора проведено сравнение параметров известных объектов и прогнозируемых площадей. Методы машинного обучения позволяют оперативно и надежно интерпретировать аналитические данные, полученные с использованием спектрометрии или портативных XRF-анализаторов. Для повышения точности прогноза подчеркивается важность комбинации традиционных статистических методов (кластерный, факторный анализ) с современными алгоритмами машинного обучения.

Ключевые слова: машинное обучение, золоторудная минерализация, геохимические данные, поисковые работы, Верхнеамгинский щелочной массив, Алдано-Становой щит

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке АО «Полюс Алдан» и по плану НИР ИГАБМ СО РАН (проект FUG-2024-0006).

Для цитирования: Чудинов П.Л., Фридовский В.Ю. Применение алгоритмов машинного обучения для прогнозирования золоторудной минерализации Верхнеамгинского щелочного массива, Алдано-Становой щит. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(2):205–219. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-205-219>

Original article

Application of machine learning algorithms to predict gold mineralization in the Verkhneamginsky alkaline massif, Aldan-Stanovoy Shield

Pavel L. Chudinov^{1,✉}, Valery Y. Fridovsky²

¹JSC “Polyus Aldan”, Nizhny Kuranakh, Russian Federation

²Diamond and Precious Metal Geology Institute,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

✉Paulenotov@gmail.com

Abstract

The study reports on the application of machine learning methods for predicting gold mineralization in the prospecting phase of geological exploration. It focuses on the Verkhneamginsky alkaline massif, situated within the Aldan-Stanovoy Shield, as a case study. The investigation included the analysis of 403 ore samples, which were evaluated through Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy (ICP-AES) to determine the concentrations of 25 chemi-

cal elements. A total of eight classification algorithms were assessed in this investigation, including Random Forest, Support Vector Machine, Neural Network (Multilayer Perceptron), Boosting (AdaBoost), Decision Tree, K-Nearest Neighbors, Linear Discriminant Analysis, and Naive Bayes. The Random Forest and Support Vector Machine algorithms demonstrated the highest accuracy, achieving 89.6%, by identifying the relationships among ore elements (Au, Ag, As, Cu, Sb) and those elements that displayed negative correlations (Mg, Ca, Ti). These results were further validated through Receiver Operating Characteristic (ROC) analysis. In the process of developing the machine learning model, the values corresponding to the “ore” factor for each sample were designated as the target variable, while serving as predictors. To enable a comparative analysis between the parameters of established entities and the predicted regions, anomalous fields of the “ore” factor values were constructed. Additionally, machine learning methods enable the rapid and reliable interpretation of virtually any geochemical analytical data in the field, including data obtained through modern spectrometry methods and portable X-ray fluorescence (XRF) analyzers. The research further underscores the significance of integrating traditional statistical approaches, such as cluster and factor analysis, with contemporary machine learning algorithms to improve the accuracy of predictions.

Keywords: machine learning, gold mineralization, geochemical data, exploration, Verkhneamginsky alkaline massif, Aldan-Stanovoy Shield

Funding. This study was conducted with financial support from JSC “Polyus Aldan” and within the research framework established by the Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (project No. FUG-2024-0006).

For citation: Chudinov P.L., Fridovsky V.Yu. Application of machine learning algorithms to predict gold mineralization in the Verkhneamginsky alkaline massif, Aldan-Stanovoy Shield. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(2):205–219. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-205-219>

Введение

Для снижения финансовых рисков и повышения точности прогнозирования на разных стадиях геологоразведочных работ применяются высокоэффективные методы обработки аналитических данных [1, 2]. Традиционные статистические подходы обладают ограничениями в интерпретации сложных многомерных зависимостей [3]. Новые возможности открываются при использовании методов машинного обучения за счет автоматизированного выявления скрытых закономерностей в больших массивах геологической информации [3–6].

В данном исследовании показана возможность применения алгоритмов машинного обучения для прогнозирования по результатам штучного опробования золоторудной минерализации в пределах Верхнеамгинского щелочного массива Алдано-Станового щита. Этот район характеризуется мезозойским щелочным магматизмом и широким развитием метасоматических процессов, связанных с золото-медно-порфировым и золото-порфировым типами оруденения, сходными с месторождениями Рябиновое и Морозкинское [7, 8].

Материалы и методы исследования

Материалом исследования являются результаты анализов штучных проб, отобранных в пределах Верхнеамгинского щелочного массива в 2021–2024 гг. Штучные пробы, имеющие видимые метасоматические изменения (гумбеити-

зация, березитизация и фельдшпатизация), отбирались в ходе геологических маршрутов вне сети опробования. Пробы проанализированы пробирным методом с ICP-AES-ом окончанием (на золото) и мультиэлементным (ICP-AES) методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой на 35 химических элементов.

Предварительно из общей выборки были исключены пробы, генетически не связанные с горными породами Верхнеамгинского щелочного массива (доломиты, известняки, песчаники и др.). В ходе дальнейшей статистической обработки из выборки удалены химические элементы, для которых количество проб со значениями НПО (нижний порог обнаружения) не является представительным (B, Bi, Ga, Hg, Tl, Th, U, W), а также Al, K, Na.

В сформированной выборке из 25 химических элементов были заменены значения НПО на $0,5 \cdot \text{НПО}$, а ВПО (верхний порог обнаружения) на $1,05 \cdot \text{ВПО}$, исключены также ураганные значения. Для дальнейших исследований использованы 403 штучные пробы, для которых определялся характер распределения элементов (log-нормальный или нормальный). По результатам для всех химических элементов принят log-нормальный закон распределения. Значения логарифмированы и нормализованы методом z-стандартизации для приведения переменных к единому масштабу с нулевым средним и единичной дисперсией.

Статистические исследования являются неотъемлемой частью на любой стадии геолого-разведочных работ. Наиболее часто на поисковой стадии применимы методы многомерной статистики (корреляционный, кластерный, факторный (метод главных компонент) анализы), принадлежащие к наиболее ценным и полезным методам для выделения участков, перспективных для выявления любого типа минерализации. Каждый из методов имеет свои ограничения при интерпретации полученных результатов [3, 5].

В последние десятилетия все более широкое распространение получают методы машинного обучения, являющиеся дальнейшим развитием методов многомерной статистики [3, 5]. Машинное обучение (МО) – это область искусственного интеллекта, которая использует алгоритмы для получения информации из данных и создания моделей, способных решать задачи без явного программирования. Искусственный интеллект, в свою очередь, описывает создание систем, способных имитировать человеческую интеллектуальную и творческую деятельность. В этом контексте машинное обучение представляет собой имитацию процесса обучения.

В машинном обучении выделяют четыре основные категории: обучение с учителем (классификация, регрессия), обучение без учителя (ассоциация, кластеризация, уменьшение размерности), полуконтролируемое обучение и активное обучение [5]. В данной работе рассматриваются только классификационные методы машинного обучения с учителем (Boosting (AdaBoost), Decision Tree, K-Nearest Neighbors, Linear Discriminant Analysis, Naive Bayes, Neural Network (Multilayer Perceptron), Random Forest и Support Vector Machine). Обучение машины и прогнозирование результата выполняются на основе положительного примера [5]. Основной задачей классификации в машинном обучении с учителем является определение принадлежности объекта к определенному классу или виду [5, 9].

Региональная геологическая позиция

Верхнеамгинский щелочной массив расположен на территории одноименного золотоносного района Алдано-Станового щита. Территория исследуемого района входит в состав Амгинской субмеридиональной зоны тектонического меланжа, отделяющей Нимнырский и Западно-Алданский террейны [10]. В строении Амгинской зоны участвуют архейские комплексы, мета-

морфизованные в амфиболитовой и эпидот-амфиболитовой фациях, раннепротерозойские ортогнейсовые и парагнейсовые комплексы субгранулитовой–гранулитовой фаций, а также фрагменты архейских и раннепротерозойских зеленокаменных поясов и дифференцированные плутоны ультраосновных, основных и щелочных пород. Верхнеамгинский золотоносный район характеризуется многоярусным строением: нижнедокембрийский фундамент, венд-нижнекембрийский осадочный чехол и мезозойские участки активизации (рис. 1) [11]. Архейские структуры фундамента с несогласием перекрыты венд-нижнекембрийским платформенным чехлом морских глинисто-карбонатных осадков. На отдельных участках в северной и восточной частях района на вершинах водоразделов сохранились мезозойские терригенные отложения юрской (юхтинская свита) и кайнозойской систем.

Основной объем магматических образований связан с мезозойской тектоно-магматической активизацией. Преобладают штоки щелочных сиенитов и монцонитов площадью десятки км². Встречаются отдельные тела и дайки щелочных гранитов, а также силлы и дайки лампрофиров. Дайки лампрофиров (протяженностью до 2 км и мощностью первые десятки метров) имеют преимущественно северо-западное и северо-восточное простирание, соответствующее преобладающим направлениям тектонических разломов. С щелочными интрузиями связаны зоны сульфидизации, окварцевания и скарнирования с золоторудной минерализацией. Специфической особенностью мезозойского магматизма на Алдано-Становом щите является его калиевый уклон, отмечаются породы калий-натриевого ряда [13, 14]. Внедрение основного объема щелочных сиенитов происходило 129,1±2,5 млн лет назад, а даек и силлов мезократовых лампрофиров (минетт) – 117,7±3,4 млн лет назад [7].

Металлогеническая специализация Верхнеамгинского золотоносного района определяется карстовыми образованиями (Куранахский тип), скарновой (Лебединский тип) и золото-медно-порфировой (Рябиновый тип) минерализацией [8].

Рудные тела Куранахского типа представлены залежами, приуроченными к карстовым полостям. Это рыхлые, обломочные, супесчано-суглинистые минерализованные образования по метасоматически измененным нижнекембрийским карбонатным отложениям и юрским пес-

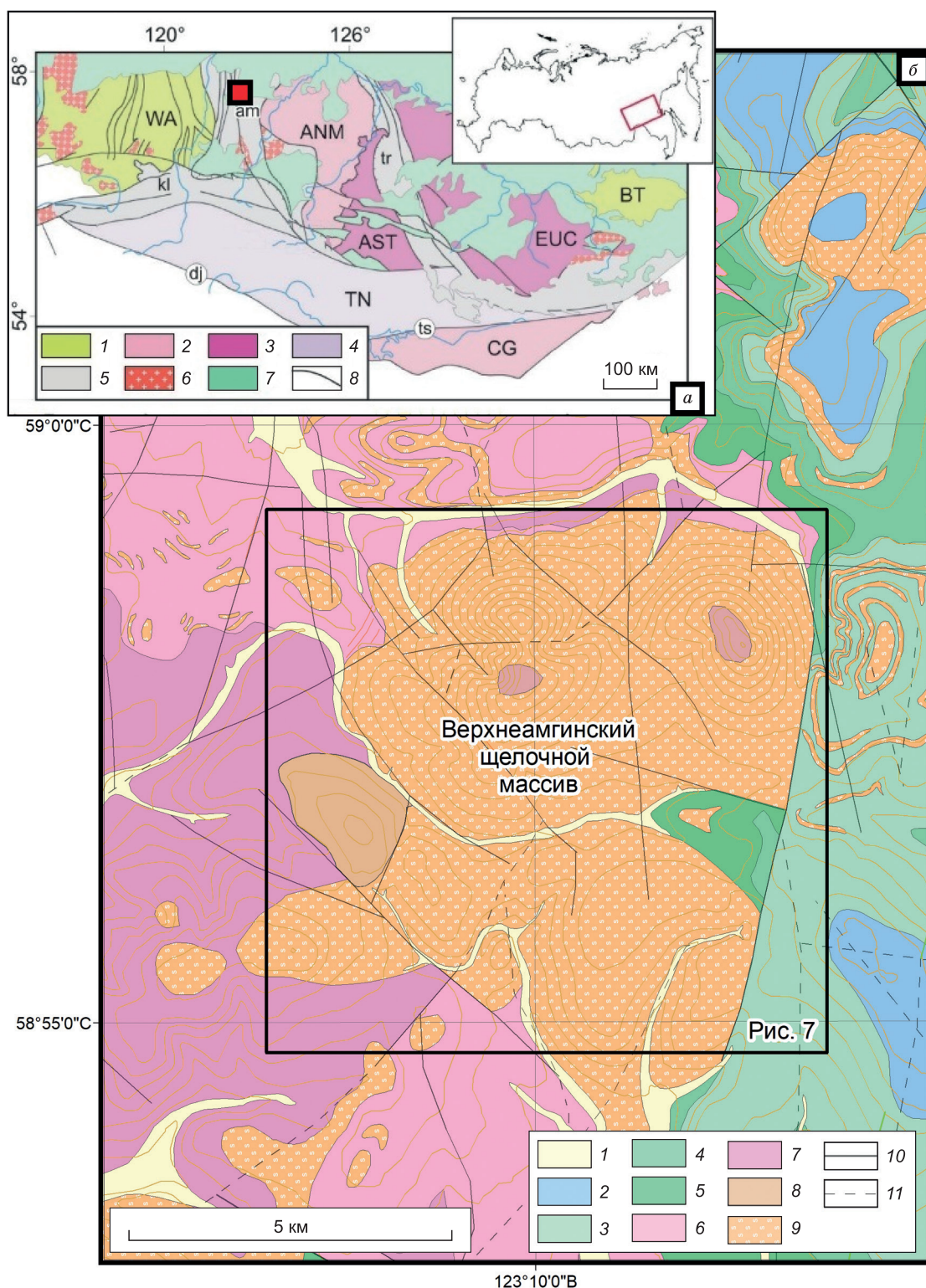


Рис. 1. Тектоническая схема Алдано-Станового щита и положение района работ (по [11] с изменениями) (а) и схема геологического строения Верхнеамгинского щелочного массива (по [8,12] с изменениями) (б).

а: 1 – гранит-зеленокаменные террейны (WA – Западно-Алданский, BT – Батомгский); 2 – гранулит-ортогнейсовые террейны (ANM – Нимнырский, CG – Чогарский); 3 – гранулит-парагнейсовые террейны (AST – Сутамский, EUC – Учурский); 4 – тоналит-трондьемит-гнейсовый террейн (TN – Тыдинский); 5 – зоны тектонического меланжа (am – Амгинская, kl –

Каларская, tr – Тыркандинская); 6 – сшивающие раннепротерозойские граниты; 7 – чехол Сибирской платформы; 8 – разломы (dj – Джелтулакский, ts – Таксакандинский).

б: 1 – четвертичные отложения (современные аллювиальные отложения, пески, галечники, валунники); 2 – юрские отложения (песчаники, гравелиты, конгломераты); 3–6 – венд-нижнекембрийские отложения (известняки, доломиты, мергели); 3 – унгелинская свита; 4 – тумулдурская свита; 5 – пестроцветная свита; 6 – усть-юдомская свита; 7 – архейские образования (кварциты с пачками гнейсов и кристаллических сланцев); 8, 9 – раннемеловые интрузии: 8 – эльконский гипабиссальный комплекс щелочно-сиенитовый; 9 – лебединский plutonический комплекс монзонит-сиенит-гранитовый; 10 – разрывные нарушения достоверные; 11 – разрывные нарушения предполагаемые

Fig. 1. a – Tectonic scheme of the Aldan-Stanovoy Shield and the location of the work area (by [11] with changes); б – Geological scheme of the geological structure of the Verkhneamginsky alkaline massif (by [8,12] with changes).

a: 1 – granite-greenstone terranes (WA – West Aldan, BT – Batomga); 2 – granulite-orthogneiss terranes (ANM – Nimnyr, CG – Chogar); 3 – granulite-paragneiss terranes (AST – Sutam, EUC – Uchur); 4 – tonalite-trondhjemite-gneiss terrane (TN – Tyndin); 5 – zones of tectonic mélange (am – Amga, kl – Kalar, tr – Tyrkanda); 6 – stitching Early Proterozoic granites; 7 – cover of the Siberian platform; 8 – faults (dj – Dzheltulaksky, ts – Taksakandin).

б: 1 – Quaternary deposits (modern alluvial deposits, sands, pebbles, boulders); 2 – Jurassic deposits (sandstones, gravelstones, conglomerates); 3–6 – Vendian-Cambrian deposits (limestones, dolomites, marls): 3 – Ungelinskaya suite; 4 – Tumuldurskaya suite; 5 – Pestrocvetnaya suite; 6 – Ust-Yudomskaya suite; 7 – Archean formations (quartzites with packs of gneisses and crystalline schists); 8, 9 – Early Cretaceous intrusions: 8 – Elkon hypabyssal alkaline syenite-alkaline granite complex; 9 – Lebedinsky plutonic monzonite-syenite-granite complex; 10 – reliable faults; 11 – inferred faults

чаникам. Первичными рудами являются пирит-адуляр-кварцевые метасоматиты [15].

Рудные тела скарнового типа представлены крутопадающими золото-сульфидно-кварцевыми жилами и горизонтальными залежами в низах доломитовой толщи венда, вблизи или на контакте с кристаллическим фундаментом по периферии мезозойских магматитов.

Золото-медно-порфировая минерализация локализована в щелочных массивах и представлена штокверками с золотосодержащими сульфидами и сульфидизированным штоком эпидейцитовых сиенит-порфиров [8].

Одним из важных критериев наличия золото-медно-порфирового и золото-порфирового оруденения является присутствие околорудных серицит-микроклиновых метасоматитов, гумбеитовых и фельдшпатитовых изменений, приуроченных к зонам разрывных нарушений и локализованных в щелочных магматических комплексах раннемелового возраста [16, 17]. Рудная минерализация в щелочных породах представлена двумя ассоциациями [7,8]. Минералы ранней ассоциации – пирит, халькопирит, галенит, сфалерит, молибденит, буланжерит сформированы из высококонцентрированных 22–44 мас.% NaCl-экв. углекислотно-азотных $\text{CO}_2 \pm \text{N}_2$ флюидов при температуре 330–400 °C и давлении 1150 бар [7]. Формирование минералов поздней ассоциации – алтаит, гессит, петцит и самородное золото происходило из низкоконцентрированных 3,3–9,2 мас.% NaCl-экв. углекислотных флюидов при температуре 210–230 °C. Необходимо отметить также наличие в породах Верхнеамгинско-

го щелочного массива редкоземельной (монацит-Се) и ториевой (торианит) минерализации [7].

Статистическая обработка данных

С целью апробации результатов методов машинного обучения и подтверждения результатов прогнозирования выборка разделена на две части. Одна часть, состоящая из 250 проб, была использована при создании моделей машинного обучения. Другая часть, из 153 проб, была принята как условно новый выделенный объект в пределах площади, не использовалась в процессе обучения модели и являлась дополнительной тестовой выборкой для созданных моделей машинного обучения. К основной выборке из 250 проб применены стандартные методы многомерной статистики, включая расчет коэффициентов кларков концентрации (КК) химических элементов (табл. 1).

Методом корреляционного анализа выявлены основные элементы-спутники золота в штуфных пробах Верхнеамгинского массива ($n = 250$). Результаты корреляционного анализа для золота (элементы ранжированы по убыванию коэффициентов корреляции): Ag 0,55 – As 0,54 – Sb 0,50 (средняя положительная связь); Cu 0,39 – V 0,39 – Fe 0,27 – Pb 0,23 – Zn 0,16 – Sc 0,16 – Ba 0,14 – Mo 0,13 – P 0,13 (слабая положительная связь) и Ca – 0,23 – Ti – 0,27 – Mg – 0,28 (слабая отрицательная связь). Проведен кластерный анализ методом иерархической кластеризации. В качестве правила объединения был использован метод Варда, а мерой расстояния (близости) 1-г Пирсона. В результате была получена дендрограмма

Таблица 1
Кларки концентрации химических элементов

Table 1
Clarks of concentration of chemical elements

Элемент	Кларк
Au	10,87
Cr	5,83
Cu	5,50
Pb	3,87
Mn	3,87
Ag	3,59
Mo	3,40
Cd	1,98
S	1,78
As	1,33
Sb	1,03
V	0,94
Co	0,92
Ni	0,80
Be	0,80
Mg	0,76
Ca	0,55
Sc	0,45
Fe	0,43
P	0,42
Zn	0,31
La	0,24
Sr	0,22
Ti	0,06
Ba	0,06

групп связанных между собой химических элементов (рис. 2).

Кластерный анализ в целом подтверждает результаты корреляционного анализа. Среди элементов на уровне группировки расстояний объединения, равной 0,3–0,8, обособляются шесть основных кластеров: 1) Au–As–Ag–Cu–Sb; 2) Be–S–Pb–Zn; 3) Cd–Cr–Mo; 4) Ba–Fe–P–V–La; 5) Co–Sc–Mn–Ni; 6) Ca–Sr–Mg–Ti.

Среди кластеров отчетливо выделяется основная рудная ассоциация, представленная Au–As–Ag–Cu–Sb. Она соответствует геохимической ассоциации Au–Ag–Cu–Bi, приуроченной к гумбеитизированным породам карбонат-серицит-мусковит-ортоклазовой фации. Ассоциация является индикатором наличия золото-медно-порфирового (Рябиновое месторождение) и золото-порфирового (Морозкинское место-

рождение) оруденения, где выделяются высококонтрастные аномалии Au, Ag, Pb, Cu, Zn, Mo, As [16].

Геохимическая ассоциация Be–S–Pb–Zn может представлять халькофильную полиметаллическую ассоциацию (Pb–Zn–S) в комплексе с Be. Присутствие бериллия может быть связано с влиянием плагиоклаза вмещающих пород. Другой возможной причиной может являться мусковитизация пород массива. В целом данная ассоциация характеризует наличие сульфидов свинца и цинка, что является важным поисковым критерием. Геохимическая ассоциация Cd–Cr–Mo имеет сложно объяснимую природу и является переходной между халькофильной Pb–Zn–S полиметаллической ассоциацией (Cd) и сидерофильной Co–Mn–Ni ассоциацией (Cr–Mo). Ассоциация Ba–Fe–P–V–La сложно интерпретируема, представлена двумя группами элементов: основной литофильной Ba–La–V, сидерофильной, включающей только железо, а также фосфором – элементом, обладающим литофильными и сидерофильными свойствами. Сложная конфигурация данного кластера требует дополнительного изучения и интерпретации. Отдельно выделяется кластер сидерофильных элементов группы железа (Transition metals) Co–Mn–Ni и редкоземельных элементов (REE), представленных скандием. Данная минеральная ассоциация отражает наличие в массиве Co–Ni минерализации.

Особого внимания заслуживают литофильные элементы Ca–Sr–Mg–Ti с явной отрицательной связью с минеральной ассоциацией Au–As–Ag–Cu–Sb, что отражает особенности рудообразования. Вынос Mg и Ca сопровождается процессом окварцевания и серицитизации. Снижение концентраций Ti может указывать на растворение титансодержащих минералов (ильменит и сфен) в метасоматическом процессе [18].

По результатам факторного анализа основной выборки получены шесть основных факторов. Для них рассчитаны значения факторных нагрузок каждого химического элемента. Рассчитанная модель объясняет 73 % общей дисперсии, что является вполне удовлетворительным результатом (табл. 2).

Первый фактор с максимальным вкладом в общую изменчивость 28,3 % отражает изменение большинства исследуемых элементов, таких

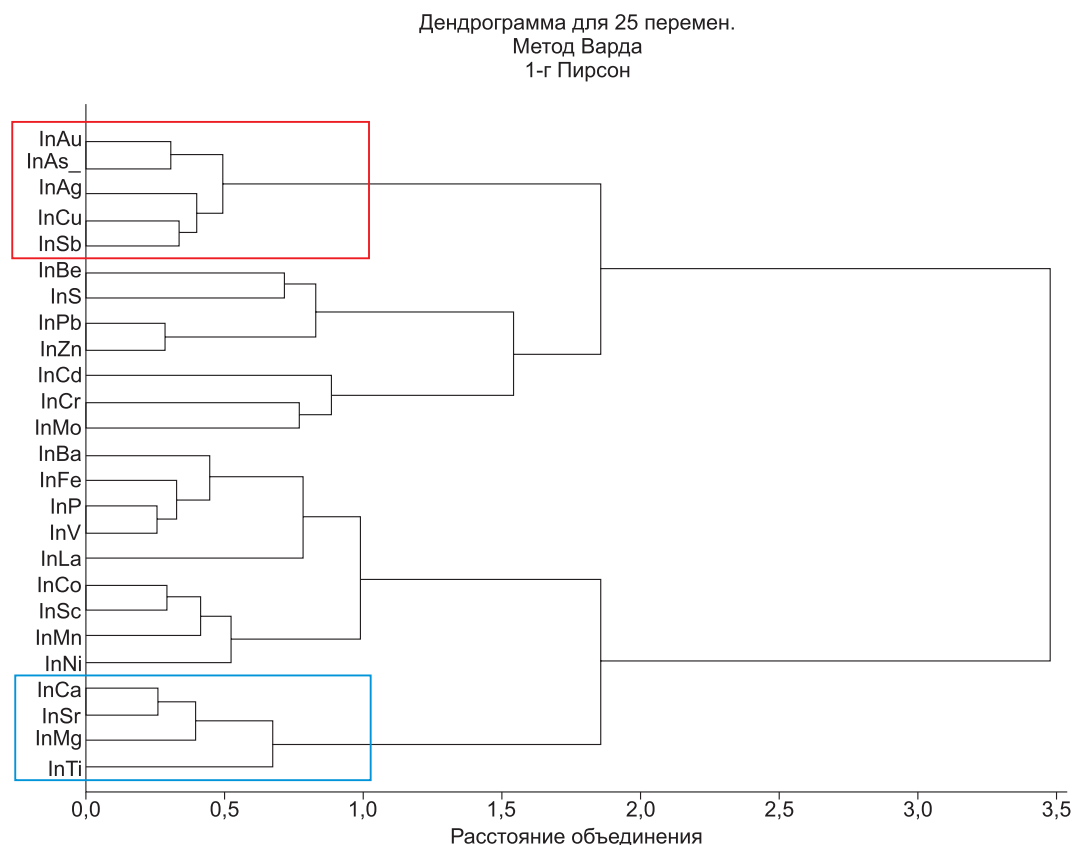


Рис. 2. Результаты кластерного анализа по основной выборке ($n = 250$)

Fig. 2. Results of cluster analysis for the main sample ($n = 250$)

как Ba, Co, Fe, Mn, P, Sc, V, Zn, а также Cu, La, и Pb, значения которых близки к существенным.

Второй фактор с весом 19,5 % и высокими положительными нагрузками Au, Ag, As, Sb, а также близкими значениям к значимым факторным нагрузкам Cu, с одной стороны, отражает накопление рудного комплекса элементов (Au, As, Ag, Sb, Cu), а с другой, отрицательными значениями Ca, Mg, Ti показывает вынос данных элементов в процессе рудообразования. Вынос Ca и Mg может быть связан с раскислением плагиоклаза, замещением амфибола (роговой обманки) и биотита карбонат-серицитовый минеральной ассоциацией, развитием щелочного метасоматизма (гумбеитизация, фельдшпатизация) с привносом Na и K. Этот фактор полностью соответствует результатам кластерного анализа и подтверждает наличие устойчивых геохимических связей. В дальнейшем, в ходе машинного обучения модели, «рудный» фактор будет использован как целевой. С этим метасоматозом сопряжена Zn–Pb минерализация, что подтверждается результатами кластерного и факторного

анализов. Фактор принят как условно «рудный», является продуктивным и перспективным показателем для выявления золотого оруденения. Достаточно высокий фактический вес (17,5 %) отражает высокую значимость и широкое развитие данного процесса в пределах Верхнеамгинского массива. В «рудном» факторе выделяется две ассоциации химических элементов: положительная, $As_{74}Ag_{71}Sb_{69}Au_{64}Cu_{57}$ и отрицательная, $Mg_{74}Ca_{68}Ti_{65}$ (рис. 3).

Третий фактор с весом 8,5 % обусловлен высокой положительной нагрузкой Cr и Ni. Четвертый фактор с весом 8 % определяется высокими отрицательными нагрузками Cd и Mo и существенными значениями Cr, что хорошо соотносится с результатами кластерного анализа. Пятый и шестой факторы имеют незначительные доли общей дисперсии, составляющие 5 и 4,4 % соответственно, малозначимые нагрузки для химических элементов.

Оценка достоверности данных, приведенных в выборке, проведена с использованием критерия Кайзера–Мейера–Олкина (КМО). Средний

Таблица 2

Значения факторных нагрузок по основной выборке (n = 250)

Table 2

Factor loading values for the main sample (n = 250)

Элемент	Fac1	Fac2	Fac3	Fac4	Fac5	Fac6
Au	-0,32	0,64	0,01	0,03	0,17	0,42
Ag	-0,36	0,71	-0,05	-0,07	0,09	0,11
As	-0,48	0,74	-0,02	-0,03	-0,02	0,20
Ba	-0,73	-0,06	-0,10	0,31	0,03	-0,21
Be	-0,44	-0,14	-0,34	-0,30	-0,28	0,00
Ca	-0,22	-0,68	-0,40	-0,21	0,20	0,34
Cd	-0,11	-0,12	-0,19	-0,61	-0,10	0,00
Co	-0,75	-0,33	0,35	0,17	-0,18	0,13
Cr	-0,02	-0,08	0,73	-0,44	-0,18	0,03
Cu	-0,55	0,57	0,18	-0,08	0,07	0,09
Fe	-0,76	0,15	0,28	0,26	-0,06	-0,28
La	-0,50	-0,27	0,17	-0,24	0,39	-0,26
Mg	-0,34	-0,74	-0,06	-0,34	-0,01	0,21
Mn	-0,64	-0,41	-0,04	0,18	-0,29	0,10
Mo	-0,05	0,24	0,11	-0,64	0,21	-0,47
Ni	-0,45	-0,39	0,60	-0,15	-0,04	0,17
P	-0,82	-0,06	-0,03	0,27	0,17	-0,15
Pb	-0,58	0,40	-0,33	-0,18	-0,05	-0,20
S	-0,22	0,31	-0,37	-0,16	-0,59	-0,10
Sb	-0,38	0,69	0,01	-0,13	0,27	0,18
Sc	-0,74	-0,18	0,27	-0,08	-0,18	0,17
Sr	-0,49	-0,49	-0,48	-0,06	0,32	0,12
Ti	-0,31	-0,65	0,02	0,18	0,16	-0,24
V	-0,86	0,08	-0,05	-0,03	0,22	0,02
Zn	-0,77	0,09	-0,25	0,02	-0,27	-0,14
Общая дисперсия	7,08	4,86	2,12	1,74	1,26	1,10
Доля объясненной дисперсии	0,28	0,19	0,08	0,07	0,05	0,04

индекс КМО по всей выборке равен 0,84, что означает высокие достоверность и адекватность этих данных. Для значений Cu, P, Sc и V показатель КМО максимальный, а для Cr, Mo и S – минимальный (табл. 3).

В полученном «рудном» факторе наиболее существенное положительное влияние на вероятность выявления комплексной полиэлементной рудной ассоциации оказывают элементы: Au, Ag, As, Cu, Sb, где наблюдается прямая положительная корреляция (рис. 4). Остальные элементы выборки, хоть и имеют влияние на фактор, но значительно меньшее. Отмеченное позволяет использовать методы машинного обучения для оперативного прогнозирования участков, перспек-

тивных на выявление Au, Ag, As, Cu, Sb рудной геохимической ассоциации.

В ходе дальнейшей статистической обработки значений «рудного» фактора был принят закон log-нормального распределения, выполнен стандартный набор операций по расчету минимально аномального, фонового содержаний, коэффициента вариации и других показателей, отражающих статистические особенности распределения значений. В соответствии с этим выделены и ранжированы уровни аномальных значений «рудного» фактора: No – фоновое, Low – низкое аномальное, Med – среднее аномальное, High – высокое аномальное. В процессе машинного обучения моделей данная многоклассовая клас-

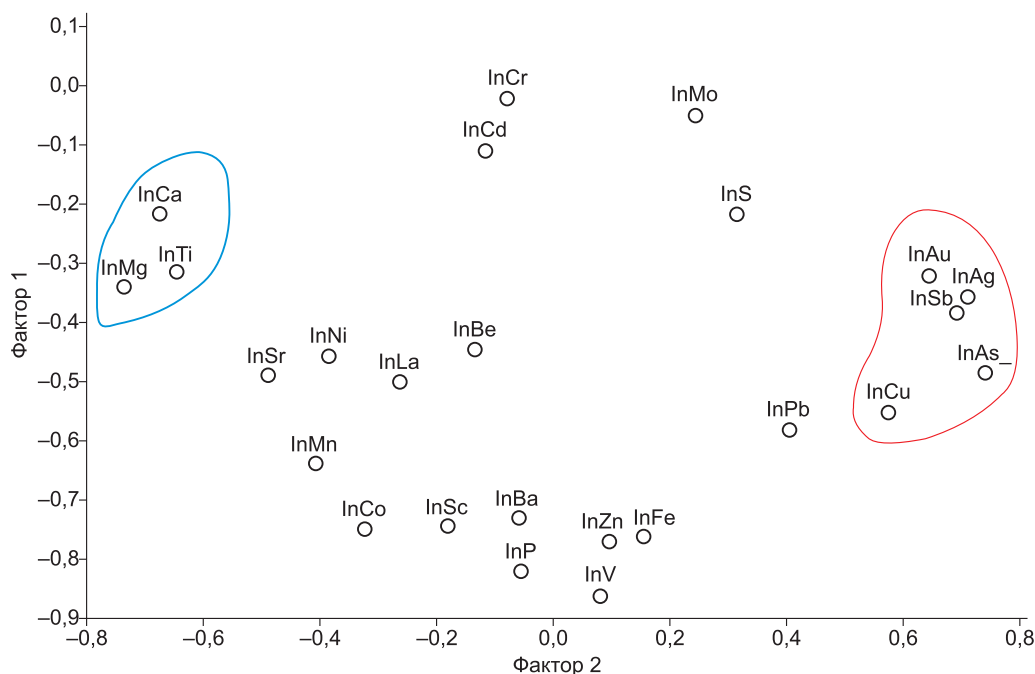


Рис. 3. График отношений химических элементов, отраженный в «рудном» факторе

Fig. 3. Graph of chemical element relationships reflected in the “ore” factor

сификация будет являться целевой, а значения «сырых» значений химических элементов будут переменными, представляющими информацию о целевой переменной.

Применение алгоритмов машинного обучения

С целью выявления наиболее эффективного метода прогнозирования были использованы восемь основных методов классификации: Boosting (AdaBoost), Decision Tree, K-Nearest Neighbors, Linear Discriminant Analysis, Naive Bayes, Neural Network (Multilayer Perceptron), Random Forest и Support Vector Machine [4, 6, 19]. Широкий выбор методов обоснован разными алгоритмами обучения для каждого из них. В процессе обучения были сформированы три локальные выборки: тренировочная, для настройки модели и проверки ее производительности (160 проб); валидационная, для подбора оптимального набора гиперпараметров (40 проб); тестовая, для итоговой оценки модели (50 проб). Распределение проб в таких пропорциях позволяет избежать недообучения или переобучения модели и дать объективную оценку работе модели [4].

На основе созданной по 250 пробам модели были прогнозированы аномальные значения в пробах тестовой выборки (153 пробы). Резуль-

таты прогноза приведены в табл. 4. По приведенным данным наиболее точными оказались три метода Random Forest, Support Vector Machine и Neural Network (Multilayer Perceptron), точность прогнозирования которых превысила 85 %. При этом стоит отметить, что все алгоритмы показали самые худшие результаты по предсказанию средних аномальных значений (Med). Высокий показатель неточности предсказаний средних аномальных значений, предположительно, связан с малым количеством проб данного кластера (менее 30). С одной стороны, можно предположить наличие определенных проблем при обработке малых массивов информации, но с другой стороны, по данному кластеру относительно неплохие результаты показали методы машинного обучения Support Vector Machine и Naive Bayes, что характеризует их способность корректно работать с малыми массивами информации. Несмотря на достаточно низкие показатели по данному кластеру, при дальнейшей тренировке моделей не представляется возможным увеличить точность предсказания. Отдельно стоит отметить, что наилучшие результаты каждый из методов показал по фоновым (No) и высоким аномальным значениям (High).

В целом все методы показали удовлетворительные результаты и могут быть использова-

Таблица 3
Значения критериев
Кайзера–Мейера–Олкина (КМО)
для химических элементов

Table 3
Kaiser–Meyer–Olkin (KMO)
criteria values for chemical elements

Элемент	КМО
Средний	0,84
Au	0,82
Ag	0,88
As	0,83
Ba	0,87
Be	0,83
Ca	0,75
Cd	0,71
Co	0,85
Cr	0,55
Cu	0,90
Fe	0,83
La	0,89
Mg	0,86
Mn	0,88
Mo	0,56
Ni	0,74
P	0,91
Pb	0,82
S	0,61
Sb	0,83
Sc	0,92
Sr	0,80
Ti	0,82
V	0,90
Zn	0,84

ны при прогнозировании, за исключением Naive Bayes, где общая точность предсказания составила всего лишь 9,2 %. Возможной причиной низкого результата может являться корреляция предикторов между собой, что противоречит предположению о независимости признаков в алгоритме Naive Bayes.

Наиболее точными алгоритмами предсказаний являются Support Vector Machine. Они обладают высокой общей точностью 89,2 % и одним из самых высоких уровней предсказания средних аномальных значений. Алгоритмы Random Forest и Neural Network (Multilayer Perceptron) имеют близкие результаты, различные в точно-

сти определения фоновых и низких аномальных значений. Данные алгоритмы отличают достаточно высокие показатели предсказания, спрогнозированные относительно всех других классов для каждой из выборок, что отражают ROC-кривые (рис. 5). В данной выборке по выбранным трем алгоритмам графики показывают зависимость количества верно классифицированных положительных примеров от количества неверно классифицированных отрицательных примеров. В целом ROC-анализ подтверждает фактически спрогнозированные результаты.

С целью контроля качества построенной модели и измерения производительности для каждого элемента был построен график среднего уменьшения точности (Mean Decrease in Accuracy), в котором наиболее высокие значения указывают на степень участия и важность в прогнозировании данного химического значения (рис. 6). На графике отображается высокая значимость как рудных элементов: As–Ag–Sb–Au–Cu, так и элементов с отрицательной корреляцией: Mg–Ca–Ti. Дополнительно отмечается повышенное влияние на прогнозирование V–Fe–Pb элементов, ранее не выделяемых как значимые, что должно учитываться при интерпретации прогнозных значений и может привести к изменению самого алгоритма обучения.

Результаты и обсуждение

Сравнение и интерпретация результатов, полученных с использованием разных алгоритмов, позволяют оценить их точность относительно друг друга и выбрать наиболее подходящий и эффективный метод для решения задач по прогнозированию. Для данной выборки наилучший результат был показан при использовании алгоритма Support Vector Machine.

Алгоритм Support Vector Machine основан на разделении геохимических и других данных через гиперплоскость. Например, разделение проб на «рудные» и «безрудные» через оптимальную гиперплоскость и определение трех областей поиска целей по обе стороны от данной гиперплоскости. Также используется генетический алгоритм для оптимизации гиперпараметров Support Vector Machine, чтобы уменьшить их влияние на результаты прогнозирования [6, 19].

Для сравнения предсказанных результатов по всей выборке построены схемы настоящих аномальных содержаний «рудного» фактора и карта аномальных предсказанных значений, получен-

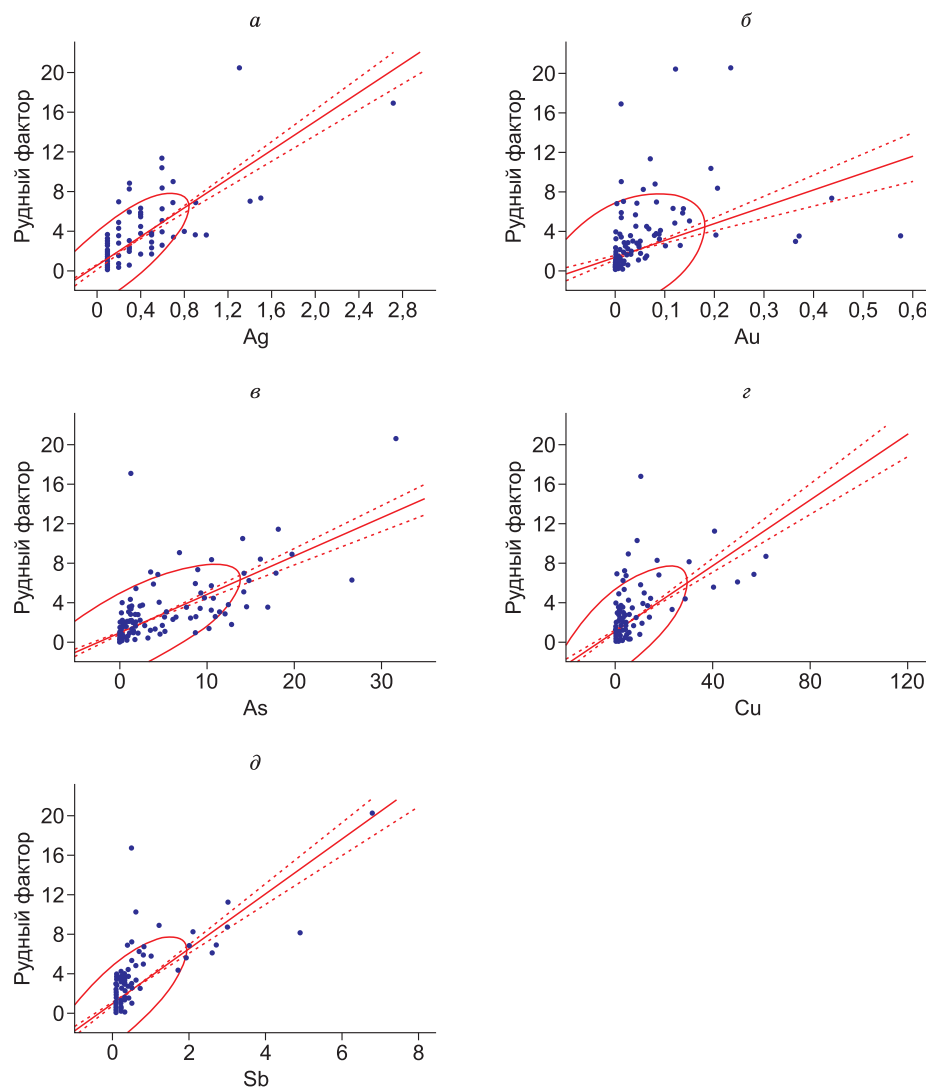


Рис. 4. Диаграммы рассеяния для «рудного» фактора и содержаний Ag (а), Au (б), As (в), Cu (г), Sb (д)

Fig. 4. Scatter plots for the “ore” factor and the contents of Ag (а), Au (б), As (в), Cu (г), Sb (д)

ных методом машинного обучения Support Vector Machine (рис. 7). На схемах отражены относительные значения в условных единицах «рудного» и прогнозного факторов. Участки разделены красной линией на две ранее использованные при обучении модели выборки: обучающую ($n = 250$) и тестовую ($n = 153$). При детальном изучении и сопоставлении двух карт вполне видны основные участки минерализации, направления минерализации, и в целом карты отличаются схожим обликом.

Полученные результаты можно считать удовлетворительными и использовать при планировании поисковых работ. В целом прогноз отражает основные участки минерализации, даже несмотря на крайне неравномерное опробова-

ние в ходе геологических маршрутов и качественные показатели (No, Low, Med, High), полученные при прогнозировании, что подтверждает его универсальность и возможность применения на поисковой стадии.

Заклучение

Применение алгоритмов машинного обучения является эффективным инструментом для анализа данных и построения прогнозов. Машинное обучение позволяет автоматически обрабатывать большие объемы данных и выделять закономерности локализации перспективных участков. Для успешного применения методов машинного обучения необходимо правильно выбирать модели и алгоритмы прогнозирования,

Таблица 4

**Фактическое количество корректно предсказанных значений
для каждого уровня аномальных значений и среднее по всему алгоритму, %**

Table 4

**The actual number of accurately predicted values
for each level of outliers and the average for the entire algorithm, %**

№ п/п	Метод обучения	No	Low	Med	High	Сред.
1	Random Forest	99,2	81,3	47,4	93,3	89,6
2	Support Vector Machine	90,2	89,1	63,2	97,8	89,2
3	Neural Network (MLP)	89,3	89,1	36,8	95,6	86,4
4	K-Nearest Neighbors	84,4	81,3	36,8	86,7	80,4
5	Boosting (ADABOOST)	96,7	48,4	0	91,1	76
6	Decision Tree	94,3	53,1	26,3	66,7	73,6
7	Linear Discriminant Analysis	59,8	73,4	36,8	77,8	64,8
8	Naive Bayes	1,6	14,1	68,4	0	9,2

обучать их на соответствующих геологических данных и проводить качественную проверку результатов.

На примере Верхнеамгинского щелочного массива были построены модели МО и оценены результаты прогнозирования золотого оруденения восемью алгоритмами машинного обучения: Boosting (AdaBoost), Decision Tree, K-Nearest Neighbors, Linear Discriminant Analysis, Naive Bayes, Neural Network (Multilayer Perceptron), Random Forest и Support Vector Machine. Среди них выбраны и применены наиболее точные для прогнозирования оруденения.

Методы машинного обучения отличаются универсальностью и могут быть применимы при поисках на разные виды твердых полезных ископаемых. Ввиду комплексной и многофакторной обработки геохимических данных, особое зна-

чение методы МО могут иметь в первую очередь при поисках благородных металлов и полиметаллов, а также при прогнозировании скрытого оруденения по геохимическим данным, характеризующим надрудный уровень.

При поисковых работах методы МО могут эффективно применяться в комплексе с XRF-анализатором, непосредственно в полевых условиях, когда в предварительно подготовленной модели используются массивы «сырых» данных и оперативно определяется степень их перспективности, с последующим построением схем аномальных значений.

Алгоритмы машинного обучения применимы при камеральной обработке информации, интерпретации результатов разных видов работ поисковой стадии: штучное опробование, опробование по вторичным и первичным ореолам рассеяния

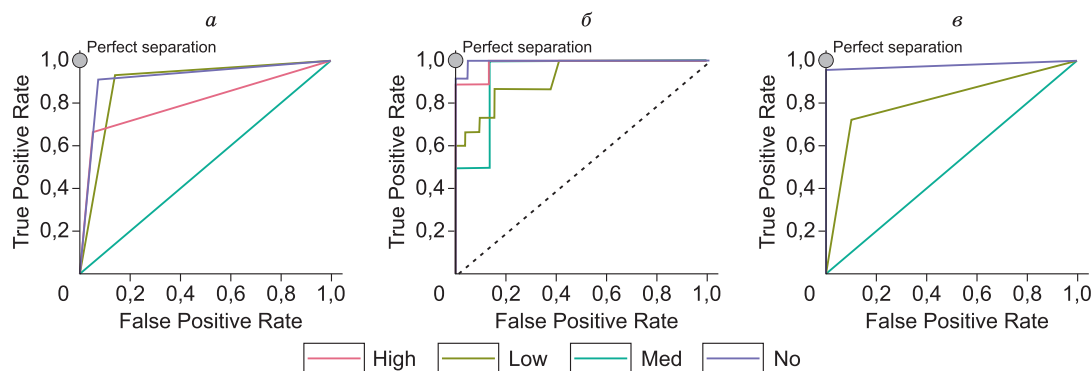


Рис. 5. ROC-кривая моделей: Support Vector Machine (а), Random Forest (б), Neural Network (в)

Fig. 5. ROC-curve of the models: Support Vector Machine (a), Random Forest (b), Neural Network (c)

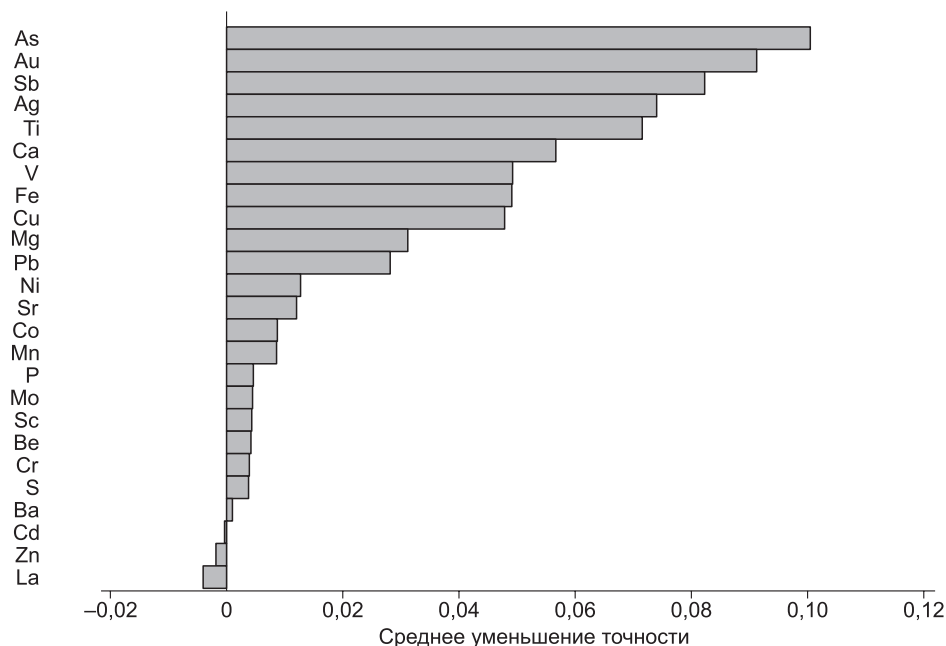


Рис. 6. График среднего уменьшения точности

Fig. 6. Plot of mean decrease in accuracy

и др. Достоинством МО является возможность актуализации модели, внесения изменений в свои алгоритмы в процессе получения первичной геологической информации. Свойство обучаемости позволяет прогнозируемым данным максимально соответствовать всей базе данных геологической информации, накопленной в процессе проведения геологоразведочных работ. При корректной обработке первичной информации и интерпретации получаемых результатов представляется возможным прогнозировать объекты-эталоны даже по небольшому количеству отобранных проб ($n < 100$).

Список литературы / References

1. Lindi O.T., Aladejare A.E., Ozoji T.M., et al. Uncertainty quantification in mineral resource estimation. *Natural Resources Research*. 2024;33:2503–2526. <https://doi.org/10.1007/s11053-024-10394-6>
2. Daya Sagar B.S., Cheng Q., Agterberg F. *Handbook of Geosciences*. Springer Cham; 2018. 366 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-78999-6>
3. Mahboob M.A., Celik T., Genc B. Review of machine learning-based mineral resource estimation. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2022;122(11):665–664. <https://dx.doi.org/10.17159/2411-9717/1250/2022>
4. Kanevski M., Foresti L., Kaiser C., et al. *Machine learning models for geospatial data. Handbook of theoretical and quantitative geography*. Lausanne: University of Lausanne; 2009, pp. 175–227.

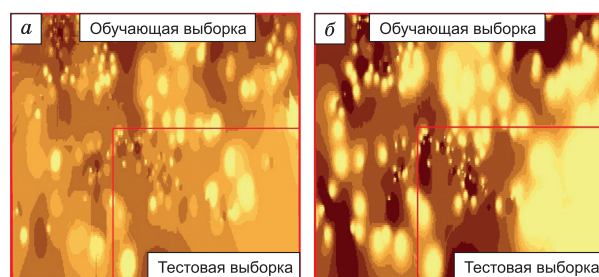


Рис. 7. Схемы настоящих «рудных» аномальных значений (а) и карта прогнозируемых аномальных значений (б) Верхнеамгинского щелочного массива Алдано-Станового щита. Положение рисунка 7 смотри рисунок 1.

Fig. 7. Maps of real “ore” anomalous values (a) and a map of predicted anomalous values (b) of the Verkhneamginsky alkaline massif of the Aldan-Stanovoy shield. Position of figure 7 see figure 1.

5. Han J., Kamber M., Pei J. *Data Mining: Concepts and Techniques*. Amsterdam: Elsevier; 2011. 432 p.
6. Akpan U.I., Starkey A. Review of classification algorithms with changing inter-class distances. *Machine Learning with Applications*. 2021;4:100031. <https://doi.org/10.1016/j.mlwa.2021.100031>
7. Прокопьев И.Р., Дорошкевич А.Г., Редина А.А. и др. Петрография щелочных пород, минералогия и условия образования рудной минерализации Верхнеамгинского золоторудного района (Алданский щит, Южная Якутия). В кн.: Эрнст Р.Э. (ред.) *Петрология магматических и метаморфических комплексов: материалы IX Всероссийской конференции с международным*

участием. Выпуск 9, г. Томск, 28 ноября – 2 декабря 2017 года. Томск: Изд-во ЦНТИ; 2017. С. 360–366.

Prokopyev I.R., Doroshkevich A.G., Redina A.A., et al. Petrography of alkaline rocks, mineralogy and conditions of formation of ore mineralization of the Verkhneamginsky gold ore region (Aldan shield, Southern Yakutia). In: Ernst R.E. (ed.) *Petrology of igneous and metamorphic complexes: Proceedings of the 9th All-Russian Conference with International Participation. Issue 9, Tomsk, November 28 – December 2, 2017*. Tomsk: Izd-vo TsNTI; 2017, pp. 360–366. (In Russ.)

8. Анисимова Г.С., Кондратьева Л.А., Соколов Е.П. и др. Золотое оруденение лебединского и куранахского типов в Верхнеамгинском районе (Южная Якутия). *Отечественная геология*. 2018;(5):3–13. <https://doi.org/10.24411/0869-7175-2018-10010>

Anisimova G.S., Kondratyeva L.A., Sokolov E.P., et al. Gold mineralization of the Lebedinsky and Kuranakh types in the Verkhneamginsky region (Southern Yakutia). *Otechestvennaya Geologiya = [Domestic geology]*. 2018;(5):3–13. (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/0869-7175-2018-10010>

9. Wang Q. Reservoir permeability prediction based on machine learning. *International Journal of Natural Resources and Environmental Studies*. 2024;3(1):129–138. <https://doi.org/10.62051/ijnres.v3n1.17>

10. Смелов А.П., Зедгенизов А.Н., Тимофеев В.Ф. Фундамент Северо-Азиатского кратона. Алдано-Становой щит. В кн.: *Тектоника, геодинамика и металлогения Республики Саха (Якутия)*. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика»; 2001. С. 81–100.

Smelov A.P., Zedgenizov A.N., Timofeev V.F. Foundation of the North Asian Craton. Aldano-Stanovoy shield. In: *Tectonics, Geodynamics and Metallogeny of the Republic of Sakha (Yakutia)*. Moscow: MAIK “Nauka/Interperiodica”; 2001, pp. 81–100. (In Russ.)

11. Парфенов Л.М., Кузьмин М.И. *Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия)*. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика»; 2001. 571 с.

Parfenov L.M., Kuzmin M.I. *Tectonics, Geodynamics and Metallogeny of the Republic Sakha (Yakutia)*. Moscow: MAIK “Nauka/Interperiodica”; 2001. 571 p. (In Russ.)

12. Соколов Е.П. Рудное золото Верхнеамгинского золотоносного района. В кн.: Биллер А.Я. (ред.) *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: материалы всероссийской научно-практической конференции, г. Якутск, 31 марта – 2 апреля 2015 г.* Якутск: Издательский дом СВФУ; 2015. С. 458–462.

Sokolov E.P. Ore gold of the Verkhneamginsky gold-bearing region. In: Biller A.Ya. (ed.) *Geology and mineral resources of the northeast of Russia: materials of the All-Russian scientific and practical conference, Yakutsk, March 31 – April 2, 2015*. Yakutsk: NEFU Publishing House; 2015, pp. 458–462. (In Russ.)

13. Жумадилова Д.В., Прокопьев И.Р., Дорошкевич А.Г. и др. Золотоносность Верхнеамгинского рудного района (Алданский щит, Якутия). В кн. *Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов*. М.: ФГБУ «ЦНИГРИ»; 2019. С. 25–28.

Zhumadilova D.V., Prokopyev I.R., Doroshkevich A.G., et al. Gold-bearing capacity of the Verkhneamginsky ore region (Aldan shield, Yakutia). In: *Scientific and methodological foundations for forecasting, prospecting, and evaluating deposits of diamonds, precious and non-ferrous metals*. Moscow: Central Research Institute of Geology of Non-Ferrous Metals; 2019, pp. 25–28. (In Russ.)

14. Пономарчук А.В., Прокопьев И.Р., Дорошкевич А.Г., и др. $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$ возраст щелочных пород Верхнеамгинского массива (Алданский щит, Южная Якутия). *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг ресурсов*. 2019;330(3):28–39.

Ponomarchuk A.V., Prokopyev I.R., Doroshkevich A.G., et al. $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$ age of alkaline rocks of the Verkhneamginsky massif (Aldan shield, South Yakutia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2019;330(3):28–39. (In Russ.)

15. Никифорова З.С., Каженкина А.Г. Типоморфизм россыпного золота Хатырхайского рудно-россыпного узла (Верхнеамгинская площадь). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2018;23(2):39–48. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2018-24-2-39-48>

Nikiforova Z.S., Kazhenkina A.G. Typomorphism of placer gold of the Khatyrkhay ore-placer cluster (Upper-Amga area). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2018;23(2):39–48. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2018-24-2-39-48>

16. Шатова Н.В., Шатов В.В., Молчанов А.В. и др. Геохимия и петрография гидротермально измененных пород Рябинового рудного поля (Южная Якутия) как основа прогноза золото-медно-порфирового оруденения. *Региональная геология и металлогения*. 2020;(84):71–96.

Shatova N.V., Shatov V.V., Molchanov A.V., et al. Geochemistry and petrography of hydrothermally altered rocks of the Ryabinovoye ore field (South Yakutia) as a basis for prediction gold-copper-porphyry ore mineralization. *Regional Geology and Metallogeny*. 2020;(84):71–96. (In Russ.)

17. Дворник Г.П. Поисковые критерии и признаки золотого оруденения в калиевых щелочных массивах (на примере месторождений и рудопоявлений Алданского щита). *Литосфера*. 2017;17(6):118–135. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2017-6-118-135>

Dvornik G.P. Searching criterions and indications of gold mineralization in potash alkaline massifs (on example deposits and displays ore Aldanskiy Shield). *LITHOSPHERE (Russia)*. 2017;17(6):118–135. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2017-6-118-135>

18. Barnes H.L. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. New York: Wiley & Sons. 1979. 798 p.

19. Dwarampudi T.M., Alugolu A. Review of machine learning classification algorithms. *International Journal of Progressive Research in Engineering Management and Science (IJPREMS)*. 2024;4(11):1104–1106 <https://www.doi.org/10.58257/IJPREMS36877>

Об авторах

ЧУДИНОВ Павел Леонидович, старший геолог, <https://orcid.org/0009-0003-3951-8413>, e-mail: Paulenotov@gmail.com
ФРИДОВСКИЙ Валерий Юрьевич, член-корреспондент РАН, доктор геолого-минералогических наук, директор, <https://orcid.org/0000-0002-4994-2141>, Scopus Author ID: 6505824025, SPIN: 3383-0398, e-mail: fridovsky@diamond.ysn.ru

Вклад авторов

Чудинов П.Л. – разработка концепции, верификация данных, проведение статистического анализа, проведение исследования, ресурсное обеспечение исследования, администрирование данных, создание черновика рукописи, визуализация и представление данных; **Фридовский В.Ю.** – верификация данных, администрирование данных, редактирование рукописи, визуализация данных, руководство исследованием и администрирование проекта

Конфликт интересов

Один из авторов – член-корреспондент РАН, доктор геолого-минералогических наук Фридовский Валерий Юрьевич является заместителем главного редактора журнала «Природные ресурсы Арктики и Субарктики». Авторам неизвестно о каком-либо другом потенциальном конфликте интересов, связанном с этой рукописью.

About the authors

CHUDINOV, Pavel Leonidovich, Senior Geologist, <https://orcid.org/0009-0003-3951-8413>, e-mail: Paulenotov@gmail.com
FRIDOVSKY, Valery Yurievich, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Director, <https://orcid.org/0000-0002-4994-2141>, Scopus Author ID: 6505824025, SPIN: 3383-0398, e-mail: fridovsky@diamond.ysn.ru

Authors' contribution

Chudinov P.L. – conceptualization, validation, formal analysis, investigation, resources, data curation, writing – original draft, visualization; **Fridovsky V.Yu.** – validation, data curation, writing – review & editing, visualization, supervision, project administration

Conflict of interest

One of the authors – Valery Yu. Fridovsky, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), is the Deputy Editor-in-Chief for the journal “Arctic and Subarctic Natural Resources”. The authors are not aware of any other potential conflict of interest relating to this article.

Поступила в редакцию / Submitted 11.05.2025

Поступила после рецензирования / Revised 22.05.2025

Принята к публикации / Accepted 28.05.2025

Инженерная геология, горное дело

УДК 622.023.25:539.32

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-220-230>



Оригинальная статья

Влияние условий водонасыщения на прочность карбонатных пород при сжатии

С. В. Сукнёв

*Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация
suknyov@igds.ysn.ru*

Аннотация

Изучение влияния воды на механические свойства горных пород необходимо для практики их разработки, в частности, при добыче полезных ископаемых, сооружении плотин, прокладывании туннелей, захоронении отходов. Присутствие воды в поровом пространстве материала наряду с наличием самих пор, трещин, каверн оказывает существенное влияние на механические свойства материала. Представлены результаты экспериментального исследования влияния условий водонасыщения на прочность при сжатии образцов доломита и известняка, представляющих вмещающие породы на месторождениях алмазов трубки «Ботубобинская» и трубки «Дальняя». В соответствии с разработанной методикой исследования осуществлен выбор режимов водонасыщения и проведены механические испытания образцов, насыщенных до определенного уровня и затем выдержанных в течение различного времени. По результатам трех серий испытаний построены зависимости прочности доломита при сжатии от времени выдержки и установлено существенное влияние времени выдержки на прочность материала, которое может приводить как к снижению, так и к увеличению прочности. Высказана гипотеза о том, что такое поведение материала связано с неравномерным распределением влаги и образованием «сухого» ядра в образце. Показано, что в рамках модели «сухого» ядра в материале могут быть реализованы различные сценарии разрушения, и это отразится на характере зависимости прочности образца от времени выдержки во влажном состоянии, включая ее немонокотное поведение. Полученные результаты имеют не только фундаментальное значение для понимания и соответствующего описания механизмов воздействия воды на породу, но также и практическое значение для оценки устойчивости и длительной прочности обводненных горных выработок.

Ключевые слова: известняк, доломит, условия насыщения, содержание воды, одноосное сжатие, прочность

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ИГДС СО РАН «Исследование поведения геоматериалов при воздействии знакопеременных температурных полей, особенностей теплофизических, аэрогазодинамических и геомеханических процессов в горных выработках и массивах пород при разработке месторождений твердых полезных ископаемых криолитозоны» (проект № FWRS-2021-0021) с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Для цитирования: Сукнёв С.В. Влияние условий водонасыщения на прочность карбонатных пород при сжатии. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(2):220–230. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-220-230>

Original article

Influence of water saturation conditions on the compressive strength of carbonate rocks

Sergey V. Suknev

*Chersky Mining Institute of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia
suknyov@igds.ysn.ru*

Abstract

The investigation into the influence of water on the mechanical properties of rocks is essential for their effective application in various fields, particularly in mining, dam construction, tunneling, and waste management. The presence of water within the pore spaces of geological materials, along with the existence of pores, cracks, and voids, plays

a significant role in determining their mechanical characteristics. This study presents the results of an experimental investigation into the effects of water saturation conditions on the compressive strength of dolomite and limestone specimens, which are recognized as host rocks in the diamond deposits found in the Botuobinskaya and Dalnaya tubes. Following established research methodologies, specific water saturation regimes were selected, and mechanical tests were conducted on specimens that were saturated to predetermined levels and subsequently maintained for varying durations. The results from the three series of tests revealed the dependence of the compressive strength of dolomite on the duration of holding time. A significant effect of holding time on the material's strength was observed, indicating that it can lead to both a decrease and an increase in strength. This phenomenon is hypothesized to be associated with a non-homogeneous distribution of water and the development of a "dry" core within the specimen. The analysis indicates that, within the framework of the "dry" core model, various fracture scenarios may develop within the material. These scenarios will affect the nature of the dependence of the specimen's strength on holding time in a wet condition, including its non-monotonic behavior. The findings are not only fundamentally important for advancing the understanding and accurate description of the mechanisms of water interaction with rock but also have practical implications for assessing the stability and long-term durability of flooded mine workings.

Keywords: limestone, dolomite, saturation conditions, water content, uniaxial compression, strength

Funding. This study was conducted within the framework of the state assignment for the Chersky Mining Institute of the North SB RAS, titled "An examination of the response of geomaterials to alternating temperature fields, thermophysical, aerogasdynamic, and geomechanical processes in mining operations and rock formations during the extraction of solid mineral deposits in the Cryolithozone." This project (No. FWRS-2021-00210) used the scientific equipment available at the Core Shared Research Facilities of the Federal Research Centre "The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences."

For citation: Suknev S.V. Influence of water saturation conditions on the compressive strength of carbonate rocks. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(2):220–230. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-220-230>

Введение

Присутствие воды в поровом пространстве материала наряду с наличием самих пор, трещин, каверн оказывает существенное влияние на механические свойства материала. Это относится и к горным породам [1–3]. Изучение влияния воды на механические свойства горных пород необходимо для практики их разработки, в частности, при добыче полезных ископаемых, сооружении плотин, прокладывании туннелей, захоронении отходов [4–6]. Объектом исследований являются породы различного типа и происхождения. Наиболее изучены песчаники [7–10], глинистые породы (глинистые сланцы, аргиллиты, глинистые песчаники) [11–16]. В меньшей степени исследованы карбонатные породы (известняки, доломиты) [9, 17, 18].

Присутствие влаги, как правило, приводит к снижению предела прочности и уменьшению модуля упругости, т. е. к ослаблению горной породы. Так, снижение прочности горных пород в водонасыщенном состоянии, по разным данным, составляет от 2 до 90 % [19]. Большой разброс данных связан, прежде всего, с большим разнообразием горных пород. Такое действие влаги на механические свойства горных пород получило в англоязычной научной литературе название «water-weakening effect». Хотя единых, стандартных методов оценки «water-weakening

effect» не существует, тем не менее, если попытаться обобщить результаты многочисленных экспериментальных исследований, то можно сделать следующие выводы относительно общих закономерностей поведения горных пород во влажном состоянии [20]:

1. Прочностные и деформационные свойства горных пород однозначно определяются количеством содержащейся в них воды (при зафиксированных всех прочих параметрах). То есть прочность и деформируемость образца горной породы зависят в числе прочего от количества содержащейся воды и не зависят от распределения воды по образцу, а также от способа, которым заданная влажность была достигнута.

2. Значения пределов прочности и модулей упругости горной породы монотонно убывают с увеличением содержания воды.

В последнее время появились работы [20–25], в которых представлены результаты, выходящие за рамки сформулированных выше представлений об общих закономерностях влияния воды на механические свойства горных пород. Главный вопрос состоит в том, действительно ли прочностные и деформационные свойства горных пород являются однозначной функцией количества воды, содержащейся в них, и не зависят, к примеру, от распределения воды в породе или времени выдержки в воде? Как отмечалось в ра-

боте [20], такая постановка вопроса вполне закономерна, поскольку речь идет о деградации механических свойств, которая во многих случаях является необратимым процессом, а это входит в противоречие с постулатом об однозначности.

Настоящее исследование продолжает цикл работ, направленных на установление закономерностей изменения физико-механических свойств карбонатных пород при неравномерном распределении влаги, т. е. в нестационарном состоянии, когда свойства породы претерпевают изменения в процессе перераспределения влаги в поровом пространстве материала. Ранее [23, 25] было обнаружено нетипичное, отличающееся от общепринятых представлений поведение упругих свойств известняка в процессе высыхания образца после его полного водонасыщения, т. е. в процессе перехода образца из водонасыщенного в воздушно-сухое состояние. В работе [20] исследованы упругие свойства образцов доломита и известняка в условиях частичного водонасыщения. Проведены три цикла испытаний предварительно насыщенных образцов в процессе их естественного высыхания в комнатных условиях. На основе анализа полученных экспериментальных данных установлены закономерности изменения модуля упругости исследованных материалов в зависимости от содержания воды при различных режимах предварительного насыщения и сделан вывод о том, что сложившиеся представления об общих закономерностях влияния воды на физико-механические свойства горных пород справедливы только для стационарного состояния и нарушаются в нестационарном, когда влага неравномерно распределена в поровом пространстве материала.

Влияние неравномерности распределения воды на физико-механические свойства горных пород исследовалось также в работах [21, 22, 24]. Обнаружено, что характер и степень влияния распределения воды на прочностные и деформационные свойства различны для разных видов пород. К примеру, в работе [22] приведены результаты испытаний на одноосное сжатие частично насыщенных образцов черного песчаника, один из которых испытывали сразу после насыщения, а второй после насыщения гидроизолировали и выдерживали перед испытанием в течение 2 суток. Тогда образцы имели одинаковое содержание воды, но в первом случае вода была сосредоточена во внешней области образца, а во втором – равномерно распределена по образцу.

Прочность и модуль упругости второго образца оказались на 10 % меньше, чем первого. Из этого наблюдения автор сделал вывод, что различное распределение воды в породе приводит к различным механическим свойствам. Это отличается от предположений традиционных исследований, которые рассматривают механическое поведение как функцию только содержания воды и пренебрегают распределением воды, продолжительностью замачивания в воде и другими условиями. Поэтому традиционные исследования, которые фокусируются только на установлении взаимосвязи между механическими свойствами и содержанием воды в породе, не дают полного понимания влияния воды на механическое поведение породы. Вывод сделан на основании сопоставления диаграмм деформирования, полученных при испытании всего двух образцов, и вряд ли может считаться достаточно обоснованным. Тем не менее, к аналогичным выводам приходят и авторы работ, упомянутых выше. Таким образом, представленные в работах [20–25] результаты свидетельствуют о том, что влияние воды на механические свойства горных пород в условиях неравномерного распределения влаги имеет существенные особенности и требует дальнейшего изучения.

В настоящем исследовании была поставлена задача установить закономерности изменения прочности при сжатии образцов карбонатных пород при различных условиях и уровнях водонасыщения.

Методика эксперимента и предварительные испытания

Для отладки технологии подготовки образцов и методики проведения исследования предварительно были проведены испытания образцов известняка из керновых проб, извлеченных из геомеханической скважины ГМС-1 в окрестности трубки «Ботуобинская». Цилиндрические образцы были изготовлены из кусков керна 38/5 (интервал отбора 372–374 м) и 18/3 (интервал отбора 167–170 м).

Известняк 38/5. Было испытано шесть образцов. Все образцы насыщали в течение 1 ч путем полного погружения в ванну с водой. Перед насыщением образцы высушивали на воздухе. После насыщения три образца испытывали сразу, остальные образцы гидроизолировали и до испытания выдерживали в течение 1 суток в эксикаторе. Испытания проводили на испытатель-

Результаты испытаний известняка 38/5

Table 1

Test results for limestone 38/5

Номер образца	Высота образца, мм	Диаметр образца, мм	Содержание воды, %	Разрушающая нагрузка, МПа	Примечание
38/5-9	36,9	35,1	0,33	56,0	
38/5-19	34,0	35,1	0,14	100,0	
38/5-21	24,0	35,1	0,25	87,6	
38/5-10	36,8	35,1	0,20	68,0	Выдержанный
38/5-20	34,0	35,1	0,26	58,2	Выдержанный
38/5-22	22,0	35,1	0,43	70,3	Выдержанный

ной машине UTS 250 со скоростью нагружения 2 МПа/с. Результаты испытаний приведены в табл. 1.

Содержание воды в образце после насыщения рассчитывали исходя из массы образца до насыщения, т. е. речь идет о содержании избыточной относительно воздушно-сухого состояния воды в образце.

Усредненное по трем образцам значение прочности известняка 38/5 после насыщения составило 81,2 МПа, а после насыщения и выдержки – 65,5 МПа, т. е. на 19 % ниже, что подтверждает вывод, сделанный в работе [22]. Следует, однако, обратить внимание на то, что содержание воды в образцах после насыщения имеет большой разброс, хотя все образцы были изготовлены из одного небольшого куска керна. Это свидетельствует о достаточно сильной структурной неоднородности материала, что проявляется также в большом разбросе прочностных свойств, как это видно из табл. 1. Высокое значение прочности образца 38/5-19, содержащего значительно меньшее количество воды по сравнению с остальными образцами, вероятнее всего, обусловлено очень низкой пористостью, и этот эффект является преобладающим. Поэтому сравнение влияния количества воды (времени насыщения) или времени выдержки необходимо производить на образцах, имеющих, как минимум, сопоставимые значения общей пористости. В противном случае такое сопоставление нельзя признать корректным, и статистика (т. е. большое количество испытанных образцов) здесь не поможет. Если исключить образец 38/5-19 из рассмотрения, значение прочности известняка 38/5 после насыщения уменьшится до 71,8 МПа, а снижение прочности после выдержки соответственно уменьшится до 10 %, но при этом разброс свойств по образцам

все равно превысит 20 %! В этих условиях делать однозначные выводы о характере влияния времени выдержки образца, а значит, и о характере влияния распределения воды в образце на его прочностные свойства было бы преждевременным.

Известняк 18/3. Было испытано восемь образцов. Все образцы насыщали в течение 24 ч путем частичного погружения в ванну с водой с последующим (через 7 ч) доливом воды до полного погружения образцов. Перед насыщением образцы высушивали на воздухе. После насыщения четыре образца испытали сразу, остальные образцы гидроизолировали и до испытания выдерживали в течение 7 суток в эксикаторе. Испытания проводили на испытательной машине UTS 250 со скоростью нагружения 2 МПа/с. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Усредненное по четырем образцам значение прочности известняка 18/3 после насыщения составило 39,95 МПа, а после насыщения и выдержки – 38,7 МПа, т. е. на 3 % ниже. Это отличие незначительно по сравнению с разбросом свойств по образцам, поэтому говорить о влиянии времени выдержки образца на изменение предела прочности в данном случае не приходится. Но здесь противоречия с результатом работы [22] как раз нет. Дело в том, что, как было отмечено выше, вывод, сделанный в работе [22], состоит в том, что различное распределение воды в породе приводит к различным механическим свойствам. В данном эксперименте образцы насыщались достаточно длительное время, и можно было говорить о достижении стационарного водонасыщенного состояния (рис. 1, 2). Поскольку предполагается, что в стационарном состоянии вода равномерно распределена по образцу, дополнительная выдержка образца уже не изменяет

Результаты испытаний известняка 18/3

Table 2

Test results for limestone 18/3

Номер образца	Высота образца, мм	Диаметр образца, мм	Содержание воды, %	Разрушающая нагрузка, МПа	Примечание
18/3-8	38,0	35,1	3,96	52,5	
18/3-9	37,0	35,1	6,68	19,3	
18/3-19	35,7	35,1	7,32	39,4	
18/3-20	23,6	35,1	5,85	48,6	
18/3-28	36,4	35,1	4,72	31,2	Выдержанный
18/3-29	36,9	35,1	6,97	29,2	Выдержанный
18/3-39	36,5	35,1	6,64	64,6	Выдержанный
18/3-40	24,0	35,1	7,07	29,8	Выдержанный

распределение воды в образце и, соответственно, не приводит к изменению его механических свойств.

Основная программа испытаний

Исследования были проведены на образцах доломита из керновых проб, извлеченных из скважины № 120 на месторождении алмазов трубки «Дальняя». Цилиндрические образцы были изготовлены из куска керна 9/1 (интервал отбора 43,0–43,6 м).

Керн разрезался на диски, из которых выбуривались цилиндрические образцы диаметром 35 мм. Из двух дисков было изготовлено по четыре образца, и еще из одного диска было изготовлено два образца. Образцы, изготовленные из одного диска, составляли одну серию, которой

присваивался номер диска. Шлифование торцов образцов производилось на торцевальном станке. Высота образцов выдерживалась в диапазоне 34,8–35,6 мм.

Режимы водонасыщения для каждого образца приведены в табл. 3.

На рис. 3–5 представлены диаграммы насыщения образцов, изготовленных из дисков 1, 2 и 3 соответственно.

Испытания проводили на испытательной машине UTS 250 со скоростью нагружения 2 МПа/с. Результаты испытаний приведены в табл. 4.

Исследование влияния времени выдержки образца в водонасыщенном состоянии на прочность при сжатии проводили на образцах, изготовленных из дисков 1 и 3. Для каждой серии испытаний отбирали по три образца, имеющих

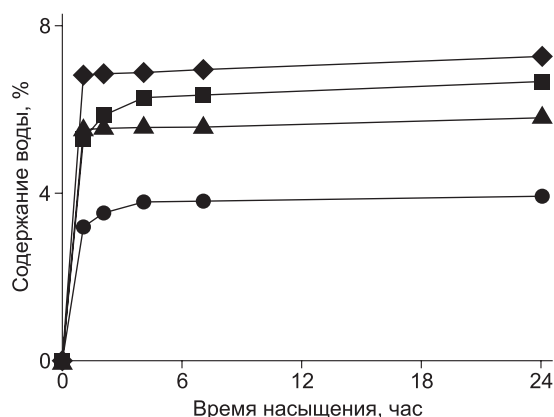


Рис. 1. Диаграммы водонасыщения образцов 18/3-8, 18/3-9, 18/3-19 и 18/3-20

Fig. 1. Diagrams of water saturation of specimens 18/3-8, 18/3-9, 18/3-19, and 18/3-20

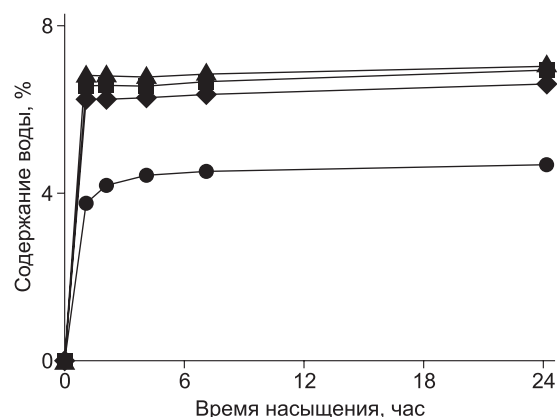


Рис. 2. Диаграммы водонасыщения образцов 18/3-28, 18/3-29, 18/3-39 и 18/3-40

Fig. 2. Diagrams of water saturation of specimens 18/3-28, 18/3-29, 18/3-39, and 18/3-40

Таблица 3

Режимы водонасыщения

Table 3

Water saturation regimes

Образец	Режим водонасыщения
9/1_1-17	Замачивание в течение 4 часов + выдержка в течение 3 суток
9/1_1-18	Замачивание в течение 4 часов + выдержка в течение 6 суток
9/1_1-19	Замачивание в течение 4 часов + выдержка в течение 1 суток
9/1_1-20	Замачивание в течение 4 часов
9/1_2-21	Замачивание в течение 4 часов + выдержка в течение 7 суток
9/1_2-22	Замачивание в течение 4 часов
9/1_3-23	Замачивание в течение 7 часов + выдержка в течение 1 суток
9/1_3-24	Замачивание в течение 7 часов + выдержка в течение 3 суток
9/1_3-25	Замачивание в течение 7 часов + выдержка в течение 6 суток
9/1_3-26	Замачивание в течение 7 часов

наиболее близкие между собой содержания воды после насыщения. Образцы после насыщения гидроизолировали и помещали в эксикатор. Перед испытанием один образец выдерживали в эксикаторе в течение 1 суток, второй – в течение 3 суток, третий – в течение 6 суток. Еще по одному образцу было испытано непосредственно после насыщения. На рис. 6 представлены зависимости прочности при сжатии от времени выдержки.

Обсуждение результатов испытаний

Так же как в испытаниях известняка 18/3, все образцы доломита 9/1 предварительно насыщались до достижения стационарного водонасыщенного состояния (см. рис. 3–5). Поэтому, как было отмечено выше, дополнительная выдержка образ-

ца уже не изменяет распределение воды в образце и, соответственно, не приводит к изменению его механических свойств. Отсюда логически следует, что в данном случае свойства не должны зависеть от времени выдержки образца. Действительно, среднее значение прочности доломита 9/1 после насыщения составило 104,6 МПа, а после насыщения и выдержки (по всем образцам) – 90,0 МПа, что на 14 % ниже, но при этом разброс значений прочности после насыщения превысил 20 %. То есть эффект от выдержки образцов лежит в полосе разброса свойств. Кроме этого, следует обратить внимание на образец 9/1_1-20, который показал наиболее высокую прочность при наименьшем содержании воды (см. рис. 3). Если исключить образец 9/1_1-20

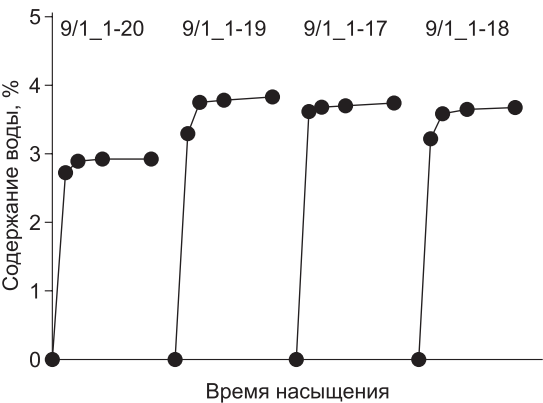


Рис. 3. Диаграммы водонасыщения образцов 9/1_1-20, 9/1_1-19, 9/1_1-17 и 9/1_1-18

Fig. 3. Diagrams of water saturation of specimens 9/1_1-20, 9/1_1-19, 9/1_1-17, and 9/1_1-18

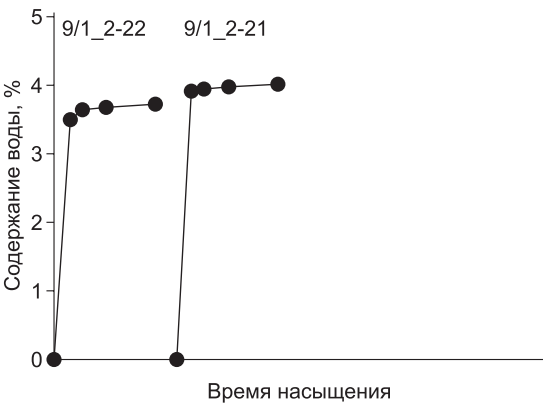


Рис. 4. Диаграммы водонасыщения образцов 9/1_2-22, 9/1_2-21

Fig. 4. Diagrams of water saturation of specimens 9/1_2-22, and 9/1_2-21

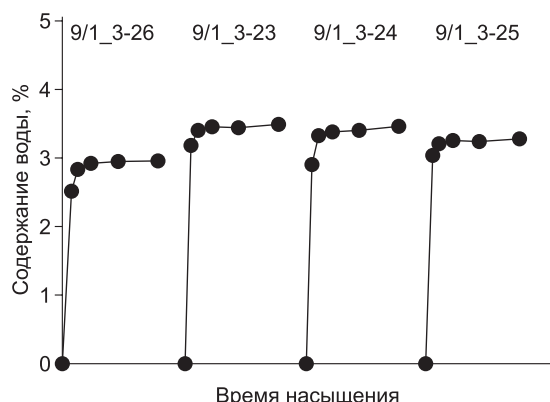


Рис. 5. Диаграммы водонасыщения образцов 9/1_3-26, 9/1_3-23, 9/1_3-24 и 9/1_3-25

Fig. 5. Diagrams of water saturation of specimens 9/1_3-26, 9/1_3-23, 9/1_3-24, and 9/1_3-25

из рассмотрения, значение прочности доломита 9/1 после насыщения составит всего 89,9 МПа. Это значение практически совпадает со значением прочности выдержанных образцов.

Но здесь необходимо сделать два важных замечания. Во-первых, говорить о достижении стационарного состояния, не вполне корректно. Образец продолжает медленно впитывать воду, поэтому правильно говорить о существенном снижении скорости насыщения, но не о полном насыщении, когда водой заполнено все поровое пространство. Здесь можно сослаться на данные работы [22]. Для пяти образцов, предварительно высушенных в печи в течение 24 ч при температуре 110 °С, были построены диаграммы водонасыщения, при этом полное время насыщения

составило 240 ч. Уже после 48 ч замачивания содержание воды стабилизировалось на уровне 1,6 %, что значительно ниже пористости образцов, которая была оценена на уровне 4,7 % (пористость рассчитывали с использованием значения истинной плотности породы, определенного пикнометрическим методом). То есть даже при длительном насыщении значительный объем порового пространства образца (около 15 %) остается не заполненным водой. То, что снижение скорости водонасыщения не всегда является надежным свидетельством достижения стационарного состояния, подразумевающего равномерное распределение воды в образце, отмечалось также в работе [21].

Второе, на что следует обратить внимание, это структура порового пространства материала, которая весьма сложна и неоднородна и представляет собой совокупность пор и каналов различных размера и формы. Скорость миграции влаги и заполнения водой крупных и мелких пор существенно различается, поэтому даже при равномерном распределении воды в образце процесс перераспределения влаги из крупных пор в мелкие поры продолжается еще длительное время. При этом увеличивается совокупная площадь контакта скелета породы с водой, а поскольку взаимодействие породы с водой осуществляется через поверхность пор, это приводит к изменению свойств породы. Другими словами, если поровое пространство заполнено водой не полностью, то даже в стационарном состоянии, при сохранении в образце определенного содержания воды, его свойства со временем могут изменяться.

Таблица 4

Результаты испытаний доломита 9/1

Table 4

Test results for dolomite 9/1

Номер образца	Высота образца, мм	Диаметр образца, мм	Содержание воды, %	Разрушающая нагрузка, МПа	Примечание
9/1_1-17	35,4	35,0	3,75	88,3	Выдержанный 3 сут
9/1_1-18	35,6	35,0	3,68	72,1	Выдержанный 6 сут
9/1_1-19	35,0	35,0	3,84	99,9	Выдержанный 1 сут
9/1_1-20	34,8	35,0	2,94	134,0	
9/1_2-21	35,3	35,0	4,03	106,7	Выдержанный 7 сут
9/1_2-22	35,2	35,0	3,74	82,2	
9/1_3-23	35,0	35,0	3,52	89,5	Выдержанный 1 сут
9/1_3-24	35,4	35,0	3,48	104,8	Выдержанный 3 сут
9/1_3-25	35,4	35,0	3,31	68,6	Выдержанный 6 сут
9/1_3-26	35,3	35,0	2,99	97,5	

Из сказанного следует, что вопрос о влиянии времени выдержки при определенном уровне водонасыщения на изменение механических свойств горной породы требует более тщательного рассмотрения.

Если рассмотреть зависимости прочности при сжатии от времени выдержки отдельно по трем сериям испытаний, то обнаружится гораздо более сложная картина. Как видно из рис. 6, изменение прочности доломита при сжатии в зависимости от времени выдержки в водонасыщенном состоянии продемонстрировало различный характер в трех проведенных сериях испытаний. Для серий испытаний 1 и 3 можно говорить о тенденции снижения прочности с увеличением времени выдержки, хотя в третьей серии испытаний эта зависимость имеет немонотонный характер. Во второй серии испытаний получен обратный результат: выдержанный в течение 7 суток образец показал более высокую прочность, чем образец, испытанный непосредственно после насыщения.

На этот счет можно высказать ряд гипотез, обоснованность которых может быть подтверждена результатами дополнительных физических экспериментов и соответствующего математического моделирования. Если справедливо предположение о том, что после окончания насыщения (замачивания) образца значительная часть пор остается незаполненными или заполненными водой частично и вода в образце распределена неравномерно (т. е. большая часть воды сосредоточена во внешних слоях образца), то это приведет к неравномерному изменению прочностных и деформационных свойств в объеме образца. Внешние слои образца будут более подвержены их деградации (снижению), чем внутренние области. Напряженно-деформированное состояние (НДС) такого неоднородного материала при нагружении будет также неоднородным. Какое именно неоднородное НДС возникнет в образце, зависит от условий нагружения и от степени деградации деформационных свойств материала, содержащего определенное количество влаги. По мере миграции влаги во внутренние области материала будут изменяться его свойства, и, соответственно, будет изменяться НДС образца при приложении такой же нагрузки. Чтобы оценить НДС, нужно знать закономерности изменения деформационных свойств в зависимости от содержания воды и закономерности миграции влаги в образце. А чтобы предсказать, какую нагрузку выдержит образец, нужно еще

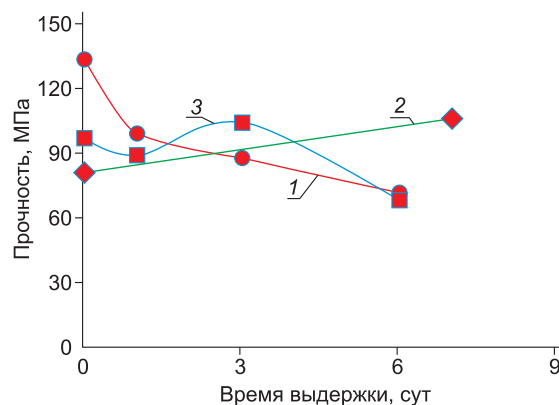


Рис. 6. Зависимости прочности доломита при сжатии от времени выдержки для серий испытаний 1–3

Fig. 6. The dependence of the compressive strength of dolomite on the holding time for test series 1–3

знать закономерности разрушения материала в неоднородном и неравнокомпонентном поле напряжений, а также закономерности изменения его прочностных свойств в зависимости от содержания воды. Таким образом, прочность образца при неравномерном распределении влаги зависит от многих факторов, и их результирующее влияние на величину предельной нагрузки может быть разным. Поэтому зависимость прочности от времени выдержки образца может носить различный, в том числе немонотонный характер.

Рассмотрим в качестве примера схему с образованием «сухого» ядра в центральной части образца. Возьмем цилиндрический образец, который насыщается водой с боковой поверхности, торцы образца гидроизолированы (т. е. для упрощения пренебрегаем краевыми эффектами). После насыщения образец устанавливается на испытательную машину. Нагружение образца осуществляется путем равномерно распределенного по площади торцевых граней смещения. Это типичная схема для испытаний, когда образец помещается между двумя нажимными плитами, жесткость которых намного превышает жесткость образца. В процессе насыщения влага быстро заполняет поры во внешних слоях образца и медленно мигрирует во внутренние области, таким образом, сердцевина образца значительное время остается сухой. Нагружение такого образца по схеме, описанной выше, приводит к неравномерному распределению напряжений в поперечном сечении. Поскольку во влажных слоях модуль упругости уменьшается, это приводит к уменьшению напряжений во внешних слоях и к увеличению напряжений в центральной части образца.

Разрушение образца может происходить как за счет высоких напряжений во внутренних слоях, так и за счет низкой прочности внешних слоев, поскольку помимо уменьшения модуля упругости во влажных слоях также происходит снижение предела прочности материала. Если уменьшение напряжений во внешних слоях происходит быстрее, чем снижается прочность материала, то тогда разрушение образца будет обусловлено потерей несущей способности внутренних слоев, образующих «сухое» ядро. По мере миграции влаги во внутренние слои материала размер «сухого» ядра будет уменьшаться, а с ним будет уменьшаться и предельная разрушающая нагрузка. Но если разрушение образца будет обусловлено потерей несущей способности внешних слоев, то картина поменяется на противоположную. По мере миграции влаги и уменьшения размера «сухого» ядра напряжения будут распределены все более неравномерно, концентрируясь в области «сухого» ядра и уменьшаясь во влажных слоях, что приведет к увеличению разрушающей нагрузки. В реальном материале сценарии разрушения могут меняться в процессе миграции влаги и приводить к немонотонному поведению разрушающей нагрузки со временем.

Заключение

Проведены экспериментальные исследования влияния условий водонасыщения на прочность при сжатии образцов доломита и известняка, представляющих вмещающие породы на месторождениях алмазов трубки «Ботуобинская» и трубки «Дальняя». На основе анализа результатов предварительных испытаний разработана методика подготовки образцов, осуществлен выбор режимов водонасыщения и проведены механические испытания образцов доломита, насыщенных до определенного уровня и затем выдержанных в течение различного времени. По результатам трех серий испытаний построены зависимости прочности доломита при сжатии от времени выдержки и установлено существенное влияние времени выдержки на прочность материала. Если для серий испытаний 1 и 3 можно говорить о тенденции снижения прочности с увеличением времени выдержки (хотя в третьей серии испытаний эта зависимость имеет немонотонный характер), то во второй серии испытаний получен обратный результат: выдержанный в течение 7 суток образец показал более высокую прочность, чем образец, испытанный непосредственно после насыщения.

Сделано предположение о том, что такое поведение материала связано с неравномерным распределением влаги в образце и ее миграцией не только в процессе насыщения, но и во время выдержки образца. После окончания насыщения (замачивания) образца значительная часть пор остается незаполненными или заполненными водой частично и большая часть воды сосредоточена во внешних слоях, что приводит к неравномерному изменению прочностных и деформационных свойств в объеме образца, и, как следствие, к неравномерному распределению напряжений во время испытания, а это оказывает влияние на величину предельной разрушающей нагрузки. По мере выдержки образца происходят миграция влаги, изменение свойств материала и, соответственно, изменение величины разрушающей нагрузки. Показано, что в рамках модели «сухого» ядра в материале могут быть реализованы различные сценарии разрушения, что отразится на характере зависимости прочности образца от времени выдержки в водонасыщенном состоянии, включая ее немонотонное поведение. Для обоснования высказанных гипотез необходимы дополнительные физические эксперименты на возможно большем количестве образцов и соответствующее математическое моделирование.

Список литературы / References

1. Erguler Z.A., Ulusay R. Water-induced variations in mechanical properties of clay-bearing rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2009;46(2):355–370. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.07.002>
2. Zhou Z., Cai X., Cao W., et al. Influence of water content on mechanical properties of rock in both saturation and drying processes. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2016;49(8):3009–3025. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-0987-z>
3. Wong L.N.Y., Maruvanchery V., Liu G. Water effects on rock strength and stiffness degradation. *Acta Geotechnica*. 2016;11(4):713–737. <https://doi.org/10.1007/s11440-015-0407-7>
4. Reviron N., Reuschlé T., Bernard J.-D. The brittle deformation regime of water-saturated siliceous sandstones. *Geophysical Journal International*. 2009;178(3):1766–1778. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04236.x>
5. Wasantha P.L.P., Ranjith P.G. Water-weakening behavior of Hawkesbury sandstone in brittle regime. *Engineering Geology*. 2014;178:91–101. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.05.015>
6. Pan Y., Wu G., Zhao Z., He L. Analysis of rock slope stability under rainfall conditions considering

- the water-induced weakening of rock. *Computers and Geotechnics*. 2020;128:103806. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103806>
7. Cai X., Zhou Z., Liu K., et al. Water-weakening effects on the mechanical behavior of different rock types: phenomena and mechanisms. *Applied Sciences*. 2019;9(20):4450. <https://doi.org/10.3390/app9204450>
8. Zhao K., Yang D., Zeng P., et al. Effect of water content on the failure pattern and acoustic emission characteristics of red sandstone. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2021;142:104709. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104709>
9. Маджид Я., Абу Бакар М.З. Влияние водонасыщенности на механические свойства осадочных пород Пакистана. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2018;(6):37–55. <https://doi.org/10.15372/FTPRI20180605>
- Majeed Y., Abu Bakar M.Z. Water saturation influences on engineering properties of selected sedimentary rocks of Pakistan. *Journal of Mining Science*. 2018;54(6):914–930. <https://doi.org/10.1134/S1062739118065060>
10. Li D., Sun Z., Zhu Q., Peng K. Triaxial loading and unloading tests on dry and saturated sandstone specimens. *Applied Sciences*. 2019;9(8):1689. <https://doi.org/10.3390/app9081689>
11. Lashkaripour G.R. Predicting mechanical properties of mudrock from index parameters. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2002;61(1):73–77. <https://doi.org/10.1007/s100640100116>
12. Hsu S.C., Nelson P.P. Characterization of Eagle Ford shale. *Engineering Geology*. 2002;67(1-2):169–183. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00151-5](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00151-5)
13. Erguler Z.A., Ulusay R. Water-induced variations in mechanical properties of clay-bearing rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2009;46(2):355–370. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.07.002>
14. Ferrari A., Minardi A., Ewy R., Laloui L. Gas shales testing in controlled partially saturated conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018;107:110–119. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.05.003>
15. Li Z., Liu S., Ren W., et al. Multiscale laboratory study and numerical analysis of water-weakening effect on shale. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2020;2020:5263431. <https://doi.org/10.1155/2020/5263431>
16. Huang S., He Y., Liu G., et al. Effect of water content on the mechanical properties and deformation characteristics of the clay-bearing red sandstone. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2021;80(2):1767–1790. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01994-6>
17. Vászrhelyi B. Statistical analysis of the influence of water content on the strength of the Miocene limestone. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2005;38(1):69–76. <https://doi.org/10.1007/s00603-004-0034-3>
18. Ciantia M.O., Castellanza R., Di Prisco C. Experimental study on the water-induced weakening of calcarenites. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2015;48(2):441–461. <https://doi.org/10.1007/s00603-014-0603-z>
19. Wong L.N.Y., Maruvanchery V., Liu G. Water effects on rock strength and stiffness degradation. *Acta Geotechnica*. 2016;11(4):713–737. <https://doi.org/10.1007/s11440-015-0407-7>
20. Сукнев С.В. Влияние условий водонасыщения на статические упругие свойства карбонатных пород. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2024;(1):15–25. <https://doi.org/10.15372/FTPRI20240102>
- Suknev S.V. Effects of regimes of water saturation on static elastic properties of carbonate rocks. *Journal of Mining Science*. 2024;60(1):12–21. <http://doi.org/10.1134/S1062739124010022>
21. Zhou Z., Cai X., Cao W., et al. Influence of water content on mechanical properties of rock in both saturation and drying processes. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2016;49(8):3009–3025. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-0987-z>
22. Tang S. The effects of water on the strength of black sandstone in a brittle regime. *Engineering Geology*. 2018;239:167–178. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.03.025>
23. Сукнев С.В. Влияние температуры и степени водонасыщения на изменение упругих свойств скальных пород при переходе из талого в мерзлое состояние. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2019;(2):14–22. <https://doi.org/10.15372/FTPRI20190202>
- Suknev S.V. Influence of temperature and water content on elastic properties of hard rocks in thaw/freeze state transition. *Journal of Mining Science*. 2019;55(2):185–193. <http://doi.org/10.1134/S1062739119025444>
24. Rabat Á., Tomás R., Cano M. Advances in the understanding of the role of degree of saturation and water distribution in mechanical behaviour of calcarenites using magnetic resonance imaging technique. *Construction and Building Materials*. 2021;303:124420. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124420>
25. Сукнёв С.В. Изменение упругих свойств частично насыщенного известняка в процессе высыхания. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(1):172–178. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-172-178>
- Suknev S.V. Change in the elastic properties of partially saturated limestone during drying conditions. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(1):172–178. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-172-178>

Об авторе

СУКНЁВ Сергей Викторович, доктор технических наук, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-0200-0429>, ResearcherID: S-7251-2016, Scopus Author ID: 6602361450, SPIN: 1998-3509, e-mail: suknyov@igds.ysn.ru

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

About the author

SUKNEV, Sergey Victorovich, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-0200-0429>, ResearcherID: S-7251-2016, Scopus Author ID: 6602361450, SPIN: 1998-3509, e-mail: suknyov@igds.ysn.ru

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 17.04.2025

Поступила после рецензирования / Revised 14.05.2025

Принята к публикации / Accepted 20.05.2025



Оригинальная статья

Энергоемкость разрушения карбонатных пород в нивальных условиях при различных уровнях засоленности

Е. В. Захаров✉

Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

✉zaharoff@igds.ysn.ru

Аннотация

Приведены результаты экспериментальных исследований по установлению влияния знакопеременного температурного воздействия на энергоемкость разрушения образцов доломита трубки «Интернациональная» и известняков карьера «Мохсоголлох» в нивальных условиях, при насыщении их растворами солей (NaCl) различных концентраций. Концентрация соли в растворе составляла от 0–20 %. Исследования выявили, что после пяти циклов замораживания-оттаивания в нивальной среде без содержания в растворе соли (0 %), энергозатраты на разрушение доломита трубки «Интернациональная» снижаются на 6 %. С увеличением концентрации соли в растворе энергоемкость разрушения образцов доломита повышается вплоть до первоначальных значений, соответствующих исходным показателям разрушения (без воздействия циклов). Энергоемкость разрушения образцов известняка карьера «Мохсоголлох» под действием пяти циклов замораживания-оттаивания в нивальных условиях максимально снижается на 15 %, при любом содержании соли в растворе. В отличие от доломита трубки «Интернациональная» влияние концентрации соли в растворе на энергоемкость разрушения образцов известняка карьера «Мохсоголлох» не выявлено. Установлено, что нивальные условия выветривания в меньшей степени воздействуют на образцы исследованных пород, чем аквальные.

Ключевые слова: энергоемкость разрушения, доломит, известняк, циклы замораживания-оттаивания, засоленность

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0382-2019-0002 «Исследование прочностных и физико-механических свойств геоматериалов и особенностей развития теплофизических и геомеханических процессов в горных выработках и массивах пород при разработке месторождений полезных ископаемых в условиях естественно низких температур»).

Для цитирования: Захаров Е.В. Энергоемкость разрушения карбонатных пород в нивальных условиях при различных уровнях засоленности. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(2):231–237. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-231-237>

Original article

The energy intensity of carbonate rock destruction under nival conditions at varying salinity levels

Evgeniy V. Zakharov✉

N.V. Chersky Mining Institute of the North,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

✉zaharoff@igds.ysn.ru

Abstract

This article presents the findings of experimental investigations conducted to assess the influence of alternating temperature variations on the energy consumption associated with the destruction of dolomite samples from the Internationalnaya pipe and limestone samples from the Mokhsogolloh quarry. The evaluations were carried out under nival conditions, involving exposure to varying concentrations of sodium chloride (NaCl) solutions, with salt concentra-

tions ranging from 0% to 20%. The findings reveal that after five freeze-thaw cycles in a nival environment, the energy required for the destruction of dolomite from the Internatsionalnaya pipe decreased by 6% in the absence of salt (0% concentration). However, as the concentration of salt in the solution increased, the energy necessary for the destruction of the dolomite samples escalated to levels comparable to those recorded prior to the freeze-thaw cycles. In contrast, the energy required for the degradation of limestone samples from the Mokhsogolloh quarry decreased by a maximum of 15% after five freeze-thaw cycles, regardless of the salt concentration present in the solution. Thus, unlike the dolomite from the Internatsionalnaya pipe, the influence of salt concentration on the energy intensity of limestone destruction from the Mokhsogolloh quarry was not observed. Furthermore, it was concluded that nival weathering conditions have a lesser effect on the examined rock samples compared to aquatic conditions.

Keywords: energy capacity of destruction, dolomite, limestone, freeze-thaw cycles, salinity

Funding. This study was conducted within the framework of the state assignment from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. 0382-2019-0002, entitled “The strength and physical-mechanical properties of geomaterials and the characteristics of thermophysical and geomechanical processes in mine workings and rock masses during the extraction of mineral deposits in naturally low temperature conditions”).

For citation: Zakharov E.V. The energy intensity of carbonate rock destruction under nival conditions at varying salinity levels. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(2):231–237. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-231-237>

Введение

Проведенные ранее исследования, выполненные в ИГДС СО РАН, показали возможность снижения в два раза и более энергозатрат на разрушение карбонатных пород алмазных месторождений Якутии под влиянием циклического замораживания-оттаивания [1]. Однако, данные результаты были получены для образцов горных пород, замораживаемых в водной среде (аквальные), а для воздушно-сухих образцов (аэральные), циклируемых в состоянии естественной влажности, снижение энергозатрат оказалось не столь значительным.

Для разрушения отдельных типов горных пород, находящихся в водонасыщенном состоянии, требуется меньше энергозатрат, что обусловлено снижением их прочностных показателей под влиянием влаги [2–8]. Так, в глинистых породах увлажнение приводит к формированию гидратных слоев вокруг частиц, ослабляя их сцепление. В скальных породах влага проникает в микротрещины и поры, что ведет к разупрочнению горной породы в целом. Это позволяет рассматривать воду как эффективное средство направленного изменения физико-механических характеристик пород. Аналогичный эффект может быть получен при использовании поверхностно-активных веществ, которые снижают энергию поверхностного натяжения за счет адсорбции на границах раздела фаз [9].

Анализ научных публикаций позволяет сделать вывод, что снижение прочности горных пород, основанное на использовании поверхностно-активных веществ, включая растворы солей и чистую воду, представляет собой эконо-

мически выгодный метод разупрочнения. Но в жестких, экстремальных условиях Севера наряду с химическими методами целесообразно использовать температурное воздействие, основанное на использовании естественного ресурса криолитозоны — атмосферного холода, доступного в неограниченном количестве. Наибольшая эффективность может быть достигнута при комбинировании ПАВ с циклическим температурным воздействием в аквальных или, как отмечают некоторые исследователи, в более агрессивных — нивальных условиях [10, 11].

Под нивальными условиями подразумевается криогенное выветривание, при котором породы подвергаются резким перепадам температур (от отрицательных к положительным, и обратно). Примером может служить периодическое проникновение воды в мерзлые массивы, вызывающее термический шок, с последующим повторным замерзанием оттаявшей породы.

Целью работы является определение закономерностей снижения энергозатрат на разрушение пород под влиянием циклического замораживания-оттаивания в нивальных условиях при различных уровнях засоленности среды.

Идея работы заключается в применении знакопеременных температурных воздействий в нивальных условиях на горные породы для снижения энергоемкости их разрушения.

Материалы и методы

Для испытания были выбраны два типа горных пород, значительно различающихся по показателям пористости: доломит тр. «Интернациональная» (АК «АЛРОСА») и известняк карьера «Мохсоголлох» (АО «Якутцемент»). В табл. 1

Основные физические свойства исследуемых пород

Table 1

Basic physical properties of the studied rocks

Порода	Влажность (начальная), %	Плотность истинная, кг/м ³	Объемный вес, кг/м ³	Пористость, %
Доломит тр. «Интернациональная»	1	2831	2430	14,2
Известняк к. «Мохсоголлох»	0,3	2728	2702	1

приведены основные физические свойства исследуемых образцов [12].

Образцы исходных горных пород измельчали до крупности $-20+10$ мм, отмывали от пыли и включений глинистых частиц, а затем в течение суток высушивали при комнатной температуре. В последующем из высушенных образцов методом квартования комплектовали навески испытуемых образцов массой 50 г каждая и в случайном порядке, с учетом трехкратной повторяемости, разделяли в соответствии с блок-схемой проведения эксперимента (табл. 2).

Для моделирования процессов разрушения в условиях нивального воздействия подготовленные навески предварительно в течение 48 ч насыщали раствором хлорида натрия следующих концентраций: 0, 5, 10 и 20 %. После насыщения образцы извлекали из растворов и замораживали в морозильной камере при температуре -20 °С. Замораживание в камере длилось не менее 12 ч, при этом контроль температуры осуществлялся с помощью термодатчика, находящегося в одном из испытуемых образцов.

В дальнейшем замороженные образцы вынимали из морозильной камеры и погружали в растворы солей заданных концентраций, обладающие положительной температурой, где и выдерживали до достижения образцами температуры $+20$ °С. Время полного размораживания составляло около 2 ч. Таким образом моделировался один цикл нивального воздействия на исследуемые образцы. Далее циклы замораживания-оттаивания повторяли: образцы извлекали из теплых растворов и повторно замораживали в морозильной камере при -20 °С. Количество циклов задавали в соответствии с блок-схемой проведения эксперимента (0, 3, 5, 10).

По завершении заданного количества «нивальных» циклов образцы извлекали из растворов, протирали от излишней влаги и сушили при комнатной температуре в течение 48 ч. Высушен-

ные образцы подвергали дроблению на жестком основании при положительной температуре, следуя ранее разработанной методике [13]. Затем определяли удельные энергозатраты на разрушение образцов и анализировали данные статистическими методами, исключая аномальные значения, используя критерии из работ [14, 15]. Для образцов, не подвергавшихся воздействию циклов замораживания-оттаивания, погрешность определения удельных энергозатрат (при надежности 0,95) на разрушение образцов доломита тр. «Интернациональная» составила 13,2 %, известняка к. «Мохсоголлох» – 3,1 %.

Результаты и обсуждение

На основании полученных данных были построены графики изменения энергоемкости разрушения исследованных горных пород в зависимости от засоленности растворов и количества проведенных циклов замораживания-оттаивания в нивальных условиях, а по средним значениям проведены линии тренда (рис. 1, 2).

Анализ данных, полученных в ходе разрушения доломита тр. «Интернациональная» в нивальных условиях, показал, что энергоемкость его

Таблица 2

Блок-схема проведения эксперимента

Table 2

Block diagram of the experiment

Количество ЦЗО в нивальных условиях	Концентрация соли (NaCl), %			
	0	5	10	20
0	5(3)	—	—	—
3	5(3)	5(3)	5(3)	5(3)
5	5(3)	5(3)	5(3)	5(3)
10	5(3)	5(3)	5(3)	5(3)

Примечание. Указано количество испытуемых навесок, в скобках количество повторов.

Note. Number of tested samples, number of tests is given in brackets.

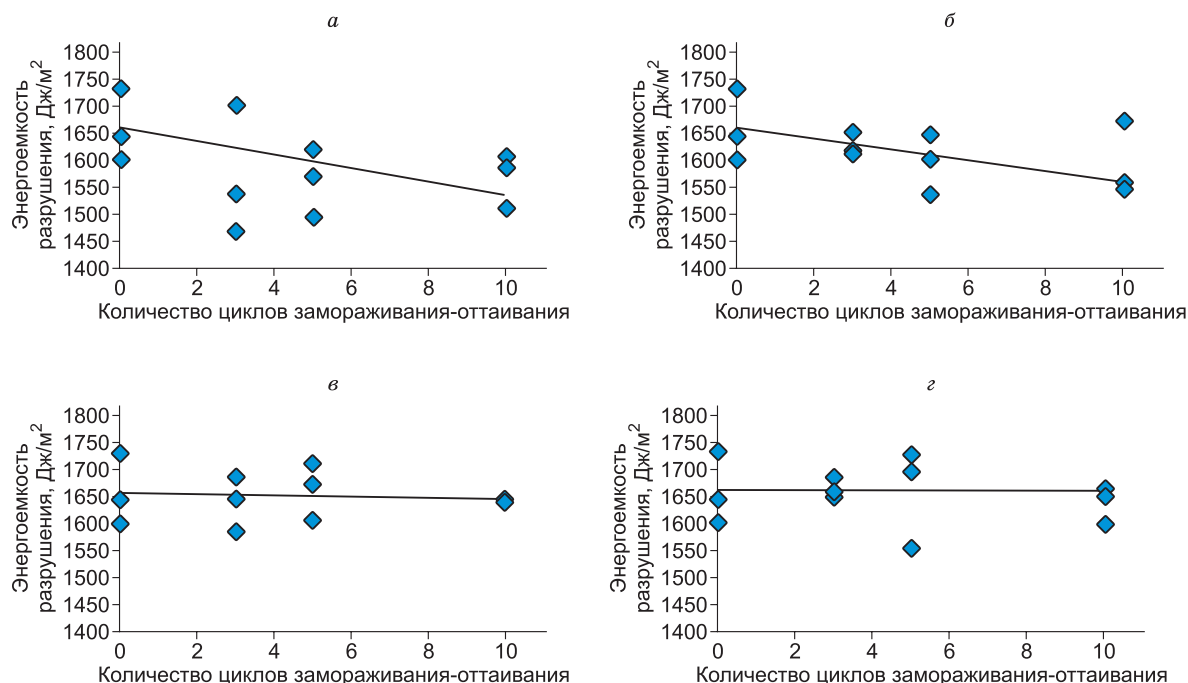


Рис. 1. Энергоемкость разрушения доломита трубки «Интернациональная». Содержание соли (NaCl), %: 0 (а), 5 (б), 10 (в), 20 (г)

Fig. 1. Energy intensity of dolomite destruction in the International pipe. Salt content (NaCl), %: а – 0, б – 5, в – 10, г – 20

разрушения практически не меняется с увеличением концентрации соли в растворе с 10 до 20 %. Существенное снижение энергоемкости было отмечено при испытаниях образцов доломита с содержанием соли 0 (см. рис. 1, а). Наибольшее снижение удельных энергозатрат наблюдается после пяти циклов замораживания-оттаивания, в среднем составляя 6 %, и остается стабильным вплоть до десятого цикла.

В нивальных условиях циклического воздействия известняки карьера «Мохсоголлох», обладая гораздо меньшей пористостью (1 %) по сравнению с доломитами (14,2 %), показали снижение энергоемкости разрушения на 15 % (рис. 2). Максимальное снижение энергозатрат наблюдается при испытаниях известняка после 3–5 нивальных циклов у образцов с концентрацией соли в растворе 0 и 5 % NaCl. Но различия в энергоемкости разрушения при разной концентрации соли минимальны. Таким образом, влияния концентрации солей в растворе на энергоемкость разрушения образцов известняка карьера «Мохсоголлох» не было установлено.

Отсутствие значительных изменений в удельных энергозатратах под действием нивальных условий для исследованных образцов доломита

(см. рис. 1), на наш взгляд, связано с тем, что методически после циклического воздействия температур все образцы вынимали из растворов и высушивали, а затем подвергали дроблению на копре. Таким образом, часть дефектов и трещин, возникающих в образцах при их замораживании, с размораживанием образцов уменьшалась либо полностью исчезала. Другие возможные причины связаны с большой первоначальной пористостью доломита (14,2 %), наличием естественной и создаваемой засоленности породы, а также замораживанием в условиях неполного влагонасыщения, – все эти факторы привели в совокупности к тому, что при замораживании образцов не возникает столь значительных напряжений, способных привести к дезинтеграции породы. Необходимо отметить, что напряжения все же имеются, но, вероятно, не успевают в достаточной мере накопиться и раскрыться за проведенные в ходе экспериментов циклы замораживания-оттаивания.

Под влиянием циклического замораживания-оттаивания в нивальных условиях доломит трубки «Интернациональная» по сравнению с известняком карьера «Мохсоголлох» оказался более устойчив к морозному выветриванию. Анало-

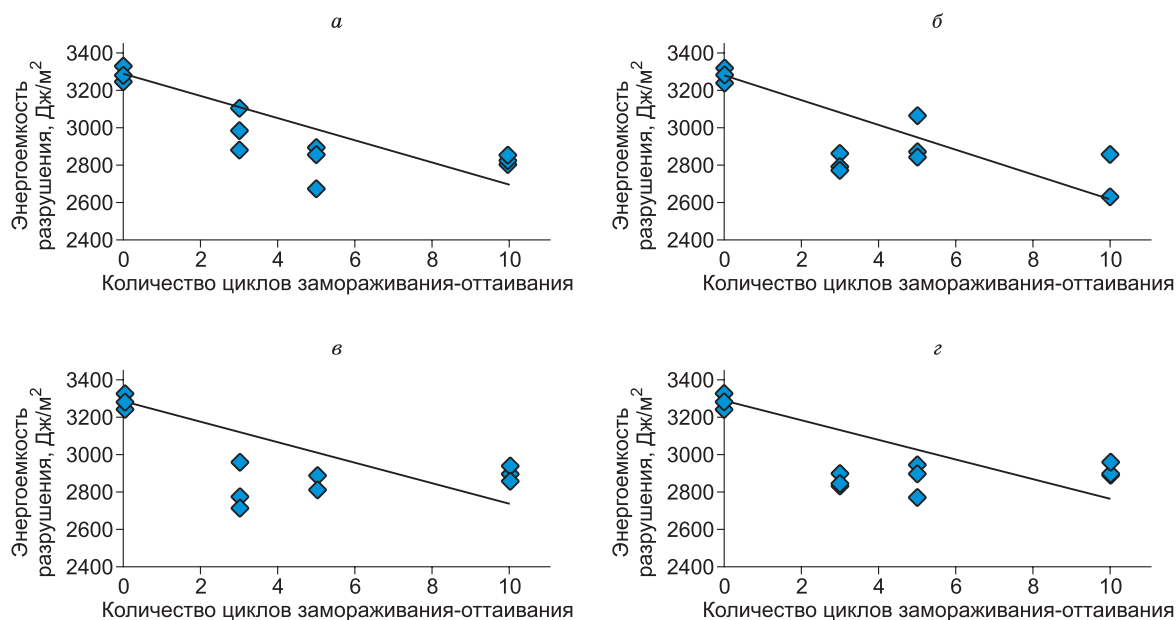


Рис. 2. Энергоемкость разрушения известняка карьера «Мохсоголлох». Поясн. см. рис. 1

Fig. 2. Energy intensity of limestone destruction in the Mokhsogolloh quarry. Explanation see Fig. 1

гичные результаты были получены в работах Мельникова А.Е. [11].

Нивальные условия воздействия оказали незначительное влияние на энергоемкость разрушения исследованных типов горных пород. В ранее выполненных экспериментах нами было установлено, что энергоемкость разрушения образцов известняка карьера «Мохсоголлох» снижается почти на 60 % после пяти циклов замораживания-оттаивания в водной среде (аквальной). То есть аквальные условия замораживания воздействовали на известняк в три-четыре раза сильнее, чем нивальные. С другой стороны, в работе [10] указано, что относительная дезинтеграция пород, разрушающихся в нивальных условиях криогенного выветривания, превышают аквальные в два раза, а аэральные – более чем в 20 раз. Таким образом, полученные экспериментальные данные показывают необходимость проведения дальнейших исследований по установлению влияния криогенного выветривания в нивальных условиях на характеристики разрушаемости горных пород.

Заключение

В ходе экспериментальных работ были установлены закономерности изменения энергоемкости разрушения доломита трубки «Интернациональная» и известняка карьера «Мохсоголлох» под влиянием циклов замораживания-оттаивания

в нивальных условиях при различных концентрациях соли в растворе. Выяснено, что по сравнению с известняком доломит более устойчив к криогенному выветриванию в нивальных условиях, даже при значительной засоленности среды, и его использование в качестве строительного материала (железнодорожные насыпи, отсыпка дорожного полотна и т. д.) является более предпочтительным. Увеличение содержания солей в растворе (10 % и более) приводит к тому, что циклическое замораживание-оттаивание доломита в нивальных условиях практически не влияет на энергоемкость его разрушения.

Список литературы / References

1. Захаров Е.В., Курилко А.С. Энергоемкость разрушения скальных пород алмазных месторождений Якутии после циклов замораживания-оттаивания. *Обогащение руд*. 2018;5(377):11–16. <https://doi.org/10.17580/or.2018.05.02>.
- Zakharov E.V., Kurilko A.S. Energy intensity of rock destruction at diamond deposits in Yakutia after freeze-thaw cycles. *Obogashchenie Rud*. 2018;5(377):11–16. <https://doi.org/10.17580/or.2018.05.02>. (In Russ.)
2. Хохлов Б.В., Рожко М.Д., Дрибан В.А. К вопросу определения коэффициента, учитывающего изменение прочности пород обводненных массивов. *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2023;10(2):79–82. <https://doi.org/10.15372/FPVGN2023100212>.

- Khokhlov B.V., Rozhko M.D., Driban V.A. On the issue of determining the coefficient that takes into account the change in the strength of the rocks of water-logged massifs. *Mining sciences: fundamental and applied issues*. 2023;10(2):79–82. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/FPVGN2023100212>.
3. Ермошина Л.Ю., Шипкова А.Е., Тер-Мартirosyan А.З. и др. Определение прочностных характеристик горных пород в воздушно-сухом и водонасыщенном состояниях. *Жилищное строительство*. 2023;(5): 23–28. <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-5-23-28>.
- Ermoshina L.Yu., Shipkova A.E., Ter-Martirosyan A.Z., et al. Determination of strength characteristics of rocks in air-dry and water-saturated states. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo [Housing Construction]*. 2023;(5):23–28. (In Russ.) <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-5-23-28>.
4. Захаров Е.В. Влияние влажности на энергоемкость дробления доломита трубки «Интернациональная» при различных температурах. *Обогащение руд*. 2023;(5):3–7. <https://doi.org/10.17580/or.2023.05.01>.
- Zakharov E.V. The effects of humidity on energy intensity of crushing dolomite from the Internationalnaya diamond mine at different temperatures. *Obogashchenie Rud*. 2023;(5):3–7. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/or.2023.05.01>.
5. Wong L.N.Y., Maruvanchery V., Liu G. Water effects on rock strength and stiffness degradation. *Acta Geotechnica*. 2016;11:713–737. <https://doi.org/10.1007/s11440015-0407-7>.
6. Cai X., Zhou Z., Liu K., et al. Water-Weakening effects on the mechanical behavior of different rock types: phenomena and mechanisms. *Applied Sciences*. 2019;9(20):44–50. <https://doi.org/10.3390/app9204450>.
7. Zhou Z., Cai X., Cao W., et al. Influence of water content on mechanical properties of rock in both saturation and drying processes. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2016;49:3009–3025. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-0987-z>.
8. Hashiba K., Fukui K., Kataoka M., et al. Effect of water on the strength and creep lifetime of andesite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018;108:37–42. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.05.006>.
9. Малкин А.И. Закономерности и механизмы эффекта Ребиндера. *Коллоидный журнал*. 2012;74(2): 239–256.
- Malkin A.I. Regularities and mechanisms of the Rehbinder's effect. *Colloid Journal*. 2012;74(2):223–238.
10. Шестернев Д.М. *Криогипергенез и геотехнические свойства пород криолитозоны*. Новосибирск: Изд-во СО РАН; 2001. 266 с.
- Shesternev D.M. *Cryohypergenesis and geotechnical properties of cryolithozone rocks*. Novosibirsk: Publishing House SB RAS; 2001. 266 p. (In Russ.)
11. Мельников А.Е. Влияние криогенного выветривания на развитие деформаций железнодорожной насыпи (на примере участка Томмот–Кердем Амурско-Якутской магистрали): Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Нерюнгри; 2015. 24 с.
- Melnikov A.E. The influence of cryogenic weathering on the development of deformations of a railway embankment (using the Tommot-Kerдем section of the Amur-Yakutsk railway as an example): Abstr. ... Diss. Cand. Sci., Neryungri; 2015. 24 p. (In Russ.)
12. ГОСТ 8269.0-97. Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний. Введ. 01.07.1998. М.: Стандартинформ; 2018. 51 с.
- GOST 8269.0-97. Crushed stone and gravel from dense rocks and industrial waste for construction work. Methods of physical and mechanical testing. Introduced 01.07.1998. Moscow: Standartinform; 2018. 51 p. (In Russ.)
13. Zakharov E., Kurilko A.S. Local minimum of energy consumption in hard rock failure in negative temperature range. *Journal of Mining Science*. 2014;50:284–287. <https://doi.org/10.1134/S1062739114020112>.
14. Кассандрова О.Н., Лебедев В.В. *Обработка результатов наблюдений*. М.: Наука; 1970. 104 с.
- Kassandrova O.N., Lebedev V.V. *Processing of observation results*. Moscow: Nauka; 1970. 104 p. (In Russ.)
15. Степнов М.Н. *Вероятностные методы оценки характеристик механических свойств материалов и несущей способности элементов конструкций*. Новосибирск: Наука; 2005. 342 с.
- Stepnov M.N. *Probabilistic methods for assessing the characteristics of mechanical properties of materials and the bearing capacity of structural elements*. Novosibirsk: Nauka; 2005. 342 p. (In Russ.)

Об авторе

ЗАХАРОВ Евгений Васильевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-3812-9534>, ResearcherID: B-4522-2013, Scopus Author ID: 56462361100, SPIN: 7592-6662, e-mail: zaharoff@igs.yasn.ru

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

About the author

ZAKHAROV, Evgeniy Vasilievich, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-3812-9534>,
ResearcherID: B-4522-2013, Scopus Author ID: 56462361100, SPIN: 7592-6662, e-mail: zaharoff@igds.ysn.ru

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 30.10.2024

Поступила после рецензирования / Revised 22.04.2025

Принята к публикации / Accepted 15.05.2025

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Экология

УДК 633.264:581.55(571.56-191.2)

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-238-249>



Оригинальная статья

Стратегии жизни плотнoderновинных злаков *Festuca lenensis* Drob. и *Koeleria cristata* (L.) Pers. в степных сообществах Центральной Якутии

С. Н. Андреева[✉]

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

[✉]Sandren_1601@mail.ru

Аннотация

Проведена оценка стратегий жизни плотнoderновинных злаков *Festuca lenensis* и *Koeleria cristata* в степных сообществах Центральной Якутии. В рамках наиболее распространенной на данное время концепции эколого-фитоценологических стратегий Л.Г. Раменского и Дж. Грайма выделяют три основных типа стратегий: конкуренты – competitors; стресс-толеранты – stress-tolerants; рудералы – ruderals (CSR-стратегии). Для каждого типа стратегии характерен свой комплекс адаптивных онтогенетических и популяционных признаков. Учитывался комплекс адаптивных популяционных показателей: плотность, индексы восстановления (I_B), старения (I_C), базовый спектр, типы регенеративной стратегии, виталитетная структура. Всего исследованы 21 ценопопуляция *Festuca lenensis* и 12 ценопопуляций *Koeleria cristata*. Проведена оценка экологических условий сообществ с использованием экологических шкал, учитывалось влияние следующих экологических факторов – увлажнение (У), богатство – засоленность почвы (БЗ) и пастбищная дигрессия (ПД). В долине среднего течения р. Лена *Festuca lenensis* произрастает при увлажнении 56,0–59,0 ступени, богатстве – засоленности почв 10,4–11,4 ступени и при пастбищной дигрессии от 3,8 до 4,5 ступени. Сообщества с участием *Koeleria cristata* приурочены к участкам с увлажнением 54,5–59,0 ступени, богатством – засоленностью почв 10,4–12,2 ступени и пастбищной дигрессией 4,2–4,5 ступени. Для *Festuca lenensis* и *Koeleria cristata* установлены различные типы жизненных стратегий. Эколого-фитоценологическая стратегия *Festuca lenensis* является типичной для мелких дерновинных злаков непродуктивных сообществ CSR стратегией. Для *Koeleria cristata* установлена S стратегия. Стратегии жизни *Festuca lenensis* и *Koeleria cristata*, обусловленные различными адаптивными реакциями популяционных показателей на одни и те же эколого-фитоценологические условия, обеспечивают их успешное совместное существование в трансформирующихся условиях реликтовых степных сообществ Центральной Якутии.

Ключевые слова: *Festuca lenensis*, *Koeleria cristata*, жизненная стратегия, виталитет, конкурент, стресс-толерант, рудерал

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ по проекту «Растительный покров криолитозоны таежной Якутии: биоразнообразие, средообразующие функции, охрана и рациональное использование» (код темы: FWRS-2021-0023; номер госрегистрации в ЕГИСУ: АААА-А21-121012190038) с применением оборудования ЦКП ФИЦ «ЯНЦ СО РАН» (грант № 13. ЦКП.21.0016).

Для цитирования: Андреева С.Н. Стратегии жизни плотнoderновинных злаков *Festuca lenensis* Drob. и *Koeleria cristata* (L.) Pers. в степных сообществах Центральной Якутии. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(2):238–249. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-238-249>

The life strategies of firm-bunch grasses *Festuca lenensis* Drob. and *Koeleria cristata* (L.) Pers. in the steppe communities of Central Yakutia

Sakhaya N. Andreeva✉

Institute for Biological Problems of Cryolithozone,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

✉Sandren_1601@mail.ru

Abstract

An evaluation of the life strategies of firm-bunch grasses, namely *Festuca lenensis* and *Koeleria cristata*, was conducted within the steppe ecosystems of Central Yakutia, using established ecological and phytocenotic strategies. These strategies classify plant species into three groups: competitors, stress-tolerants, and ruderals, commonly referred to as CSR strategies. Each group is defined by a distinct set of adaptive ontogenetic and population characteristics. A comprehensive assessment of various adaptive population indicators was performed, including density, recovery index, aging index, basic spectrum, types of regenerative strategy, and vitality structure. The study included 21 cenopopulations of *Festuca lenensis* and 12 cenopopulations of *Koeleria cristata*. Consequently, the ecological conditions of the communities were analyzed using ecological scales, considering the impact of several factors: moisture, soil salinity, and pasture degradation. In the valley of the middle reaches of the Lena River, *Festuca lenensis* was observed to thrive within the following ranges: at moisture levels of 56.0-59.0, soil salinity levels of 10.4-11.4, and pasture degradation levels of 3.8-4.5. Conversely, communities containing *Koeleria cristata* were associated with moisture levels of 54.5-59.0, soil salinity levels of 10.4-12.2, and pasture degradation levels of 4.2-4.5. Furthermore, distinct life strategies were identified for both *Festuca lenensis* and *Koeleria cristata*. The ecological and phytocenotic strategy of *Festuca lenensis* is representative of low-bunch grasses found in unproductive communities, aligning with the CSR strategies. In contrast, *Koeleria cristata* demonstrates an S strategy. In conclusion, the life strategies of both *Festuca lenensis* and *Koeleria cristata*, shaped by their distinct adaptive responses of population indicators to comparable ecological and phytocenotic conditions, enable their successful coexistence within the changing environments of the relict steppe communities in Central Yakutia.

Keywords: *Festuca lenensis*, *Koeleria cristata*, adaptive strategy, vitality, competitor, stress-tolerant, ruderal

Funding. This study was conducted within the framework of the state assignment from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the project: “Vegetation cover of the permafrost zone of the taiga in Yakutia: biodiversity, habitat-forming functions, protection and rational use” (theme No. FWRS-2021-0023; registration No. AAAA-A21-121012190038), using the equipment provided by the Core Shared Research Facilities of the Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre SB RAS” (grant No. 13.CSRF.21.0016).

For citation: Andreeva S.N. The life strategies of firm-bunch grasses *Festuca lenensis* Drob. and *Koeleria cristata* (L.) Pers. in the steppe communities of Central Yakutia. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(2):238–249. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-30-2-238-249>

Введение

В настоящее время уникальные реликтовые степные сообщества, сохранившиеся с плейстоценового геологического периода, наиболее крупные участки которых распространены в долине среднего течения р. Лена Центральной Якутии, подвергаются сильному антропогенному воздействию. В степных сообществах, занимавших в прошлые периоды большие территории, происходили самые различные процессы адаптации вида на различных биологических уровнях – организменном, популяционном, экосистемном. На фоне возрастающего антропоген-

ного пресса степи ведут себя динамично, и изучение адаптационных процессов представляет особую актуальность и значимость. Особенно это касается популяций доминирующих видов степных сообществ – плотнодерновинных злаков.

«Комплексный адаптивный ответ на воздействия факторов среды, формирующийся благодаря тесной взаимосвязи его адаптивных признаков и реакций и определяющий способ выживания, положение и функциональную роль в фитоценозе», рассматривают как жизненную стратегию вида растений [1]. В рамках наиболее распространенной на данное время концепции эколого-

фитоценологических стратегий Л.Г. Раменского [2] и Дж. Грайма [3] выделяют три основных типа стратегий: конкуренты – competitors; стресс-толеранты – stress-tolerants; рудералы – ruderals (CSR-стратегии). Для каждого типа стратегии характерен свой комплекс адаптивных онтогенетических и популяционных признаков: адаптивные онтогенетические тактики, онтогенетические и репродуктивные стратегии, характер изменчивости возрастной, виталитетной, пространственной и биоморфологической структур, плотности и численности, жизненного состояния ценопопуляций, ритмов фенологического развития [4].

Сведения по экологии и биологии популяций злаков многочисленны, при этом исследований эколого-фитоценологических стратегий недостаточно.

Мелкие злаки *Festuca ovina* L. и *Koeleria macrantha* (Ledeb.) Schult., произрастающие в пастбищах Британских островов, относятся к CSR-стратегам [3]. Такой же промежуточной стратегией характеризуются некоторые плотнoderновинные луговые злаки, в частности *Deschampsia caespitosa* (L.) Beauv. и *Nardus stricta* L., которые, обладая набором разнообразных адаптационных возможностей, имеют возможность произрастать в различных эколого-фитоценологических условиях, где проявляют тот или иной тип стратегии – от конкурента и рудерала до стресс-толеранта [5]. Агропопуляции рыхлoderновинных злаков *Dactylis glomerata* L. s.l. и *Arrhenatherum elatius* (L.) J. et C. Presl на вскрышных отвалах Кузбасса проявляют виолентные и патиентные качества [6].

В Якутии популяционные исследования злаков проводились В.П. Ивановой [7], А.А. Скобелевой [8], К.В. Кардашевской, В.Е. Кардашевской, А.Г. Хабытчаровой [9, 10, 11], Н.Н. Егоровой [12], Федоровой А.И. [13] и др. По наблюдениям А.А. Скобелевой [8], плотнoderновинный злак *Psathyrostachys caespitosa* (Sukacz.) Peschkova в степях Центральной Якутии обладает смешанным типом жизненной стратегии – конкурентно-стресс-толерантным (CS).

Цель исследования – определение стратегий жизни плотнoderновинных злаков *Festuca lenensis* и *Koeleria cristata* в степных сообществах Центральной Якутии.

Материалы и методы

Объекты исследования – многолетние травянистые плотнoderновинные симподиально нарастающие поликарпики *Festuca lenensis* и *Koeleria*

cristata. *Festuca lenensis* – северо-восточно-азиатский лесостепной вид. *Koeleria cristata* имеет циркумполярный ареал и является обычным растением во всей степной области.

Исследования ценопопуляций проводились на территориях Хангаласского улуса (далее ХУ) в окр. с. Октемцы (ценопопуляции ХУ-1, ХУ-2), с. Тэхтюр (ХУ-3) и с. Улах-Ан (ХУ-4, ХУ-5), Намского улуса (НУ) в окр. с. Никольский (НУ-1, НУ-2) и городского округа г. Якутск: в окр. с. Старая Табага (Таб-1 – Таб-5), с. Кильдямцы (Ки-1 – Ки-7), с. Тулагино (Ту), п. Кангалассы (Канг-1, Канг-2), с. Марха (М-1–М-6) и г. Якутск (Я-1 – Я-4). Всего исследовано 21 ценопопуляция *Festuca lenensis* и 12 ценопопуляций *Koeleria cristata*.

Материал был собран на степных участках долин среднего течения р. Лена в Центральной Якутии. Проведена оценка экологических условий сообществ с использованием экологических шкал, учитывалось влияние следующих экологических факторов – увлажнение (У), богатство–засоленность почвы (БЗ) и пастбищная дигрессия (ПД) [14]. Анализ исследованных 32 сообществ по экологическим факторам показал, что по фактору увлажнения исследованные сообщества занимают амплитуду сухолугового увлажнения (55–63 ступени), по фактору богатства–засоленности почв занимают ступени от небогатых до довольно богатых почв (8,5–13 ступени) и по фактору пастбищной дигрессии относятся к сообществам, испытывающим слабое и умеренное влияние выпаса (3–4,5 ступени) [15].

Наиболее сухие места с довольно богатыми почвами занимают крупнoderновинно-злаковые (ломкоколосниковые, ковыльные, змеевковые) настоящие степи. Твердоватоосочковые степи с типчаковыми и тонконоговыми луговыми степями занимают среднее положение по оси увлажнения. Но твердоватоосочковые степи развиваются в отличие от типчаковых и тонконоговых луговых степей в более засоленных условиях. Менее засоленные места занимают богаторазнотравные луговые степи. Лесные сообщества развиваются в наиболее влажных условиях с небогатыми почвами.

Относительно шкалы пастбищной дигрессии можно отметить, что растительность исследованных сообществ подвержена влиянию слабого и умеренного выпаса. К сообществам, испытывающим умеренное влияние пастбищной дигрес-

сии, относятся дерновинно-злаковые и твердовато-осочковые степи, а также некоторые сообщества типчаковых луговых степей, в частности, холоднопопынно-типчаковое и вильчатопычатково-типчаковое сообщество. Остальные типчаковые и тонконоговые луговые степи характеризуются условиями слабого влияния выпаса. Наименее слабое влияние пастбищной дигрессии отмечено в сообществах богаторазнотравных крупнозлаковых луговых степей и светлехвойных лесов.

В долине среднего течения р. Лена *Festuca lenensis* часто произрастает при увлажнении 56,0–59,0 ступени, богатстве–засоленности почв 10,4–11,4 ступени и при пастбищной дигрессии от 3,8 до 4,5 ступени, что характерно для твердоватоосочковых степей, типчаковых и богаторазнотравных луговых степей.

Сообщества с участием *Koeleria cristata* приурочены к участкам с увлажнением 54,5–59,0 ступени, богатством–засоленностью почв 10,4–12,2 ступени и пастбищной дигрессией 4,2–4,5 ступени и являются сообществами крупнодерновинно-злаковых и твердоватоосочковых степей, типчаковых и тонконоговых луговых степей.

Популяционные исследования проведены с учетом эколого-фитоценологических характеристик на организменном и ценопопуляционном уровнях. Исследования на организменном уровне включали измерение метрических параметров растений, находящихся в генеративном состоянии.

На популяционном уровне при изучении плотности и онтогенетической структуры объектов исследования был использован метод случайно-регулярного способа отбора учетных площадок размером 0,0625–0,25 м². Размер учетных площадок выбран, исходя из размеров дерновин объектов исследования (диаметр дерновин в среднем 4–5 см).

На ценопопуляционном уровне исследований проведена оценка демографических характеристик ценопопуляций: плотности (D), индексов восстановления (I_B), старения (I_C) [16, 17], определены базовый спектр [18], тип онтогенеза [5], типы регенеративной стратегии [3].

Изучение виталитетной структуры ценопопуляций проведено на основе анализа 10–15 количественных морфологических признаков вегетативной и генеративной сферы особей. Проведено ранжирование ряда особей по индексу IVC (in-

dex of vitality of the coenopopulation) на три класса – a (высокий), b (средний), c (низкий) [19, 20].

Под онтогенетической стратегией понимали изменчивость морфологической целостности растений (I , %) [19] на экоклине с использованием индекса виталитета ценопопуляций IVC по размерному спектру особей [21].

Типы жизненных стратегий даются по классификации Раменского–Грайма [2, 3].

Оценка взаимосвязи популяционных и фитоценологических (экологических) показателей проведена с использованием непараметрического коэффициента корреляции Спирмена r_s . При расчетах использованы пакеты программ Statistica for Windows 8 (StatSoft) и Microsoft Office Excel 2010.

Названия растений приведены согласно С.К. Черепанову [22] и Определителю высших растений Якутии [23].

Результаты и обсуждение

Полный онтогенез *Festuca lenensis* и *Koeleria cristata* включает 4 периода и 10 онтогенетических состояний. Онтогенез исследованных видов относится к В типу II надтипу по классификации Л.А. Жуковой [5], при этом для каждого вида характерны свои особенности, касающиеся продолжительности пребывания особей в тех или иных онтогенетических состояниях. Так, для онтогенеза *Festuca lenensis* характерно длительное пребывание особей в v, g_1 – g_3 состояниях. Особенности онтогенеза *Koeleria cristata* являются партикуляция в ранних онтогенетических состояниях (молодых генеративных), продолжительный старогенеративный и субсенильный период. Онтогенетический спектр ценопопуляций исследованных видов характеризуется неполнотой, обусловленной как неравномерностью семенного возобновления, так и небольшой продолжительностью пребывания особей в p - im и ss - s состояниях (табл. 1, 2) [24].

Базовый спектр ценопопуляций *Festuca lenensis* – левосторонний, с абсолютным максимумом на виргинильных особях (см. табл. 1).

Для *Festuca lenensis* характерно только семенное возобновление. По наблюдениям К.И. Осипова [25], самоподдержание ценопопуляций *Festuca lenensis* осуществляется за счет сравнительно высокого урожая семян, повторяющегося через 3–5 лет, что является следствием чередования периодов обильного цветения и отдыха, определяемых не только погодными условиями, но и

биологией вида. При достаточном увлажнении семена массово прорастают в конце июля–начале августа сразу после осыпания в «окнах» растительности (свободных от подстилки участках растительности, выбоинах, трещинах), таким образом, регенеративная стратегия относится S-типу – сезонному восстановлению. По нашим данным, в конце июля было зафиксировано большое число проростков и ювенильных особей в ценопопуляциях Канг-1, Таб-1, НУ-2, Канг-2 и Ки-1.

Для ценопопуляций *Festuca lenensis* установлена флуктуационная динамика онтогенетической структуры, обусловленная пастбищной дигрессией. При слабом увеличении пастбищной нагрузки увеличиваются плотность и численность особей, преимущественно за счет семенного размножения, спектр изменяется от централизованного или бимодального на левосторонний. Затем при дальнейшем увеличении нагрузки происходят уменьшение плотности и изменение левостороннего спектра на централизованный, бимодальный или, в крайнем случае, правосторонний (рис. 1).

Базовый спектр ценопопуляций *Koeleria cristata* – левосторонний, с абсолютным максимумом на виргинильных и молодых генеративных особях (табл. 2).

Восстановление ценопопуляций *Koeleria cristata* осуществляется семенным способом за счет

банка семян, т. е. регенеративная стратегия относится к B_s -типу. Прорастание семян происходит весной или в начале лета.

I_B ценопопуляций *Festuca lenensis* колеблется в достаточно широком диапазоне: от 0,2 до 0,8, а ценопопуляций *Koeleria cristata* – от 0–0,2 до 0,9, в зависимости от уровня семенного возобновления, в среднем I_B исследованных видов характеризуется значениями 0,4–0,6, преимущественно за счет накопления в ценопопуляциях особей *im*–*v* состояния.

Индекс старения I_C большинства ценопопуляций *Festuca lenensis* характеризуется низкими значениями – от 0 до 0,09, только у 2 ЦП *Festuca lenensis* значение I_C превышает 0,15. Данный показатель свидетельствует о низкой доле особей постгенеративных состояний, так как особи постгенеративных состояний, обладая низкой жизнеспособностью, быстро выбывают из ценопопуляции путем естественного отмирания. I_C ценопопуляций *Koeleria cristata* имеет средние значения от 0,02 до 0,32, что указывает на значительное участие особей постгенеративного периода.

Плотность особей ценопопуляций *Festuca lenensis* изменяется от 4 до 34 особей на 0,25 м². Влияние фитоценологических условий на демографические показатели ценопопуляций *Festuca lenensis* не выражено. Во всех типах сообществ встречаются ценопопуляции со средними значе-

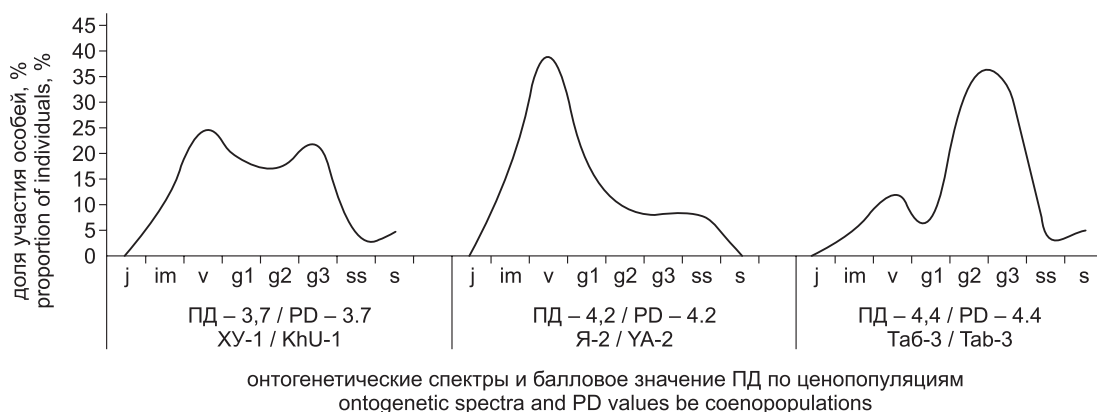


Рис. 1. Динамика онтогенетической структуры ценопопуляций *Festuca lenensis* в зависимости от пастбищной дигрессии ($Y = 57,2$ – $57,3$ и $B3 = 10,7$ – $10,9$).

Ценопопуляции: ХУ-1 – *Spiraea media* + *Stipa krylovii*; Я-2 – *Artemisia commutata* + *Festuca lenensis*; Таб-3 – *Festuca lenensis* + *Potentilla bifurca*

Fig. 1. The dynamics of the ontogenetic structure of *Festuca lenensis* coenopopulations depending on pasture degradation (PD) (M (moisture) = 57.2 – 57.3 and S (soil salinity) = 10.7 – 10.9).

The coenopopulations: KhU-1 – *Spiraea media* + *Stipa krylovii*; YA-2 – *Artemisia commutata* + *Festuca lenensis*; Tab-3 – *Festuca lenensis* + *Potentilla bifurca*

Таблица 1

Основные показатели ценопопуляций *Festuca lenensis*

Table 1

Key characteristics of coenopopulations of *Festuca lenensis*

ЦП CP	I_B I_{recovery}	I_C I_{aging}	D^*	Доля особей по онтогенетическим состояниям, %									IVC	I
	p	j		im	v	g_1	g_2	g_3	ss	s				
Твердоватоосоочковые степи														
Я-4 YA-4	0,47	0,00	13	0	0	15	31	16	18	19	0	0	1,11	35,56
Канг-1 Kang-1	0,80	0,03	22	12	47	14	8	8	2	6	2	0	0,90	35,56
М-2 M-2	0,45	0,09	8	0	0	20	21	8	18	23	9	0	1,27	28,89
Таб-5 Tab-5	0,64	0,05	13	0	0	38	23	17	15	2	5	1	—**	—
Тонконоговые степи														
Ки-1 Ki-1	0,67	0,03	32	2	1	43	20	7	7	17	3	0	1,11	44,44
М-3 M-3	0,49	0,09	7	0	0	15	30	27	7	13	9	0	1,19	35,56
Типчаковые степи														
Я-2 YA-2	0,61	0,08	11	0	0	17	39	19	9	8	8	0	1,03	48,89
Таб-3 Tab-3	0,18	0,10	4	0	0	5	12	7	33	33	5	5	0,89	35,56
М-1 M-1	0,72	0,03	16	0	2	43	24	15	6	5	3	0	0,88	17,78
М-4 M-4	0,56	0,04	25	0	0	26	28	18	13	11	4	0	1,19	40,00
Я-3 YA-3	0,75	0,00	18	0	0	14	62	10	12	3	0	0	1,11	28,89
Богаторазнотравные луговые степи														
Я-1 YA-1	0,59	0,10	9	0	4	20	29	17	7	13	9	1	0,90	33,33
Канг-2 Kang-2	0,80	0,02	34	0	17	44	17	8	8	4	2	0	1,06	35,56
Таб-2 Tab-2	0,35	0,15	6	0	0	8	21	23	16	16	13	2	0,71	22,22
Таб-1 Tab-1	0,62	0,07	9	0	11	33	13	19	9	7	7	0	1,03	35,56
НУ-2 NU-2	0,69	0,02	18	0	24	31	13	16	9	6	2	0	0,91	31,11
Таб-4 Tab-4	0,24	0,18	6	0	0	4	16	25	22	15	16	2	—**	0
ХУ-1 KhU-1	0,38	0,09	7	0	0	10	24	19	17	21	4	4	0,89	20,00

ЦП СР	I_B	I_C	D^*	Доля особей по онтогенетическим состояниям, %									IVC	I
	I_{recovery}	I_{aging}		p	j	im	v	g_1	g_2	g_3	ss	s		
Лесные сообщества														
НУ-1 NU-1	0,65	0,07	12	0	9	23	29	13	13	7	7	0	0,98	35,56
ХУ-2 KhU-2	0,54	0,07	8	0	6	16	28	18	17	7	6	1	0,96	17,78
ХУ-3 KhU-3	0,51	0,16	7	0	1	16	25	22	10	10	16	0	0,88	37,78

Примечание. * D – плотность особей, шт./0,25 м²; ** – для ценопопуляций показатели IVC и I не рассчитаны

Note. * D – the density of individuals, pcs./0.25 m²; ** – The IVC and I indexes were not calculated for coenopopulations.

ниями плотности 6–13 шт./0,25 м², I_B – 0,45–0,70. Плотность изменяется в зависимости от рельефа сообществ. На более пологих участках надпойменных террас и вершин склонов плотность выше, чем на средних частях склона, где имеется уклон. На плотность слабое влияние оказывают экологические факторы – увлажнение ($r_s = -0,22$) и пастбищная дигрессия ($r_s = 0,28$) (рис. 2). Плотность по градиенту фактора поддерживается на среднем уровне, при этом на средних значениях фактора наблюдается увеличение плотности.

Плотность в ценопопуляциях *Koeleria cristata* изменяется от 1 до 38 шт. на 0,25 м². Эколого-фитоценоотические условия влияют на показатели плотности ценопопуляций *Koeleria cristata*. Плотность имеет более высокие значения в тонконоговых и типчаковых степях, чем в крупнoderновинно-злаковых и разнотравно-луговых степях. Также имеется зависимость от рельефа местообитания. В наиболее сухих местообитаниях, расположенных на крутых склонах (ломко-колосниковые степи), наблюдаются наименьшая плотность особей и низкое семенное возобновление. Из экологических факторов наиболее заметное влияние на плотность ценопопуляций *Koeleria cristata* оказывает увлажнение ($r_s = 0,64$) (рис. 3).

При оценке виталитетного типа ценопопуляций *Festuca lenensis* по размерному спектру с использованием I_Q выявлены 11 процветающих и 8 депрессивных ценопопуляций. На виталитет ценопопуляций *Festuca lenensis* значительное влияние оказывают фактор богатства-засоленности почв и плотность особей. IVC *Festuca lenensis* положительно коррелирует с фактором богатства-засоленности почв – $r_s = 0,49$ (значение корреляции статистически значимо при $p > 0,05$), т. е. при увеличении фактора увеличи-

вается IVC , соответственно, увеличивается габитус особей (рис. 4). Плотность особей также положительно коррелирует с IVC *Festuca lenensis* ($r_s = 0,38$), но при наиболее высоких значениях плотности характерны средние значения IVC 1,05–1,2.

В результате анализа виталитетного типа 12 ценопопуляций *Koeleria cristata* выявлены 7 процветающих, 1 равновесная и 4 депрессивных ценопопуляций. Значение IVC *Koeleria cristata* имеет отрицательную зависимость от экологических факторов: увлажнения и плотности особей (рис. 5). Данные факторы имеют положительную корреляцию между собой ($r_s = 0,64$) (см. рис. 3) и взаимно влияют на виталитет особей *Koeleria cristata*.

Стратегии жизни объектов исследования.

Популяционные показатели *Festuca lenensis* и *Koeleria cristata* как комплекс адаптивных реакций на условия фитоценоотических факторов свидетельствуют, что исследованные виды обладают различными типами стратегий.

Эколого-фитоценоотическая стратегия *Festuca lenensis* определена нами как смешанная конкурентно-рудерально-стресс-толерантная (CSR) стратегия, что соответствует описанной ранее стратегии мелких дерновинных злаков непродуктивных пастбищ [3].

Конкурентные свойства (С) проявляются: в доминировании в типчаковых степях, травяно-кустарничковом ярусе гемибореальных лесов; в укрупнении габитуса в благоприятных условиях (при увеличении богатства-засоленности почв); в поддержании плотности на среднем уровне по градиенту экологических факторов; в чередовании защитного и стрессового компонентов в онтогенетической стратегии в благоприятные

Таблица 2

Основные показатели ценопопуляций *Koeleria cristata*

Table 2

Key characteristics of coenopopulations of *Koeleria cristata*

ЦП СР	I_B	I_C	D^*	Доля особей по онтогенетическим состояниям, %								IVC	I
	I_{recovery}	I_{aging}		j	im	v	g_1	g_2	g_3	ss	s		
Крупнотравнозлаковые степи													
Ки-4 Ки-4	0	0	1	0	0	0	37	63	0	0	0	1,23	32,14
Ки-6 Ки-6	0,89	0,07	18	2	24	57	4	3	2	4	2	0,80	—**
Ки-7 Ки-7	0,69	0,03	8	0	13	54	13	13	4	3	0	1,05	—
ХУ-1 KhU-1	0,77	0,24	6	0	12	47	12	0	6	18	6	—	—
Тонконоговые степи													
Ки-2 Ки-2	0,60	0,05	12	20	18	19	33	4	1	5	0	1,04	17,86
М-5 М-5	0,65	0,02	36	0	14	49	27	3	4	2	0	0,89	39,29
Ки-1 Ки-1	0,55	0	28	18	28	9	37	1	6	0	0	1,00	17,86
Типчаковые степи													
Ки-3 Ки-3	0,18	0,10	4	0	5	12	42	20	12	10	0	1,00	35,71
М-6 М-6	0,76	0,08	13	21	28	22	7	8	7	7	1	1,05	21,43
Тул Tul	0,51	0,05	38	31	14	3	39	8	0	5	0	1,00	25,00
Богатотравнолуговые степи													
Ки-5 Ки-5	0,22	0	2	13	0	9	57	13	8	0	0	0,95	42,86
ХУ-5 KhU-5	0,74	0,32	7	0	2	48	7	5	5	27	5	1,00	—

Примечание. * D – плотность особей, шт./0,25 м²; ** – для ценопопуляций с малой выборкой генеративных особей показатели IVC и I не рассчитаны.

Note. * D – the density of individuals, pcs./0, 25 m²; ** – The IVC and I indexes were not calculated for coenopopulations with small sample of generative individuals.

годы. Черты стресс-толерантности (S) *Festuca lenensis* проявляются: в жизненной форме; в длительности онтогенеза; в неполноценности онтогенетического спектра; в неежегодном цветении и плодоношении особей; в осуществлении вегетации до и после периода летней засухи; в способности длительно существовать на территориях, подверженных нарушениям (при выпасе и рекреации). Рудеральные (R) свойства *Festuca lenensis* проявляются: в только семенном раз-

множении; в S-типе регенеративной стратегии – обильное осеннее семенное восстановление в «окнах» растительности; в увеличении плотности при благоприятных условиях (наличие «окон» растительности и достаточное увлажнение), за счет осуществления S-регенеративной стратегии; в преобладании стрессового компонента в онтогенетической стратегии.

В условиях степей Средней Лены, где наблюдается преобладание молодых ценопопуляций

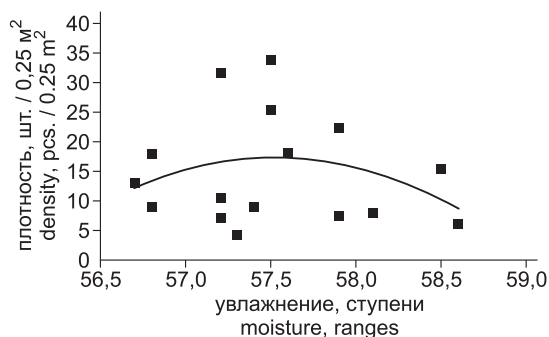


Рис. 2. Зависимость плотности ценопопуляций *Festuca lenensis* от фактора увлажнения

Fig. 2. The correlation between the density of *Festuca lenensis* coenopopulations and the moisture factor

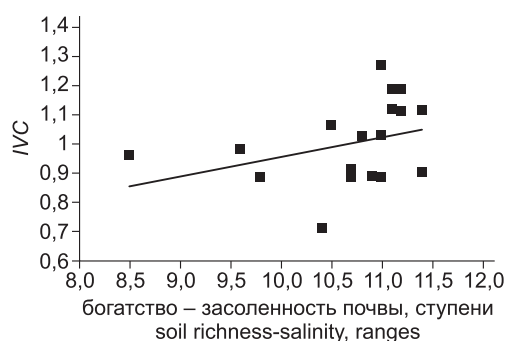


Рис. 4. Зависимость значений IVC *Festuca lenensis* от фактора богатства – засоленности почв

Fig. 4. The correlation between the IVC values of *Festuca lenensis* and the soil richness-salinity factor

и левостороннего базового спектра, в стратегии *Festuca lenensis* более выражены эксплерентные черты.

Эколого-фитоценотическая стратегия *Koeleria cristata* определена нами как стресс-толерантная (S). Пациентность *Koeleria cristata* проявляется: в произрастании в местообитаниях, отличающихся широкой экологической амплитудой: в условиях стресса и нарушений (ломко-колосниковые и ковыльные степи) – экотопическая пациентность; в условиях конкуренции (луговые степи, остепненные луга) – фитоценотическая пациентность; в подчиненном положении в сообществах; в жизненной форме; в длительном онтогенезе; в выживании в виде партикул в условиях нарушения; в прохождении вегетации до и после периода засухи; в смешанной форме размножения (наличие почвенного банка семян – V_s -регенеративная стратегия и партикуляция); в относительно низком уровне морфологической изменчивости; в зависимости

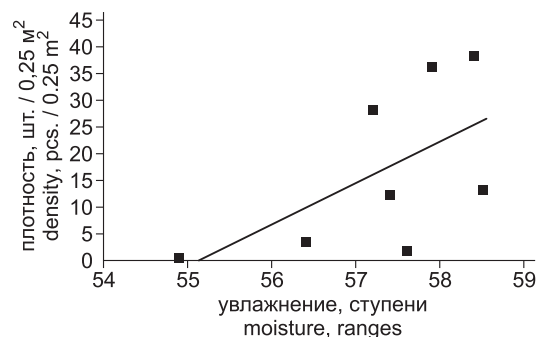


Рис. 3. Зависимость плотности ценопопуляций *Koeleria cristata* от фактора увлажнения

Fig. 3. The correlation between the density of *Koeleria cristata* coenopopulations and the moisture factor

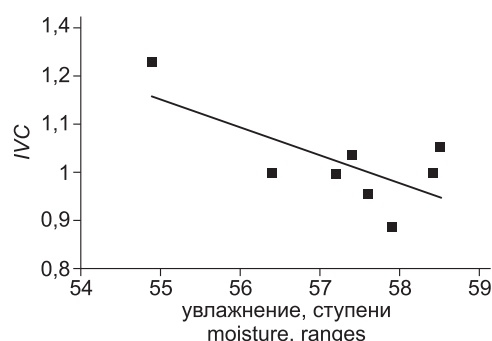


Рис. 5. Зависимость значений IVC *Koeleria cristata* от фактора увлажнения ($r_s = -0,14$)

Fig. 5. The correlation between the IVC values of *Koeleria cristata* and the moisture factor with $R_s = -0,14$

плотности от экологических факторов – плотность увеличивается при повышении увлажнения; в зависимости виталитета от экологических факторов; в чередовании стрессового и защитного компонентов в онтогенетической стратегии.

Оба вида играют большую роль в сохранившихся с плейстоценового геологического периода степных сообществах Центральной Якутии в частности и Якутии в целом. Постепенно в ходе реализации своих жизненных стратегий виды адаптировались и смогли занять свою фитоценотическую роль, находятся в нормальном экологическом состоянии и определяют облик современных центральнаякутских степей.

Закключение

В ходе выполненных работ для плотнoderновинных злаков *Festuca lenensis* и *Koeleria cristata* установлены различные типы жизненных стратегий. Эколого-фитоценотическая стратегия *Festuca lenensis* является типичной для мелких дер-

новинных злаков непродуктивных сообществ CSR-стратегией. Для *Koeleria cristata* установлена S-стратегия. Стратегии жизни *Festuca lenensis* и *Koeleria cristata*, обусловленные различными адаптивными реакциями популяционных показателей на одни и те же эколого-фитоценотические условия, обеспечивают их успешное совместное существование в реликтовых степных сообществах региона.

Список литературы / References

1. Чадаева В.А., Шхагапсоев С.Х. Теоретические аспекты стратегий жизни дикорастущих видов растений. *Юг России: экология, развитие*. 2016;11(4):93–109. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2016-4-93-109>
- Chadaeva V.A., Shkhagapsoev S.H. Theoretical aspects of life strategies of wild plant species. *South of Russia: ecology, development*. 2016;11(4):93–109. (In Russ.) <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2016-4-93-109>
2. Раменский Л.Г. О принципиальных установках, основных понятиях и терминах производственной типологии земель. *Советская ботаника*. 1935;(4):25–42.
- Ramenskii L.G. About fundamental directions, basic concepts and terms of land production typology. *Sovetskaya Botanika*. 1935;(4):25–44. (In Russ.)
3. Grime J.P. *Plant strategies and vegetation processes*. Chichester: J. Wiley Publ.; 1979. 222 p.
4. Чадаева В. А., Шхагапсоев С. Х. Анализ стратегий выживания видов рода *Allium* L. Российской части Кавказа. *Юг России: экология, развитие*. 2016; 11(1):104–118. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2016-1-104-118>
- Chadaeva V.A., Shkhagapsoev S.H. Analysis of survival strategies of the species *Allium* L. in the Russian Caucasus. *South of Russia: Ecology, Development*. 2016; 11(1):104–118. (In Russ.) <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2016-1-104-118>
5. Жукова Л.А. Популяционная жизнь луговых растений. Йошкар-Ола: РИИК «Ланар»; 1995. 224 с.
- Zhukova L.A. *Population life of meadow plants*. Yoshkar-Ola: RIIC 'Lanar'; 1995. 224 p. (In Russ.)
6. Ламанова Т.Г., Шеремет Н.В., Доронькин В.Н. Эколого-ценотические стратегии рыхлодерновинных злаков в агрофитоценозах на отвалах лесостепной зоны Кузбасса. *Растительный мир Азиатской России*. 2022;15(3):218–229. <https://doi.org/10.15372/RMAR20220304>
- Lamanova T.G., Sheremet N.V., Doronkin V.M. Ecological-coenotic strategies of laxicaespitose grasses in agrophytocoenoses on spoil dumps in the forest-steppe zone of Kuzbass. *Rastitel'nyj Mir Aziatskoy Rossii = Flora and Vegetation of Asian Russia*. 2022;15(3):218–229. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/RMAR20220304>
7. Иванова В.П. Типчаковые степи – один из этапов пастбищной дигрессии растительности в долине

р. Лены. В кн.: Андреев В.Н. (ред.) *Растительность Якутии и ее охрана*. Якутск: ЯФ СО АН СССР; 1981. С. 37–56.

Ivanova V.P. Fescue steppes – one of the stages of pasture vegetation digression in the Lena River valley. In: Andreev V.N. (ed.) *Vegetation of Yakutia and its protection*. Yakutsk: YaF SB AS USSR; 1981, pp. 37 - 56. (In Russ.)

8. Скобелева А.А. Онтогенез ломкоколосника дернистого (*Psathyrostachys caespitosa* (Sukaczew) Peschkova). В кн.: Жукова Л.А. (ред.) *Онтогенетический атлас растений: научное издание. Том VII*. Йошкар-Ола: Мар. гос. ун-т; 2013. С. 251–260.

Skobeleva A.A. Ontogenesis of *Psathyrostachys caespitosa* (Sukaczew) Peschkova. In: Zhukova L.A. (ed.) *Ontogenetic atlas of plants. Volume VII*. Yoshkar-Ola: Mari State University; 2013, pp. 251–260. (In Russ.)

9. Кардашевская К.В., Кардашевская В.Е., Хабытcharова А.Г. Тактика и стратегия выживания *Hordeum brevisubulatum* (Trin.) Link. *Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии*. 2021;(20-1):225–228. <https://doi.org/10.14258/pbssm.2021042>.

Kardashevskaya K.V., Kardashevskaya V.E., Khabytcharova A.G. Tactics and life strategies of *Hordeum brevisubulatum* (Trin.) Link. *Problemy botaniki Yuzhnoj Sibiri i Mongolii*. 2021;(20-1):225–228. (In Russ.) <https://doi.org/10.14258/pbssm.2021042>.

10. Kardashevskaya, V.E., Egorova N.N. Populations of *Agrostis diluta* Kurcz. and *Psathyrostachys caespitosa* (Sukaczew) Peschkova in Yakutia: dynamics of vitality. *Acta Biologica Sibirica*. 2021;7:491–503. <https://doi.org/10.3897/abs.7.e78452>

11. Кардашевская, В.Е. Модульное строение степных злаков. *Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии*. 2018;(17):200–203.

Kardashevskaya, V.E. Modular structure of steppe grasses. *Problemy botaniki Yuzhnoj Sibiri i Mongolii*. 2018;(17):200–203.

12. Егорова Н.Н. Биоморфология и популяционная характеристика полевицы светлой (*Agrostis diluta* Kurcz.) в Центральной Якутии: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Уфа. 2014. 18 с.

Egorova N.N. Biomorphology and population characteristics of *Agrostis diluta* Kurcz. in Central Yakutia: Abstr. ...Diss. Cand. Sci. Ufa. 2014. 18 с.

13. Федорова А.И. Динамика онтогенетической стратегии и тактики ценопопуляций *Hordeum brevisubulatum* (Trin.) Link в условиях Вилуйской зоны Центральной Якутии. В кн.: *Перспективы развития и проблемы современной ботаники: Материалы V Международной молодежной конференции, г. Новосибирск, 18–20 сентября 2024 г.* Новосибирск: ООО “Академиздат”; 2024. С. 29–30.

Fedorova A.I. Dynamics of ontogenetic strategy and tactics of *Hordeum brevisubulatum* (Trin.) Link coenopopulations in the Viluy zone of Central Yakutia. In: *Prospects of development and challenges of modern botany:*

Proceedings of the 5th International Youth Conference, Novosibirsk, 18-20 September 2024. Novosibirsk: Akademizdat; 2024, pp. 29–30. (In Russ.)

14. Троева Е.И., Зверев А.А., Королюк А.Ю., Черосов М.М. Экологические шкалы флоры и микобиоты Якутии. В кн.: *Флора Якутии: географические и экологические аспекты*. Новосибирск: Наука; 2010. С. 114–150.

Troeva E.I., Zverev A.A., Korolyuk A.Yu., Cherosov M.M. Ecological scales of flora and mycobiota of Yakutia. In: *Flora of Yakutia: geographical and ecological aspects*. Novosibirsk: Nauka; 2010, pp. 114–150. (In Russ.)

15. Андреева С.Н. Эколого-фитоценотическая характеристика местообитаний *Festuca lenensis* Drob. и *Koeleria cristata* (L.) Pers. в степных сообществах долин среднего течения р. Лена. *Известия Самарского научного центра РАН*. 2012;14(1):1431–1433.

Andreyeva S.N. Ecological-phytocoenotic evaluation of habitats of *Festuca lenensis* and *Koeleria cristata* has been made in steppe communities of the middle reaches of the Lena river. *Izvestiya of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2012;14(1):1431–1433. (In Russ.)

16. Жукова Л.А. Динамика ценопопуляций луговых растений в естественных фитоценозах. В кн.: *Динамика ценопопуляций травянистых растений*. Киев: Наукова думка; 1987. С. 9–19.

Zhukova L.A. Dynamics of meadow plant populations in natural phytocenoses. In: *Dynamics of price populations of herbaceous plants*. Kiev: Naukova Dumka; 1987, pp. 9–19. (In Russ.)

17. Глотов Н.В. Об оценке параметров возрастной структуры популяций растений. В кн.: *Жизнь популяций в гетерогенной среде: сборник научных материалов II Всероссийского популяционного семинара, Йошкар-Ола, 16–20 февраля 1998 года. Часть 1*. Йошкар-Ола: Периодика Марий Эл; 1998. С. 146–149.

Glotov N.V. On estimation of parameters of the age structure of plant populations. In: *Life of populations in heterogeneous environment: Collection of scientific materials of the 2nd All-Russian Population Seminar, Yoshkar-Ola, February 16–20, 1998. Part 1*. Yoshkar-Ola: Periodica Mari El Publ. 1998, pp. 146–149. (In Russ.)

18. Заугольнова Л.Б. Структура популяций семенных растений и проблемы их мониторинга: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. СПб.; 1994. 70 с.

Zaugolnova L.B. Structure of populations of seed plants and problems of their monitoring: Abstr. ...Diss. Doct. Sci, St. Petersburg.; 1994. 70 p. (In Russ.)

19. Злобин Ю.А. Принципы и методы ценологических популяций растений. Казань: Казанский университет; 1989. 145 с.

Zlobin Yu.A. Principles and methods of cenotic populations of plants. Kazan: Kazan University; 1989. 145 p. (In Russ.)

20. Ишбирдин А.Р., Ишмуратова М.М., Жирнова Т.В. Стратегии жизни ценопопуляции *Cephalanthera rubra* (L.) Rich. на территории Башкирского государственного заповедника. *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия: Биология*. 2005;9(1):85–98.

Ishbirdin A.R., Ishmuratova M.M., Zhirnova T.V. The life strategies of the *Cephalanthera rubra* (L.) Rich. cenopopulation within the Bashkir State Reserve. *Vestnik Nizhny Novgorod. Biology*. 2005;(1):85–98. (In Russ.)

21. Ишбирдин А.Р., Ишмуратова М.М. Об онтогенетических тактиках *Rhodiola iremelica*. В кн.: *Фундаментальные и прикладные проблемы популяционной биологии: Сборник тезисов докладов VI Всероссийского популяционного семинара, г. Нижний Тагил, 2–6 декабря 2002 года*. Нижний Тагил: Нижнетагильский государственный педагогический институт; 2002. С. 76–78.

Ishbirdin A.R., Ishmuratova M.M. On ontogenetic tactics of *Rhodiola iremelica*. In: *Fundamental and applied problems of population biology: Collection of abstracts of the 6th All-Russian Population Seminar, Nizhny Tagil, 2–6 December 2002*. Nizhny Tagil: Nizhny Tagil State Pedagogical Institute; 2002. pp. 76–78. (In Russ.)

22. Черепанов С.К. *Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР)*. СПб.: Мир и семья; 1995. 992 с.

Cherepanov S.K. *Vascular plants of Russia and neighbouring countries (within the former USSR)*. St. Petersburg.: Mir i Familia Publ.; 1995. 992 p.

23. Афанасьева Е.А., Байков К.С., Бобров А.А. и др. *Определитель высших растений Якутии*. М.: Товарищество научных изданий КМК; Новосибирск: Наука; 2020. 895 с.

Afanaseva E.A., Baikov K.S., Bobrov A.A., et al. *Key to the higher plants in Yakutia*. Moscow: KMK Scientific Press; Novosibirsk: Nauka; 2020. 895 p. (In Russ.)

24. Андреева С.Н. Онтогенетическая структура ценопопуляций *Festuca lenensis* Drob. в степных сообществах долин среднего течения р. Лена. *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки*. 2011; 14-1(98):203–206.

Andreeva S.N. Ontogenetic structure of *Festuca lenensis* Drob. coenopopulations in steppe communities of the valleys of the middle reaches of the Lena River. *Belgorod State University Scientific Bulletin. Natural Sciences Series*. 2011;14-1(98):203–206.

25. Осипов К.И. Семенная продуктивность и семенное возобновление растений типчаковых степей Западного Забайкалья. В кн.: *Степная растительность Сибири и некоторые черты ее экологии*. Новосибирск: Наука; 1982. С. 73–94.

Osipov K.I. Seed productivity and seed renewal of plants of fescue steppes of the Western Transbaikalia. In: *Steppe vegetation of Siberia and some features of its ecology*. Novosibirsk: Nauka; 1982, pp. 73–94. (In Russ.)

Об авторе

АНДРЕЕВА Сахая Николаевна, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-5003-8037>, ResearcherID: GZG-8254-2022, Scopus Author ID: 682968, SPIN: 1080-3830, e-mail: Sandren_1601@mail.ru

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

About the author

ANDREEVA, Sakhaya Nikolaevna, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5003-8037>, ResearcherID: GZG-8254-2022, Scopus Author ID: 682968, SPIN: 1080-3830, e-mail: Sandren_1601@mail.ru

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 21.11.2024

Поступила после рецензирования / Revised 23.01.2025

Принята к публикации / Accepted 05.02.2025



Оригинальная статья

Хемотаксономические исследования деревьев рода *Larix* на территории Центральной Якутии

С. М. Рожина[✉], А. А. Местникова, И. В. Слепцов

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

[✉]sahayana-rozhina@mail.ru

Аннотация

В работе представлено хемотаксономическое исследование трех видов лиственниц: лиственница Каяндера (*Larix cajanderi*), лиственница сибирская (*Larix sibirica*) и лиственница Гмелина (*Larix gmelinii*). Изучены метаболомные профили, полученные методом газовой хроматографии с масс-спектрометрическим детектором, различных органов (хвоя, кора и шишки) для выявления видовых особенностей на биохимическом уровне, а также их связи с экологическими условиями произрастания. Исследуемые образцы растений были собраны в однотипных условиях на территории Ботанического сада Института биологических проблем криолитозоны СО РАН. Анализ собранных образцов проводился методом метаболомного профайлинга с использованием газового хромато-масс-спектрометра (ГХ-МС). Результаты исследований показали, что *L. gmelinii* и *L. cajanderi* имеют близкие метаболомные профили, рассчитанные методом главных компонент (РСА), что указывает на их близость на биохимическом уровне и может быть связано с аналогичными экологическими адаптациями в условиях Центральной Якутии. Напротив, *L. sibirica* формировала отдельный кластер, подтверждая свою идентичность и отличия в метаболомном профиле. Анализ метаболомов показал, что экологические факторы, такие как влажность, температура и условия почвы, оказывают более значительное влияние на химический состав хвои и коры указанных видов по сравнению с их таксономическими различиями. Полученные результаты подчеркивают важность учета экологических факторов при изучении систематики и дифференциации видов рода *Larix*, а также открывают новые пути для дальнейших исследований в области экологической биохимии хвойных древесных растений. Представленная работа может послужить основой для будущих исследований метаболомики и хемотаксономии в контексте адаптации растений к меняющимся экологическим условиям.

Ключевые слова: лиственница, метаболомный анализ, *Larix*, хемотаксономия, газовая хроматография, химический состав

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0297–2021-0025, рег. № АААА-А21-121012190035–9) и с применением оборудования ЦКП ФИЦ «ЯНЦ СО РАН» (грант № 13.ЦКП.21.0016).

Для цитирования: Рожина С.М., Местникова А.А., Слепцов И.В. Хемотаксономические исследования деревьев рода *Larix* на территории Центральной Якутии. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(2):250–259. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-250-259>

Original article

Chemotaxonomic investigations of *Larix* species in Central Yakutia

Sakhaiana M. Rozhina[✉], Anna A. Mestnikova, Igor V. Sleptsov

Institute for Biological Problems of Cryolithozone,

Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

[✉]sahayana-rozhina@mail.ru

Abstract

This paper presents a chemotaxonomic investigation of three larch species: Cajander larch (*Larix cajanderi*), Siberian larch (*Larix sibirica*), and Gmelin larch (*Larix gmelinii*). We examined the metabolomic profiles obtained through gas chromatography coupled with mass spectrometry detector of various plant organs, including needles, bark, and cones of *Larix sibirica*, *Larix gmelinii*, and *Larix cajanderi*. The objective of this study was to identify species-specific bio-

chemical characteristics and their correlation with environmental growth conditions. Plant samples were collected under controlled conditions from the Botanical Garden of the Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS. The results of our study indicate that *L. gmelinii* and *L. cajanderi* share similar metabolic profiles, as revealed by principal component analysis (PCA). This finding suggests a biochemical similarity between the two species, which may reflect their related ecological adaptations to the environmental conditions of Central Yakutia. In contrast, *Larix sibirica* was observed to form a distinct cluster, thereby confirming its unique identity and differences in metabolic profile. The metabolomic analysis indicated that environmental factors, including soil conditions, humidity, and temperature, have a more pronounced impact on the chemical composition of the needles and bark of these species than their taxonomic distinctions. These results highlight the importance of considering environmental factors when investigating the taxonomy and differentiation of *Larix* species. Furthermore, this research opens new avenues for further exploration in the field of environmental biochemistry concerning coniferous woody plants. This study may serve as a foundational reference for future investigations into metabolomics and chemotaxonomy in relation to plant adaptation to changing environmental conditions.

Keywords: larch, metabolomic analysis, *Larix*, chemotaxonomy, gas chromatography, chemical composition

Funding. This study was conducted within the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. 0297–2021–0025, reg. No. AAAA-A21-121012190035–9), using scientific equipment provided by the Core Shared Research Facilities of the Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences” (grant No. 13.SCF.21.0016).

For citation: Rozhina S.M., Mestnikova A.A., Sleptsov I.V. Chemotaxonomic investigations of *Larix* species in Central Yakutia. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(2):250–259. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-250-259>

Введение

Лиственницы рода *Larix* Mill. занимают важное место в различных экосистемах России, особенно в тайге. Эти растения покрывают большие участки леса, общая площадь которых составляет около 263,2 млн га, что соответствует примерно 36,6 % лесных ресурсов страны [1]. Разнообразие видов лиственниц усложняет их систематизацию, особенно в регионах Северной Азии. Например, *Larix sibirica*, *Larix gmelinii* и *Larix cajanderi* получили подтверждение и признание в отечественных научных кругах. Известно, что на территории Сибири и Дальнего Востока выделяют девять видов рода *Larix*. Некоторые виды лиственниц, которые были описаны Сукачевым [2] и Колесниковым [3], все еще остаются предметом активных исследований и споров в ботаническом сообществе [4, 5].

Лиственница Гмелина (*L. gmelinii*) является одним из наиболее изученных видов и подразделяется на четыре подтипа [6]:

1. *Larix gmelinii* var. *gmelinii* — ареал распространения охватывает обширные территории от Енисея и до самого Берингова моря.

2. *Larix gmelinii* var. *japonica* — распространен преимущественно на островах Хоккайдо, Сахалине и южных Курилах.

3. *Larix gmelinii* var. *olgensis* — распространен в Приморском районе, но встречается и на севере Китая и в Северной Корее.

4. *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* — высокогорная форма, произрастающая преимущественно в Китае.

По современным литературным источникам, многие авторы [7–12] предположили, что все лиственницы, обитающие на Дальнем Востоке, могут быть объединены в один вид — *Larix gmelinii*.

Лиственницу Гмелина по международной систематике растений принято обозначать как *Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen. Некоторые ученые относят *Larix cajanderi* к синонимам типовой разновидности *Larix gmelinii* так же, как и дальневосточные лиственницы, к которым относятся *Larix ochotensis*, *Larix kamtschatica*, *Larix olgensis* var. *Komarovii* Kolesn [9, 13].

Отечественные ученые подвергли критике систематику лиственниц, распространенных на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока, которую выдвинули многие зарубежные исследователи [14, 15]. По мнению отечественных исследователей, лиственница Гмелина и Каяндера являются самостоятельными видами, что подтверждается накопленным за многие годы работы большим массивом данных экспедиций и лабораторных наблюдений по изменчивости признаков, а также ареалу распространения *Larix gmelinii* и *Larix cajanderi* на территории Дальнего Востока и Восточной Сибири [5, 13–17].

В последние годы возрастает интерес к использованию молекулярно-генетических методов в ботанических исследованиях различных видов, в том

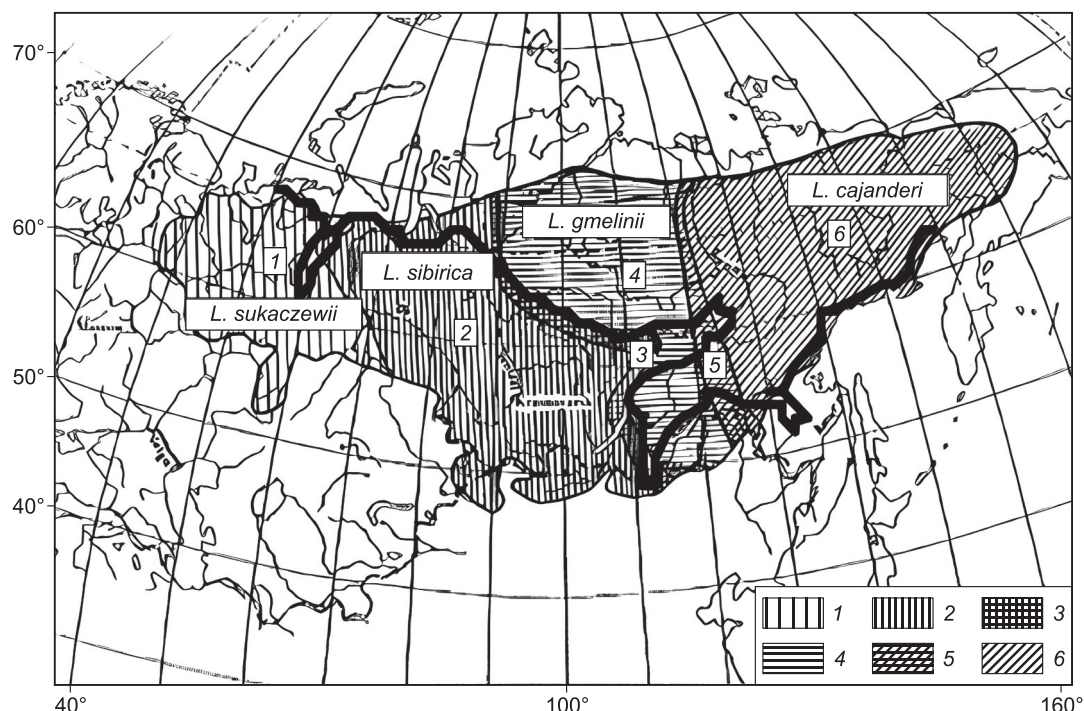


Рис. 1. Распространение различных видов лиственницы на территории Сибири и Дальнего Востока
1 – *Larix sukaczewii*, 2 – *Larix sibirica*, 3 – *Larix czekanowskii*, 4 – *Larix gmelinii*, 5 – *Larix gmelinii* x *Larix cajanderi*, 6 – *Larix cajanderi* [18]

Fig. 1. The distribution of various larch species in Siberia and the Far East
1 – *Larix sukaczewii*, 2 – *Larix sibirica*, 3 – *Larix czekanowskii*, 4 – *Larix gmelinii*, 5 – *Larix gmelinii* x *Larix cajanderi*, 6 – *Larix cajanderi* [18]

числе и таких спорных как лиственницы, произрастающие на территории Восточной Сибири и на Дальнем Востоке [18]. Применение передовых методов исследования, таких как молекулярно-генетические, позволяет глубже понять видовые особенности растений и оценить разнообразие семейств и родов.

С применением молекулярно-генетических методов анализа показано существенное разнообразие видов в популяции лиственниц в районе Охотского моря, на полуострове Камчатка и на территории Республики Саха (Якутия), Магаданской области и Забайкальского края [19–24].

По результатам, полученным с применением митохондриальных ДНК-маркеров [21], установлено, что лиственница Каяндера, произрастающая в верховьях р. Колыма, является самостоятельным видом. В популяции, найденной в Оротукской котловине, обнаружили шишки, которые не соответствуют признакам, наблюдающимся у *L. cajanderi* [25]. Полученные данные могут свидетельствовать о том, что исследованный образец может быть гибридом между *Larix gmelinii* и *Larix cajanderi* либо представляет со-

бой уникальный экотип лиственницы Каяндера. Дальнейшие исследования генеративных и вегетативных структур, совместно с генетическим анализом, установили, что оротукская лиственница относится именно к виду *Larix cajanderi* [26]. Выявленные изменения могут указывать на существование экотипа, который, вероятно, следует рассматривать как отдельный внутривидовой таксон, характеризующийся высокой вариабельностью и фенотипических, и генетических признаков.

Целью данной работы являлось проведение хемотаксономического анализа методом метаболомного профайлинга на газовом хроматографе с масс-спектрометрическим детектором различных тканей *Larix cajanderi*, *Larix sibirica* и *Larix gmelinii*, произрастающих в однотипных эколого-географических условиях на территории Центральной Якутии.

Материалы и методы

Объектом исследования являлись различные органы деревьев, к которым относятся хвоя, кора и шишки лиственницы сибирской (*Larix sibirica*),

лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii*) и лиственницы Каяндера (*Larix cajanderi*), относящихся к роду *Larix* и семейству Pinaceae. На территории Якутии основной лесообразующей породой является лиственница. Ареал обитания лиственницы на территории Якутии насчитывает 109,3 млн га [27].

Сбор образцов хвои, коры и шишек *Larix sibirica*, *Larix gmelinii* и *Larix cajanderi* проводили в начале лета (июнь) 2021 г. в Ботаническом саду Института биологических проблем криолитозоны СО РАН, расположенном в г. Якутск с деревьев высотой от 4 до 5 м.

Для метаболомного анализа 10 мг воздушно-сухого сырья экстрагировали в 1 мл метанола. Полученный экстракт выпаривали при 40 °C на ротаторном испарителе, сухой остаток растворяли в 50 мкл пиридина. Для получения летучих триметилсилил-производных (ТМС) проводили процесс дериватизации с использованием 50 мкл N,O-бис-(триметилсилил)трифторацетамида (BSTFA) в течение 15 мин при 100 °C. Анализ проводили методом газовой хромато-масс-спектрометрии (ГХ-МС) на хроматографе «Мэстро» (Россия) с квадрупольным масс-спектрометром Agilent 5975C (США), колонка HP-5MS, 30 м × 0,25 мм. Для хроматографии использовали линейный градиент температуры от 70 до 320 °C со скоростью 4 °C/мин при потоке газа (гелий) 1 мл/мин. Сбор данных осуществляли с помощью программного обеспечения Agilent ChemStation. Количественную интерпретацию хроматограмм проводили методом внутренней стандартизации по углеводороду C23 [28]. Обработка и интерпретация масс-спектрометрической информации проводилась с использованием стандартной библиотеки NIST 2011. Статистическую обработку метаболомных профилей выполняли методом главных компонент в программе MetaboAnalyst (www.metaboanalyst.ca).

Результаты и обсуждения

Известно, что на территории Якутии широко распространены два вида деревьев, относящихся к роду *Larix*, – *Larix gmelinii* и *Larix cajanderi* [18]. В однотипных эколого-географических условиях на территории Республики Саха (Якутия) три исследуемых вида лиственниц: *Larix sibirica*, *Larix gmelinii* и *Larix cajanderi*, произрастают только на территории Ботанического сада Института биологических проблем криолитозоны СО РАН. Собранные образцы различных органов

трех исследуемых видов лиственниц были проанализированы на газовом хроматографе с масс-спектрометрическим детектором методом метаболомного профайлинга для выявления хемотаксономических особенностей *Larix sibirica*, *Larix gmelinii* и *Larix cajanderi*.

Для статистического анализа полученных метаболомных данных была создана матрица, на которой отражены метаболомные профили хвои, шишек и коры *L. sibirica*, *L. gmelinii* и *L. cajanderi* (рис. 2). Построенный профиль включал 15 наблюдений по 96 метаболитам для хвои, 15 наблюдений по 100 метаболитам для коры и 15 наблюдений по 100 метаболитам для шишек. Полученный массив данных был обработан методом главных компонент (PCA).

По полученным результатам установлено, что метаболомы образцов исследуемых органов *L. sibirica*, *L. gmelinii* и *L. cajanderi* сформировали две группы. В первую группу кластеризовались метаболомы *L. gmelinii* и *L. cajanderi*, а в другую *L. sibirica* (см. рис. 2). Таким образом, по результатам, полученным при анализе графика счетов, рассчитанного методом главных компонент, выявлено, что метаболомы, являющиеся отражением биохимического состава хвои, шишек и коры *L. gmelinii* и *L. cajanderi*, объединились в одну группу, что может быть вызвано незначительными различиями в химическом составе различных органов между исследуемыми видами деревьев рода *Larix* семейства Pinaceae.

Различия в биохимическом составе между *L. sibirica*, *L. gmelinii* и *L. cajanderi*, возможно, возникли из-за разницы в специфических генетических аллелях деревьев, которые отвечают за синтез первичных и вторичных метаболитов в организме. Так, известно, что основными отличительными особенностями *L. sibirica*, *L. gmelinii* и *L. cajanderi* являются форма, ширина и угол отклонения чешуй сформированных шишек [16, 19].

Отличительной особенностью *L. cajanderi* от *L. gmelinii* является отклонение чешуи на 70–80° от оси шишки и сплюснутая шаровидная форма. *L. gmelinii*, напротив, имеет преимущественно яйцевидную форму плода, и угол отклонения чешуи от оси шишки составляет 40–50° [15, 16]. Следует отметить, что *L. gmelinii* и *L. cajanderi* различаются также по многим физиологическим, морфологическим и фенологическим параметрам. Основными из них являются различия температур, необходимых для инициации процессов

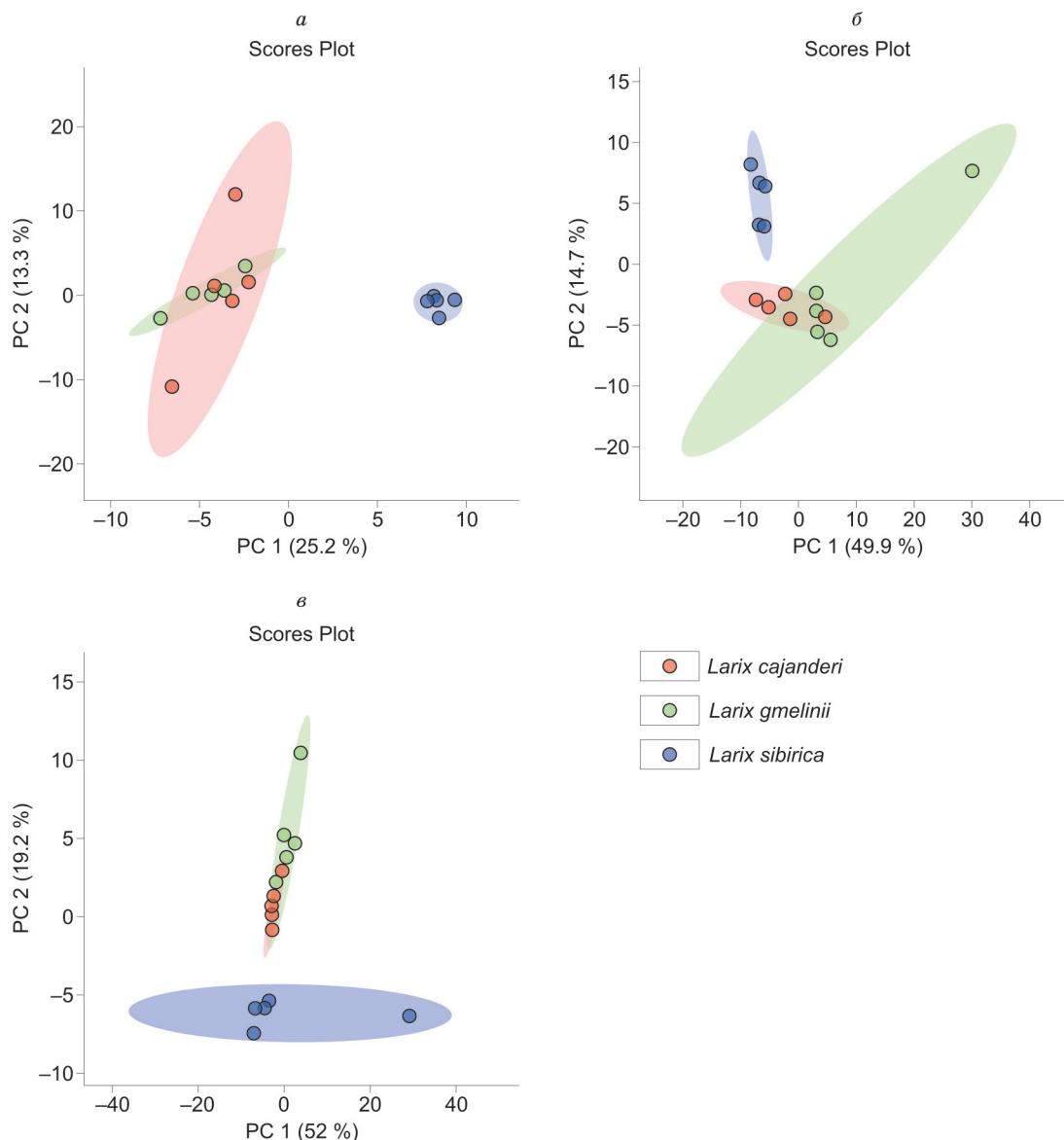


Рис. 2. Распределение метаболомов хвои (а), коры (б) и шишек (в) *Larix sibirica*, *Larix gmelinii* и *Larix cajanderi*, рассчитанное методом главных компонент (PCA) в условиях Якутии

Fig. 2. Distribution in metabolomes of needles (a), bark (б), and cones (в) of *Larix sibirica*, *Larix gmelinii*, and *Larix cajanderi* in Yakutia calculated using principal component analysis (PCA)

цветения, но одним из основных отличий является то, что они имеют различные сроки рассеивания семян [16]. Современные исследования с применением молекулярно-генетических методов анализа установили отличительные признаки на генетическом уровне у *L. gmelinii* и *L. cajanderi* [23, 24]. Другие авторы [29] провели исследование, которое показало, что различия между лиственницами Гмелина и Каяндера не наблюдались на уровне кариотипа. Это может отражать адаптацию к экологии, генетическую ста-

бильность и уровень разнообразия в популяциях, что является основным доказательством близости исследуемых видов в роду *Larix*.

По результатам метаболомного профайлинга методом ГХ-МС была создана иерархическая кластеризация различных органов, таких как хвоя, кора и шишки, исследуемых видов лиственниц (рис. 3).

По полученным данным методом иерархической кластеризации, построенной на основе метаболомных профилей методом ГХ-МС, показана

но, что метаболомы исследуемых органов (хвоя, кора и шишки *L. sibirica*, *L. gmelinii* и *L. cajanderi*) разделились на два основных кластера. Метаболиты *L. cajanderi* и *L. gmelinii* объединились в отдельный кластер, а *L. sibirica* кластеризовался отдельно.

Колесников Б.П. [3] и Бобров Е.Г. [6] установили, что лиственница Каяндера сформировалась в конце плейстоцена в популяциях лиственницы Гмелина. Напротив, *Larix sibirica* является наиболее ранее сформированным (конец плиоцена) видом на территориях Северо-Восточной Сибири. После формирования *Larix gmelinii* как отдельного вида в конце плейстоцена началось постепенное вытеснение *Larix sibirica* из территорий Северо-Восточной Сибири, но до сих пор данный вид местами можно встретить в этом регионе [30–32]. Из трех исследуемых видов *Larix cajanderi* считается самым молодым и окончательно сформировался в конце плейстоцена, появление данного вида может быть вызвано географическими особенностями, в частности, изоляцией Верхоянским хребтом [29].

В результате обработки метаболомных профилей выявлено, что наиболее весомый вклад в разделение кластеров методом главных компонент и иерархической кластеризации вносили вторичные метаболиты лиственницы *L. sibirica*, *L. gmelinii* и *L. cajanderi*, такие как фенолы и терпены (см. таблицу).

Представленные результаты метаболомного профайлинга могут свидетельствовать о том, что по хемотаксономическим признакам *L. gmelinii* и *L. cajanderi* – близкие виды в роду *Larix*.

Ранее проведенные исследования показывают, что эколого-географические особенности среды произрастания способствуют разделению *L. gmelinii* и *L. cajanderi* [33]. Таким образом, климатические, географические и экологические особенности места произрастания оказывали более сильное воздействие на метаболитические профили растений, чем видовые особенности лиственниц Каяндера и Гмелина.

Заключение

В ходе проведенного хемотаксономического исследования трех видов лиственниц (*Larix sibirica*, *Larix gmelinii* и *Larix cajanderi*), произрастающих в однотипных условиях, установлено, что метаболомы различных органов (хвоя, кора и шишки) *Larix gmelinii* и *Larix cajanderi* кластеризовались в одну группу по результатам обра-

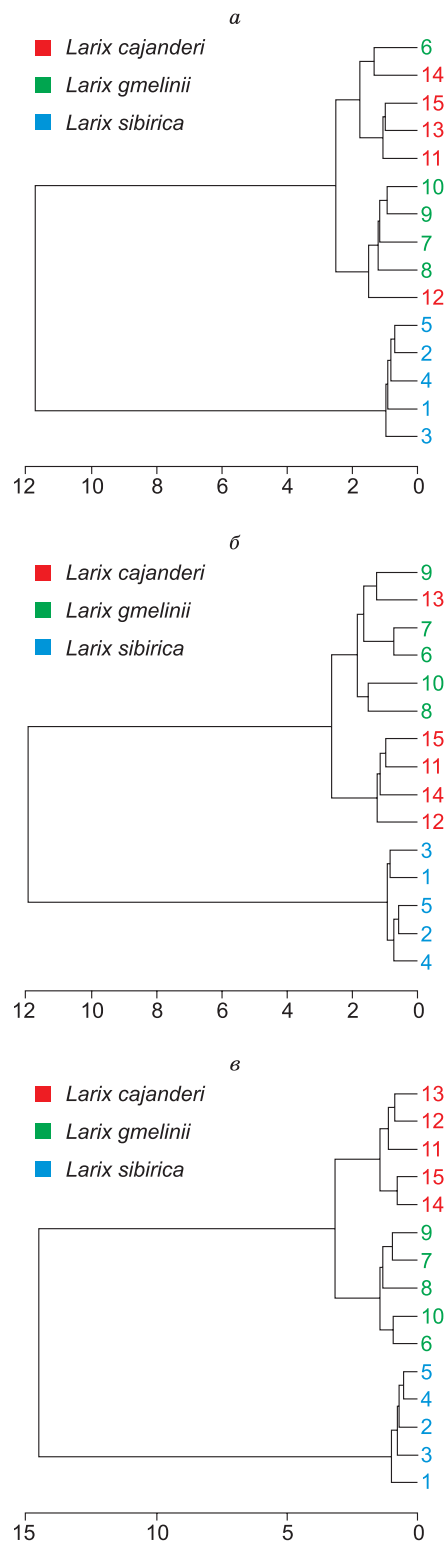


Рис. 3. Дендрограмма иерархической кластеризации метаболомов хвои (а), коры (б) и шишек (в) *Larix sibirica*, *Larix gmelinii* и *Larix cajanderi* в условиях Якутии

Fig. 3. Dendrogram illustrating the hierarchical clustering of metabolomes in needles (а), bark (б), and cones (в) of *Larix sibirica*, *Larix gmelinii*, and *Larix cajanderi* in Yakutia

Основные видоспецифичные вторичные метаболиты в тканях рода *Larix*

Main species-specific secondary metabolites present in the tissues of the genus *Larix*

Орган	Класс соединений*	t _R	Основные ионы**	<i>L. sibirica</i>	<i>L. gmelinii</i>	<i>L. cajanderi</i>
Хвоя	Терпен	28,793	270; 360; 537	—	+	+
	Фенол	38,960	487; 559; 683	+	—	—
Кора	Терпены	19,322	171; 212; 315	—	+	+
		25,404	265; 355; 456	—	+	+
		26,746	255; 270; 349	—	+	+
		27,610	255; 275; 396	—	+	+
		29,867	257; 270; 446	+	—	—
Шишки	Терпены	28,978	255; 270; 469	—	+	+
		29,859	257; 360; 392	+	—	—
		38,809	270; 460; 548	—	+	+
	Фенолы	20,094	220; 275; 323	—	+	+
		24,506	307; 355; 458	—	+	+
		38,004	369; 561; 633	—	+	+
		39,069	354; 458; 548	—	+	+
		39,153	245; 380; 516	—	+	+

Примечание. * — для обнаруженных вещества удалось идентифицировать только класс соединений в соответствии NIST 2020; ** — основные ионы веществ получены методом электронной ионизации (EI) на ГХ-МС.

Note. * For the detected substances, only the class of compounds could be identified according to NIST 2020; ** The main ions of the substances were obtained using electron ionization (EI) on GC-MS.

ботки данных методом главных компонент и иерархической кластеризации. Полученные данные могут свидетельствовать, что исследуемые виды являются близкими в роду *Larix*, что, скорее всего, вызвано аналогичными экологическими условиями их произрастания. Полученные данные подтверждают, что экологические факторы, такие как почвенные условия, влажность и температура, оказали более выраженное влияние на химический состав исследуемых тканей, чем таксономические различия, что подчеркивает значимость экологии при изучении систематики растений.

Данная работа также подтверждает, что хемотаксономические исследования, основанные на анализе метаболомных профилей, открывают новые горизонты для дальнейших исследований. Полученные данные могут стать основой для более глубокого понимания биохимических механизмов, определяющих адаптацию хвойных древесных растений к местным экологическим условиям. В будущем использование молекулярно-генетических методов вместе с метаболомным анализом может привести к более полному пониманию видового разнообразия и систематики рода *Larix*, а также помочь в разрешении существ-

ующих споров о таксономической принадлежности различных популяций и экотипов.

Список литературы / References

1. *Лесной фонд России*. Справочник. Книга для Лесного фонда Российской Федерации / Всероссийский научно-информационный центр лесных исследований Федеральной службы леса. М.: Рослесхоз; 1999. 280 с.
Forest Fund of Russia. Handbook. Book for the Forest Fund of the Russian Federation / All-Russian Scientific and Information Center for Forest Research of the Federal Forestry Service. Moscow: Rosleskhoz Publ.; 1999. 280 p. (In Russ.)
2. Сукачев В.Н. О двух новых ценных для лесного хозяйства древесных породах. *Труды и исследования по лесничему хозяйству и лесной промышленности*. 1931;(10):1–20.
Sukachev V.N. On two new valuable tree species for forestry. *Trudy i issledovaniya po lesnichemu khozyaystvu i lesnoy promyshlennosti* = *Works and research on forestry and forest industry*. 1931;(10):1–20. (In Russ.)
3. Колесников Б.П. К систематике и истории развития лиственниц секции *Pauciseriales* Patshke. В кн.: Комаров В.Л. (ред.) *Материалы по истории флоры и растительности СССР*. М.–Л.: Изд-во Акад. наук СССР; 1946. С. 21–86.
Kolesnikov B.P. On the systematics and development history of larches of the *Pauciseriales* Patshke section. In:

- Komarov V.L. (ed.) *Materials on the history of flora and vegetation of the USSR*. Moscow–Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences. 1946, pp. 21–86. (In Russ.)
4. Коропачинский И.Ю. Голосеменные, Гречиховые, Камнеломковые, Бобовые, Рутовые, Крушиновые-Лоховые, Ворсянковые, Вьюнковые, Вербеновые. В кн.: *Сосудистые растения советского Дальнего Востока = Plantae vasculares orientis extremi sovietici*. Том. 4. Л.: Наука; 1989. С. 9–25.
- Koropachinsky I.Yu. Gymnosperms, Buckwheat, Saxifrage, Legumes, Rutaceae, Buckthorn-Fleecy, Villus, Convolvulus, Verbenaceae. In: *Vascular plants of the Soviet Far East = Plantae vasculares orientis extremi sovietici*. Volume 4. Leningrad: Nauka; 1989, pp. 9–25. (In Russ.)
5. Коропачинский И.Ю., Встовская Т.Н. *Древесные растения азиатской России*. Новосибирск: Изд-во СО РАН фил. «Гео»; 2002. 706 с.
- Koropachinsky I.Yu., Vstovskaya T.N. *Woody plants of Asian Russia*. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, “Geo”; 2002. 706 p. (In Russ.)
6. Бобров Е.Г. *Лесообразующие хвойные СССР*. Л.: Наука; 1978. 189 с.
- Bobrov E.G. *Forest-forming conifers of the USSR*. Leningrad: Nauka; 1978. 189 p. (In Russ.)
7. Farjon A. *World checklist and bibliography of conifers*. Kew: Royal Botanic Gardens; 2001. 309 p.
8. Farjon A. *A bibliography of conifers: selected literature on taxonomy and related disciplines of the Coniferales*. Kew: Royal Botanic Gardens; 2005. 218 p.
9. Govaerts R., Farjon A. *World Checklist of Pinaceae*. Kew: Royal Botanic Gardens; 2010.
10. Farjon A., Filler D. *An atlas of the world's conifers: an analysis of their distribution, biogeography, diversity and conservation status*. Leiden, Boston: Brill; 2013. 524 p.
11. Christensen K.I. Coniferopsida. In: Jonsell B. (ed.) *Flora Nordica, vol. 1*. The Bergius Foundation, Stockholm; 2000, pp. 91–115.
12. *World Checklist Of Selected Plant Families*. Kew: Royal Botanic Gardens. 2018.
13. Ветрова В.П., Синельникова Н.В., Барченков А.П. Изменчивость и дифференциация *Larix cajanderi*, *L. dahurica* и *L. sibirica* по форме семенных чешуй шишек. *Turczaninowia*. 2018;21(2):86–100. <https://doi.org/10.14258/turczaninowia.21.2.10>
- Vetrova V.P., Sinelnikova N.V., Barchenkov A.P. Variability and differentiation of *Larix cajanderi*, *L. dahurica* and *L. sibirica* on shape of cone scales. *Turczaninowia*. 2018;21(2):86–100. (In Russ.) <https://doi.org/10.14258/turczaninowia.21.2.10>
14. Koropachinskii I.Y., Milyutin L.I. Botanical-geographical and forestry aspects of introgressive hybridization of the Gmelin's larch (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.) and Cajander larch (*L. cajanderi* Mayr). *Contemporary Problems of Ecology*. 2011;4:167–177. <https://doi.org/10.1134/S1995425511020081>
15. Орлова Л.В. Конспект дикорастущих и некоторых интродуцированных видов рода *Larix* Mill. (Pinaceae) флоры Восточной Европы. *Новости систематики высших растений*. 2011;43:5–18.
- Orlova L.V. The synopsis of wild and some introduced species of the genus *Larix* Mill. (Pinaceae) in the flora of the East Europe. *Novitates Systematicae Plantarum Vascularium*. 2011;43:5–18. (In Russ.)
16. Абаймов А.П., Коропачинский И.Ю. *Лиственницы Гмелина и Каяндера*. Новосибирск: Наука; 1984. 121 с.
- Abaimov A.P., Koropachinsky I.Yu. *Larix gmelinii and Larix cajanderi*. Novosibirsk: Nauka; 1984. 121 p. (In Russ.)
17. Барченков А.П., Милютин Л.И. Изменчивость генеративных органов лиственниц Гмелина и Каяндера в Восточной Сибири. *Хвойные бореальной зоны*. 2008;25(1–2):37–43.
- Barchenkov A.P., Milyutin L.I. Variability of generative organs of Gmelin and Cajander larches in Eastern Siberia. *Conifers of the Boreal Zone*. 2008;25(1–2):37–43. (In Russ.)
18. Abaimov A.P., Milyutin L.I., Lesinski J.A., Martinsson O. *Variability and ecology of Siberian larch species*. 1998. 123 p.
19. Semerikov V.L., Zhang H., Sun M., Lascoux M. Conflicting phylogenies of *Larix* (Pinaceae) based on cytoplasmic and nuclear DNA. *Molecular Phylogenetics and Evolution*. 2003;27(2):173–184.
20. Kozyrenko M.M., Artyukova E.V., Reunova G.D., et al. Genetic diversity and relationships among Siberian and Far Eastern larches inferred from RAPD analysis. *Russian Journal of Genetics*. 2004;(40):401–409.
21. Семериков В.Л., Полежаева М.А. Структура изменчивости митохондриальной ДНК лиственниц Восточной Сибири и Дальнего Востока. *Генетика*. 2007;43(6):782–789.
- Semerikov V.L., Polezhaeva M.A. Structure of mitochondrial DNA variability of larches in Eastern Siberia and the Far East. *Genetics*. 2007;43(6):782–789. (In Russ.)
22. Polezhaeva M.A., Lascoux M., Semerikov V.L. Cytoplasmic DNA variation and biogeography of *Larix* Mill. in Northeast Asia. *Molecular Ecology*. 2010;19(6):1239–1252.
23. Ларионова А.Я., Орешкова Н.В. Генетический полиморфизм лиственниц. Изоэнзимный полиморфизм. В кн.: Ефремов С.П., Милютин Л.И. (ред.) *Биоразнообразие лиственниц Азиатской России*. Новосибирск: ГЕО; 2010. С. 51–71.
- Larionova A.Ya., Oreshkova N.V. Genetic polymorphism of larches. Isoenzyme polymorphism. In: Efremov S.P., Milyutin L.I. (eds.) *Larch biodiversity of Asian Russia*. Novosibirsk: GEO; 2010, pp. 51–71. (In Russ.)
24. Орешкова Н.В., Ветрова В.П., Синельникова Н.В. Генетическая и фенотипическая изменчивость *Larix cajanderi* Mayr в северной части Российской Федерации. *Contemporary Problems of Ecology*. 2015;(8):9–20.

25. Синельникова Н.В., Пахомов М.Н. Морфологическая изменчивость лиственницы Каяндера (*Larix cajanderi* Mayr) в Оротукской котловине (долина р. Колыма). *Turczaninowia*. 2011;14(3):62–68.
- Sinelnikova N.V., Pakhomov M.N. Morphological variability of Cajander larch (*Larix cajanderi* Mayr) in the Orotuk basin (Kolyma river valley). *Turczaninowia*. 2011;14(3):62–68. (In Russ.)
26. Журавлев Ю.Н., Козыренко М.М., Васюткина Е.А. и др. ДНК-полиморфизм. В кн.: Ефремов С.П., Милютин Л.И. (ред.) *Биоразнообразие лиственниц Азиатской России*. Новосибирск: ГЕО; 2010. С. 72–91.
- Zhuravlev Yu.N., Kozurenko M.M., Vasyutkina E.A., et al. DNA polymorphism. In: Efremov S.P., Milutin L.I. (eds.) *Biodiversity of larches of Asian Russia*. Novosibirsk: GEO; 2010, pp. 72–91. (In Russ.)
27. Максимов Т.Х. Круговорот углерода в лиственных лесах якутского сектора криолитозоны: Дис. ... докт. биол. наук. Красноярск; 2007. 88 с.
- Maksimov T.Kh. Carbon cycle in larch forests of the Yakut sector of the cryolithozone: Diss. ... Doct. Sci, Krasnoyarsk; 2007. 88 p. (In Russ.)
28. Петрова Н.В., Сазанова К.В., Медведева Н.А., Шаварда А.Л. Особенности метаболомного профиля на разных стадиях онтогенеза *Prunella vulgaris* (Lamiaceae) при выращивании в климатической камере. *Химия растительного сырья*. 2018;(3):139–147. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2018033798>.
- Petrova N.V., Sazanova K.V., Medvedeva N.A., Shavarda A.L. Metabolomic profile at the different stages of *Prunella vulgaris* (Lamiaceae) ontogenesis at growing in the climate chamber. *Khimiya Rastitelnogo Syr'ya*. 2018;(3):139–147. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2018033798>.
- (3):139–147. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2018033798>. (In Russ.)
29. Goryachkina O.V., Badaeva E.D. Muratova E.N., Zelenin A.V. Molecular cytogenetic analysis of Siberian Larix species by fluorescence in situ hybridization. *Plant Systematics and Evolution*. 2013;299:471–479. (In Russ.) <https://doi.org/10.1007/s00606-012-0737-y>.
30. Сукачев В.Н. К истории развития лиственниц. *Лесное дело. М.–Л.; 1924. С. 12–44.*
- Sukachev V.N. On the development history of larches. *Forestry*. Moscow-Leningrad; 1924, pp. 12–44. (In Russ.)
31. Дылис Н.В. *Лиственница Восточной Сибири и Дальнего Востока*. М.: Издательство Академии наук СССР; 1961. 210 с.
- Dylis N.V. *Larch of Siberia and the Far East*. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1961. 210 p. (In Russ.)
32. Бобров Е.Г. *История и систематика лиственниц*. Л.: Наука; 1972. 96 с.
- Bobrov E.G. *History and systematics of larches*. Leningrad: Nauka; 1972. 96 p. (In Russ.)
33. Слепцов И.В., Рожина С.М. Эколого-географические особенности накопления метаболитов в хвое *Larix cajanderi* на территории Якутии *Химия растительного сырья*. 2021;(2):275–280. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2021028322>
- Sleptsov I.V., Rozhina S.M. Ecological and geographical features of the accumulation of metabolite in the needles of *Larix cajanderi* in the territory of Yakutia. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*. 2021;(2):275–280. (In Russ.) <https://doi.org/10.14258/jcprm.2021028322>

Об авторах

РОЖИНА Сахаяна Михайловна, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-7223-9297>, ResearcherID: AAO-3383-2020, Scopus Author ID: 57208332809, SPIN: 7002-5247, e-mail: sahayana-rozhina@mail.ru

МЕСТНИКОВА Анна Александровна, лаборант, <https://orcid.org/0009-0005-5057-9713>, ResearcherID: rid87289, SPIN: 7988-7524, e-mail: manyawkaye@gmail.com

СЛЕПЦОВ Игорь Витальевич, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-5980-579X>, ResearcherID: J-7736-2018, Scopus Author ID: 57200540770, SPIN: 9348-8311, e-mail: neroxasg@mail.ru

Вклад авторов

Рожина С.М. – создание черновика рукописи, редактирование рукописи, проведение исследования, проведение статистического анализа, визуализация; **Местникова А.А.** – создание черновика рукописи, проведение исследования, проведение статистического анализа; **Слепцов И.В.** – разработка концепции, методология, визуализация, редактирование рукописи

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

ROZHINA, Sakhaiana Mikhailovna, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-7223-9297>, ResearcherID: AAO-3383-2020, Scopus Author ID: 57208332809, SPIN: 7002-5247, e-mail: sahayana-rozhina@mail.ru

MESTNIKOVA, Anna Aleksandrovna, Laboratory Assistant, <https://orcid.org/0009-0005-5057-9713>, ResearcherID: rid87289, SPIN: 7988-7524, e-mail: manyawkaye@gmail.com

SLEPTSOV, Igor Vitalievich, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5980-579X>, ResearcherID: J-7736-2018, Scopus Author ID: 57200540770, SPIN: 9348-8311, e-mail: neroxasg@mail.ru

Authors' contribution

Rozhina S.M. – writing – original draft, writing – review & editing, investigation, formal analysis, visualization; **Mestnikova A.A.** – writing – original draft, investigation, formal analysis; **Sleptsov I.V.** – conceptualization, methodology, visualization, writing – review & editing

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 12.12.2024

Поступила после рецензирования / Revised 06.05.2025

Принята к публикации / Accepted 14.05.2025



Оригинальная статья

Особенности биомониторинга урбанизированных территорий с использованием флуктуирующей асимметрии разных видов древесных растений (на примере Иркутска)

Г. В. Чудновская, О. В. Чернакова✉

Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, г. Иркутск, Российская Федерация
✉ chernakova-o@list.ru

Аннотация

Для оценки качества среды по состоянию живых существ наряду с рекомендованной *Betula pendula* Roth. можно использовать другие широко распространенные в городах древесные растения. Материал был собран в 2018–2024 гг. в г. Иркутск. В качестве объектов научных исследований были выбраны 12 массовых видов древесных растений. В качестве фактора влияния учитывался автомобильный транспорт. Было заложено 202 пробные площадки в трех зонах: транспортной, селитебной и рекреационной. Средние показатели флуктуирующей асимметрии между транспортной зоной с интенсивным движением и рекреационной у *Ulmus parvifolia* увеличиваются в 1,41, *Pyrus ussuriensis* – в 1,36, *Padus maackii* – в 1,34, *Padus avium*, *Acer negundo* и *Betula pendula* – в 1,33, *Acer ginnala* – в 1,29 раза, что указывает на высокую их чувствительность к исследуемому фактору. У *Populus alba* и *Malus baccata* напряженность воздействия присутствует, но изменения менее выражены (разница в 1,17, и 1,23 раза соответственно). У *Syringa vulgaris* и *Syringa josikaea* значительных колебаний в показателях стабильности развития между всеми исследованными зонами не наблюдается. У *Populus balsamifera* различия в показателях флуктуирующей асимметрии в зависимости от интенсивности транспортного потока не выявлены. Полученные показатели флуктуирующей асимметрии позволили разработать шкалы для восьми видов фанерофитов, которые можно применять в мониторинге состояния природной среды урбанизированных территорий. Применение флуктуирующей асимметрии позволяет осуществлять достоверную оценку показателей стабильности развития самих древесных растений и тем самым грамотно и целенаправленно осуществлять подбор видов с определенными параметрами восприятия негативного воздействия для озеленения городов. Для его проведения можно использовать «коэффициент различия стабильности развития», который учитывает видовые отличия изучаемых признаков, используя в качестве базового значение с рекреационных территорий.

Ключевые слова: урбанизированная территория, стабильность развития, флуктуирующая асимметрия, автотранспортная нагрузка, биоиндикация, древесные растения

Финансирование. Исследования выполнены в рамках темы «Мониторинг состояния животного и растительного мира Восточной Сибири» (рег. номер АААА-А17-117120640050-1), подтемы кафедры технологии в охотничьем и лесном хозяйстве Иркутского ГАУ «Совершенствование оценки биологических ресурсов и технологии в охотничьем и лесном хозяйстве Восточной Сибири».

Для цитирования: Чудновская Г.В., Чернакова О.В. Особенности биомониторинга урбанизированных территорий с использованием флуктуирующей асимметрии разных видов древесных растений (на примере Иркутска). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(2):260–271. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-260-271>

Original article

An investigation of biomonitoring in urban environments through the assessment of fluctuating asymmetry in diverse species of woody plants: a case study conducted in Irkutsk

Galina V. Chudnovskaya, Olga V. Chernakova✉

Ezhevsky Irkutsk State Agrarian University, Irkutsk, Russian Federation
✉ chernakova-o@list.ru

Abstract

For the assessment of environmental quality through living beings, it is possible to employ woody plant species that are commonly found in urban settings, alongside the suggested species *Betula pendula* Roth. The data for this research

were gathered between 2018 and 2024 in Irkutsk, focusing on twelve prevalent species of woody plants as the subjects of scientific inquiry. The effects of motor vehicle traffic were identified as a significant factor influencing the research outcomes. In Irkutsk, a total of 202 test sites were established across three specific zones: transportation, residential, and recreational. The average values of fluctuating asymmetry in the transportation zone, which is characterized by heavy traffic, were observed to increase in comparison to the recreational zone. Specifically, *Ulmus parvifolia* exhibited an increase of 1.41 times, *Pyrus ussuriensis* showed an increase of 1.36 times, *Padus maackii* increased by 1.34 times, and both *Padus avium*, *Acer negundo*, and *Betula pendula* demonstrated an increase of 1.33 times. Additionally, *Acer ginnala* exhibited an increase of 1.29 times. These findings indicate a significant sensitivity of these species to the examined environmental factor. In contrast, *Populus alba* and *Malus baccata* displayed signs of stress due to the impact of traffic, although the observed changes were less pronounced, with differences of 1.17 and 1.23 times, respectively. No significant fluctuations in development stability indicators were noted for *Syringa vulgaris* and *Syringa josikaea* across the studied zones. Furthermore, *Populus balsamifera* did not reveal any differences in fluctuating asymmetry indicators in relation to the intensity of traffic flow. The fluctuating asymmetry indicators obtained from this research contributed to the development of scales for eight phanerophyte species, which can be employed in monitoring the condition of the natural environment in urbanized areas. The application of fluctuating asymmetry provides a reliable means of assessing the development stability indicators of woody plants, thereby enabling the informed and targeted selection of species with specific parameters for mitigating negative impacts in urban greening initiatives. To achieve this, the “development stability difference coefficient which accounts for species-specific variations in the examined characteristics, using values derived from recreational areas as a baseline.

Keywords: urbanized territory, development stability, fluctuating asymmetry, traffic intensity, bioindication, woody plants

Funding. This study was conducted as part of the project titled “Monitoring the condition of animal and plant life in Eastern Siberia” (reg. No.: AAAA-A17-117120640050-1), along with a subproject from the Department of Technology in Hunting and Forestry at Irkutsk State Agrarian University, titled “Enhancing the assessment of biological resources and production methods in the Hunting and Forestry Sectors of Eastern Siberia.”

For citation: Chudnovskaya G.V., Chernakova O.V. An investigation of biomonitoring in urban environments through the assessment of fluctuating asymmetry in diverse species of woody plants: a case study conducted in Irkutsk. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(2):260–271. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-260-271>

Введение

Флуктуирующая асимметрия (ФА) представляет собой небольшие, случайные отклонения от идеальной билатеральной симметрии, отражающие стабильность развития организма в конкретных условиях среды. В последние десятилетия этот показатель находит все большее применение в биомониторинге трансформированных территорий, особенно урбанизированных, подверженных комплексному воздействию антропогенных факторов. Оценка экологического состояния на основе ФА позволяет оценить качество среды по морфологическим признакам организмов, подвергающихся воздействию различных стрессоров, выявить территории с повышенной нагрузкой, определить источники загрязнения и проследить динамику состояний. Флуктуирующая асимметрия, интегрированная с другими методами оценки состояния окружающей среды, предоставляет ценную информацию для принятия экологически обоснованных управленческих решений в условиях городской инфраструктуры [1–5].

Основными объектами для осуществления биомониторинга населенных пунктов могут служить древесные растения, участвующие в озеленении этих территорий, так как все негативные воздей-

ствия, связанные с влиянием широкого спектра факторов, таких как химическое и физическое загрязнение, патогены, изменение климата и фрагментация среды обитания, несомненно, оказывают непосредственное и серьезное действие на их стабильность развития и физиологическое состояние.

Методическими рекомендациями по выполнению оценки качества среды по состоянию живых существ, утвержденных распоряжением Росэкологии, для осуществления биоиндикации предписано использовать широко распространенный вид *Betula pendula* Roth [1]. Значительная часть научных работ исследователей, применяющих данную методику, также посвящены оценке флуктуирующей асимметрии, характеризующей стабильность развития именно данного растения. При этом количество фоновых видов, задействованных в зеленом строительстве мегаполисов и городов, довольно обширно и многие фанерофиты занимают обширные пространства и массово произрастают как в промышленных и транспортных зонах, так и на придомовых территориях, в скверах и парках. В связи с этим ассортимент видов, которые можно использовать в качестве объектов для биомониторинга состоя-

ния окружающей среды урбанизированных территорий, несомненно, может быть существенно расширен.

Кроме того, флуктуирующая асимметрия может позволить провести оценку стабильности самих древесных растений с учетом межродовой и межвидовой изменчивости, обусловленной генетическими факторами, и тем самым определить виды, наиболее приспособленные к существованию в определенных условиях с различным уровнем воздействия многообразных антропогенных факторов. Это дает возможность при планировании и принятии решений для проведения работ по озеленению использовать растения, способные произрастать в допустимых величинах загрязнения.

Материалы и методика

Материал для изучения был собран в 2018–2024 гг. в г. Иркутск. В качестве объектов научных исследований были выбраны 12 видов древесных растений, достаточно массово распространенных в зеленых насаждениях города: *Padus avium* Mill., *Padus maackii* (Rupr.) Kom., *Populus alba* L., *Populus balsamifera* L., *Acer negundo* L., *Acer ginnala* Maxim., *Betula pendula* Roth, *Pyrus ussuriensis* Maxim., *Syringa vulgaris* L., *Syringa josikaea* Jacq. fil. ex Reichenb., *Malus baccata* (L.) Borkh. и *Ulmus parvifolia* Jacq. [6–11].

В качестве основного фактора влияния учитывали автомобильный транспорт. Для определения стабильности развития было заложено 202 пробные площадки в трех административных округах г. Иркутск, в трех зонах: транспортной, селитебной и рекреационной. При этом в транспортной зоне отдельно оценивались участки, расположенные вдоль магистралей с высоким трафиком и дорог, примыкающих к ним, а также находящихся внутри жилых кварталов, где интенсивность движения автомобилей значительно ниже. Для чистоты эксперимента учеты проводили в местах с отсутствием прессинга от промышленных предприятий (рис. 1).

Для определения флуктуирующей асимметрии на 50 собранных с каждой пробной площадки листовых пластинок было получено шесть–восемь метрических показателей. В методических рекомендациях по оценке стабильности для древесных растений рекомендовано использовать пять измерений, при этом параметры, фиксирующие длину листьев, не учитываются. В связи с этим нами добавлены два дополнительных про-

мера (6 и 7), которые позволяют отследить данные сдвиги в симметрии. Кроме этого, был задействован еще один дополнительный метрический показатель, характеризующий ширину половинок листовых пластинок, измеренную от основания третьей жилки второго порядка (рис. 2).

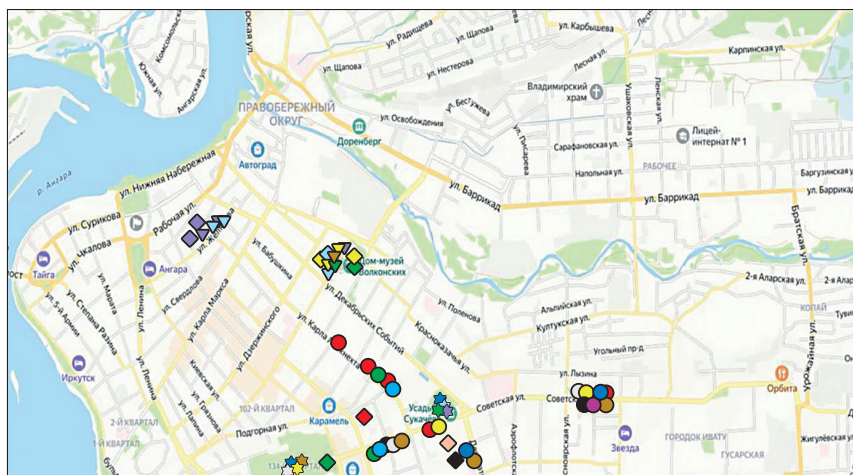
На наш взгляд, использовать метрические показатели, оценивающие длину второй жилки второго порядка и расстояние между концами первой и второй жилок второго порядка, учитываемые рядом исследователей [12–19], для видов с несовершенноперистым жилкованием нельзя, поскольку точно определить окончание жилок, которые раздваиваются и часто просто не доходят до края листа, не представляется возможным. Поэтому для *Padus avium*, *Padus maackii*, *Populus balsamifera*, *Pyrus ussuriensis*, *Syringa vulgaris*, *Syringa josikaea* и *Malus baccata* эти промеры не проводили.

При анализе морфологических характеристик *Populus alba* и *Acer ginnala* не учитывались параметры расстояния между основаниями первой и второй жилок второго порядка, а также расстояние от основания второй жилки второго порядка до вершины листовой пластинки. Данное решение было принято ввиду того, что у преобладающего числа исследованных листьев основания указанных жилок совпадали (рис. 4).

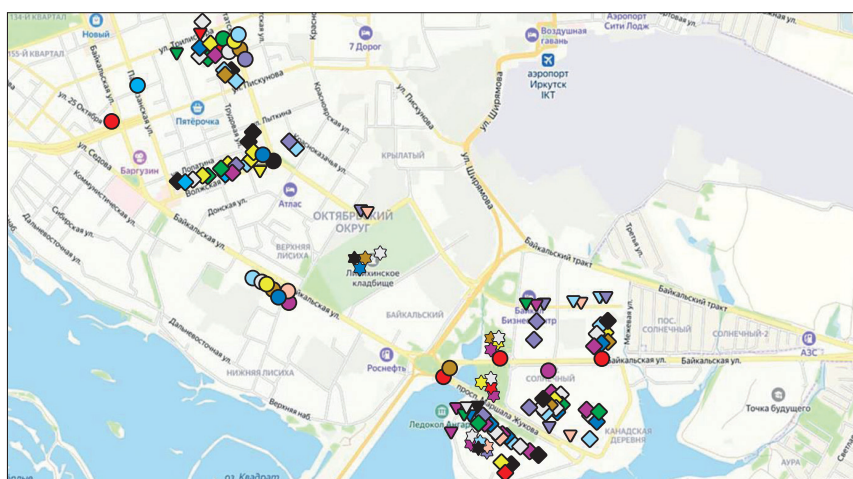
Результаты исследования и обсуждение

По результатам исследования получены данные стабильности развития древесных растений с пробных площадок и средние значения по зонам [6–11] (табл. 1).

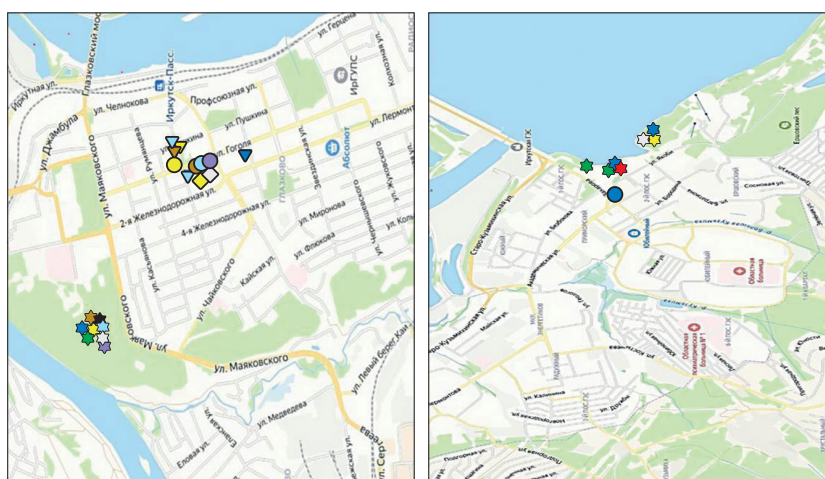
Установлено, что такие виды, как *Ulmus parvifolia*, *Betula pendula*, *Pyrus ussuriensis*, *Acer negundo*, *Padus maackii*, *Acer ginnala* и *Padus avium*, демонстрируют серьезное снижение уровня показателей стабильности развития по мере уменьшения влияния выбросов. При этом максимальные значения этих показателей наблюдаются на пробных площадках, расположенных вблизи дорог с интенсивным движением (транспортная зона), а минимальные – в рекреационных зонах. Различия в средних интегральных показателях флуктуирующей асимметрии между этими зонами у *Ulmus parvifolia* увеличиваются в 1,41, *Pyrus ussuriensis* – в 1,36, *Padus maackii* – в 1,34, *Padus avium*, *Acer negundo* и *Betula pendula* – в 1,33, *Acer ginnala* – в 1,29 раза, что указывает на высокую чувствительность этих видов к исследуемому фактору [6–8, 11].



Правобережный округ г. Иркутск



Октябрьский округ г. Иркутск



Свердловский округ г. Иркутск

Рис. 1. Схемы расположения пробных площадок

○ – *Betula pendula*; ● – *Pyrus ussuriensis*; ● – *Populus balsamifera*; ● – *Populus alba*; ● – *Acer ginnala*; ● – *Acer negundo*; ● – *Padus avium*; ● – *Syringa vulgaris*; ● – *Syringa josikaea*; ● – *Padus maackii*; ● – *Malus baccata*; ● – *Ulmus parvifolia*;

○ – транспортная зона, с высокой интенсивностью движения автотранспорта; ▽ – транспортная зона, со средней интенсивностью движения автотранспорта; ◇ – селитебная зона; ☆ – рекреационная зона

Fig. 1. Layout of test sites

○ – *Betula pendula*; ● – *Pyrus ussuriensis*; ● – *Populus balsamifera*; ● – *Populus alba*; ● – *Acer ginnala*; ● – *Acer negundo*; ● – *Padus avium*; ● – *Syringa vulgaris*; ● – *Syringa josikaea*; ● – *Padus maackii*; ● – *Malus baccata*; ● – *Ulmus parvifolia*; ○ – transport zone with high traffic intensity; ▽ – transport zone with medium traffic intensity; ◇ – residential zone; ☆ – recreational zone

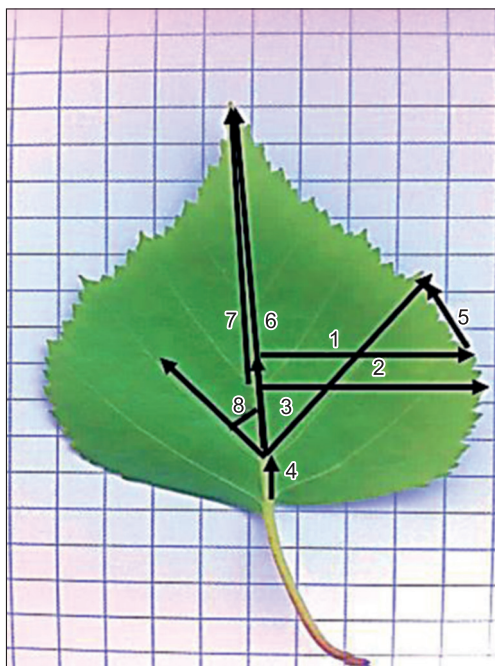


Рис. 2. Метрические показатели листовых пластинок для оценки флуктуирующей асимметрии.

1 – ширина половинки листовой пластинки, измеренная на середине ее длины; 2 – ширина половинки листовой пластинки, измеренная от основания третьей жилки второго порядка; 3 – длина второй жилки второго порядка; 4 – расстояние между основаниями первой и второй жилок второго порядка; 5 – расстояние между концами первой и второй жилок второго порядка; 6 – расстояние от основания второй жилки второго порядка до вершины листовой пластинки; 7 – расстояние от основания третьей жилки второго порядка до вершины листовой пластинки; 8 – угол между центральной жилкой и второй жилкой второго порядка

Fig. 2. Leaf blade metrics for assessing fluctuating asymmetry:

1 – width of the half of leaf blade measured at the middle of its length; 2 – width of half the of leaf blade measured from the base of the third vein of the second order; 3 – length of the second vein of the second order; 4 – distance between the bases of the first and second veins of the second order; 5 – distance between the ends of the first and second veins of the second order; 6 – distance from the base of the second vein of the second order to the apex of the leaf blade; 7 – distance from the base of the third vein of the second order to the apex of the leaf blade; 8 – angle between the central vein and the second vein of the second order width of half of the leaf blade was measured at the midpoint of its length

В научных публикациях, посвященных изучению ФА у данных видов деревьев, также отмечается их отрицательная реакция на действие антропогенных факторов, в том числе и транспортной инфраструктуры.

Е.Г. Шадрина, В.М. Захаров (совместно с другими авторами) подчеркивают тенденцию нарастания степени нарушения стабильности развития березы под воздействием возрастающей антропогенной нагрузки в городских условиях [20, 21]. По данным Г.Р. Хикматуллиной, интегральные показатели флуктуирующей асимметрии у *Betula pendula* на территориях с большой транспортной нагрузкой увеличиваются в сравнении с парковыми зонами в г. Ижевск в 1,23, г. Агрыз – в 1,32 раза, т. е. сопоставимо с полученными нами результатами [22].

А.Е. Максименко, Л.Н. Сунцова, Е. М. Иншаков по результатам обследования мест произрастания черемухи обыкновенной в г. Красноярск оценивают данный вид как среднеустойчивый к техногенному загрязнению, но при этом не рекомендуют осуществлять ее посадки вблизи магистралей [23]. Эти же исследователи, анализируя эффективность использования черемухи Маака в озеленении данного города, пришли к выводу, что под воздействием антропогенной нагрузки у нее происходит уменьшение синтеза биомассы фотосинтетического аппарата, изменяются биометрические показатели и темпы прироста годичных побегов [24].

Аналогичное заключение о негативном влиянии промышленного загрязнения на состояние растений в городских условиях приводит И.С. Коротченко в отношении вяза мелколистного на основании данных об увеличении показателей флуктуирующей асимметрии и изменений морфологических характеристик листьев [25]. А.И. Татарицев, в свою очередь, указывает, что посадки данного вида в г. Красноярск демонстрируют наилучшее состояние в районах с минимальным уровнем техногенного воздействия [26].

Угнетающее воздействие на состояние насаждений клена ясенелистного по мнению К.Л. Нарваткина, Д.И. Башмаков, в ряду с другими фак-

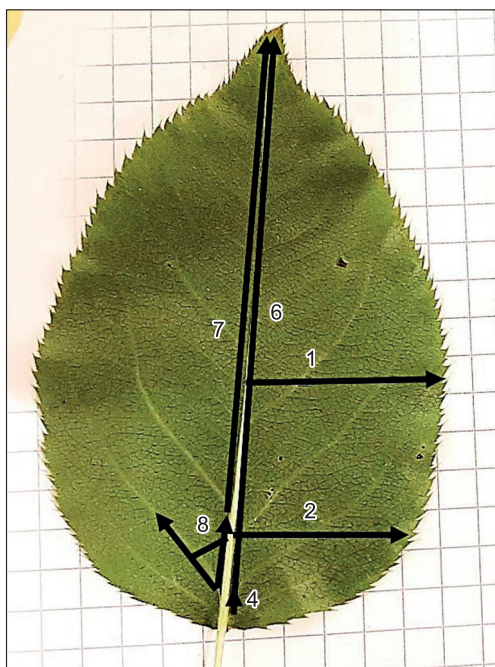


Рис. 3. Метрические показатели листовых пластинок древесных растений с несовершенноперистым жилкованием

Fig. 3. Leaf blades metrics in woody plants with imperfect veining

торами комплексного антропогенного влияния урбанизированных ландшафтов вызывают сильные загрязнения, связанные с выбросами автотранспорта, что приводит к существенному варьированию значений флуктуирующей асимметрии [27].

Е. П. Черных, Г. Г. Первышина, О. В. Гоголева отмечают, что на стабильность развития черемухи обыкновенной первостепенное влияние оказывает интенсивность движения автомобильного транспорта. По их данным, на участках ее произрастания с высоким трафиком даже на расстоянии 8 м от магистрали показатели ФА были выше почти в два раза, чем у экземпляров, находящихся у дорог пятой категории [17].

У *Populus alba* и *Malus baccata* наблюдается тенденция к увеличению стабильности развития с ростом напряженности воздействия, однако изменения менее выражены (разница в 1,17, и 1,23 раза соответственно) [10].

У *Syringa vulgaris* и *Syringa josikaea* значительных колебаний в показателях стабильности развития в зависимости от уровня антропогенного воздействия между всеми исследованными зонами не наблюдается. Коэффициент увели-

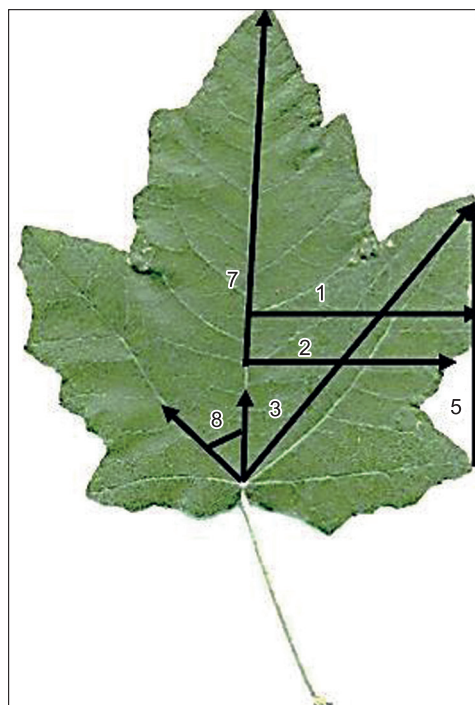


Рис. 4. Метрические показатели листовых пластинок *Populus alba* и *Acer ginnala*

Fig. 4. Metric parameters of leaf blades *Populus alba* and *Acer ginnala*

чения от рекреационной зоны к транспортной, с интенсивным трафиком составляет, 1,13 и 1,07 соответственно.

У *Populus balsamifera* различия в показателях флуктуирующей асимметрии в зависимости от интенсивности транспортного потока не выявлены. По всей видимости, на данный вид большее влияние оказывают перестойный возраст деревьев и связанное с этим критическое состояние большинства экземпляров, произрастающих в г. Иркутск [9]. Е.Г. Шадрин В.Ю. Солдатов и Н.В. Турмухамедова также отмечают возрастание ФА у сенильных растений [28].

Различные виды фанерофитов характеризуются индивидуальной асимметрией, что требует для сравнения их стабильности развития по флуктуирующей асимметрии использования единого показателя. Для этой цели предложен коэффициент различия стабильности развития, основанный на закономерностях шкалы оценки качества среды по величине флуктуирующей асимметрии листьев *Betula pendula* [1]. В качестве эталонной точки (коэффициент 1,00) приняты значения, полученные с рекреационных территорий, которые характеризуются минимальным техногенным

Таблица 1

Показатели стабильности развития древесных растений на территории г. Иркутск

Table 1

Indicators of the Development Stability of Woody Plants in Irkutsk

Растение	Средние показатели стабильности развития по зонам			
	Транспортная, с интенсивным движением автотранспорта	Транспортная, со средней интенсивностью движения автотранспорта	Селитебная	Рекреационная
<i>Betula pendula</i>	0,040±0,0018	0,037±0,0028	0,034±0,0010	0,030±0,0010
<i>Pyrus ussuriensis</i>	0,060±0,0036	0,051±0,0027	0,050±0,0017	0,044±0,0023
<i>Populus balsamifera</i>	0,053±0,0017	0,053±0,0034	0,042±0,0024	0,050±0,0025
<i>Populus alba</i>	0,055±0,0016	0,053±0,0029	0,049±0,0021	0,047±0,0022
<i>Acer ginnala</i>	0,054±0,0022	0,051±0,0021	0,045±0,0013	0,042±0,0015
<i>Acer negundo</i>	0,069±0,0027	0,061±0,0030	0,053±0,0014	0,052±0,0020
<i>Padus avium</i>	0,036±0,0017	0,033±0,0022	0,031±0,0014	0,027±0,0011
<i>Padus maackii</i>	0,047±0,0038	0,042±0,0042	0,037±0,0021	0,035±0,0024
<i>Syringa vulgaris</i>	0,053±0,0021	0,050±0,0031	0,050±0,0015	0,047±0,0040
<i>Syringa josikaea</i>	0,045±0,0019	0,045±0,0031	0,043±0,0011	0,042±0,0020
<i>Malus baccata</i>	0,053±0,0046	0,050±0,0040	0,047±0,0035	0,043±0,0034
<i>Ulmus parvifolia</i>	0,069±0,0047	0,064±0,0046	0,054±0,0040	0,049±0,0035

воздействием. Все последующие коэффициенты определены посредством пропорционального преобразования крайних значений флуктуирующей асимметрии в баллы существующей шкалы качества среды. Отношение средних показателей стабильности развития транспортных и жилых зон к средним показателям стабильности развития рекреационных позволяет рассчитать коэффициенты различия стабильности развития, что дает возможность непосредственно оценить уровень реакции отдельных видов растений на фактор влияния и сравнить стабильность развития разных видов (табл. 2).

Таблица 2

Коэффициенты различия стабильности развития растений

Table 2

Coefficients of difference in plant development stability

Величина коэффициента	Характеристика стабильности развития и устойчивости
1,00	Нулевая точка
1,01–1,11	Условно-нормальная
1,12–1,24	Высокая устойчивость
1,25 до 1,35	Средняя устойчивость
1,36 и более	Низкая устойчивость

Результаты дисперсионного анализа по выявлению уровня воздействия напряженности транспортного потока (высокий, средний, низкий и отсутствующий) на интегральные показатели стабильности развития изученных видов показали значимые значения у видов *Betula pendula*, *Acer ginnala*, *Padus avium*, *Padus maackii* и *Malus baccata*; у *Pyrus ussuriensis*, *Acer negundo* – ограниченные. У *Populus balsamifera*, *Populus alba*, *Ulmus parvifolia*, *Syringa vulgaris* и *Syringa josikaea* статистического влияния не было выявлено [6–11] (табл. 3).

Полученные показатели флуктуирующей асимметрии *Pyrus ussuriensis*, *Populus alba*, *Acer negundo*, *Acer ginnala*, *Padus avium*, *Padus maackii* и *Ulmus parvifolia* позволили разработать шкалы, которые можно успешно применять в мониторинге состояния природной среды урбанизированных территорий, а данные виды древесных растений использовать в качестве индикаторов, по которым можно фиксировать происходящие в ней изменения. Для характеристики качества среды, определенного как условно нормальное, приведены средние значения интегрального показателя флуктуирующей асимметрии с рекреационных территорий (табл. 4).

Заключение

Проведенные исследования и накопленные данные по стабильности развития древесных ра-

Таблица 3

**Результаты дисперсионного анализа по оценке влияния
интенсивности движения автотранспорта на стабильность
развития древесных растений в г. Иркутске**

Table 3

**The results of the ANOVA analysis for assessing
the influence of traffic intensity on the stability of tree plant development in Irkutsk**

Растение	Факторная дисперсия	Остаточная дисперсия	Степень влияния исследованного фактора	Критерий Фишера при вероятности $P = 0,95 \%$
<i>Betula pendula</i>	0,00031	0,00018	0,6288	$F_{\text{расч}} = 9,36 > F_{\text{табл}} = 3,20$
<i>Pyrus ussuriensis</i>	0,00047	0,00048	0,4931	$F_{\text{расч}} = 4,87 > F_{\text{табл}} = 3,29$
<i>Populus balsamifera</i>	0,00026	0,00055	0,3184	$F_{\text{расч}} = 1,87 < F_{\text{табл}} = 3,49$
<i>Populus alba</i>	0,00017	0,00037	0,3097	$F_{\text{расч}} = 1,40 < F_{\text{табл}} = 3,71$
<i>Acer ginnala</i>	0,00042	0,00041	0,5036	$F_{\text{расч}} = 5,41 > F_{\text{табл}} = 3,24$
<i>Acer negundo</i>	0,00107	0,00115	0,4826	$F_{\text{расч}} = 6,47 > F_{\text{табл}} = 3,07$
<i>Padus avium</i>	0,00021	0,00011	0,6426	$F_{\text{расч}} = 9,58 > F_{\text{табл}} = 3,24$
<i>Padus maackii</i>	0,00014	0,00006	0,7000	$F_{\text{расч}} = 4,70 > F_{\text{табл}} = 4,35$
<i>Syringa vulgaris</i>	0,00004	0,00018	0,1810	$F_{\text{расч}} = 0,89 < F_{\text{табл}} = 3,49$
<i>Syringa josikaea</i>	0,00002	0,00019	0,0991	$F_{\text{расч}} = 0,44 < F_{\text{табл}} = 3,49$
<i>Malus baccata</i>	0,00018	0,00014	0,5655	$F_{\text{расч}} = 6,56 > F_{\text{табл}} = 3,20$
<i>Ulmus parvifolia</i>	0,00109	0,00713	0,1324	$F_{\text{расч}} = 0,36 < F_{\text{табл}} = 4,35$

Таблица 4

**Шкалы оценки качества среды по величине флуктуирующей асимметрии листовой пластинки
для различных видов фанерофитов**

Table 4

**Scales for Evaluating Environmental Quality Based on the Magnitude of Fluctuating Asymmetry
in Leaf Blades of Various Phanerophyte Species**

Балл	Качество среды	Показатель стабильности развития (величина флуктуирующей асимметрии)						
		<i>Pyrus ussuriensis</i>	<i>Populus alba</i>	<i>Acer ginnala</i>	<i>Acer negundo</i>	<i>Padus avium</i>	<i>Padus maackii</i>	<i>Ulmus parvifolia</i>
I	Условно-нормальное	<0,044	<0,047	<0,042	<0,052	<0,027	<0,035	<0,049
II	Начальное (незначительное) отклонение от нормы	0,044–0,049	0,047–0,052	0,042–0,046	0,052–0,057	0,027–0,029	0,035–0,039	0,049–0,054
III	Средний уровень отклонения от нормы	0,050–0,055	0,053–0,058	0,047–0,052	0,058–0,064	0,030–0,033	0,040–0,043	0,055–0,061
IV	Существенные (значительные) отклонения от нормы	0,056–0,059	0,059–0,064	0,053–0,056	0,065–0,070	0,034–0,036	0,041–0,047	0,062–0,066
V	Критическое состояние	0,060 и более	0,065 и более	0,057 и более	0,071 и более	0,037 и более	0,048 и более	0,067 и более

стений, участвующих в озеленении крупных городских населенных пунктов, по флуктуирующей асимметрии листовых пластинок позволяют рекомендовать в качестве объектов для проведения биомониторинга за состоянием природной среды, наряду с *Betula pendula*, и другие фоно-

вые широко распространенные виды фанерофитов: *Pyrus ussuriensis*, *Populus alba*, *Acer negundo*, *Acer ginnala*, *Padus avium*, *Padus maackii* и *Ulmus parvifolia*.

В связи с тем что достаточно различимых отличий в стабильности развития *Syringa vulgaris*

Syringa josikaea и *Malus baccata* не выявлено, использование их биоиндикации в Восточной Сибири не представляется возможным. При этом не исключается возможность применения данных видов в биомониторинге территорий европейской части РФ с более комфортными для них условиями произрастания, прежде всего более мягким климатом.

Перестойные насаждения, к которым относятся большинство посадок *Populus balsamifera* в городах Сибири, слабо пригодны для биоиндикации, так как в большей степени отражают индивидуальные возрастные изменения стабильности развития растений, чем антропогенные воздействия.

Применение флуктуирующей асимметрии позволяет осуществлять достоверную оценку показателей стабильности развития самих древесных растений и тем самым грамотно и целенаправленно осуществлять подбор видов с определенными параметрами восприятия негативного воздействия в урбанизированной среде для зеленого строительства городов. Для проведения такого анализа целесообразно использовать показатель, способный при оценке флуктуирующей асимметрии принимать во внимание видовые отличия изучаемых признаков, к которым может относиться «коэффициент различия стабильности развития». При этом использование в качестве базового значения с рекреационных территорий, где данные особенности учтены, позволяет проводить сравнение величин этого коэффициента у различных видов.

Список литературы / References

1. Методические рекомендации по выполнению оценки качества среды по состоянию живых существ (оценка стабильности развития живых организмов по уровню асимметрии морфологических структур). Распоряжение Росэкологии от 16.10.2003 № 660. М.: Наука; 2003. 24 с.

Guidelines for evaluating environmental quality based on the condition of living organisms: An assessment of development stability in living organisms by the level of asymmetry of morphological structures. Decree of Ros ecology dated 16.10.2003, № 660. Moscow: Nauka; 2003. (In Russ.).

2. Шадрина Е.Г., Вольперт Я.Л. Практика оценки здоровья среды: эффективность применения показателя флуктуирующей асимметрии и других биоиндикационных подходов. *Жизнь Земли*. 2018;40(2):183–198.

Shadrina E.G., Vol'pert Ya.L. The practice of environmental health assessment: efficiency of fluctuating asymmetry and other bioindication-based approaches. *Zhizn Zemli [Life of the Earth]*. 2018;40(2):183–198. (In Russ.).

3. Захаров В.М., Трофимов И.Е. Морфогенетический подход к оценке среды: исследование стабильности развития. *Онтогенез*. 2017;48(6):433–442. <https://doi.org/10.7868/S0475145017060064>

Zaharov V.M., Trofimov I.E. Morphogenetic approach to estimation of environmental health: study of developmental stability. *Ontogenez*. 2017;48(6):433–442. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0475145017060064>

4. Захаров В.М., Трофимов И.Е. Оценка состояния биоразнообразия: исследование стабильности развития. *Известия Российской академии наук. Серия биологическая*. 2020;(2):115–123. <https://doi.org/10.31857/S0002332920020125>

Zaharov V.M., Trofimov I.E. Assessment of biodiversity status: study of developmental stability. *Biology Bulletin*. 2020;47(2):115–122. <https://doi.org/10.1134/S1062359020020120>

5. Адамович Т.А., Олькова А.С. Вариативность флуктуирующей асимметрии листьев *Betula pendula* Roth в зависимости от условий произрастания. *Siberian Journal of Sciences and Agriculture*. 2024;16(3):250–262. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2024-16-3-840>

Adamovich T.A., Olkova A.S. Variability of fluctuating asymmetry of *Betula pendula* Roth leaves depending on growing conditions. *Siberian Journal of Sciences and Agriculture*. 2024;16(3):250–262. (In Russ.) <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2024-16-3-840>

6. Чернакова О.В. Оценка стабильности развития *Acer ginnala* Maxim. в г. Иркутске по флуктуирующей асимметрии листьев. *Вестник ИрГЦХА*. 2019;(95):84–92.

Chernakova O.V. Evaluation of stability of *Acer ginnala* Maxim growth in Irkutsk city using the by fluctuating asymmetry of leaves. *Vestnik IrGSHA*. 2019;(95):84–92. (In Russ.).

7. Чудновская Г.В., Чернакова О.В. Показатели стабильности развития *Betula pendula* Roth, участвующей в озеленении г. Иркутска. *Вестник ИрГЦХА*. 2020;(100):100–111. <https://doi.org/10.51215/1999-3765-2020-100-100-111>

Chudnovskaya G.V., Chernakova O.V. Indicators of the developmental stability of *Betula pendula* Roth participating in the landscaping of the city of Irkutsk. *Vestnik IrGSHA*. 2020;(100):100–111. (In Russ.) <https://doi.org/10.51215/1999-3765-2020-100-100-111>

8. Чернакова О.В. Показатели стабильности развития *Pyrus ussuriensis* Maxim., участвующего в озеленении г. Иркутска. *Вестник ИрГЦХА*. 2021;6(107):93–106. <https://doi.org/10.51215/1999-3765-2021-107-93-114>

Chernakova O.V. Indicators of the stability of the development of *Pyrus ussuriensis* Maxim., participating in landscaping of Irkutsk. *Vestnik IrGSHA*. 2021;6(107):93–106. (In Russ.) <https://doi.org/10.51215/1999-3765-2021-107-93-114>

9. Чудновская Г.В., Чернакова О.В. Показатели стабильности развития *Populus balsamifera* L., участвующего в озеленении г. Иркутска. *Вестник ИрГЦХА*.

2021;(104):93–106. <https://doi.org/10.51215/1999-3765-2021-104-93-106>

Chudnovskaya G.V., Chernakova O.V. Indicators the of development stability of *Populus balsamifera* L., participating in landscaping the city of Irkutsk. *Vestnik IrGSHA*. 2021;(104):93–106. (In Russ.) <https://doi.org/10.51215/1999-3765-2021-104-93-106>

10. Чудновская Г.В., Чернакова О.В. Показатели стабильности развития *Malus baccata* (L.) Borkh., участвующего в озеленении г. Иркутска. *Вестник ИрГЦХА*. 2023;2(115):133–144. <https://doi.org/10.51215/1999-3765-2023-115-133-144>

Chudnovskaya G.V., Chernakova O.V. Indicators the of development stability of *Malus baccata* (L.) Borkh., participating in landscaping the city of Irkutsk. *Vestnik IrGSHA*. 2023;2(115):133–144. (In Russ.) <https://doi.org/10.51215/1999-3765-2023-115-133-144>

11. Чудновская Г.В., Чернакова О.В. Флуктуирующая асимметрия листа *Acer negundo* L. как индикатор состояния организма и качества городской среды. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(2):293–302. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-293-302>

Chudnovskaya G.V., Chernakova O.V. Fluctuating asymmetry of the leaf of *Acer negundo* L. as an indicator of the state of the organism and the quality of the urban environment. *Arctic and Subarctic Natural Resource*. 2023;28(2):293–302. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-293-302>

12. Кулагина В.А., Григорьева Н.Г. Листовые пластины тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) и сирени обыкновенной (*Syringa vulgaris*) как индикатор состояния среды территории г. Красноярск. В кн.: *Инновационные тенденции развития российской науки: Материалы XII международной научно-практической конференции молодых ученых, г. Красноярск, 08–09 апреля 2019 г.* Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет; 2019. С. 50–54.

Kulagina V.A., Grigorieva N.G. Leaves of balsamic poplar (*Populus balsamifera* L.) and oriental lilac (*Syringa vulgaris*) as within indicator of the environment of krasnoyarsk city. In: *Innovative trends in the development of Russian science: Proceedings of the 12th International Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Krasnoyarsk, April 8–9, 2019*. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Agrarian University; 2019, pp. 50–54. (In Russ.)

13. Коротченко И.С. Влияние теплоэнергетического комплекса г. Красноярск на величину флуктуирующей асимметрии листовой пластинки тополя бальзамического. *Вестник КрАСГАУ*. 2015;8(107):15–20.

Korotchenko I.S. The influence of Krasnoyarsk heat-power complex of on the size of the fluctuating asymmetry of the balsam poplar leaf plate. *Bulletin of KrasSAU*. 2015;8(107):15–20. (In Russ.)

14. Коротченко И.С., Лебедев Н.А., Первышина Г.Г. и др. Влияние выбросов тепловых электростанций

Красноярского края на стабильность развития тополя бальзамического. *Успехи современного естествознания*. 2020;(10):85–90. <https://doi.org/10.17513/use.37495>

Korotchenko I.S., Lebedev N.A., Pervyshina G.G., et al. Influence of emissions from thermal power plants of the Krasnoyarsk Region on the stability of development of balsamic poplar. *Advances in Current Natural Sciences*. 2020;(10):85–90. (In Russ.) <https://doi.org/10.17513/use.37495>

15. Попельницкая И.М., Попов А.О. Флуктуирующая асимметрия листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) в городской среде. *Успехи современного естествознания*. 2017;(12):72–78.

Popelnitskaya I.M., Popov A.O. Leaves' fluctuating asymmetry of poplars (*Populus balsamifera* L.) in the urban environment. *Advances in Current Natural Sciences*. 2017;(12):72–78. (In Russ.)

16. Папинен А.Е. Оценка качества среды методом флуктуирующей асимметрии листовых пластинок *Betula pendula* Roth., *Padus avium* Mill. и *Crataegus sanduinea* Pall. в пойме реки Каратуз (Красноярский край). *Juvenis scientia*. 2019;(9-10):4–7. <https://doi.org/10.32415/jscientia.2019.09-10.01>

Papinen A.E. Assessment of medium quality by fluctuating asymmetry of *Betula pendula* Roth., *Padus avium* Mill. and *Crataegus sanduinea* Pall. in the floodplain of the Karatuz River (Krasnoyarsk Region). *Juvenis Scientia*. 2019;(9-10):4–7. (In Russ.) <https://doi.org/10.32415/jscientia.2019.09-10.01>

17. Черных Е.П., Первышина Г.Г., Гоголева О.В. Экологическая оценка влияния автотранспорта на флуктуирующую асимметрию листьев черемухи обыкновенной (*Padus avium* Mill.). *Вестник КрАСГАУ*. 2013;12(87):137–141.

Chernykh E.P., Pervyshina G.G., Gogoleva O.V. The ecological assessment of the motor transport influence on fluctuating asymmetry of bird cherry tree (*Padus avium* Mill.) leaves. *Bulletin of KrasSAU*. 2013;12(87):137–141. (In Russ.)

18. Черных Е.П., Первышина Г.Г., Гоголева О.В. Оценка экологического благополучия территории г. Красноярск с использованием черемухи обыкновенной в качестве биоиндикатора. *Вестник КрАСГАУ*. 2014;1(88):96–100.

Chernykh E.P., Pervyshina G.G., Gogoleva O.V. The ecological favourable condition assessment of the Krasnoyarsk city territory with the bird cherry tree use as a bio-indicator. *Bulletin of KrasSAU*. 2014;1(88):96–100. (In Russ.)

19. Черных Е.П., Первышина Г.Г., Гоголева О.В. Оценка экологического состояния территории Красноярского края методом флуктуирующей асимметрии листьев черемухи обыкновенной (*Padus avium* Mill.). *Вестник КрАСГАУ*. 2014;2(89):84–88.

Chernykh E.P., Pervyshina G.G., Gogoleva O.V. The Krasnoyarsk Krai territory ecological condition assessment by the leaf fluctuating asymmetry method of bird

cherry tree (*Padus avium* Mill.). *Bulletin of KrasSAU*. 2014;2(89):84–88. (In Russ.)

20. Захаров В.М., Шадрина Е.Г., Турмухаметова Е.Г. и др. Оценка состояния растений по стабильности развития в естественных и антропогенных условиях (флуктуирующая асимметрия признаков листа березы повислой *Betula pendula* L.). *Известия Российской академии наук. Серия биологическая*. 2020;(2):191–196. <https://doi.org/10.31857/S0002332920020113>

Zakharov V.M., Sharova N.A., Trofimov I.E., et al. Assessment of plant status by the stability of development in natural and anthropogenic conditions (fluctuating asymmetry of leaf features of the silver birch, *betula pendula* roth) *Biology Bulletin*. 2020;47(2):186–190.

21. Shadrina E., Turmukhametova N., Soldatova V., et al. Fluctuating asymmetry in morphological characteristics of *Betula pendula* Roth leaf under conditions of urban ecosystems: evaluation of multi-factor negative impact. *Symmetry*. 2020;12(8):1–35. <https://doi.org/10.3390/sym12081317>

22. Хикматуллина Г.Р. Сравнение морфологических признаков листа *Betula pendula* в условиях урбано-среды. *Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле*. 2013;(2):48–56.

Khikmatullina G.R. Comparison of morphological characteristics of sheet *Betula pendula* leaf in conditions of urban environment. *Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences*. 2013;(2):48–56. (In Russ.)

23. Максименко А.Е., Сунцова Л.Н., Иншаков Е.М. Оценка экологического состояния среды по асимметрии листьев черемухи обыкновенной, произрастающей в различных районах города. В кн.: *Лесной и химический комплексы – проблемы и решения: Сборник статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции, г. Красноярск, 9 декабря 2016 г.* Красноярск: Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева; 2016. С. 49–51.

Maksimenko A.E., Suntsova L.N., Inshakov E.M. Assessment of the ecological state of the environment based on the asymmetry of the leaves of common bird cherry growing in different areas of the city. In: *Forest and chemical complexes – problems and solutions: Collection of articles based on the materials of the All-Russian scientific and practical conference, Krasnoyarsk, December 9, 2016*. Krasnoyarsk: Siberian State Aero-

space University named after Academician M.F. Reshetnev; 2016, pp. 49–51. (In Russ.)

24. Сунцова Л.Н., Иншаков Е.М. Особенности роста черемухи обыкновенной и Маака в условиях урбанизированной среды города Красноярск. *Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений*. 2017;20:183–184.

Suntsova L.N., Inshakov E.M. Features of growth of common bird cherry and Maack's bird cherry in the urbanized environment of the city of Krasnoyarsk. *Fruit growing, seed production, introduction of woody plants*. 2017;20:183–184. (In Russ.)

25. Коротченко И.С. Биоиндикация загрязненных районов г. Красноярск по величине флуктуирующей асимметрии листовой пластинки вяза приземистого. *Вестник КрасГАУ*. 2015;11(110):67–72.

Korotchenko I.S. Bioindication of contaminated areas of Krasnoyarsk by the magnitude of fluctuating asymmetry of the leaf blade of the Siberian elm. *Bulletin of KrasSAU*. 2015;11(110):67–72. (In Russ.)

26. Татаринцев А.И. Санитарное состояние насаждений вяза в г. Красноярске. *Вестник КрасГАУ*. 2012;8(71):68–72.

Tatarintsev A.I. Sanitary condition of elm plantations in Krasnoyarsk. *Bulletin of KrasSAU*. 2012;8(71):68–72. (In Russ.)

27. Нарваткина К.Л., Башмаков Д.И. Влияние условий городской среды на морфометрические показатели листьев клена американского (*Acer negundo* L.). В кн.: *XLVI Огарёвские чтения: Материалы научной конференции, г. Саранск, 06–13 декабря 2017 г.* Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва; 2018. С. 103–109.

Narvatkina K.L., Bashmakov D.I. Influence of urban environmental conditions on morphometric parameters of American maple leaves (*Acer negundo* L.). In: *XLVI Ogarevsky Readings: Proceedings of the scientific conference, Saransk, December 6–13, 2017*. Saransk: Ogarev National Research Mordovian State University; 2018, pp. 103–109. (In Russ.)

28. Шадрина Е., Солдатова В., Турмухаметова Н. Флуктуирующая асимметрия как мера стресса в природных популяциях древесных растений: влияние экологических и географических факторов на developmental stability. *Symmetry*. 2023;15(3):700. <https://doi.org/10.3390/sym15030700>

Об авторах

ЧУДНОВСКАЯ Галина Валерьевна, кандидат биологических наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-3119-1693>, SPIN: 4874-1596, e-mail: g.chudnowskaya2011@yandex.ru

ЧЕРНАКОВА Ольга Владимировна, старший преподаватель, <https://doi.org/0000-0002-3283-9703>, SPIN: 3763-4803, e-mail: chernakova-o@list.ru

Вклад авторов

Чудновская Г.В. – разработка концепции, проведение исследования, проведение статистического анализа, создание черновика рукописи, редактирование рукописи; **Чернакова О.В.** – разработка концепции, прове-

дение исследования, проведение статистического анализа, создание черновика рукописи, редактирование рукописи

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

CHUDNOVSKAYA, Galina Valeryevna, Cand. Sci. (Biol.), Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-3119-1693>, SPIN: 4874-1596, e-mail: g.chudnowskata2011@yandex.ru

CHERNAKOVA, Olga Vladimirovna, Senior Lecturer, <https://doi.org/0000-0002-3283-9703>, SPIN: 3763-4803, e-mail: chernakova-o@list.ru

Authors' contribution

Chudnovskaya G.V. – conceptualization, investigation, formal analysis, writing – original draft, writing – review & editing; **Chernakova O.V.** – conceptualization, investigation, formal analysis, writing – original draft, writing – review & editing

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 01.04.2025

Поступила после рецензирования / Revised 21.05.2025

Принята к публикации / Accepted 29.05.2025



Оригинальная статья

Ископаемые остатки мезофауны четвертичного периода Янского плато как индикаторы палеоландшафтных условий позднего плейстоцена

В. С. Боескоров[✉], Г. Н. Саввинов

Научно-исследовательский институт прикладной экологии Севера
им. профессора Д.Д. Саввинова в СВФУ им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация
[✉]vstepb@mail.ru

Аннотация

В статье рассмотрены результаты исследований плейстоценовых энтомофаун и дождевых червей в четвертичных отложениях Северо-Востока России. Ископаемые представители мезофауны четвертичного периода обнаружены в погребенных горизонтах и едомных отложениях Батагайской термоэрозионной котловины, а также в заиленных песках обнажения Улахан Сууллар Янского плоскогорья. По данным палеорастительных реконструкций, Батагайский участок, расположенный на Янском плоскогории Якутии, на протяжении большей части позднего плейстоцена был покрыт луговыми степями и лиственничными лесами. Проведенные исследования в погребенных почвах исследуемых участков выявили, что в целом соотношение тайги и лугово-степной растительности в общем растительном покрове в течение всего времени варьировало в соответствии с меняющимися климатическими условиями, а также со степенью воздействия периодически возникающих лесных пожаров. Приведены некоторые доминантные виды плейстоценовых сообществ (*Hypera*, *Morychus viridis*, *Pterostichus* (*Cryobius*) и др.), описаны особенности их экологии и распространения, а также обсуждены возможности проведения палеореконструкций природных условий прошлых эпох. Исследования показали, что палеоэнтомологические остатки, обнаруженные в многолетнемерзлых толщах изученных нами объектов Янского плоскогорья (Батагайская котловина и обнажение Улахан Сууллар), свидетельствуют о том, что на этой территории обитали насекомые, населяющие как лесные растительные комплексы, так и тундростепные фитоценозы.

Ключевые слова: ископаемые насекомые, плейстоцен, голоцен, тундростепи, Батагайский провал, мезофауна, погребенные горизонты

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ «Биота и абиотические компоненты экосистем Северо-Востока России и рациональное освоение природных ресурсов криолитозоны в условиях изменения климата и техногенного воздействия» (№ FSRG-2013-0011).

Для цитирования: Боескоров В.С., Саввинов Г.Н. Ископаемые остатки мезофауны четвертичного периода Янского плато как индикаторы палеоландшафтных условий позднего плейстоцена. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(2):272–281. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-272-281>

Original article

Fossil specimens of the mesofauna from the Quaternary period of the Yana Plateau as indicators of the paleolandscape conditions during the late Pleistocene

Vasily S. Boeskorov[✉], Grigory N. Savvinov

Savvinov Research Institute of Applied Ecology of the North, Ammosov North-Eastern Federal University,
Yakutsk, Russian Federation
[✉]vstepb@mail.ru

Abstract

This article presents the results of a study focused on Pleistocene entomofauna and earthworms found within Quaternary deposits in the North-East of Russia. Fossil specimens of the Quaternary mesofauna were identified in buried horizons and yedoma deposits within the Batagay thermoerosion basin, as well as in the silted sands of the Ulakhan

Sullar outcrop on the Yana Plateau. Paleobotanical reconstructions indicate that the Batagaysky site, situated on the Yana Plateau in Yakutia, was predominantly characterized by meadow steppes and larch forests throughout the majority of the late Pleistocene epoch. Research conducted on the buried soils within the study areas has indicated that the proportion of taiga to meadow-steppe vegetation within the total vegetation cover has varied over time. These fluctuations are indicative of alterations in climatic conditions as well as the impact of recurrent forest fires. The article highlights several dominant species from Pleistocene communities, including *Hypera*, *Morychus viridis*, and *Pterostichus* (*Cryobius*), while also providing an overview of their ecological characteristics and distribution. Additionally, it explores the potential for conducting paleoreconstructions of the natural conditions of past eras. The research indicates that paleoentomological remains discovered in the permafrost layers of the studied sites on the Yana Plateau suggest the presence of insects inhabiting both forest and steppe environments during this period.

Keywords: fossil insects, Pleistocene, Holocene, tundra-steppe, Batagaysky depression, mesofauna, buried horizons
Funding. This study was conducted within the framework of the state assignment from the Ministry of Education and Science of the Russian Federation “Biota and abiotic components of ecosystems in the North-East of Russia and the rational development of natural resources in the cryolithozone in the context of climate change and technogenic impact” (No. FSRG-2013-0011).

For citation: Boeskorov V.S., Savvinov G.N. Fossil specimens of the mesofauna from the Quaternary period of the Yana Plateau as indicators of the paleolandscape conditions during the late Pleistocene. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(2):272–281. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-272-281>

Введение

Степень изученности четвертичных насекомых Северо-Востока Сибири как индикаторов палеоклиматических и палеоландшафтных условий остается сравнительно низкой по отношению к другим представителям позднелейстоценовых фаунистических комплексов.

Целенаправленное изучение позднелейстоценовой палеоэнтомофауны Северной Якутии началось в 1960-е годы с исследований И.И. Грушевского и Л.Н. Медведева [1–3] и др. С этого времени накоплен достаточно обширный материал [4–11], где особое место принадлежит остаткам различных почвенных насекомых и коконам дождевых червей. Хорошую сохранность имеют остатки хитиновых экзоскелетов, присутствующие в обилии в различных генетических отложениях, в том числе в мерзлых тонкодисперсных породах [10]. Все это дает основание считать их наиболее перспективным материалом для воссоздания облика палеоэкологических условий на Северо-Востоке России. Более того, большинство плейстоценовых видов насекомых сохранилось в современной энтомофауне, их анализ дает очень ценную информацию для палеореконструкции природных условий прошлого.

Материалы и методы

Объектом наших исследований являются погребенные горизонты и едомные отложения Батагайской термоэрозионной котловины, а также заиленные пески обнажения Улахан Сууллар Янского плоскогорья (рис. 1).

Материалом исследований явились остатки ископаемых представителей почвенной мезо-

фауны, такие как долгоносики рода *Hypera*, жук-пилюльщик *Morychus viridis*, жука-железа *Pterostichus* (*Cryobius*) и др.

Извлечение остатков ископаемых беспозвоночных из погребенных горизонтов производилось по традиционной методике, описанной в ряде работ [12–20]. Порода промывается через сито с ячейкой 0,5 мм, сухая промывка разделяется на фракции через почвенные сита для последующего ручного разбора проб под микроскопом Микромед-3 с фотофиксацией обнаруженных ископаемых объектов. Необходимо отметить, что при методе промывки ухудшается сохранность остатков, экзоскелеты насекомых разрушаются на отдельные склериты. Поэтому наиболее приемлем метод послойного просмотра монолитов породы [20], где можно найти целые скелеты насекомых. Не-



Рис. 1. Карта-схема района исследований

Fig. 1. Map of the research area

достаток данного метода заключается в том, что мелкие малозаметные остатки не учитываются и это может привести к определенному искажению облика энтомофауны [21].

Результаты и обсуждение

Плейстоценовая мамонтовая степь как уникальный арктический биом постепенно угасла по мере наступления голоцена, на фоне потепления климата, в связи с чем особый научный интерес вызывает ее реконструкция, в том числе путем изучения остатков четвертичной мезофауны как индикаторов палеоклиматических и палеоландшафтных условий того времени.

Остатки окаменелых экскрементов и коконов дождевых червей – это одни из интереснейших объектов палеонтологических исследований, но из-за трудоемкости работы с ними остаются еще очень мало изученными, и, к сожалению, полученные результаты практически не востребованы исследователями [22]. В то же время дождевые черви как одни из наиболее крупнейших представителей палеопочвенной мезофауны в перспективе могут широко использоваться в реконструкции прошлых эпох. Не менее важным

фактором является и то, что прочность покровов остатков их коконов, как и хитинов членистоногих, обеспечивает большую сохранность и широкое распространение, чем остатков других ископаемых насекомых. Они чаще встречаются в фациях, благоприятных для захоронения растений и позвоночных животных.

Исследования ископаемых беспозвоночных нами начаты с 2016 г. [23]. Несмотря на их относительно малые размеры и хрупкость, они обнаружены нами на глубине от 8 до 48 м в стенках термоэрозионной котловины Батагайка (рис. 2) и обнажения Улахан Сууллар (рис. 3).

Термоэрозионная котловина Батагайка (см. рис. 2) расположена на склоновых ландшафтах Янского плоскогорья, вблизи от п. Батагай Верхоянского района на северо-востоке Якутии. Первоначальное возникновение данной котловины относят ко второй половине 60-х гг. прошлого столетия и связывают с началом термокарстовых процессов на Киргиллях-Хатынгнахской седловине [24]. В последующие годы общая площадь котловины неуклонно увеличивалась, достигнув в 2018 г. 76,8 га. Необходимо отметить, что при постоянной длине депрессии 2,5 км ши-

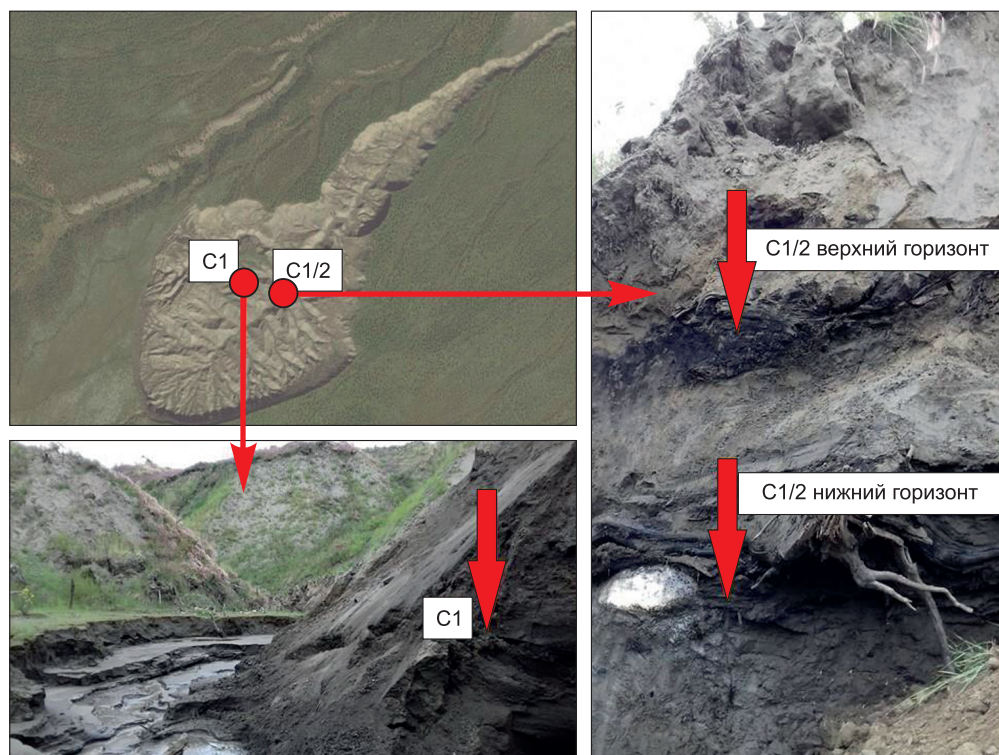


Рис. 2. Место отбора проб. Батагайская термоэрозионная котловина

Fig. 2. Sampling location. Batagai thermal erosion basin



Рис. 3. Место отбора проб, обнажение Улахан Сууллар
Fig. 3. Sampling site, Ulakhan Sullar outcrop

рина котловины, особенно за счет активного таяния ледового комплекса ее западного борта, за последние годы достигла более 880 м при средней глубине депрессии 60–70 м [24].

В верхней части этого провала обнажается сплошная стена ископаемых льдов высотой до 90 м, где мощные ископаемые жильные льды эпигенетического происхождения выклинивают первичные супесчано-суглинистые отложения и усиливают оттайку мерзлых грунтов. Во время интенсивной оттайки в июле–августе происходят обвалы из верхних слоев вместе со стволами деревьев, костными остатками ископаемых животных. На территории этого просадочного котлована образовался сильно рассеченный водными потоками рельеф. У бортов котлована в результате размыва водными потоками и оттайки жильных льдов образуются земляные останцы – байджерахи и происходят оползни крупных отвалов из верхних слоев [25].

Обнажение Улахан Сууллар (см. рис. 3) является разрезом верхнекайнозойских отложений, расположено на правом берегу р. Адыча, в 8 км ниже по течению от пос. Бетенкес Верхоянского района. Местонахождение представляет собой обрыв 65–80-метровой IV надпойменной террасы, на которой вскрываются отложения от верхнего плиоцена до верхнего плейстоцена [26]. При этом, согласно палинологическим данным, средняя часть осадочной толщи обнажения Улахан Сууллар формировалась в среднем плейстоцене [25].

По данным палеорастительных реконструкций, Батагайский участок на протяжении большей части позднего плейстоцена, возможно, был покрыт луговыми степями и лиственничными лесами. Однако в целом, как указывают некоторые исследователи, соотношение тайги и луговой степной растительности в общем растительном покрове в течение всего времени варьировало в соответствии с меняющимися климатическими условиями, а также со степенью воздействия периодически возникающих лесных пожаров [11, 27–30].

На этих объектах ископаемые насекомые обнаружены нами в основном в местах, где есть залежи органического горизонта или в слоях мелкозернистых осадочных пород, представленных едомными отложениями на глубинах от 8 до 44,5 м [11, 23]. Обнаруженные насекомые принадлежат к семейству Долгоносиков (Curculionidae) рода *Hypera*, это арктический вид, толерантный к низким температурам и не требовательный к прогреву почвы (рис. 4–6), жука-пилюльщика *Morychus viridis* (рис. 7) и жужелиц *Pterostichus* (*Cryobius*) (рис. 8, 9). Эти представители насекомых типичны для тундростепных комплексов и населяют в основном сухие луговые фитоценозы с обильной травянистой растительностью, а также лесную периферию, где в современных условиях обитают дождевые черви. Исходя из этого, мы предполагаем, что дождевые черви также существовали в тех биотопах наравне с найденными нами ископаемыми представителями

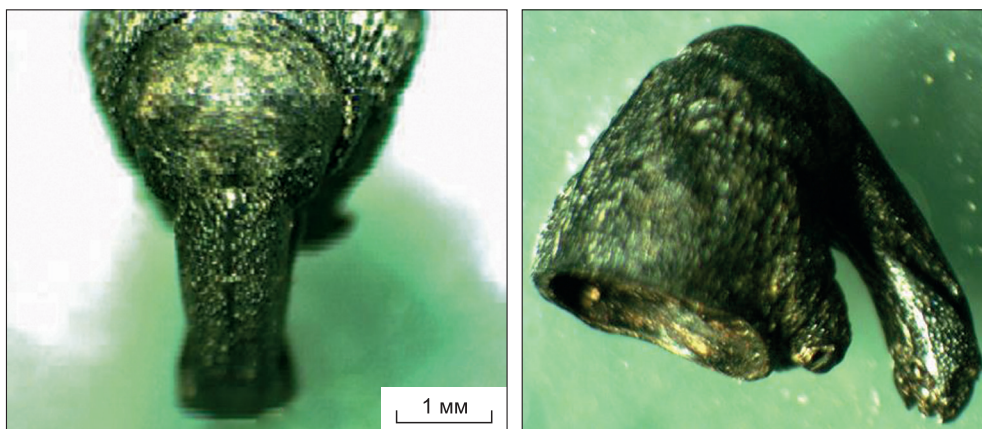


Рис. 4. Голова долгоносика рода *Hypera* (Батагайка)

Fig. 4. Head of a weevil of the genus *Hypera* (Batagaika)

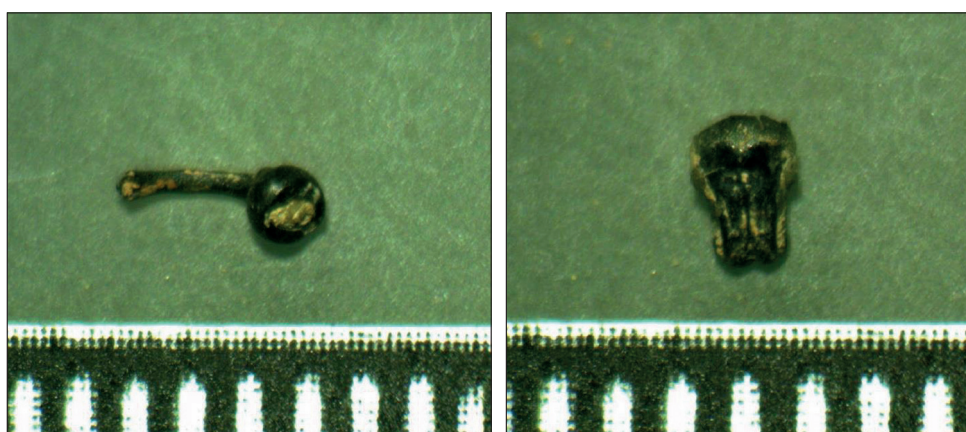


Рис. 5. Фрагмент головы долгоносика рода *Hypera* (Улахан Сууллар)

Fig. 5. Fragment of the head of a weevil of the genus *Hypera* (Ulakhan Sullar)



Рис. 6. Фрагмент ножки долгоносика рода *Hypera* (Батагайка)

Fig. 6. Fragment of the leg of the weevil of the genus *Hypera* (Batagaika)

мезофауны с оптимальными гидротермическими условиями и богатыми полуразложившимися органическими остатками. Высокое содержание некоторых видов жуликов семейства *Pterostichus* объясняет, что эти насекомые предпочитают также и заболоченные леса, и отражает существование заболоченных биотопов. Как указывалось в наших ранних публикациях, экологическая близость этих ископаемых насекомых указывает

на то, что в позднелайстоценовых средах преобладали мелколиственные леса подтайги и лесостепи, так как семейство долгоносиков рода *Hypera* является основным индикатором этих биоценозов [23].

Закключение

Таким образом, основу тафоценоза мезофауны четвертичного периода составляют жесткокры-

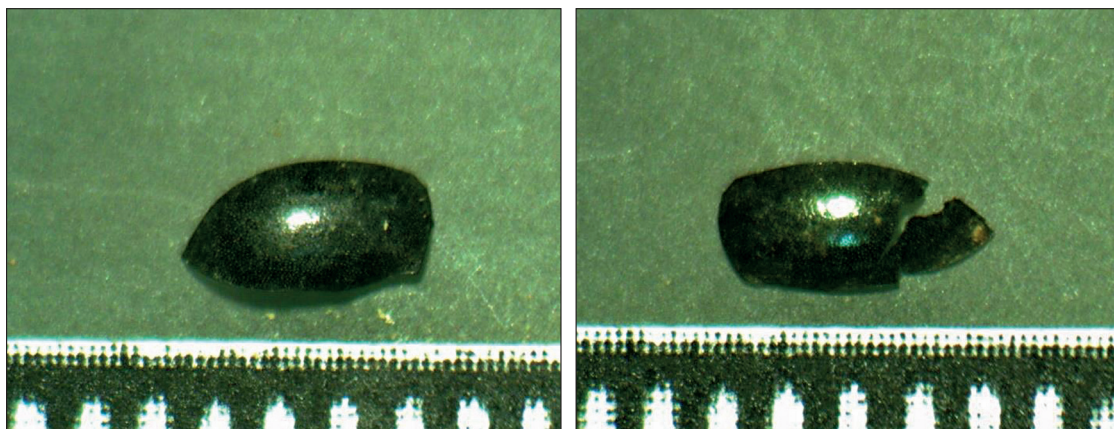


Рис. 7. Надкрылья жука-пилюльщика *Morychus viridis* (Батагайка, Улахан Сууллар)

Fig. 7. Elytra of the pill beetle *Morychus viridis* (Batagaika, Ulakhan Sullar)



Рис. 8. Надкрылья жужелицы *Pterostichus* (*Cryobius*) (Батагайка)

Fig. 8. Elytra of the ground beetle *Pterostichus* (*Cryobius*) (Batagaika)



Рис. 9. Фрагмент надкрылья жужелицы *Pterostichus* (*Cryobius*) (Улахан Сууллар)

Fig. 9. Fragment of the elytra of the ground beetle *Pterostichus* (*Cryobius*) (Ulakhan Sullar)

лые, причем, по литературным данным [31–33], в плейстоценовых комплексах наиболее разнообразно представлены долгоносики, а в голоценовых – жужелицы. Для позднеплейстоценовых

энтомокомплексов характерно присутствие холодолюбивых и сухолюбивых форм. Для голоценового периода наблюдается полное отсутствие холодолюбивого комплекса. Плейстоценовые энто-

мокомплексы по видовому составу близки между собой и заметно отличаются от голоценовых. Эти же виды до сих пор обитают в том же районе исследований.

Энтомологический анализ остатков хитина, обнаруженных в Батагайской толще мерзлоты, подтверждает интерпретацию палеорастительности, реконструкцию и дополняет наше понимание палеоэкологических условий на этом месте. Находка склеритов, принадлежащих муравьям древоточцам *Camponotus herculeanus* и фрагментам жуков-стафилинид рода *Atheta*, свидетельствуют о наличии леса на данном участке. А многочисленные находки остатков обитателей лесных полей и холодных сухих степей: долгоносика *Hypera*, жука-щелкача *Pterostichus (Cryobius)* и жука-пилюльщика *Morychus viridis* доказывают существование плейстоценовой мамонтовой степи [34]. Необходимо указать, что *Morychus viridis* – это современный эндемик Северо-Восточной Сибири, встречающийся в реликтовых холодных и очень сухих степях.

Исследования показали, что палеоэнтомологические остатки, обнаруженные в многолетнемерзлых толщах изученных нами объектов Янского плоскогорья (Батагайская котловина и обнажение Улахан Сууллар), свидетельствуют о том, что на этой территории обитали насекомые, населяющие как лесные растительные комплексы, так и тундростепные фитоценозы.

В целом полученные нами материалы будут способствовать не только изучению изменения климата, но и теоретическому обоснованию выделения палеогеографических типов комплексов мезофауны в четвертичном периоде на территории Янского плоскогорья.

Список литературы/ References

1. Грушевский И.И., Медведев Л.Н. Предварительные данные применения колеоптерологического анализа для изучения континентальных отложений Северной Якутии. В кн.: *Сборник статей по палеонтологии и биостратиграфии НИИГА*. Т. 28. Л.: Научно-исследовательский институт геологии Арктики; 1962. С. 38–42.

Grushevsky I.I., Medvedev L.N. Preliminary data on the use of coleopterological analysis for the study of continental sediments in Northern Yakutia. In: *Collection of articles on paleontology and biostratigraphy of the Scientific Research Institute of Arctic Geology*. Volume 28. Leningrad: Scientific Research Institute of the Geology of the Arctic. pp. 38–42. (In Russ.)

2. Грушевский И.И., Медведев Л.Н. О значении колеоптерологического анализа для изучения кон-

тинентальных четвертичных отложений Арктики. В кн.: Занина И.Е., Чернышева Н.Е. (ред.) *Биостратиграфические и палеобиофаунальные исследования и их практическое значение*. М.: Недра; 1970. С. 252–256.

Grushevsky I.I., Medvedev L.N. The significance of coleopterological analysis in the examination of continental Quaternary deposits in the Arctic region. In: Zannina I.E., Chernysheva N.E. (eds.) *Biostratigraphic and paleobiofacial studies and their practical implications*. Moscow: Nedra; 1970, pp. 252–256. (In Russ.)

3. Медведев Л.Н., Воронова Н.Н. Колеоптерологический анализ геологических разрезов мамонтовых кладбищ в северной Якутии. В кн.: Старобогатов Я.И. (ред.) *Мамонтовая фауна Русской равнины и Восточной Сибири*. Л.: Наука; 1977. С. 72–77.

Medvedev L.N., Voronova N.N. Coleopterological analysis of geological sections of mammoth cemeteries in northern Yakutia. In: Starobogatov Ya.I. (ed.) *Mammoth fauna of the Russian Plain and Eastern Siberia*. Leningrad: Nauka; 1977, pp. 72–77. (In Russ.)

4. Matthews J.V. Quaternary environments at Cape Deceit (Seward Peninsula, Alaska): evolution of tundra ecosystem. *Geological Society of America Bulletin*. 1974;85: 1353–1384.

5. Киселев С.В. *Позднекайнозойские жесткокрылые Северо-Востока Сибири*. М.: Наука; 1981. 116 с.

Kiselev S.V. *Late Cenozoic Coleoptera of North-East Siberia*. Moscow: Nauka; 1981. 116 p. (In Russ.)

6. Кузьмина С.А. Насекомые и спорово-пыльцевые спектры голоценовых отложений на побережье Хромской губы (Северная Якутия). В кн.: *Материалы XIII научной конференции молодых ученых и аспирантов МГУ*. М.; 1987. С. 23–30.

Kuzmina S.A. Insects and spore-pollen spectra of Holocene deposits on the coast of Khromskaya Bay (Northern Yakutia). In: *Proceedings of the 13th Scientific Conference for Young Researchers and Postgraduate Students at Moscow State University*. Moscow; 1987, pp. 23–30. (In Russ.)

7. Kuzmina S.A., Kuznetsova T.V., Sulerzhitsky L.D., Sher A.V. The Late Pleistocene fauna of the Laptev shelf grassland: insects and mammals. In: Kassens H., Volkman-Lark K. (eds.) *Fifth Workshop on Russian-German Cooperation: Laptev Sea System 2000*. St. Petersburg, Russia, November 26–28, 1999. Terra Nostra. Schriften der Alfred-Wegener-Stiftung, Koln; 1999, pp. 48–49.

8. Кузьмина С.А., Колесников С.Ф. Насекомые верхнеплейстоценовых и голоценовых отложений Медвежьих островов (Восточно-Сибирское море). *Бюллетень МОИП. Отдел геологический*. 2000;75(2):68–71.

Kuzmina S.A., Kolesnikov S.F. Insects of the Upper Pleistocene and Holocene deposits of the Bear Islands (East Siberian Sea). *Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Geological series*. 2000;75(2):68–71. (In Russ.)

9. Кузьмина С.А., Перковский Е.Э. *Среда обитания Cholevinus sibiricus (Coleoptera, Leiodidae) в плейстоцене*. *Вестник зоологии*. 2001;3:31–38.

- Kuzmina S.A., Perkovsky E.E. Habitat of *Cholevinus sibiricus* (Coleoptera, Leiodidae) in the Pleistocene. *Bulletin of Zoology*. 2001;3:31–38. (In Russ.)
10. Алфимов А.В., Берман Д.И., Шер А.В. Тундростепные группировки насекомых и реконструкция климата позднего плейстоцена низовий Колымы. *Зоологический журнал*, 2003;82(2):281–300.
- Alfimov A.V., Berman D.I., Sher A.V. Tundra-steppe insect assemblages and reconstruction of late Pleistocene climate in the lower reaches of the Kolyma River. *Zoologicheskii zhurnal*. 2003;82(2):281–300. (In Russ.)
11. Murton J., Opel T., Wetterich S., et al. Batagay megaslump: A review of the permafrost deposits, Quaternary environmental history, and recent development. *Permafrost and Periglacial Process*. 2023;34(3):399–416. <https://doi.org/10.1002/ppp.2194>.
12. Makarkin V.N. Fossil Hemerobiidae (Neuroptera) from the Eocene Tadushi Formation, the Russian Far East, with description a new genus. *Zootaxa*. 2023;5297(1):115–123. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.5297.1.6>
13. Зиновьев Е.В. Голоценовые насекомые Урала, центра и севера Западно-Сибирской равнины. *Зоологический журнал*. 2020;99(5):528–543. <https://doi.org/10.31857/S0044513420050153>
- Zinovyeva Ye.V. Holocene insects of the Urals and from the center and north of Western Siberia. *Zoologicheskii zhurnal*. 2020;99(5):528–543. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0044513420050153>
14. Coope G.R. Fossil beetles collected by James Bennie from Late Glacial silts at Corstorphine, Edinburgh. *Scottish Journal of Geology*. 1968;4(4):339–348.
15. Coope G.R. The response of coleoptera to gross thermal changes during the Mid Weichselian interstadial. *Mitteilungen der Internationalen Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie*. 1969a;17:173–183.
16. Shotton F.W. Movements of insect populations in the British Pleistocene. In: Wright H.E., Frey D.G. (eds.) *International Studies on the Quaternary: papers prepared on the occasion of the VII Congress of the International Association for Quaternary Research Boulder, Colorado, 1965*. New York. 1965, pp. 17–33.
17. Matthews J.V. Jr. A paleoenvironmental analysis of three Late Pleistocene coleopterous assemblages from Fairbanks, Alaska. *Quaestiones Entomologicae*. 1968;4:202–224.
18. Медведев Л.Н. Методика и перспективы применения колеоптерологического анализа для изучения четвертичных отложений и истории формирования фаун. В кн.: Пьявченко Н.И. (ред.) *История развития растительного покрова центральных областей Европейской части СССР в антропогене*. М.: Наука; 1968. С.115–123.
- Medvedev L.N. Methodology and prospects for the application of coleopterological analysis for the study of Quaternary deposits and the history of the formation of faunas. In: Pyavchenko N.I. (ed.) *History of the development of the vegetation cover of the central regions of the European part of the USSR in the anthropogene*. Moscow: Nauka; 1968, pp. 115–123. (In Russ.)
19. Morgan A.V. Late Pleistocene and early Holocene Coleoptera in the lower Great Lakes region. In: Laub R.S., Miller N.G., Steadman D.W. (eds) *Late Pleistocene and early Holocene paleoecology and archaeology of the eastern Great Lakes region*. *Bull Buffalo Soc Nat Sci*. 1988; 33:195–206.
20. Ashworth A.C., Brophy J.A. A Late Quaternary fossil beetle assemblage from the Missouri Coteau, North Dakota. *Bulletin of the Geological Society of America*. 1972;83(10):2981–2988.
21. Назаров В.И. Реконструкция ландшафтов Белоруссии по палеоэнтомологическим данным (антропоген). *Труды Палеонтологического института АН СССР*. 1984;205:96–104.
- Nazarov V.I. Reconstruction of the landscapes of Belarus based on paleoentomological data (anthropogen). *Trudy Paleontologicheskogo instituta AN SSSR*. 1984;205:96–104. (In Russ.)
22. Moineau O., Antoine P., Hattéb C., et al. The impact of Last Glacial climate variability in west-European loess revealed by radiocarbon dating of fossil earthworm granules. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2017;114(24):6209–6214. <https://doi.org/10.1073/pnas.1614751114>
23. Боесков В.С., Саввинов Г.Н. Позднеплейстоценовая мезофауна почв Янского плоскогорья. *Проблемы региональной экологии*. 2018;5:97–99.
- Boyeskorov V.S., Savvinov G.N. Late Pleistocene mesofauna of the soils of the Yana plateau. *Regional Environmental Issues*. 2018;5:97–99. (In Russ.)
24. Саввинов Г.Н., Данилов П.П., Петров А.А. и др. Экологические проблемы Верхоянского района. *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова*. 2018;68(6):18–33.
- Savvinov G.N., Danilov P.P., Petrov A.A., et al. Environmental problems of the Verkhoyansky region. *Vestnik of North-Eastern Federal University*. 2018;68(6):18–33. (In Russ.)
25. Новгородов Г.П., Григорьев С.Е., Чепрасов М.Ю., Саввинов Г.Н. Обзор находений мамонтовой фауны в бассейне реки Яна. *АРКТИКА XXI век. Естественные науки*. 2014;1(1):66–73.
- Novgorodov G.P., Grigor'ev S.E., Cheprasov M.Yu., Savvinov G.N. Overlook localities mammoth fauna in the River Basin Yana. *Arctic XXI century. Natural Sciences*. 2014;1:66–73. (In Russ.)
26. Новгородов Г.П., Григорьев С.Е., Чепрасов М.Ю. Перспективные местонахождения мамонтовой фауны в бассейне р. Яна. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2013;8:255–259.
- Novgorodov G.P., Grigorev S.E., Cheprasov M.Yu. Prospective locations of mammoth fauna in the Yana River basin. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2013;8:255–259. (In Russ.)

27. Лукьянычева М.С., Галанин А.А., Васильева А.Н. и др. Новые данные о границах и возрасте позднечетвертичных оледенений Верхоянского хребта в долине р. Ундулунг. В кн.: *Пути эволюционной географии – 2021. Материалы II Всероссийской научной конференции, посвященной памяти профессора А.А. Величко, г. Москва, 22–25 ноября 2021 г.* М.: Изд-во Института географии РАН; 2021. С. 209–213.

Lukyanycheva M.S., Galanin A.A., Vasileva A.N., et al. New data on the boundaries and age of the late Quaternary glaciations of the Verkhoyansk Range in the Undulyung River valley. In: *Paths of Evolutionary Geography – 2021: Proceedings of the Second All-Russian Scientific Conference Dedicated to the Memory of Professor A.A. Velichko, Moscow, November 22–25, 2021.* Moscow: Publishing House of the Institute of Geography of the RAS; 2021, pp. 209–213. (In Russ.)

28. Васильчук Ю.К. Едома. Часть 1. История геокриологического изучения в XIX и XX веках. *Арктика и Антарктика*. 2022;(4):54–114. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2022.4.39339>

Vasil'chuk Yu.K. Yedoma. Part 1. Annals of geocryological research in the XIX–XX centuries. *Arctic and Antarctica*. 2022;(4):54–114. (In Russ.) <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2022.4.39339>

29. Васильчук Ю.К. Едома. Часть 2. История геокриологического изучения и исследований стабильных изотопов и радиоуглеродного возраста в первом десятилетии XXI века. *Арктика и Антарктика*. 2023;(2):34–87. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2023.2.40971>

Vasil'chuk Yu.K. Yedoma. Part 2. Annals of geocryological research, especially radiocarbon dating and the stable-isotopes studies in the first decade of the XXI century. *Arctic and Antarctica*. 2023;(2):34–87. (In Russ.) <https://doi.org/10.7256/2453-922.2023.2.40971>

30. Jongejans L.L., Mangelsdorf K., Karger C., et al. Assessing organic matter characteristics in ancient permafrost: A biogeochemical study at the Batagay Megaslum, East Siberia. *The Cryosphere*. 2022;16(9):3601–3617. <https://doi.org/10.5194/tc-16-3601-2022>

31. Гурина А.А. Позднечетвертичные жесткокрылые Юго-востока Западно-сибирской равнины: Дисс. ... канд. биол. наук. Новосибирск; 2019. 129 с.

Gurina A.A. Late quaternary Coleoptera of the South-east of the West Siberian plain: Diss. ... Cand. Sci., Novosibirsk; 2019. 129 p. (In Russ.)

32. Gurina A.A., Dudko R.Yu., Prosvirov A.S., et al. Coleoptera assemblages from the Quaternary deposits of Kizikh river, the southernmost late Pleistocene insects of the West Siberian Plain. *Invertebrate Zoology*. 2019; 16(2):165–182. <https://doi.org/10.15298/invertzool.16.2.05>

33. Gurina A.A., Dudko R.Y., Ivanov A.V., et al. New data on the distribution of southern forests for the West Siberian Plain during the late Pleistocene: A paleontological approach. *Diversity*. 2023;15(1):56. <https://doi.org/10.3390/d15010056>

34. Dudko R.Yu., Danukalova G.A., Gurina A.A., et al. Insects and molluscs of the Late Pleistocene at the Gornovo site (Southern Ural foreland, Russia): New data on palaeoenvironment reconstructions. *Quaternary International*. 2021;632:154–177. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.10.003>

Об авторах

БОЕСКОРОВ Василий Степанович, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-9627-2013>, ResearcherID: H-177-2019, Scopus Author ID: 16641946800, SPIN: 7920-2558, e-mail: vstepb@mail.ru

САВВИНОВ Григорий Николаевич, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, директор, <https://orcid.org/0000-0002-5324-5410>, ResearcherID: T-7914-2017, Scopus Author ID: 56028258300, SPIN: 7459-1073, e-mail: savvinov_gn@mail.ru

Вклад авторов

Боесков В.С. – проведение исследования, создание черновика рукописи; **Саввинов Г.Н.** – разработка концепции исследования, методология, администрирование данных, редактирование рукописи

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

BOESKOROV, Vasily Stepanovich, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-9627-2013>, ResearcherID: H-177-2019, Scopus Author ID: 16641946800, SPIN: 7920-2558, e-mail: vstepb@mail.ru

SAVVINOV, Grigory Nikolaevich, Dr. Sci. (Biol.), Chief Researcher, Director, <https://orcid.org/0000-0002-5324-5410>, ResearcherID: T-7914-2017, Scopus Author ID: 56028258300, SPIN: 7459-1073, e-mail: savvinov_gn@mail.ru

Authors' contribution

Boeskorov V.S. – investigation, writing – original draft; **Savvinov G.N.** – conceptualization, methodology, data curation, writing – review & editing

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 09.09.2024

Поступила после рецензирования / Revised 14.04.2025

Принята к публикации / Accepted 22.04.2025

Биологические ресурсы

УДК 606:63(470-17)

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-282-289>



Оригинальная статья

Вопросы реализации Национального проекта «Биоэкономика» в Арктической зоне Российской Федерации

М. А. Жуков✉

АНО «Научно-координационный центр по проблемам Севера, Арктики
и жизнедеятельности малочисленных народов Севера», г. Москва, Российская Федерация
✉ nkcsever@gmail.com

Аннотация

Указ Президента РФ от 07.05.2024 №309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года», Федеральный закон от 30.11.2024 № 428-ФЗ «О биоресурсных центрах и биологических (биоресурсных) коллекциях и о внесении изменений в статью 29 Федерального закона «О животном мире», Федеральный закон от 13.07.2020 № 193-ФЗ «О государственной поддержке предпринимательской деятельности в Арктической зоне Российской Федерации», Указ Президента РФ от 26.10.2020 N 645 (ред. от 27.02.2023) «О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года» и планируемый к реализации с апреля 2025 года Национальный проект «Биоэкономика» имеют сопряженные цели и задачи применительно к Арктической зоне РФ (АЗРФ). В статье обсуждаются возможности их достижения с учетом наличия организационно-правовых и научных заделов, с опорой на которые представляется реализуемым соответствующий комплекс мер. В АЗРФ, где жесткий климат ограничивает возможности сельскохозяйственного производства, развитие биоэкономики возможно с использованием дикоросов и животных, обитающих в вольном или полувольном состоянии. Биопродуктивность арктической и субарктической биоты невелика, в связи с чем эффективное хозяйствование возможно при организации глубокой переработки сырья, расширении линейки производимой продукции и рынков ее реализации. Доступные к использованию запасы биомассы достаточны для хозяйственного использования в рамках малого и среднего бизнеса местного населения на основе использования современных физико-химических биотехнологий.

Ключевые слова: Арктическая зона РФ, сохранение биоразнообразия, биотехнологии

Финансирование. Работа выполнена в рамках плановой научной деятельности АНО «Научно-координационный центр по проблемам Севера, Арктики и жизнедеятельности малочисленных народов Севера» (АНО НКЦ «Север»).

Для цитирования: Жуков М.А. Вопросы реализации Национального проекта «Биоэкономика» в Арктической зоне Российской Федерации. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(2):282–289. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-282-289>

Original article

Issues with implementation regarding the National Project “Bioeconomics” in the Arctic zone of the Russian Federation

Mikhail A. Zhukov✉

ANO “NCC “Sever”, Moscow, Russian Federatio
✉ e-mail@mail.ru

Abstract

The Decree of the President of the Russian Federation, dated May 7, 2024, No. 309 “On the national development goals of the Russian Federation for the period up to 2030 and for the future up to 2036”, Federal Law, dated November 30, 2024, No. 428-FZ “On bioresource centers and biological (bioresource) collections and on amendments to Article

29 of the Federal Law “On the Animal World”, Federal Law, dated July 13, 2020, No. 193-FZ “On state support for entrepreneurship in the Arctic zone of the Russian Federation”, Decree of the President of the Russian Federation, dated October 26, 2020, No. 645 (as amended on February 27, 2023) “On the Strategy for the Development of the Arctic Zone of the Russian Federation and Ensuring National Security for the Period up to 2035”, and the National Project “Bioeconomics” planned for implementation starting in April 2025, share related goals and objectives in relation to the Arctic zone of the Russian Federation (AZRF). This article explores the potential for achieving specific objectives by evaluating the availability of organizational, legal, and scientific resources, which collectively indicate that a corresponding set of measures is feasible for implementation. In the Arctic Zone of the Russian Federation, where the harsh climate limits agricultural production, the development of a bioeconomy is achievable through the use of wild plants and animals that exist in free or semi-free conditions. The bioproductivity of Arctic and subarctic biota is relatively low; therefore, effective management can be attained through the establishment of advanced processing techniques for raw materials, the diversification of manufactured products, and the expansion of markets for their distribution. The biomass reserves available for use are sufficient to support economic activities within the framework of small and medium-sized enterprises operated by the local population, leveraging contemporary physical and chemical biotechnologies.

Keywords: Russian Federation Arctic zone, biodiversity conservation, biotechnology

Funding. This study was conducted within the framework of the established scientific activities of the ANO “Scientific Coordination Center for Problems of the North, the Arctic and the Livelihoods of Indigenous Peoples of the North” (ANO NCC “Sever”).

For citation: Zhukov M.A. Issues with implementation regarding the National Project “Bioeconomics” in the Arctic zone of the Russian Federation. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(2):282–289. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-282-289>

Введение

Указом Президента РФ от 07.05.2024 № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года» установлены цели, целевые показатели и задачи, выполнение которых характеризует достижение национальных целей. Среди целей: г) экологическое благополучие; д) устойчивая и динамичная экономика; е) технологическое лидерство. Первый вице-премьер Правительства РФ Денис Мантуров на форуме «Биопром-24» в Геленджике в октябре 2024 г. сообщил, что в 2025 г. будет запущен новый Национальный проект «Биоэкономика». Директор департамента химической промышленности Минпромторга РФ Артур Смирнов в рамках форума на заседании Совета по развитию микробиологической промышленности и биотехнологий рассказал о том, что Нацпроект будет включать в себя пять федеральных проектов: 1) научно-техническая поддержка развития биотехнологий; 2) создание инфраструктуры; 3) кадры; 4) биотехнологическое оборудование; 5) организация производств микробиологической продукции. Каждое из тематических направлений Нацпроекта будет включать в себя продуктивные группы биотехнологий.

Федеральный закон от 30.11.2024 № 428-ФЗ «О биоресурсных центрах и биологических (биоресурсных) коллекциях и о внесении изменений

в статью 29 Федерального закона «О животном мире» предусматривает в целях сохранения и изучения биологического разнообразия, сохранения и использования генетических ресурсов устойчивого развития создание Фонда биологических (биоресурсных) коллекций РФ, национальных центров генетических ресурсов и национальных каталогов особо ценных образцов генетических ресурсов. В соответствии со ст. 7 закона в состав Фонда биологических (биоресурсных) коллекций РФ помимо национальных коллекций особо ценных образцов генетических ресурсов входят все находящиеся на территории РФ биологические (биоресурсные) коллекции, ... независимо от их происхождения, времени, способа и места хранения. Статья 11 предусматривает образование биоресурсных центров путем наделения функциями биоресурсного центра научной или образовательной организации, которая является федеральным государственным учреждением.

Базовая функция государства – обеспечение благоприятных условий жизни граждан. Вся сумма конкретных задач при достижении этой цели укладывается в три кейса: экономическое развитие, экологическое благополучие, социальный прогресс. Кейсы взаимосвязаны в системе прямых-обратных связей. Игнорирование задач любого из них ведет к росту диспропорций и торможению развития. Особое значение эти цели и задачи имеют в Арктической зоне РФ (АЗРФ).

Задачу охраны неустойчивой, уязвимой окружающей среды и рационального использования биологических ресурсов Арктики как среды обитания человека, в рамках Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации (Указ Президента РФ от 26.10.2020 N 645 (ред. от 27.02.2023), возможно реализовать только как общесистемную задачу, из которой невозможно исключить ту или иную ее подсистему [3]. В целом заявленные национальные цели развития и направления деятельности Национального проекта «Биоэкономика», в том числе применительно к АЗРФ, системно взаимоувязаны, и системное же планирование сопряженных по достигаемым результатам мероприятий, в том числе предусматриваемых Федеральным законом от 30.11.2024 № 428-ФЗ, обеспечит их синергетический эффект.

Биоразнообразие – ресурс устойчивости экосистем

Экологическое благополучие населения конкретных территорий самым непосредственным образом связано с состоянием ее природных экосистем. Разбалансировка экосистемных процессов создает те или иные проблемы, преодоление которых требует усилий, направленных на восстановление их сбалансированного состояния или на формирование новой искусственной среды обитания. И то и другое – крайне ресурсо- и трудозатратно. Разумнее и рациональнее поддерживать исходное сбалансированное состояние природных экосистем, нежели долго и мучительно, с ошибками и недоработками формировать новый формат экосистемного баланса.

Среда обитания человека не сводима только к абиотическим факторам. Косная материя в ней неразделима с материей живой. В соответствии с современной теорией самоорганизации систем способностью к сохранению устойчивости при изменении параметров внешней среды обладают только фрактально организованные, открытые, неравновесные системы с высоким уровнем сложности и разнообразия их подсистем, в которых происходят нелинейные процессы. Чем шире это разнообразие, тем выше адаптивный потенциал соответствующей сложной системы, тем в большем диапазоне изменений параметров внешней среды система может сохранять свою устойчивость и не деградировать. Для биологических систем это биоразнообразие образующих их видов живых организмов [7]. Биоразнообразие именно в природных экосистемах – биоресурсное

богатство, которое крайне сложно поддерживать искусственным образом в искусственной среде. К тому же в искусственной среде резко снижается биоразнообразие на биохимическом уровне. Решение задачи возможно только в естественной среде и на больших пространствах. Примеры биологических (биоресурсных) коллекций и биоресурсных центров на больших пространствах в естественной среде – территориальные формы охраны природы в формате «особо охраняемые природные территории» (далее – ООПТ), являющиеся в соответствии с Федеральным законом от 30.11.2024 № 428-ФЗ федеральными государственными учреждениями или филиалами федеральных государственных учреждений.

Территориальные формы охраны природы как инструменты сохранения биоразнообразия и биоресурсов

Территориальные формы охраны природы, нацеленные на сохранение экосистем как среды обитания человека и биосферы в целом, достаточно детально проработаны только для категории ООПТ. Весьма поверхностно проработаны вопросы методологии, методической и процедурной основы установления режимов хозяйствования и жизнедеятельности человека для таких территориальных форм охраны природы, как территории традиционного природопользования (далее – ТТП), зоны с особыми условиями использования территорий (далее – ЗОУИТ), а также функциональные зоны, для которых документами территориального планирования определяются границы и функциональное назначение (по сути все те же ЗОУИТ) [6].

Оценка ценности территорий с точки зрения отнесения их к той или иной категории ООПТ исходит в первую очередь из их биологического компонента, и только ландшафтные или геологические заказники создаются исходя из соображений ценности среды абиотической. В то же время, Стратегия сохранения редких и находящихся под угрозой исчезновения видов животных, растений и грибов в Российской Федерации на период до 2030 года от 17.02.2014 № 212-р констатировала, что основная часть местообитаний редких и находящихся под угрозой исчезновения видов животных, растений и грибов располагается за пределами ООПТ на землях, на которых осуществляется интенсивная хозяйственная деятельность, особенно в АЗРФ [1]. В этой связи достижение национальных целей развития

требует распространения мер природоохранного характера на раздельно в состав ООПТ территории с природными ландшафтами. В первую очередь речь идет об установлении на указанных территориях таких режимов жизнедеятельности и хозяйствования, которые нормируют воздействия, обеспечивая сохранение компонентов биосферы как факторов экологической устойчивости и ресурсной обеспеченности.

Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29 декабря 2004 года № 190 ФЗ предусматривает: (1) учет экологических факторов и учет экологической безопасности (ст. 2, п. 2 и п. 9); (2) проведение государственной экологической экспертизы проектной документации (ст. 5.2, п. 5, пп. 3). С целью учета экологических факторов и экологической безопасности в ст. 1 Градостроительного кодекса предусматривается отображение в материалах территориального планирования: (1) зон с особыми условиями использования территорий, устанавливаемых в соответствии с законодательством Российской Федерации (п. 4); (2) функциональных зон, для которых документами территориального планирования определены границы и функциональное назначение (п. 5); (3) территориальных зон – зон, для которых в правилах землепользования и застройки определены границы и установлены градостроительные регламенты (п. 7). В соответствии со ст. 9, п. 1 в документах территориального планирования определяется назначение территорий исходя из совокупности социальных, экономических, экологических и иных факторов.

Статьи 41.2 и 47 Кодекса предусматривают учет экологических условий в документах инженерных изысканий по проектированию объектов капитального строительства и реконструкции, планировке территории. Статья 49 предусматривает, что в АЗРФ подлежат государственной экологической экспертизе проектная документация объектов капитального строительства и результаты инженерных изысканий, за исключением оговоренных в законе случаев. Все это соответствует ст. 35 федерального закона от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды», предусматривающего, что территориальное планирование, градостроительное зонирование и планировка территории осуществляются в соответствии с требованиями в области охраны окружающей среды, в том числе в соответствии с требованиями к сохранению биологического разнообразия

[10]. Земельный кодекс Российской Федерации от 25 октября 2001 года № 136-ФЗ также предусматривает зоны с особыми условиями использования территорий (ст. 104). Установление ЗОУИТ осуществляется в том числе в целях охраны окружающей среды (ст. 104, п. 1, пп. 4) [6].

Действующее законодательство предусматривает широкий спектр форматов территориальной охраны природы, включающий в себя как территории с преимущественными задачами охраны посредством исключения хозяйственного использования, так и с преимущественными задачами хозяйственного использования с учетом тех или иных ограничений технического, технологического или поведенческого характера. Располагая таким арсеналом инструментов регулирования, возможно на основной части территории АЗРФ выстроить комбинацию территорий с различными уровнями ограничений на базе нормативно закреплённых режимов, установленных по результатам проектирования с учетом всего комплекса целевых назначений и целевых ограничений на тех или иных участках территорий. Сочетаемые в большие пространственные массивы территории с режимами ООПТ, ТТП, ЗОУИТ, функциональных зон способны обеспечить нормальное функционирование популяций животных и растений с сохранением путей расселения и миграции, с минимизацией риска фрагментации популяции. Комбинирование их режимов обеспечит условия рационального природопользования с учетом ресурсной структуры территорий, допустимых антропогенных трансформаций и вариантов применяемых технико-технологических решений в пределах конкретных местностей. Совмещенное в рамках природно-хозяйственного планирования описание ресурсов, планов их вовлечения в хозяйственный оборот, а также природных ограничений хозяйствования дает возможность предусмотреть в целом систему мероприятий хозяйственного развития, учесть требования сохранения благоприятной среды обитания и совмещения традиционных и индустриальных видов хозяйствования.

В условиях Арктики неконфликтное совмещение недропользования с традиционным природопользованием, сохранением природной среды, экологическим и рекреационным туризмом возможно – но на основе детального учета в проектах хозяйственной деятельности специфики конкретных ландшафтов и особенностей рас-

селения и хозяйствования населения, ведущего традиционное природопользование. Проекты освоения природных ресурсов включают разделы оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС), материалы которых часто имеют высокую информационную ценность и могут быть использованы для целей природно-хозяйственного пространственного планирования [6].

Решая задачи сохранения и изучения биоразнообразия, сохранения и использования генетических ресурсов в целях обеспечения устойчивого развития, Федеральный закон от 30.11.2024 № 428-ФЗ предусматривает создание биоресурсных центров в организационной форме научных или образовательных федеральных государственных учреждений. Но даже не все ООПТ являются государственными учреждениями, не говоря уже о ТТП, ЗОУИТ и иных территориях со схожим статусом. Но все эти территории в сумме являются для объектов животного и растительного мира вмещающим пространством, где эти объекты пребывают в естественном природном состоянии – главном условии их нормального сохранения. Именно эти пространства – главные хранители биоразнообразия и биологических ресурсов. Они должны курироваться соответствующими профильными научными государственными учреждениями, получающими статус биоресурсных центров и уполномоченными в вопросах оценки состояния биоразнообразия и биоресурсного потенциала, проектирования режимов функционирования территорий и изменения этих режимов с учетом изменений состояния биоразнообразия и биоресурсного потенциала.

Биоразнообразие – разнообразие сырьевых ресурсов биотехнологии

Виды арктической флоры и фауны важны не только сами по себе, но и с точки зрения их непосредственной и опосредованной ценности, которую они представляют для других компонентов арктической экосистемы, включая человека. Сохранение биоразнообразия – сбережение ресурсов экологического благополучия и экономического развития на текущий и будущие периоды. Сбережение ресурсов экономического развития – в рачительном использовании природных факторов жизнеобеспечения. Неэкологичное хозяйствование подрывает ресурсную базу развития, резко сужает спектр доступных видов хозяйствования, не обеспечивает условий совмещения различных видов хозяйственной деятельности.

Рачительное, рациональное использование природных ресурсов требует не только грамотного территориального планирования с установлением на конкретных территориях специальных требований ко всем формам хозяйствования. Необходимо также научиться извлекать из биоресурсов максимум потребляемых благ и добавленной стоимости, так как постоянно нарастающая эксплуатация неизбежно приведет к их истощению.

В Арктике высока доля уникальных таксонов, что объясняется экстремальной природной средой, требующей специфических адаптаций, включая повышенную биоактивность тканей и сред организмов и разнообразие в них молекул регуляторного и защитного действия. Эти специфические адаптации определяют способности организма функционировать в экстремальных режимах, выдерживать жесткий холодовой стресс в сочетании с периодическим дефицитом пищи и необычным фотопериодизмом в период «полярной ночи» и «полярного дня», геомагнитные аномалии и др. [4]. Большинство таксонов в таких условиях существовать не могут и в Арктику не проникают. Утрата арктических видов означает утрату биологических свойств и адаптаций, уже сейчас открывающих новые возможности в медицине и технологиях существования человека в экстремальных средах, включая Космос [3].

Возобновляющиеся биологические ресурсы – то, с чем коренное и местное население АЗРФ и районов Крайнего Севера останется после истощения минеральных ресурсов и закрытия обеспечивающих их эксплуатацию населенных пунктов. В условиях Арктики и Субарктики биопродуктивность повсеместно невелика, но экстремальные условия обитания стимулируют накопление в тканях организмов биоактивных веществ в объемах, зачастуюкратно превышающих их концентрации в тканях аналогичных организмов на более южных территориях. Это делает многие организмы Арктики и Субарктики особо ценным сырьем для производства продукции с адаптогенными и здоровьесберегающими свойствами [4].

Производство такой продукции наукоемко и создает из сравнительно небольших объемов сырья продукты с высокой добавленной стоимостью и потребительской ценностью, востребованные как в нашей стране, так и за рубежом. Одновременно, капиталоемкость такого производства более чем умеренная и сам тип производства по классификационным признакам соответствует малому и среднему бизнесу, оптимальной формой

для которого является производственная кооперация, действующая в правовом режиме формата территорий опережающего социально-экономического развития (ТОСЭР). Управляющая компания в рамках режима ТОСЭР предоставляет в пользование резидентам полученный от государства локальный обособленный имущественный комплекс, включая современное инновационное биотехнологическое оборудование, за текущее состояние и развитие которого она и отвечает. Правовой режим, льготы и преференции ТОСЭР способны создать привлекательные условия внешним инвесторам [5]. Это делает ТОСЭР удобной формой для организации центров глубокой переработки биосырья [9]. Небольшие производственные участки с несколькими высококвалифицированными технологами могут создаваться практически в любом населенном пункте Арктики и Субарктики, вовлекая в производственную деятельность коренное и местное население, в первую очередь молодежь и людей среднего возраста с законченным школьным образованием.

Решение о выделении АЗРФ в составе территории страны было принято в связи с готовившимся созданием Арктического Совета в последние годы существования СССР как территории, в пределах которой будут реализовываться программы международного сотрудничества и в отношении которой будут приняты международные обязательства в сфере экологии и социально-экономического благополучия коренного и местного населения. В этих целях в Арктическом Совете создана рабочая группа по устойчивому развитию в Арктике – SDWG [5]. На Восьмой министерской сессии Арктического совета в мае 2013 года стороны «...признали, что экономическая деятельность в Арктике – неотъемлемая часть устойчивого развития народов и сообществ региона» [8]. В этой связи рациональное использование арктических биоресурсов – не только внутренние вопросы экономического развития, но и предмет международных обязательств в сопряженных сферах сохранения биоразнообразия и социально-экономического благополучия коренного и местного населения АЗРФ.

Биоресурсы Арктики ценны, но ограничены по суммарному объему. Они смогут обеспечить достойный уровень жизни коренного и местного населения только при условии углубленной их переработки с максимальным расширением линейки производимой продукции и рынков ее

реализации. Это возможно только на платформе инновационного биотехнологического производства в его современных организационных формах. Производство продукции из биоресурсов – сфера малого и среднего бизнеса. Но представители этого бизнеса не имеют ни собственных компетенций в этой сфере, ни необходимых сбережений для инвестирования. Без государственной поддержки и налаживания сотрудничества с научными организациями, работающими в области биотехнологий, в этой сфере не обойтись, и значимую роль в ней будут играть биоресурсные центры как источники соответствующих компетенций [4].

Заключение

Цели и задачи Указа Президента Российской Федерации от 07.05.2024 № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года», федерального закона от 30.11.2024 № 428-ФЗ «О биоресурсных центрах и биологических (биоресурсных) коллекциях и о внесении изменений в статью 29 федерального закона «О животном мире» и Национального проекта «Биоэкономика» взаимосопряжены. Системы мер по их достижению также поддаются взаимоувязыванию. В АЗРФ, где абсолютно преобладают ненарушенные или слабоизмененные природные ландшафты, а жесткий климат ограничивает возможности сельскохозяйственного производства, развитие биоэкономики возможно с использованием дикоросов и животных, обитающих в вольном или полувольном состоянии. Биопродуктивность арктической и субарктической биоты невелика, в связи с чем эффективное хозяйствование возможно при организации глубокой переработки сырья, расширении линейки производимой продукции и рынков ее реализации. Доступные к использованию запасы биомассы достаточны для хозяйственного использования в рамках малого и среднего бизнеса коренного и местного населения, не имеющего соответствующих компетенций и инвестиционных ресурсов.

С учетом необходимости государственной поддержки перспективен формат ТОСЭР с участием в проекте биоресурсных центров как источников компетенций. В качестве пилотного проекта перспективен разрабатывавшийся в Республике Саха (Якутия) проект ТОСЭР «Полярная звезда» с участием в качестве биоресурсного центра Институ-

та биологических проблем криолитозоны (ИБПК) СО РАН с его разнообразными инновационными разработками, уже производимыми в ограниченных объемах опытно-экспериментальным биоцехом ИБПК [2, 4]. ИБПК обладает всем необходимым набором компетенций, включая инвентаризацию биоресурсов республики и проектирование природоохранных режимов.

Федеральный закон от 13.07.2020 № 193-ФЗ «О государственной поддержке предпринимательской деятельности в Арктической зоне Российской Федерации», лишивший привязки режима ТОСЭР к локальным пространствам площадки промышленного парка, создал правовой прецедент расширения этой площадки на неопределенно большие пространства [11]. Это позволяет включать в территорию ТОСЭР не только промышленную площадку, но и уголья с правовым режимом ТТП или ЗОУИТ, продукция с которых используется в процессе переработки на промышленной площадке ТОСЭР [5].

Список литературы / References

1. Амирханов А.А., Романенков Р.Л., Тишков А.А. и др. Сохранение среды обитания арктической флоры и фауны. В кн.: Сапогин С.А. (ред.) *Сохранение биоразнообразия в Арктике. Проблемы, задачи, решения*. М.: Физматкнига; 2023. С. 81–108.
2. Жуков М.А., Романенков Р.Л., Тишков А.А., et al. Conservation of the habitat of Arctic flora and fauna. In: Sapogin S.A. (ed.) *Conservation of biodiversity in the Arctic. Problems, Tasks, Solutions*. Moscow: Fizmatkniga Publ.; 2023, pp. 81–108. (In Russ.)
3. Жуков М.А. Предисловие. В кн.: Сапогин С.А. (ред.) *Сохранение биоразнообразия в Арктике. Проблемы, задачи, решения*. М.: Физматкнига, 2023. С. 11–15.
4. Жуков М.А. Preface. In: Sapogin S.A. (ed.) *Conservation of biodiversity in the Arctic. Problems, Tasks, Solutions*. Moscow: Fizmatkniga Publ.; 2023, pp. 11–15. (In Russ.)
5. Жуков М.А., Кершенгольц Б.М., Куваев А.В. Традиционное природопользование на Севере – технологическая культура Арктической субцивилизации: от прошлого к будущему. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(4):574–583. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-4-574-583>
6. Жуков М.А., Кершенгольц Б.М., Куваев А.В. Traditional nature management in the North as a technological culture of the Arctic subcivilization: from past to future. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023; 28(4):574–583. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-4-574-583>
7. Жуков М.А., Романенков Р.Л., Тишков А.А. и др. *Методология стратегического планирования и правового регулирования в Арктической зоне Российской Федерации*. М.: Физматкнига, 2023. 109 с.
8. Zhukov M.A., Romanenkov R.L., Tishkov A.A., et al. *Methodology of Strategic Planning and Legal Regulation in the Arctic Zone of the Russian Federation*. Moscow: Fizmatkniga Publ.; 2023. 109 p. (In Russ.)
9. Жуков М.А., Телеснина В.М. Природно-хозяйственное пространственное планирование в Арктике. *Арктика 2035: актуальные вопросы, проблемы, решения*. 2021;(3):51–55.
10. Zhukov M.A., Telesnina V.M. Natural and economic spatial planning in the Arctic. *Arctic 2035: Current Issues, Problems, Solutions*. 2021;(3):51–55. (In Russ.)
11. Кершенгольц Б.М., Чернобровкина Т.В., Шейн А.А. и др. *Нелинейная динамика (синергетика) в химических, биологических и биотехнологических системах (издание второе, дополненное): Учебное пособие*. Якутск: Изд-во ЯГУ; 2009. 284 с.
12. Kershengolts B.M., Chernobrovkina T.V., Shein A.A., et al. *Nonlinear Dynamics (synergetics) in Chemical, Biological and Biotechnological Systems (second edition, supplemented): Textbook*. Yakutsk: Yakut State University Publishing House; 2009. 284 p. (In Russ.)
13. Пилиасов А.Н., Котов А.В. Некоторые аспекты международного экономического сотрудничества в Арктике. *Вестник СПбГУ. Сер. 6. Политология. Международные отношения*. 2016;(2):81–96.
14. Pilyasov A.N., Kotov A.V. Some aspects of international economic cooperation in the Arctic. *Vestnik of Saint Petersburg State University. Ser. 6. Political Science. International Relations*. 2016;(2):81–96. (In Russ.)
15. Федеральный закон от 29.12.2014 № 473-ФЗ «О территориях опережающего социально-экономического развития в Российской Федерации».
16. Federal Law, dated December, 29, 2014, No. 473-FZ, “On the Territories of Advanced Socio-Economic Development in the Russian Federation”. (In Russ.)
17. Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды».
18. Federal Law, dated January, 10, 2002, No. 7-FZ «On Environmental Protection». (In Russ.)
19. Федеральный закон от 13.07.2020 № 193-ФЗ «О государственной поддержке предпринимательской деятельности в Арктической зоне Российской Федерации».
20. Federal Law, dated July, 07, 2020, No. 193-FZ «On State Support for Entrepreneurial Activity in the Arctic Zone of the Russian Federation». (In Russ.)

Об авторах

ЖУКОВ Михаил Андреевич, кандидат биологических наук, ученый секретарь научного совета АНО «НКЦ «Север», SPIN: 9081-9033, e-mail: nkcsever@gmail.com

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

ZHUKOV, Mikhail Andreevich, Cand. Sci. (Biol.), Academic Secretary, ANO “NCC “Sever”, SPIN: 9081-9033, e-mail: nkcsever@gmail.com

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 16.01.2025

Поступила после рецензирования / Revised 22.04.2025

Принята к публикации / Accepted 14.05.2025



Достижения и перспективы развития микробиотехнологий на Северо-Востоке Евразии

М. П. Неустроев✉

Якутский научно-исследовательский институт сельского хозяйства
им. М.Г. Сафронова ФИЦ ЯНЦ СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация
✉mneustroev50@mail.ru

Аннотация

Приведен обзор результатов исследований Якутского НИИСХ за последние два десятилетия по разработке высокоэффективных инактивированных вакцин, изучению микробиоты домашних, диких и ископаемых палео-животных, созданию биопрепаратов, способствующих получению экологически чистой органической продукции животноводства. Впервые в России разработаны высокоэффективные инактивированные вакцины против мыта и сальмонеллезного аборта лошадей, утвержденные Россельхознадзором МСХ РФ. Разработан на основе штаммов *B. subtilis* пробиотик «Сахабактисубтил» для профилактики и лечения дисбактериозов, повышения иммунобиологической реактивности сельскохозяйственных животных. Научная новизна разработок подтверждена 53 патентами РФ. Для дальнейшего развития микробиотехнологий, создания и организации производства новых лекарственных средств и биопрепаратов с использованием микробиологического, животного и растительного сырья предлагается организация Арктического центра биотехнологий с микробиологической и вирусологической лабораториями на базе лабораторий по разработке микробных препаратов и ветеринарной биотехнологии ЯНИИСХ. Создание Арктического центра биотехнологий будет способствовать обеспечению биологической безопасности России, особенно на Северо-Востоке Евразии. В связи с интенсивным промышленным освоением Арктики, потеплением климата в высоких широтах, изменениями видового разнообразия фауны, путей миграции диких животных и перелетных птиц, угрозой зоонозных эпидемий нарастает необходимость не только широкомасштабного мониторинга инфекционных, особенно вирусных заболеваний животных и человека, но и разработки ветеринарных вакцин и биопрепаратов, повышающих надежность иммунологической защиты.

Ключевые слова: штаммы, микроорганизмы, вакцины, пробиотики, биологическая безопасность

Финансирование. Работа выполнена в рамках: государственного задания Якутского НИИСХ ЯНЦ СО РАН «Разработать методы создания новых биопрепаратов, технологии борьбы и профилактики болезней животных и птиц, обеспечивающих получение органической продукции традиционных отраслей сельского хозяйства на Крайнем Севере» (FWS-2021-0007); технологического проекта «Биотехнологии глубокой переработки уникального северного, экологически чистого, воспроизводимого биосырья» (2022-2024 годы), выполняемого в рамках НОЦ «Север: территория устойчивого развития».

Для цитирования: Неустроев М.П. Достижения и перспективы развития микробиотехнологий на Северо-Востоке Евразии. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(2):290–302. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-290-302>

Review article

Achievements and future opportunities for the advancement of microbiotechnology in the North-East of Eurasia

Mikhail P. Neustroev✉

Safronov Yakut Scientific Research Institute of Agriculture – Division of Federal Research Centre
“The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”,
Yakutsk, Russian Federation
✉mneustroev50@mail.ru

Abstract

This article provides a comprehensive analysis of the research conducted by the Yakut Scientific Research Institute of Agriculture over the past two decades. It highlights the advancement of highly effective inactivated vaccines, the exploration of microbiota in domestic, wild, and fossilized Paleozoic animals, and the development of biological products that facilitate organic livestock production. The Institute has achieved a significant milestone by developing, for

the first time in Russia, highly effective vaccines aimed at preventing horse-soap and salmonella-related abortions. These vaccines have received approval from Rosselkhoznadzor, the regulatory authority within the Ministry of Agriculture of the Russian Federation. Additionally, the probiotic “Sakhabactisubtil”, derived from *Bacillus subtilis* strains, has been formulated to prevent and treat dysbiosis while enhancing the immunobiological reactivity of livestock. These innovations have been patented in the Russian Federation, resulting in the issuance of 53 patents that validate their scientific innovation. To further advance microbiological technologies and improve the production of innovative pharmaceuticals and biologics using microbial, animal, and plant resources, the establishment of an Arctic Biotechnology Center is proposed. This center would capitalize on the laboratories of the Yakut Scientific Research Institute of Agriculture and is intended to encompass microbiological and virology laboratories focused on the development of microbial products and veterinary biotechnologies. The establishment of this center is anticipated to significantly bolster Russia’s biological security, particularly in the northeastern region of Eurasia. The accelerated industrial development in the Arctic, alongside the effects of climate change in high-latitude regions, has resulted in substantial changes in species diversity, wildlife migration patterns, and the routes of migratory birds. These transformations have increased the risk of zoonotic diseases and the likelihood of epidemic outbreaks. As a result, there is an urgent need for comprehensive monitoring of infectious diseases, with particular emphasis on viral pathogens that impact both animals and humans. Furthermore, there is a critical necessity to develop effective veterinary vaccines and biological products to enhance overall health and safety.

Keywords: strains, microorganisms, vaccines, probiotics, biological safety

Funding. This study was conducted within the framework of the state assignment for the Yakut Scientific Research Institute of Agriculture, which is affiliated with the FRC “Yakut Scientific Centre of the SB of the RAS”, titled “Creation of new biopreparations and technologies, control and prevention of animal and bird diseases, ensuring the production of organic products in traditional agricultural sectors of the Far North” (No. FWRS-2021-0007). Additionally, this study was integrated into the technological project titled “Biotechnologies for the deep processing of unique northern, environmentally friendly, renewable bio-raw materials”, 2022–2024 as part of the Scientific and Educational Center “North: Territory of Sustainable Development”.

For citation: Neustroev M.P. Achievements and future opportunities for the advancement of microbiotechnology in the North-East of Eurasia. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(2):290–302. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-290-302>

Введение

В настоящее время особую актуальность приобретает задача обеспечения биологической безопасности России, особенно в Арктике.

Общепризнанное потепление климата в высоких широтах, деградация многолетнемерзлых грунтов, интенсивное промышленное освоение природных ресурсов, контролируемые и неконтролируемые палеонтологические раскопки, расширение среды обитания переносчиков зоонозных инфекций (насекомых, грызунов), изменения путей миграции диких животных и перелетных птиц могут увеличить риск возникновения и распространения инфекционных болезней человека и животных. Следует учитывать появление новых вирусов и бактерий в результате естественного или искусственного мутагенеза.

В природе насчитывается около 1,5 млн видов представителей дикой фауны. Они могут быть резервуарами и переносчиками около 75 % инфекционных болезней животных и человека [1–3]. Более половины из них, включая грипп, СПИД, атипичную пневмонию, лихорадки Денге и Эбола, имеют животное происхождение [4], как и Covid-19, вызвавший всемирную пандемию [5]. Болезни животных значительно влияют на патоло-

гии человека, так 60 % инфекционных болезней людей – зоонозы, 75% эмерджентных инфекций – зоогенного происхождения, 80 % объектов биотерроризма – возбудители зоонозов [6]. Сохраняется угроза заноса визиккулярных инфекций на территорию России при миграции диких животных по трем направлениям: северокавказскому, центрoазиатскому и дальневосточному [7, 8].

В Якутии, самом крупном по территории регионе России (3 083 523 км²), представляющем основную часть Северо-Востока Евразии, гнездятся более 30 млн диких птиц (271 вид). В последние десятилетия отмечены изменения в составе орнитофауны: появляются новые виды – чибис, кулик-поручийник, светлокрылая крачка, скворец, большая синица, и список этот продолжает пополняться [9]. Большая часть гнездящихся пернатых – 217 видов являются перелетными, которые зимуют в основном в странах Юго-Восточной Азии. По количеству диких копытных Якутия занимает одно из первых мест в России [10]. В Якутии отмечаются природные очаги сибирской язвы, бешенства, бруцеллеза, иерсиниоза, лептоспироза, туляремии и других болезней. В этой связи реальна угроза распространения опасных зоонозов. Вместе с тем, вопрос научно обоснованного

мониторинга, профилактики и борьбы с инфекционными болезнями животных и человека остается открытым. А в связи с отсутствием современных вирусологической и микробиологической лабораторий регион становится потенциальным очагом будущих пандемий. Это – глобальная проблема.

Известно, что изменения климата и глобальное потепление создают условия для преодоления вирусами межвидовых барьеров и расширения ареала их распространения [11]. Также настораживает уникальный факт возрождения гигантского вируса из арктического льда с возрастом 30 тысяч лет [12]. Другой пример – выделение якутскими учеными жизнеспособных бактерий рода *Bacillus* из останков представителей мамонтовой фауны, сохранившихся в многолетнемерзлых грунтах 30–40 тысяч лет [13–15]. В литературе есть данные о выделении возбудителя чумы из захоронений XVIII–XIX веков на территории Якутии. Эти факты указывают на особую роль «вечной мерзлоты» в сохранении возбудителей инфекционных болезней.

В целях рационального проведения общих профилактических мероприятий по сибирской язве нами составлен кадастр неблагополучных пунктов на территории Республики Саха (Якутия), на которой в период с 1811 по 1993 г. зарегистрированы 739 вспышек сибирской язвы среди домашних и диких животных в 29 административных районах, в 244 населенных пунктах. Среди них – 455 неблагополучных пунктов сибирской язвы, ранее не входившие в Российский кадастр [16, 17]. В России последняя вспышка сибирской язвы отмечена на Ямале в 2016 г. Причиной возникновения считается оттаивание вечной мерзлоты [18]. Предыдущая вспышка сибирской язвы зарегистрирована на Ямале в 1941 г. Исходя из этого, можно предположить, что споры оставались жизнеспособными в мерзлотной почве не менее 75 лет. В Якутии сибирская язва с 1993 г. не регистрируется. Однако в Абыйском районе (2015 г.) выделены три возбудителя сибирской язвы во время палеонтологических раскопок [19].

Возможность возникновения сибирской язвы диктует необходимость разработки эффективных и экологически безвредных способов и методов обеззараживания мест, зараженных спорами, и специфической профилактики инактивированными вакцинами.

Нами впервые в условиях Якутии установлено распространение среди диких копытных лептоспироза, иерсиниоза, сальмонеллеза, инфекционного ринотрахеита и вирусной диареи [20]. Эти данные дополняют результаты исследований авторов, отмечавших значительную зараженность диких животных в других субъектах России и странах мира.

Несомненно, что развитие агропромышленного комплекса в северных регионах возможно только в условиях стабильного эпидемиологического и эпизоотического благополучия, которое может создаваться на базе научных знаний о механизмах распространения, межвидовой передаче, видовом составе вирусов возбудителей заболеваний человека, домашних и диких животных, птиц. Необходимость мониторинга инфекционных болезней диких животных и птиц возрастет в период распространения новых вирусных болезней, в том числе коронавируса COVID-19. Тем более есть сообщение о распространении коронавирусной болезни среди лошадей в штате Колорадо США. Установлено сходство клинических признаков, вызванных коронавирусом лошадей (ECoV) и возбудителем сальмонеллезного аборта [21]. Н. Вульф отмечал необходимость глобального мониторинга передачи вирусов от диких животных человеку для контроля распространения инфекционных болезней и предотвращения пандемии [4]. Есть предположение, что следующим регионом начала пандемии гриппа птиц может быть Крайний Север России, в том числе Якутия [22].

Установление нами циркуляции вирусов инфекционного ринотрахеита, диареи в популяции оленей Арктических районов и у лесных бизонов указывает на то, что переносчиками возбудителей могут быть перелетные птицы [20]. Таким образом, болезни диких животных и птиц могут оказывать существенное влияние на их численность и продуктивность, а также угрожать здоровью домашних животных и человека.

Исходя из вышеизложенного, актуальным является проведение мониторинга инфекционных болезней диких животных, перелетных птиц, а также бактериологических, вирусологических и молекулярно-генетических исследований выделенных изолятов. Исследования, направленные на изучение микробиоты и выделенных изолятов, помогут определить пути передачи возбудителей зоонозов, разработать и организовать методы за-

щиты диких, домашних животных, птицы и человека.

Необходимость разработки и производства биопрепаратов для ветеринарного применения, растениеводства и плановое их использование в целях обеспечения биологической безопасности, научно-технического обеспечения развития сельского хозяйства, снижения технологических рисков в продовольственной сфере и обеспечения производства органической продукции отмечены в ряде указов Президента РФ и Главы РС (Я).

Согласно ФЗ № 280-ФЗ «Об органической продукции и о внесении изменений в отдельные экономические акты Российской Федерации» от 3 августа 2018 г. предусматривается разработка и производство биологических препаратов.

Органическое сельское хозяйство предусматривает запрет на применение агрохимикатов, пестицидов, антибиотиков, стимуляторов роста и откорма животных, гормональных препаратов, за исключением тех, которые разрешены к применению в Российской Федерации.

В настоящее время мировая общественность уделяет серьезное внимание безопасности продуктов питания, что наиболее ярко проявилось в отказе от использования антибиотиков в животноводстве стран Европейского союза с января 2006 года. Для решения проблемы резистентности микроорганизмов к антибиотикам предлагаются разработки нового поколения эффективных антибактериальных веществ, бактериофагов, бактериальных удобрений, фитобиостимов и иммуномодуляторов.

В Республике Саха (Якутия) от традиционных отраслей – коневодства и оленеводства можно получить органическую продукцию, которая обладает экспортоориентированным потенциалом. Однако в настоящее время получению такой продукции препятствуют широкое использование антибиотиков, распространение бактериальных и вирусных инфекций.

В настоящее время микробиологические технологии наиболее развиты в таких странах, как США, Канаде, Японии и Европейском союзе. Китай, Индия и Бразилия приступили к реализации программ развития по всему спектру биотехнологий.

Несмотря на перспективность и огромные потенциальные возможности рынков биотехнологической продукции, биотехнологии в России развиты недостаточно. В Республике Саха (Яку-

тия) в этой сфере имеются определенные научные достижения в областях переработки сельскохозяйственного сырья и разработки новых лекарственных средств в ветеринарной медицине. Однако результаты научных исследований остаются недостаточно востребованными из-за слабой коммерциализации результатов и ограниченных возможностей экспериментальных производств.

Важность микробиологических биотехнологий для развития сельскохозяйственного производства, обеспечивающих продовольственную безопасность, охрану ранимой окружающей среды Якутии, неоспорима. Методы и способы микробиологической биотехнологии позволяют производить национальные кисломолочные продукты, разработать новые экологически безопасные ветеринарные лекарственные средства, эффективные добавки, премиксы, переработать отходы агропромышленного комплекса (навоз, помет, осадки сточных вод), наладить производство биологических удобрений, средств защиты и повышения урожайности растений, рекультивировать загрязненные почвы с учетом климатических условий и особенностей ведения отраслей животноводства и растениеводства в условиях Северо-Востока Евразии.

Исходя из вышеизложенного ставится цель – разработать и организовать производство лекарственных средств и биологических препаратов с использованием микробиологического сырья для получения органической продукции, повышения продуктивности отраслей сельского хозяйства, обеспечения импортозамещения и экспорта продукции.

Эти задачи включают разработку:

- лекарственных средств для ветеринарного применения из микробного сырья (вакцины и пробиотики);

- биопрепаратов для ветеринарного применения, пищевой промышленности и охраны природы (бактериофаги, кормовые добавки, закваски кумыса, суората и других национальных продуктов, ферментные препараты из растительного, животного и микробного сырья, препараты для биоремедиации почвы, очистки воды);

- биопрепаратов для растениеводства (биологические удобрения, препараты для борьбы с болезнями растений),

- а также создание Арктического центра микробиотехнологий с микробиологической и ви-

Таблица 1

**Штаммы микроорганизмов, выделенные
и идентифицированные в ЯНИИСХ,
депонированные во Всероссийских коллекциях**

Table 1

**Strains of microorganisms isolated and identified
at the Yakut Scientific Research Institute of Agriculture
and deposited in the All-Russian collections**

№	Штамм
1	Штамм возбудителя сальмонеллезного аборта лошадей <i>Salmonella abortus</i> БН-12
2	Штамм возбудителя мыта <i>Streptococcus equi</i> Н-5/1
3	Штамм бактерий <i>Bacillus subtilis</i> ТНП-3
4	Штамм бактерий <i>Bacillus subtilis</i> ТНП-5
5	Штамм бактерий <i>Bacillus subtilis</i> «Колыма-7/2к»
6	Штамм бактерий <i>Bacillus subtilis</i> «Оймякон-6/1»
7	Штамм <i>Lactobacillus acidophilus</i> К 1902
8	Штамм <i>Lactobacillus delbrueckii</i> subsp. <i>bulgaricus</i> К 1903
9	Штамм <i>Lactobacillus acidophilus</i> К 1901
10	Штамм молочных дрожжей <i>Clavispora lusitanae</i> 1 Д
11	Штамм бактерий <i>Bacillus subtilis</i> 2СП В-14405
12	Штамм бактерий <i>Bacillus subtilis</i> 5СП В-14406
13	Штамм бактерий <i>Bacillus subtilis</i> 27 L VKPM В-14800
14	Штамм бактерий <i>Bacillus subtilis</i> 11 К VKPM В-14816

русологической лабораториями мирового уровня и биофармзавода, который будет производить все вышеперечисленное.

В Якутском НИИСХ с 1997 г. организована и действует лаборатория по разработке микробных препаратов, в 2013 г. организована новая лаборатория ветеринарной биотехнологии. В результате многолетних исследований по микробной экологии мерзлотных почв, растений, домашних, диких и ископаемых животных учеными ЯНИИСХ установлено, что в микробиоценозе окружающей среды и микробиоте животных в условиях вечной мерзлоты особую и доминирующую роль играют бактерии рода *Bacillus*, обладающие уникальными биологическими свойствами. Эта группа микроорганизмов является одной из самых перспективных групп в современной биотехнологии [23].

В целях разработки биотехнологических препаратов выделены, идентифицированы и депонированы во Всероссийских коллекциях 14 штаммов микроорганизмов (табл. 1).

Штаммы выделены из мерзлотных почв, сельскохозяйственных и диких животных, палеомикробиоты, якутского кумыса. Микроорганизмы используются для разработки иммунобио-

логических и биологических препаратов. Два штамма поданы на Международное депонирование. Идентификация штаммов проводилась бактериологическими, молекулярно-генетическими и биохимическими методами. Штаммы депонированы в Государственных коллекциях микроорганизмов ВГНКИ ветеринарных препаратов Россельхознадзора, Московском НИИ эпидемиологии и микробиологии им. Г.Н. Габричевского Роспотребнадзора, ВНИИ сельскохозяйственной микробиологии и в Биоресурсном центре Всероссийской коллекции микроорганизмов Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт».

В рамках мониторинга инфекционных болезней изучается микробиота животных и птиц. Имеется коллекция около 400 изолятов бактерий *Bacillus*, выделенных из микробиоты сельскохозяйственных и диких животных, мамонтовой фауны и мерзлотных почв. Проводится изучение биологических свойств (пробиотические, антагонистические, ферментативные и фунгицидные) и возможности их использования в микробиотехнологии России и Китая.

Вакцины аналогов в России не имеют. Пробиотик превосходит по эффективности существ-

Таблица 2

Биопрепараты, созданные в ЯНИИСХ

Table 2

Biologics created at the Yakut Scientific Research Institute of Agriculture

№	Биопрепараты
1	Пробиотик «Сахабактисубтил» для профилактики дисбактериозов, повышения иммунобиологической реактивности сельскохозяйственных животных, утвержденный Россельхознадзором МСХ РФ (2006, 2012 гг.). Пробиотик предохраняет 90–95 % молодняка от болезней желудочно-кишечного тракта. Экономический эффект на 1 руб. затрат составляет 16–17 рублей
2	Вакцина против мыта лошадей, утверждена Россельхознадзором (2021 г.). Эффективность иммунизации 90–95 %. Экономический эффект на 1 руб. затрат составляет 7 рублей
3	Вакцина против сальмонеллезного аборта лошадей, утверждена Россельхознадзором МСХ РФ (2006, 2012, 2019 гг.). Внесены изменения в регистрационное досье и выдано новое регистрационное удостоверение в 2019 г. Иммунизация вакциной повышает деловой выход жеребят в неблагополучных пунктах на 15,7–23 %. Экономический эффект на 1 руб. затрат составляет 10,7 рублей
4	Вакцина против мыта лошадей «Табын» утверждена МСХ Республики Казахстан (2018 г.)
5	Вакцина против мыта утверждена в Монголии (2023 г.)
6	Микробная закваска для якутского кумыса (2022 г.)
7	Йогурт якутский кумысный (2025 г.)

вующие аналоги. Производство их лицензировано и организовано при ЯНИИСХ (2010–2015 гг.) и ООО НПЦ «Хоту-Бакт» (2015 г.) [24]. Научная новизна разработок защищена 53 патентами РФ. Биопрепараты востребованы не только в республике, но и в других регионах, а также в Казахстане и Монголии. В настоящее время продукция используется в Красноярском, Алтайском краях, Новосибирской и Владимирской областях, республиках Алтай, Хакасия, Бурятия и Казахстан. Во исполнение поручения Главы РС (Я) А.С. Николаева организовано лицензированное производство вакцины мыта в Монголии (2024 г.) и планируется в Казахстане. Разработчики биопрепаратов являются победителями инновационных проектов по Дальневосточному региону (2006 г.), обладателями золотой медали ВВЦ за препарат «Сахабактисубтил» (2007 г.), лауреатами государственных премий по науке и технике РС (Я) (4 премии). ООО НПЦ «Хоту-Бакт» резидент Технопарка «Якутия», участник Фонда «Сколково», обладатель Гранта Президента РС (Я), приза Ассоциации тихоокеанских Технопарков мира (2019 г.), победитель конкурса экспортеров года Якутии (2023).

По результатам испытания пробиотиков и вакцин разработаны и изданы рекомендации и методические пособия (табл. 3) [23].

В последние годы завершены испытания новых вакцин и пробиотиков:

- вакцина против мыта и ринопневмонии;

- вакцина против ринопневмонии лошадей инактивированная;
- ассоциированная вакцина против ринопневмонии, сальмонеллезного аборта и мыта лошадей;
- кормовая добавка «Норбакт» для птицеводства;
- кормовая добавка для крупного рогатого скота и свиней;
- пробиотики для производства инновационных пробиотических кисломолочных продуктов нового поколения;
- санитарно-гигиеническое средство «Пробиодез-3+5» для обработки вымени коров после доения.

В настоящее время проводятся следующие научные исследования (табл. 4).

Реализация проекта развития микробиотехнологий в Якутии предусматривает два этапа: I – 2026–2027 гг., II – 2028–2029 гг.

На первом этапе для развития науки, обеспечения спроса Якутии на биотехнологическую продукцию и ее реализацию в субъектах России необходимо решить задачи, указанные в табл. 5.

На втором этапе для глубокой модернизации технологической базы перерабатывающей и биологической промышленности за счет массового внедрения в производство методов и продуктов сельскохозяйственной биотехнологии, организации промышленного производства лекарственных средств, средств защиты и повышения продуктивности растений, почвы необходимо решить задачи, отмеченные в табл. 6.

**Рекомендации и методические пособия, разработанные в ЯНИИСХ
по результатам испытаний пробиотиков и вакцин**

Table 3

**Recommendations and methodological manuals developed
at the Yakut Scientific Research Institute of Agriculture
based on the results of trials with probiotics and vaccines**

№	Рекомендации и методические пособия
1	Профилактика и лечение мыта лошадей в табунном коневодстве (Новосибирск, 2006 г.)
2	Профилактика инфекционных болезней лошадей (Якутск, 2002 г.)
3	Профилактика инфекционных абортков кобыл в табунном коневодстве: рекомендации (Якутск, 2002 г.)
4	Создание специализированных стад северных оленей для производства биологически активных добавок и пищевых продуктов в условиях севера Сибири и Дальнего Востока Российской Федерации (Москва, 2010 г.)
5	Система контроля за проявлением микобактериозов крупного рогатого скота в условиях Якутии (Якутск, 2010 г.)
6	Вакцина против ринопневмонии лошадей инактивированная с иммуномодулятором в профилактике вирусного аборта лошадей табунного содержания (Якутск, 2012 г.)
7	Меры борьбы с лептоспирозом животных в условиях Якутии (Якутск, 2013 г.)
8	Комплекс мероприятий по обеззараживанию и переработке навоза и птичьего помета в условиях Якутии (Новосибирск, 1996 г.); – технические условия 2180-001-00670203-00 «Биоорганическое удобрение с Сахабактисубтилом (БОУСС)» (утверждены МСХ РС(Я) от 26.07.2000 г.); – техническая инструкция по производству биоорганического удобрения с Сахабактисубтилом (БОУСС) (утверждена МСХ РС (Я) от 26.07.2000 г.)
9	Пробиотик «Сахабактисубтил» в профилактике и лечении диарейных заболеваний телят и поросят (Якутск, 2003 г.)
10	Профилактика микотоксикозов сельскохозяйственных животных и условиях Республики Саха (Якутия) (Якутск, 2004 г.)
11	Штаммы <i>Bacillus subtilis</i> в профилактике послеродовых осложнений коров (Якутск, 2006 г.)
12	Профилактика нарушений обмена веществ у крупного рогатого скота в условиях Якутии (Якутск, 2007 г.)
13	Технология применения пробиотика в оленеводстве (Якутск, 2008 г.)
14	Профилактика и лечение болезней северного оленя (Москва, 2008 г.)
15	Профилактика желудочно-кишечных болезней в клеточном звероводстве (Якутск, 2008 г.)
16	Технология применения пробиотиков из штамма бактерий <i>Bacillus subtilis</i> в свиноводстве и птицеводстве (Якутск, 2010 г.)
17	Способы профилактики микотоксикозов крупного рогатого скота с применением препарата «Сахабактисубтил» в условиях Якутии (Якутск, 2010 г.)
18	Биологически активные добавки и пищевые продукты в условиях Севера, Сибири и Дальнего Востока РФ (Москва, 2010 г.)
19	Пробиотики из штамма <i>Bacillus subtilis</i> в сельском хозяйстве Якутии (Якутск, 2010, 2012 гг.)
20	Силосование кормовых культур с использованием биопрепаратов (Якутск, 2012 г.)
21	Технология применения препарата «Сахабактисубтил» для нормализации кишечного микробиоценоза лошадей после дегельминтизации (Якутск, 2013 г.)
22	Меры борьбы с лептоспирозом животных в условиях Якутии (Якутск, 2013 г.)
23	Профилактика микотоксикозов лошадей табунного содержания в условиях Якутии (Якутск, 2014 г.)
24	Диагностика, профилактика, лечение маститов коров (Якутск, 2015 г.)
25	Технология применения пробиотика «Сахабактисубтил» в коневодстве (Якутск, 2015 г.)
26	Технология приготовления и использования пробиотического кисломолочного продукта на основе штаммов бактерий <i>Bacillus subtilis</i> из вторичного сырья коровьего молока молодняку крупного рогатого скота (Якутск, 2018 г.)
27	Санитарно-гигиеническое средство «Пробиодез3+5» на основе штамма бактерий <i>Bacillus subtilis</i> для дезинфекции помещений в присутствии животных и обработке вымени коров после доения (Якутск, 2021 г.)
28	Биопрепараты из штаммов бактерий, выделенных из мерзлотных почв Якутии (Якутск, 2022 г.)

№	Рекомендации и методические пособия
29	Профилактика ринопневмонии и мыта молодняка лошадей комбинированной вакциной с иммуномодулятором (Якутск, 2022)
30	Выделение и идентификация бактериофагов против возбудителя сальмонеллезного аборта лошадей (Якутск, 2023 г.)
31	Ветеринарно-санитарные требования к безопасности продукции табунного коневодства, поставляемой на экспорт (Якутск, 2023 г.)
32	Технология приготовления и использования ферментной кормовой добавки на основе штаммов бактерий <i>Bacillus subtilis</i> для табунного коневодства Республики Саха (Якутия) (Якутск, 2024 г.)
33	Probiotics on the basis of bacteria <i>Bacillus subtilis</i> in agriculture (Якутск, 2024 г.)

Таблица 4

Научные исследования ЯНИИСХ в области микробиологических биотехнологий

Table 4

Scientific research of the Yakut Scientific Research Institute of Agriculture
in the field of microbiological biotechnology

№	Тематика	Результаты
1	Разработка моюще-дезинфицирующих средств на основе пробиотических штаммов микроорганизмов	В 2019 г. получен патент РФ на изобретение
2	Разработка ферментной кормовой добавки с использованием пробиотических штаммов для молодняка лошадей	
3	Разработка микробных препаратов для борьбы с болезнями и повышения урожайности растений (картофель, огурцы, помидоры, земляника)	Получены три патента РФ на изобретение
4	Поиск штаммов бактерий продуцентов биологически активных веществ	Исследуется микрофлора диких животных. Выделены перспективные штаммы. Установлено распространение иерсиниоза среди лосей и косуль
5	Исследования микробиоты перелетных птиц с целью оценки их возможной роли в передаче возбудителей инфекционных заболеваний человека и животных	В связи с угрозой новых зооантропонозных заболеваний это направление крайне важно и является задачей мирового уровня
6	Изучение ферментов микроорганизмов	Результаты исследований будут являться основанием для постановки задачи организации биотехнологического завода по производству ферментов
7	Разработка бактериофагов	

В табл. 7 указаны основные инструменты поддержки развития сельскохозяйственной микробиотехнологии в Якутии.

Приоритеты развития сельскохозяйственной биотехнологии.

В сельскохозяйственную биотехнологию включены пищевая и природоохранная (экологическая) биотехнологии:

1. *Биологическая защита растений.* Средства для повышения продуктивности. В условиях «вечной мерзлоты» актуальным становится поиск биологических мер защиты и повышения продуктивности растений. В ЯНИИСХ разработаны методы борьбы с болезнями картофеля,

огурцов, земляники с использованием пробиотических штаммов микроорганизмов, выделенных из мерзлотных почв. Получены три патента РФ на изобретения. Следует их доработать, провести производственные испытания, утвердить новые средства защиты в Россельхознадзоре, организовать производство.

2. *Биоудобрения.* Будут разработаны биологические удобрения с полезными микроорганизмами (азотфиксирующие, споровые и другие). Продолжается поиск микроорганизмов, перерабатывающих органические отходы (навоз, помет, осадки сточных вод). Биопрепараты будут способствовать развитию органического земле-

Таблица 5

Задачи I этапа развития микробиотехнологий в Якутии в 2026–2027 гг.

Table 5

Objectives for the first stage of microbiotechnology development in Yakutia, 2026–2027

№	Задачи
1	Развитие сельскохозяйственной биотехнологической науки, создание и укрепление лабораторий. Приобретение приборов и оборудования. Разработка новых технологий и лекарственных средств. Коммерциализация научных результатов. Патенты. Патентные соглашения. Лицензирование и сертификация производства. Утверждение НТД (инструкции, ТУ, технологические инструкции)
2	Создание биофармзавода
3	Производство национальных кисломолочных продуктов (кумыс, суorat)
4	Промышленное производство новых лекарственных средств для сельского хозяйства, ветеринарной медицины и экологии (вакцина против мыта, вакцина против сальмонеллезного аборта, вакцина инактивированная против ринопневмонии, вакцина ассоциированная против ринопневмонии, сальмонеллезного аборта и мыта, пробиотики «Сахабактисубтил», «Пантобакт», «Норбакт», «Хонгуринобакт», средства защиты и повышения продуктивности растений и почвы)
5	Подготовка и переподготовка кадров
6	Создание коллекции микроорганизмов

Таблица 6

Задачи II этапа развития микробиотехнологий в Якутии в 2028–2029 гг.

Table 6

Objectives for the second phase of microbiotechnology development in Yakutia, 2028–2029

№	Задачи
1	Промышленное производство национальных кисломолочных продуктов
2	Промышленное производство биологических средств (лекарственные средства, средства защиты растений)
3	Развитие междисциплинарных систем исследований. Взаимодействие и интеграция с технологической средой субъектов России и зарубежных стран
4	Создание МИП для вовлечения потенциала научных организаций в создание и производство новых биотехнологических продуктов

деля – основы органического животноводства, а также снижению экологического ущерба. В ЯНИИСХ разработана технология производства биоудобрения на основе переработки и обеззараживания навоза и помета с использованием пробиотических микроорганизмов. Получены два патента РФ на изобретения. Следует подготовить НТД, утвердить и получить лицензию, организовать производство.

3. *Биопрепараты для животноводства.* Преимуществом российских иммунобиологических лекарственных средств должно быть изготовление их из «местных» штаммов микроорганизмов, обуславливающих их высокую специфичность и эффективность.

Для развития сельскохозяйственной биотехнологии необходимо:

1. Разработать механизм субсидирования части инвестиционных расходов предприятий, на-

правляемых на создание новых производственных мощностей по выпуску биотехнологических продуктов в сфере сельского хозяйства.

2. Разработать механизм софинансирования создания пилотных предприятий для отработки и внедрения в сельском хозяйстве инновационных биотехнологических продуктов.

3. Создать Центр биологических ресурсов (сельскохозяйственной и экологической биотехнологии, непатогенных микроорганизмов для сельского хозяйства и экологии).

4. Создать биофармзавод биопрепаратов для сельского хозяйства (микробные препараты для животноводства, растениеводства).

5. Создать малые инновационные предприятия:

- по обеззараживанию отходов и осадков сточных вод с использованием микробных препаратов;
- по производству биоудобрений;
- по обеззараживанию нефтезагрязненных почв;

**Основные инструменты поддержки развития
сельскохозяйственной микробиотехнологии в Якутии**

Table 7

Main tools for supporting the development of agricultural microbiology in Yakutia

№	Инструменты
1	Стимулирование спроса на биотехнологическую продукцию, включая: – принятие республиканской программы развития биотехнологии; – организацию кластера сельскохозяйственной биотехнологии в технопарке Якутия; – разработку мер государственной поддержки сельхозпроизводителей в использовании биологической продукции (лекарственные средства, кисломолочная продукция, средства защиты растений, удобрения); – разработку и реализацию механизма поддержки государственных закупок биотехнологической продукции; – разработку мер стимулирования предприятий производителей биотехнологической продукции
2	Содействие повышению конкурентоспособности биотехнологических предприятий: – предоставление на грантовой основе или на условиях беспроцентного займа финансирования для реализации программ НИОКР; – усиление приоритета развития биотехнологий, особенно в период ранних стадий инновационной деятельности – «предпосевной» и «посевной» в рамках грантов, программа поддержки малого и среднего бизнеса, Фонда содействия развития малых форм предприятий в научно-технической сфере и других фондов (венчурный и другие); – разработка механизмов поддержки создания и деятельности биотехнологических предприятий за счет развития инновационной инфраструктуры (кластер сельскохозяйственной биотехнологии, центр коллективного использования оборудования и приборов); – реализация опыта применения «зеленых стандартов» для рационального использования природных ресурсов, освоения экологически безвредных технологий
3	Развитие образования в сфере сельскохозяйственной биотехнологии: – расширение взаимодействия и интеграции аграрной науки и вуза в сфере сельскохозяйственной биотехнологии (создание кафедр, проведение совместных исследований), финансовая поддержка такого взаимодействия в рамках аграрно-, научно-образовательного производственного комплекса; – создание новых образовательных программ по сельскохозяйственной биотехнологии; – организация системы повышения квалификации и переподготовки биотехнологических кадров в центральных НИУ и вузах
4	Развитие науки в сфере сельскохозяйственных биотехнологий: – увеличение доли расходов (биотехнологической) науки в структуре бюджета РАН и РС(Я); – разработка стратегической программы исследований по сельскохозяйственной биотехнологии в РС(Я)
5	Развитие экспериментальной производственной базы: – развитие инновационной инфраструктуры путем создания экспериментальных предприятий для наработки партий с целью лабораторных, клинических и производственных испытаний; – привлечение средств государственного и частного бизнеса для развития экспериментальных производств; – формирование подпрограмм и отдельных мероприятий по созданию экспериментальных предприятий в рамках Республиканской программы развития биотехнологии
6	Поддержка и развитие биокolleкций: – создание центра коллекции микроорганизмов; – взаимодействие с ведущими НИУ – держателями коллекций (ВГНКИ ветеринарных препаратов, ВНИИСХМ, МНИМЭМ, ВИЗР и другие) и международными центрами; – разработка и реализация мер государственной поддержки центра коллекции микроорганизмов
7	Международное сотрудничество: – разработка совместных программ НИОКР в рамках РНФ (Германия, Китай, Япония, Монголия); – лицензирование новых препаратов в Японии, Китае и Монголии; – экспорт препаратов; – создание референтных лабораторий Международного эпизоотического бюро

– по детоксикации кормов, продуктов, организма, контаминированных солями тяжелых металлов.

6. Формировать заказ на выполнение научных исследований по следующим направлениям:

– разработка новых лекарственных средств для профилактики и лечения болезней животных;

– разработка новых средств повышения урожайности и борьбы с болезнями сельскохозяйственных культур;

– разработка мер детоксикации продуктов, кормов, организма, контаминированных солями тяжелых металлов;

– разработка новых средств и методов обеззараживания и рекультивации нефтезагрязненных почв.

Необходимость разработки и использования вакцин, пробиотиков обусловлена сложной эпизоотической обстановкой по заразным болезням лошадей, таким как мыт, лептоспироз, ринопневмония и сальмонеллез, которые вызывают аборт и распространены почти во всех хозяйствах республики. Так, сальмонеллезный аборт в 1985–2023 гг. зарегистрирован в 150 пунктах 21 улусах, а ринопневмония в 2002–2018 гг. – в 100 пунктах 16 улусах. Приказом МСХ РФ от 19 декабря 2011 г. ринопневмония, лептоспироз и сальмонеллез включены в перечень заразных, в том числе особо опасных болезней животных, по которым могут устанавливаться ограничительные мероприятия (карантин). В результате распространения инфекционных болезней (сальмонеллы, ринопневмония, мыт) и невыполнения других зоотехнических и ветеринарных требований деловой выход жеребят в республике составляет всего 50–55 %. Ущерб составляет около 1,5 млрд руб/год. Установление карантина приводит к отмене племпродажи, недополучению продукции, снижению объемов продаж. При проведении профилактических мероприятий с использованием вакцин деловой выход минимально может быть повышен на 10 % или можно получить дополнительно 8 тыс. жеребят на сумму 560 млн рублей. Это только по коневодству.

Использование биологических препаратов и удобрений в растениеводстве позволит получить органическую продукцию и повысить урожайность на 10–20 %, обеспечить импортозамещение биопрепаратов и экспорт продукции.

Для развития биомедицины и биофармацевтики следует:

1. Разработать пробиотические препараты для медицины.

2. Разработать и провести клинические испытания новых кисломолочных продуктов для профилактики и лечения туберкулеза и других болезней на основе якутских штаммов бактерий, депонированных в коллекции ФБУН ВНИИЭМ им. Г.Н. Габричевского.

Заключение

Реализация проекта развития микробиотехнологий для разработки и производства новых био-

препаратов явится основой становления Якутии как биотехнологической республики, развития отраслей сельского хозяйства с высоким качеством продукции, обеспечивающих продовольственную и биологическую безопасность северо-восточных регионов Российской Федерации.

Список литературы / References

1. Бедоева З.М., Божьева Ю.В. Эпизоотологический мониторинг инфекционных болезней у диких плотоядных животных. *Ветеринарная медицина*. 2011;(3-4):120–122.

Bedoeva Z.M., Bozhyeva Yu.V. Epizootological monitoring of infectious diseases in wild carnivorous animals. *Veterinarnaya meditsina*. 2011;(3-4):120–122. (In Russ.)

2. Artois M. The role of wildlife in the control of domestic animal diseases. *Conf. OIE*. 2012. 1–9.

3. Заволока А.А. Заболевание диких и экзотических животных и их роль в заболевании людей. *VetPharma*. 2013;(3):21–30.

Zavoloka A.A. Diseases of wild and exotic animals and their role in human diseases. *VetPharma*. 2013;(3):21–30. (In Russ.)

4. Вульф Н. Как предотвратить пандемию. *В мире науки*. 2009;(6):65–69.

Wulf N. Preventing a Pandemic: *V Mire Nauki=A World of Science*, 2009;6:65–69. (In Russ.)

5. Официальный сайт Россельхознадзора. www.fsvps.ru/fsvps/print/news/34932.html.

Official website of the Rosselkhoz nadzor. www.fsvps.ru/fsvps/print/news/34932.html.

6. Макаров В.А., Грубый В.А., Груздев К.Н., Сухарев О.И. *Список МЭБ и трансграничные инфекции животных*: монография. Владимир: ВНИИЗЖ; 2012. 162 с.

Makarov V.A., Grubiy V.A., Gruzdev K.N., Sukharev O.I. *The OIE List and Cross-Border Animal Infections*: A Monograph. Vladimir; 2012. P. 162. (In Russ.)

7. Морозов А.В. Экологическое значение распространения возбудителей бактериальных инфекций охотничьих животных в Беларуси. *Животноводство и ветеринарная медицина*. 2015;16(1):33–38.

Morozov A.V. The ecological significance of the spread of pathogens of bacterial infections among hunting animals in Belarus. *Animal Agriculture and Veterinary Medicine*. 2015;16(1):33–38. (In Russ.)

8. Семакина В.П., Акимова Т.П., Соломатина И.Ю., Караулов А.К. Риск заноса особо опасных заболеваний животных с везикулярным синдромом на территории России. *Ветеринария сегодня*. 2019;28(1):3–9. <https://doi.org/10.2932/2304-196X-1-28-3-9>

Semakina V.P., Akimova T.P., Solomatina I.Yu., Karaulov A.K. Risk of introducing highly dangerous animal vesicular diseases into the Russian Federation. *Veterinary Science Today*. 2019;28(1):3–9. (In Russ.) <https://doi.org/10.2932/2304-196X-1-28-3-9>

9. Дегтярев А.Г. *Охотничье-промысловые птицы Республики (Саха) Якутии*. Якутск: Изд-во СО РАН; 2004. 109 с.
- Degtyarev A.G. *Hunting and commercial birds of the Republic (Sakha) Yakutia*. Yakutsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2004. 109 p. (In Russ.)
10. Аргунов А.В., Степанова В.В., Охлопков И.М. Динамика численности и использование ресурсов диких копытных в таежной части Якутии. *Аграрный вестник Урала*. 2017;161(7):4–11.
- Argunov A.V., Stepanova V.V., Okhlopov I.M. The population dynamics and resource use of wild ungulates in the taiga of Yakutia. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2017;161(7):4–11. (In Russ.)
11. Legendre M., Bartoli J., Shmakova L., et al. Thirty-thousand-year-old distant relative of giant icosahedral DNA viruses with a pandoravirus morphology. *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2014;111(11):4274–4279. <https://doi.org/10.1073/pnas.1320670111>.
12. Legendre M., Lartique A., Bertaux L., et al. In-depth study of Mollivirus sibericum, a new thirty-thousand-old giant virus infecting Acanthamoeba. *Morphology. Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2015;112(38):5327–5335. <https://doi.org/10.1073/pnas.1510795112>.
13. Tarabukina N.P., Neustroev M.P., Fedorova M.P., et al. Yakutia Zoolite Microflora. In *Vth International Conference on Mammoth and their Relatives*. 2010;59–60.
14. Neustroev M.P. On the prospects of microbiological research on mammoth fauna in permafrost. *Quaternary International*. 2012;255:139–140.
15. Neustroev M.P., Tarabukina N.P., Neustroev M.M., et al. Microflora of Fossil Animals Preserved in Yakut Permafrost. *Journal of Earth Science and Engineering*. 2014;4:484–489.
16. Huber I., Potapova R., Ammosova E., et al. Symposium report: emerging threats for human health – impact of socioeconomic and climate change on zoonotic diseases in the Republic of Sakha (Yakutia), Russia. *International Journal of Circumpolar Health*. 2020;79(1):1–13. <https://doi.org/10.1080/2243982.2020.171598>.
17. Дягилев Г.Т., Неустроев М.П. Кадастр неблагоприятных пунктов по сибирской язве в Республике Саха (Якутия). *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*. 2019;49(5):88–93. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2019-5-11>.
- Dyagilev G.T., Neustroev M.P. Cadastre of unfavorable locations for anthrax of animals in the Republic of Sakha (Yakutia). *Siberian Herald of Agricultural Science*. 2019;49(5):88–93. (In Russ.) <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2019-5-11>.
18. Timofeev V., Bakhteeva I., Mironova R., et al. Insights from *Bacillus anthracis* strains isolated from permafrost in the tundra zone of Russia. *BioRxiv preprint first posted online Dec. 3. 2018*. <https://doi.org/10.1101/486290>.
19. Ерофеевская Л.А. Генетическая идентификация сибирезязвенного штамма, выделенного из нефтезагрязненного многомерзлого грунта. В кн.: *Шестая Пушчинская школа-конференция «Биохимия, физиология и биосферная роль микроорганизмов»: Материалы конференции, г. Пушchino, 2–6 декабря 2019 г.* Пушchino: Вода: химия и экология; 2019. С. 86–88.
- Yerofeevskaya L.A. Genetic identification of the anthrax strain isolated from oil-contaminated permafrost soil. In: *Sixth Pushchino School-Conference “Biochemistry, Physiology, and the Biospheric Role of Microorganisms”: Conference Proceedings, Pushchino, December 2–6, 2019*, Pushchino: Water, Chemistry, and Ecology Publ.; 2019, pp. 86–88. (In Russ.)
20. Неустроев М.П., Юров К.П., Тарабукина Н.П. и др. Роль диких животных в эпизоотологии инфекционных болезней в Якутии. *Ветеринария и кормление*. 2021;(5):57–64. <https://doi.org/10.30917/ATT-VK-1814-9588-2021-5-15>
- Neustroev M.P., Yurov K.P., Tarabukina N.P., et al. Role of wild animals in epizootology of infectious diseases in Yakutia. *Veterinaria i kormlenie*. 2021;(5):57–64. (In Russ.) <https://doi.org/10.30917/ATT-VK-1814-9588-2021-5-15>.
21. Manship A.J., Bliklager A.T., Elfenbein J.R. Disease features of equine coronavirus and enteric salmonellosis are similar in horses. *Journal of Veterinary Medicine*. 2019;33(2):912–917. <https://doi.org/10.1111/jvim.15386>.
22. Revich B.A., Podolnaya M.A. Thawing of permafrost may disturb historic cabbie burial grounds in East Siberia Cibaion. *Global Health Action*. 2011;4:8482. <https://doi.org/10.3402/gha.410.8482>.
23. Неустроев М.П., Тарабукина Н.П. *Технология применения иммунобиологических и пробиотических препаратов в сельском хозяйстве*. Новосибирск: Изд. ООО «СибАК»; 2022. 374 с.
- Neustroev M.P., Tarabukina N.P. *Technology of Using Immunobiological and Probiotic Drugs in Agriculture*. Novosibirsk: SibAK Publishing House; 2022. 374 p. (In Russ.)
24. Неустроев М.П., Петрова С.Г. *Разработка иммунобиологических препаратов против вирусных и бактериальных болезней лошадей*. Новосибирск: Изд. ООО «СибАК»; 2023. 186 с.
- Neustroev M.P., Petrova S.G. *Development of Immunobiological Drugs for Viral and Bacterial Diseases in Horses*. Novosibirsk: SibAK Publishing House; 2023. 186 p. (In Russ.)

Об авторе

НЕУСТРОЕВ Михаил Петрович, доктор ветеринарных наук, профессор, главный научный сотрудник, заместитель директора по науке, заведующий лабораторией ветеринарной биотехнологии, <https://orcid.org/0000-0003-0672-4109>, ResearcherID: 1-4401-2017, Scopus Author ID: 50462075800, SPIN: 2897-9540, e-mail: mneustroev50@mail.ru

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

About the author

NEUSTROEV, Michael Petrovich, Dr. Sci. (Vet.), Professor, Chief Researcher, Deputy Director for Science, Head of Laboratory of Veterinary Biotechnology, <https://orcid.org/0000-0003-0672-4109>, ResearcherID: 1-4401-2017, Scopus Author ID: 50462075800, SPIN: 2897-9540, e-mail: mneustroev50@mail.ru

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 17.04.2025

Поступила после рецензирования / Revised 21.05.2025

Принята к публикации / Accepted 28.05.2025



Обзорная статья

Национальный проект России «Биоэкономика» на Северо-Востоке Евразии: биопрепараты из тканей холодоадаптированных дикоросов и аборигенных видов животных

Б. М. Кершенгольц 

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

kerschen@mail.ru

Аннотация

В работе показано, что большой ресурс для развития биоэкономики имеет Северо-Восток Евразии. В результате действия экстремальных природно-климатических факторов на биоту в тканях северных организмов синтезируется уникальный комплекс биоактивных веществ. Их интактное выделение с помощью современных физико-химических биотехнологий, во-первых, позволяет создавать биопрепараты регуляторного и защитного действия по отношению к организму человека, которые находят широкое применение в медицине, пищевой промышленности и косметологии. Во-вторых, их производство из вторичного сырья и отходов традиционных отраслей хозяйствования на Севере (северное оленеводство, коневодство холодоадаптированной якутской лошади, охотничий и рыбный промыслы, выращивание в природных условиях и собирательство дикоросов) позволяет на 25–40 % повысить их рентабельность, в итоге – качество, уровень жизни и состояние здоровья северян. В Республике Саха (Якутия) имеются все условия и составляющие, необходимые для развития биотехнологической промышленности: уникальное по составу биоактивных веществ, самовозобновляемое, экологически чистое, северное растительное и животное биосырье; квалифицированные кадры биотехнологов и медицинских работников, проводящих доклинические и клинические испытания разрабатываемых биопрепаратов; материально-техническая база – экспериментальный биоцех в Институте биологических проблем криолитозоны (ИБПК) СО РАН, в котором используются современные физико-химические биотехнологии для интактного выделения комплексов биоактивных веществ из тканей холодоадаптированных дикоросов и аборигенных видов животных; большой задел в виде созданных биопрепаратов, имеющих сертификаты Роспотребнадзора (ЕВРАЗЭС). В статье приводится обзор авторских биопрепаратов, их физико-химических свойств, результатов доклинических и клинических испытаний, области применения в профилактической, лечебной и реабилитационной медицине, а также в производстве функциональных продуктов питания, в организациях и на предприятиях соответствующих квалифицированных пользователей (медицинские учреждения, предприятия пищевой промышленности и др.). Намечены задачи следующего этапа развития биоэкономики в регионе.

Ключевые слова: биоэкономика, биотехнологии, Северо-Восток Евразии, биопрепараты из тканей холодоадаптированных растений и животных

Финансирование. Работа выполнена в рамках: государственного задания ИБПК СО РАН «Физиолого-биохимические механизмы адаптации растений, животных, человека к условиям Арктики/Субарктики и разработка биопрепаратов на основе природного северного сырья, повышающих эффективность адаптационного процесса и уровень здоровья человека в экстремальных условиях среды» (FWRS-2021-0025; регистр. номер НИОКТР АААА-А21-121012190035-9); II этапа Программы комплексных научных исследований в Республике Саха (Якутия), направленных на развитие ее производительных сил и социальной сферы на 2021–2024 годы (КНИ-2); Технологического проекта НОЦ «Север: территория устойчивого развития» «Биотехнологии глубокой переработки уникального северного, экологически чистого, воспроизводимого биосырья», 2022–2024 годы.

Для цитирования: Кершенгольц Б.М. Национальный проект России «Биоэкономика» на Северо-Востоке Евразии: биопрепараты из тканей холодоадаптированных дикоросов и аборигенных видов животных. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(2):303–325. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-303-325>

National project of Russia “Bioeconomics” in the North-East of Eurasia: biopreparations from tissues of cold-adapted wild plants and native animal species

Boris M. Kershengolts✉

*Institute for Biological Problems of Cryolithozone, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yakutsk, Russian Federation
✉kerschen@mail.ru*

Abstract

The North-East region of Eurasia offers substantial opportunities for advancing bioeconomy, primarily due to the unique array of bioactive substances present in the tissues of northern organisms. This phenomenon is significantly influenced by the region’s extreme natural and climatic conditions. The intact extraction of these bioactive substances, facilitated by contemporary physicochemical biotechnology, enables the development of biopreparations that possess regulatory and protective properties beneficial to human health. These biopreparations have extensive applications across various sectors, including medicine, the food industry, and cosmetology. Moreover, the utilization of secondary raw materials and waste generated by conventional northern economic activities –such as reindeer herding, the breeding of cold-adapted Yakut horses, hunting, fishing, and the cultivation and gathering of wild plants–has the potential to enhance profitability by 25 to 40%. This practice contributes to the improvement of quality of life, living standards, and health among the northern population. The Republic of Sakha (Yakutia) is endowed with the necessary conditions and components for the advancement of the biotechnology industry. This includes a unique array of bioactive substances, as well as self-renewable and environmentally sustainable northern plant and animal bio-raw materials. The region is characterized by a skilled workforce comprising biotechnologists and medical professionals who are actively engaged in the preclinical and clinical trials of developed biopreparations. An experimental bioworkshop at the Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS employs advanced physicochemical biotechnologies for the intact isolation of bioactive substance complexes derived from the tissues of cold-adapted wild plants and native animal species. The biopreparations produced in this bioworkshop have received certification from Rospotrebnadzor (EURASEC). This article provides a comprehensive overview of proprietary biopreparations, detailing their physicochemical properties, the results of preclinical and clinical trials, and their applications in preventive, therapeutic, and rehabilitative medicine. Furthermore, it addresses the significance of biopreparations in the manufacturing of functional food products by organizations and enterprises that are recognized as qualified entities, including medical institutions and entities within the food industry. The goals for the next stage of bioeconomy advancement in the region have been distinctly outlined.

Keywords: bioeconomics, biotechnology, North-East Eurasia, biopreparations from tissues of cold-adapted plants and animals

Funding. This study was conducted within the framework of the state assignment for the Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS titled “Physiological and biochemical mechanisms of adaptation of plants, animals, and humans in Arctic/Subarctic regions and the development of biopreparations derived from natural northern raw materials that increase the efficiency of the adaptation process and improve human health in extreme environmental conditions” (theme No. FWRS-2021-0025; registration No. AAAA-A21-121012190035-9). This research aligns with Stage II of the Program for Comprehensive Scientific Research in the Republic of Sakha (Yakutia) for the period 2021–2024 (KNI-2). Additionally, it is associated with the technological project “Biotechnologies for deep processing of unique northern, environmentally friendly, reproducible bio-raw materials”, 2022–2024 of the Scientific and Educational Center “North: Territory of Sustainable Development”.

For citation: Kershengolts B.M. National project of Russia “Bioeconomics” in the North-East of Eurasia: biopreparations from tissues of cold-adapted wild plants and native animal species. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(2):303–325. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-303-325>

Введение

Биоэкономика – это экономическая деятельность, связанная с использованием биотехнологий и биомассы в производстве товаров, услуг

или энергии, включая применение научных и технологических разработок в сельском хозяйстве, здравоохранении, пищевой промышленности, химической и энергетической отраслях [1]. Био-

**Содержание общих фенольных групп в молекулах флавоноидов
из тканей некоторых дикоросов и органов животных**

Table 1

**Content of total phenolic groups in flavonoid molecules
from the tissues of some wild plants and animal organs**

Вид растений (вид и органы животного)	Якутия		Приморский край	
	Концентрация, мг/мл	Количество фракций	Концентрация, мг/мл	Количество фракций
Рододендрон золотистый / <i>Rhododendron golden</i>	2,78±0,28	10	2,10±0,20	5
Уснея / <i>Usnea</i>	0,44±0,04	8	0,32±0,03	5
Полынь чернобыльник / Wormwood Chernobyl	0,70±0,08	11	0,50±0,05	6
Родиола розовая / <i>Rhodiola rosea</i>	0,88±0,09	12	0,60±0,05	6
Кверцитины из коры лиственницы / Quercetins from larch bark	1,02±0,11	7	0,65±0,06	3
Желчь медведя / Bear bile	0,51±0,05	6	0,38±0,04	3
Панты оленя (северного – в Якутии; благородного – в приморье) / Deer antlers (northern – in Yakutia; red in Primorye)	0,98±0,05	24	0,32±0,05	6

экономика включает в себя те отрасли экономики, которые используют возобновляемые биологические ресурсы суши и моря – такие как сельскохозяйственные культуры, дикоросы, рыба, животные и микроорганизмы, – для производства продуктов питания, товаров для здоровья, материалов, изделий, текстиля и энергии, решая при этом глобальные проблемы, такие как изменение климата, истощение ресурсов и продовольственная безопасность, здоровье населения [2].

Уникальный ресурс для развития биоэкономики – биота Северо-Востока Евразии (региона с самым холодным климатом в обитаемой части планеты Земля), благодаря тому что природный холод вызывает в организмах растений и животных, произрастающих/обитающих в этих экстремальных условиях среды, формирование комплекса адаптивных механизмов на биохимическом, физиологическом, морфологическом уровнях. Один из основных – адаптивные изменения состава физиологически активных веществ (ФАВ) регуляторного и защитного действия. Установлено, что ткани северных растений и животных отличаются повышенным в 1,5–2,5 раза содержанием ФАВ регуляторного и защитного действия, по сравнению с аналогичными видами, произрастающими/обитающими в условиях умеренного климата [3–8] (табл. 1 и 2). Причем, одна из важнейших биохимических адаптаций (своего рода увеличение «биоразнообразия на молекулярном уровне») – в 3–5 раз большее структурное разно-

образие ФАВ регуляторного и защитного действия (изомеров, гомологов, производных по степени окисленности и т. д.), выполняющих одну и ту же функцию, но с разными характеристиками активности.

Биоразнообразие на молекулярном уровне фактически является количественной мерой адаптивного потенциала, позволяющего организмам выживать в экстремальных условиях природной среды, так как именно структурное разнообразие ФАВ регуляторного и защитного действия определяет способность биосистем сохранять способность к самоорганизации в экстремальных и изменяющихся условиях среды [9–11] (аналогично тому, как биоразнообразие экоформ и видов в популяциях и экосистемах является количественной мерой их адаптивного потенциала).

Вместе с тем, так как большинство этих ФАВ – вещества *неспецифического* регуляторного и защитного действия, то, будучи введенными в организм человека, они оказывают соответствующий биогенный профилактический и лечебный эффект на него. Причем такое действие в биосистемах оказывают не отдельные ФАВ, а определенный ансамбль их структурных семейств. Поэтому структурное разнообразие этих ФАВ при их использовании в качестве активного комплекса веществ в биопрепаратах позволяет избежать негативных побочных эффектов, характерных для монокомпонентных химиофармацевтических препаратов (например, формирования супербак-

**Структурное разнообразие фракций флавоноидов
тканей некоторых лекарственных растений,
произрастающих в разных климатогеографических зонах**

Table 2

**Structural diversity of flavonoid fractions in tissues
of some medicinal plants across distinct climatic and geographical zones**

Вид растения	Регион		
	Якутия	Бурятия	Монголия
Вздутоплодник сибирский/ Siberian swollen fruit	5	2	3
Родиола розовая / <i>Rhodiola rosea</i>	12	6	7
Рододендрон золотистый / <i>Rhododendron golden</i>	10	6	
Рододендрон даурский / <i>Rhododendron daurica</i>	6	4	

терий при использовании синтетических и полусинтетических антибиотиков). На этом основаны принципы юго-восточно-азиатской традиционной медицины. Получать все компоненты такого комплекса синтетическим путем – весьма сложная и дорогая задача. Иное дело – разработать биотехнологии их интактного выделения из соответствующего вида воспроизводимого и экологически чистого биосырья. Эта особенность биохимического состава тканей северных экоформ дикоросов и аборигенных видов диких животных – значимое преимущество развития биоэкономики в условиях Крайнего Севера с использованием этих тканей как биосырья для глубокого биотехнологического передела.

Развитие биоэкономики на Крайнем Севере имеет и большую социально-экономическую значимость. Например, глубокая биотехнологическая переработка вторичного сырья и отходов традиционных отраслей хозяйства коренного населения Крайнего Севера (оленоводство северного оленя, коневодство якутской лошади, охотничий промысел, сбор северных дикоросов и организация их питомников в природной среде) позволит повысить их рентабельность на 25–40 %, благодаря высоким потребительской ценности и добавленной стоимости конечных продуктов, а также создать новые высокотехнологичные рабочие места и, в целом, повысить уровень жизни северян.

Биоэкономика включает в себя создание и масштабное внедрение в практику биотехний и биотехнологий сохранения и расширения биоразнообразия, являющегося основой устойчивости и продуктивности любых экосистем, что особенно актуально для легко ранимых северных экосистем, а также биотехний сохранения и рас-

ширения (реинтродукции) видового состава северных экоформ растений, видов холодоадаптированных диких животных, с учетом обеспеченности последних кормовой базой и адекватности их взаимодействия с другими элементами соответствующих экосистем.

В Институте биологических проблем криолитозоны СО РАН в течение 70 лет сложились научные школы, накоплен большой информационный и экспериментальный материал по изучению и расширению биоразнообразия, основ устойчивости и продуктивности легко ранимых северных экосистем, рациональному использованию биоресурсов; изучен биохимический состав тканей более 50 видов и экоформ северных дикоросов и пяти аборигенных видов холодоадаптированных видов животных; создана экспериментально-технологическая база по биотехнологическому глубокому переделу уникальных северных природных биоресурсов дикоросов и тканей аборигенных видов диких животных с получением продуктов с высокой добавленной стоимостью. Разработаны и используются современные физико-химические биотехнологии с использованием приемов ультра-, нанофильтрации, низкотемпературного фракционирования ($-42 \div -48^\circ\text{C}$), экологически чистой механохимической (безреагентной) активации природного биосырья и другие. Получено более 60 патентов РФ, проведены клиническая апробация шести созданных БАД, их сертификация с получением разрешительных документов Роспотребнадзора (ЕВРАЗЭС; г. Москва) на производство и реализацию пантовых и комплексных лишайниково-растительных биопрепаратов. Создан сертифицированный опытно-экспериментальный биоцех, налажен выпуск небольших партий соответствующей продукции

медицинского, пищевого и косметологического направлений. С их использованием ряд предприятий пищевой промышленности наладили выпуск функциональных пищевых продуктов: только за 10 месяцев 2023 и за 10 месяцев 2024 гг. их было произведено и реализовано населению на общую сумму около 390 млн рублей.

Биопрепараты на основе пантов северного оленя

В 70-е годы XX века профессором И.И. Брехманом с коллегами в СССР из пантов благородного оленя был создан биопрепарат «Пантокрин». В России в 90-е годы XX века на рынке появился и был официально признан препарат на основе пантов северного оленя «Рантарин». В последующем появились БАДы, произведенные из пантов и рогов северного оленя: «Валкорнин» и «Цыганпан». Экстракты из пантов северного оленя получили широкое применение в косметике в виде биологически активных добавок в кремы, лосьоны и гели.

Наиболее активным и сбалансированным по биоактивным компонентам, благодаря авторской оригинальной биотехнологии, является БАД «Эпсорин» (водно-спиртовой либо в сахарном сиропе экстракт из пантов северного оленя) [12–16]. Результаты клинических испытаний «Эпсорина», проведенные в начале 1990-х годов на основании решения Фармакологического комитета РФ в Главном военном клиническом госпитале им. Н.Н. Бурденко (г. Москва), Российском государственном медицинском университете МЗ РФ (г. Москва), ВНИИ физической культуры и спорта (г. Москва), Национальном государственном университете физической культуры, спорта и здоровья имени П.Ф. Лесгафта (г. Санкт-Петербург) и в других медицинских центрах, показали, что «Эпсорин» является эффективным лекарственным средством в отношении астенических состояний различного генеза, при неврастении, неврозах, в постоперационном периоде, при слабости сердечной мышцы, при гипотонии, обладает стимулирующими, придающими силы свойствами, повышает физическую и умственную работоспособность. Его эффект на 40–60 % более выражен, чем соответствующий эффект «Пантокрина», что подтверждено электрофизиологическими (ЭКГ, ЭЭГ) исследованиями и психологическими тестами.

Установлено, что «Эпсорин» обладает выраженным радиопротекторным действием в отно-

шении иммунной и кроветворной систем (повышает клеточность костного мозга и тимуса, увеличивает число ранних предшественников кроветворения в костном мозге и селезенке) по сравнению с экстрактом из пантов лося или настоек женьшеня (табл. 3) [17].

Показано, что «Эпсорин»: стимулирует процесс восстановления кроветворения в костном мозге и селезенке (без оказания заметного влияния на лимфоузлы) и после цитостатического действия; оказывает стимулирующий эффект на функциональную активность всего компартмента ранних предшественников гемопоэза (кроветворения костного мозга), выявляемого методом экзогенного колониеобразования (КОЕс), обеспечивающих успешное протекание начальных этапов эритро-, миело- и лимфопоэза; предотвращает ингибирующее влияние холодового воздействия на процесс формирования клеточного и гуморального иммунного ответа к тимусзависимому антигену ЭБ; введение «Эпсорина» до холодового воздействия восстанавливает колониеобразующую активность ранних предшественников кроветворения до контрольных значений. То есть «Эпсорин» предотвращает ингибирующее влияние острого холодового стресса на функции клеток иммунной и кроветворной систем.

Показана высокая эффективность «Эпсорина» как иммуномодулятора при лечении патологий с аутоиммунным компонентом в патогенезе: больных острым вирусным гепатитом «В», хроническими вирусными гепатитами «В» и «С» в период выраженной активности [18], больных хроническим обструктивным бронхитом [19], при лечении туберкулеза легких [20]. Противопоказание курсовому приему «Эпсорина» – выраженная гипертоническая болезнь.

«Эпсорин» рекомендован для применения в практике спортивной медицины для повышения адаптации к интенсивным физическим и психологическим нагрузкам, повышения физической работоспособности, ускорения восстановления, профилактики перетренированности, при астенических состояниях и как стресс-регулирующее средство. Он не вызывал побочного действия и аллергических реакций и повышал работоспособность, в том числе и в группе практически здоровых людей.

В Центре спортивной медицины Федерального медико-биологического агентства России в ходе проведения НИОКР по теме «Апробация методик коррекции функциональных состояний

Таблица 3

**Радиопротекторное и криозащитное действие «Эпсорина»
в отношении иммунной и кроветворной систем
(контроль – экстракт пантов лося или экстракт корней и корневищ женьшеня)**

Table 3

**Radioprotective and cryoprotective effects of Epsorin
on the immune and hematopoietic systems
(control group of elk antler extract or ginseng root or rhizome extract)**

Исследуемый параметр	Контроль	«Эпсорин»
1. Колониеобразующая активность при введении «Эпсорина» в течение 5 дней до облучения в дозе 5 Гр (число КОЕс на селезенку)	4,7 ± 0,4	8,0 ± 0,6
2. Колониеобразующая активность при введении «Эпсорина» в течение 5 дней после облучения в дозе 5 Гр (число КОЕс на селезенку)	6,0 ± 0,5	10,4 ± 0,7
3. Клеточность костного мозга на 9-е сутки после облучения при введении «Эпсорина» в течение 5 дней до облучения в дозе 5 Гр (число миелокарноцитов 10 ⁶ / бедро)	4,4 ± 0,4	8,4 ± 0,6
4. Клеточность костного мозга на 9-е сутки после облучения при введении «Эпсорин» в течение 5 дней после облучения в дозе 5 Гр (число миелокарноцитов 10 ⁶ / бедро)	4,2 ± 0,4	6,2 ± 0,5
5. Клеточность тимуса на 9-е сутки после облучения при введении «Эпсорина» в течение 5 дней до облучения в дозе 5 Гр (число тимоцитов 10 ⁷)	3,8 ± 0,3	5,2 ± 0,5
6. Клеточность тимуса на 9-е сутки после облучения при введении «Эпсорина» в течение 5 дней после облучения в дозе 5 Гр (число тимоцитов 10 ⁷)	2,3 ± 0,2	3,3 ± 0,3
7. Клеточность костного мозга на 5-е сутки после введения циклофосфана (100 мг/кг) при введении «Эпсорина» в течение 5 дней до цитостатика (число миелокарноцитов 10 ⁶ / бедро)	9,8 ± 0,6	17,1 ± 0,9
8. Клеточность селезенки на 5-е сутки после введения циклофосфана (100 мг/кг) при введении «Эпсорина» в течение 5 дней до цитостатика (число клеток 10 ⁷)	5,2 ± 0,8	10,2 ± 0,6
9. Число КОЕс (на 10 ⁵ клеток костного мозга) через 5 дней после в/в введения сингенных клеток костного мозга животным, летально облученным в дозе 8,5 Гр	3,3 ± 0,3	6,8 ± 0,4
10. Число КОЕс (на 10 ⁵ клеток костного мозга) через 11 дней после в/в введения сингенных клеток костного мозга животным, летально облученным в дозе 8,5 Гр	9,5 ± 0,5	16,2 ± 0,5
11. Число антителообразующих клеток /10 ⁶ клеток селезенки на 4 сутки после окончания холодового стресса, который длился 3 часа при +7–8 °С, и иммунизации тимусзависимым антигеном (ЭБ). «Эпсорин» вводился <i>per os</i> в течение 5 дней до холодового стресса в дозе 60 мг/кг	1750 ± 320	3860 ± 270

спортсменов с использованием продуктов из природного северного сырья. Разработка учебно-тематических программ применения БАД на основе продуктов из природного северного сырья для коррекции функциональных состояний спортсменов» подтверждена высокая эффективность использования БАД «Эпсорин» в тренировочном цикле спортсменов национальных и олимпийских сборных России, а также установлено, что «...Биопрепарат Эпсорин не содержит каких-либо компонентов, обладающих допинговой активностью, и может быть использован в подготовке спортсменов и при занятиях массовыми формами физической культуры без ограничений».

На основе «Эпсорина» в 1998 г. был разработан БАД «Эпсорин в сахарном сиропе» [21], который показал высокую эффективность в педиатрии и в спортивной медицине, включая лечение

дисбактериозов толстой кишки у детей 5–7 лет: почти в 10 раз увеличилось содержание лактобактерий и нормальных эшерихий, причем ни у кого из детей после применения «Эпсорина в сахарном сиропе» не было выявлено кишечных палочек с измененными свойствами и условно-патогенных энтеробактерий. При приеме «Эпсорина в сахарном сиропе» спортсменами (кик-боксерами, футболистами, гимнастами, марафонцами и др.) в тренировочном цикле объем выполненной работы возрастал почти в 2 раза. Показано положительное действие на организм и самочувствие спортсменов «Эпсорина в сахарном сиропе» при его разовом приеме перед соревнованиями.

«Эпсорин» применяется в производстве функциональных пищевых продуктов с адаптогенной и иммуномодуляторной активностью. На производственных предприятиях ФАПК «Якутия»

с 2020 года налажен промышленный выпуск уникального тонизирующего (*НЕ энергетик*) безалкогольного и бескофеинового напитка «YES» (Yakutia Energy Secret), не имеющего аналогов в мире. Основным оригинальным биоактивным комплексом являются микродобавки «Эпсорина» [22]. Его употребляют как дополнение к пище и как мягкий биостимулятор без побочных действий. Интересен спортсменам и всем, кто следит за здоровьем, так как его рецептура основана на традиционных натуральных продуктах, используемых коренными народами Севера. Партнером стала международная компания, работающая с «Pepsi- и Coca-Cola», Испытания нового продукта были проведены в 2018–2019 гг. в трех институтах в Дрездене, Москве и Санкт-Петербурге. Только за 10 месяцев 2023 и 10 месяцев 2024 гг. произведено и реализовано населению безалкогольного и бескофеинового напитка «YES» более чем на 32 млн рублей.

В целях снятия противопоказания при применении «Эпсорина» (гипертонической болезни) был создан биопрепарат «Роксирина». [23]. Эффект достигался путем введения в «Эпсорин» ФАВ, выделяемых из шести видов дикоросов и эндокринных органов северных аборигенных животных: полыни якутской, якутской экоформы родиолы розовой, рододендрона золотистого, солодки уральской, струи кабарги, желчи бурого медведя По характеру действия «Роксирина» – аналог «Эпсорина», но благодаря тому, что отличается от него более разнообразным составом ФАВ (простагландины, интерлейкины, интерфероны и другие регуляторные пептиды, антиоксиданты, полный набор аминокислот, микро- и макроэлементов, фосфолипиды, стероиды и органические кислоты, дезоксиурсохолевая кислота, колхициноподобные вещества, флавогликозиды и другие), обладает не только биостимулирующей, антистрессовой, тонизирующей, гонадотропно стимулирующей активностью, но и еще более выраженным иммуномодулирующим, противовоспалительным, противоаллергическим антидотным, радиозащитным действием, *нормализует* артериальное давление, оказывает хорошие клинические эффекты при лечении астенических состояний различной природы, половых расстройств, синдрома похмелья, заболеваниях желудочно-кишечного тракта, вирусных гепатитов, заболеваний органов дыхания и других патологий, связанных с нарушениями функцио-

нирования иммунной системы или гормональной регуляции.

Адаптогенный эффект «Роксирина» подтвержден следующими результатами. В пяти группах людей, сравнимых в этно-половозрастном отношении, в течение 3–4 месяцев регистрировалась заболеваемость по семи нозологическим формам (простудные заболевания в осенне-зимний период, заболевания сердечно-сосудистой системы, центральной нервной системы, аллергические, дыхательной системы, желудочно-кишечного тракта, инфекционные), а также прочая заболеваемость (табл. 4).

Добровольцы первой (контрольной) группы не принимали антистрессовые биопрепараты. Лица второй группы при повышении интенсивности действия стресс-факторов различной природы принимали в профилактических целях по стандартной схеме препарат «Пантокрин», третьей – экстракт корней и корневищ родиолы розовой, четвертой – «Эпсорин», пятой – «Роксирина». Результаты, приведенные в табл. 4, показывают, что чем разнообразнее сбалансированный состав ФАВ, тем более высокую профилактическую эффективность оказывает БАД в отношении заболеваний стресса. Так при использовании «Роксирина» общая заболеваемость снизилась почти в 3 раза по сравнению с контролем. Анализ ряда параметров крови, уровень которых увеличивается при формировании неспецифической адаптивной реакции (НАР) «стресс» в организме (содержание глюкозы, липопротеидов, холестерина, активности глутамил-, аспартатамино- и аланинаминотрансфераз) [24], показал, что эти биопрепараты обладают адаптогенным эффектом, наиболее выраженным у «Роксирина». Одной из наиболее частых причин стрессуемости приездающего в Якутию населения является процесс адаптации к экстремальным климатическим условиям, особенно в осенне-зимний период. Формирование НАР «стресс» или предстрессовых реакций при этом характеризуется рядом симптомов: головной болью, головокружением, одышкой, сердцебиением, понижением аппетита, повышенной утомляемостью, сонливостью, раздражительностью, слабостью, ослабленным вниманием, плохим настроением. В пяти группах людей, впервые приехавших в Якутию (по 25 человек) и проходящих стадию адаптации к климатическим условиям г. Якутск в течение первого для каждого человека осенне-зимнего сезона, была проведена адаптогенная профилактика ука-

Таблица 4

Профилактическое и адаптогенное действие комплексов ФАВ из пантов благородного и северного оленя, родиолы розовой и БАД «Роксирин» (по мере усложнения их состава) по некоторым клиническим и биохимическим характеристикам ($p < 0,05$)

Table 4

Preventive and adaptogenic effects of complexes of FAS obtained from red and reindeer antlers, *Rhodiola rosea*, and the nutritional supplement “Roxirin” (arranged in order of increasing compositional complexity) based on some clinical and biochemical characteristics ($p < 0.05$)

Клинические и биохимические характеристики	Контроль	«Пантокрин» (из пантов благородного оленя)	Экстракт корней и корневищ родиолы розовой	«Эпсорин»	«Роксирин»
Заболееваемость в испытуемых группах различными классами патологий, % (*)					
Простудные (в осенне-зимний период)	28±2	18±2	22±3	15±2	7±1
Сердечно-сосудистой системы	8±1	8±1	8±1	6±1	4±1
Центральной нервной системы	9±1	6±1	9±1	5±1	3±1
Аллергические	7±1	7±1	7±1	6±1	4±1
Дыхательной системы	14±2	9±1	14±1	7±1	4±1
Желудочно-кишечного тракта	9±1	6±1	9±1	5±1	3±1
Инфекционные	8±1	6±1	8±1	4±1	2±1
Прочие	12±2	10±1	12±1	7±1	5±1
Общая заболеваемость	95±6	70±5	71±5	55±4	32±3
Некоторые биохимические показатели сыворотки крови (*)					
-глюкоза, ммоль/л	8.1±0.3	7.5±0.3	7.4±0.3	6.2±0.2	5.6±0.2
-бета-липопротеиды, г/л	5.2±0.2	4.3±0.2	4.1±0.2	3.5±0.1	2.7±0.1
-холестерин, ммоль/л	7.8±0.2	6.8±0.2	6.5±0.2	5.5±0.1	4.9±0.2
Характер и встречаемость жалоб в процессе 1-го осенне-зимнего сезона адаптации к климатическим условиям г. Якутск у приезжих (**)					
Головная боль	35±3	22±2	25±3	18±2	11±2
Головокружение	25±2	18±2	17±2	13±1	8±1
Одышка	55±5	35±5	30±3	20±2	12±1
Сердцебиение	38±4	28±3	25±3	19±2	9±1
Снижение аппетита	37±4	25±3	24±3	11±1	5±1
Повышенная утомляемость	75±7	55±5	48±5	25±2	12±1
Сонливость	45±4	38±4	30±3	19±2	8±1
Раздражительность	63±6	45±4	38±4	24±2	9±1
Слабость	58±6	38±4	35±3	21±2	9±1
Ослабленное внимание	66±6	43±4	41±4	19±2	8±1
Плохое настроение	53±5	35±3	32±3	23±2	7±1

(*) В каждой группе – по 35 человек в возрасте 18–50 лет, прием препарата – по стандартным профилактическим схемам в течение 3–4 месяцев / Each group comprised 35 individuals aged between 18 and 50 years, who were administered the drug in accordance with standard preventive regimens for a duration of 3 to 4 months.

(**) В каждой группе – по 25 человек в возрасте 35–50 лет с некоторыми нарушениями углеводного и липидного обмена адаптивного характера / Each group comprised 25 individuals aged between 35 and 50 years who exhibited some adaptive disorders related to carbohydrate and lipid metabolism.

занными комплексами природных БАВ с оценкой частоты встречаемости вышеуказанных симптомов синдрома «напряжения дезадаптации». Результаты, приведенные в табл. 4, показывают, что по ряду симптомов стрессируемость организма при профилактическом применении БАВ, особенно «Роксирин», снижается в 3–8 раз и более.

Биопрепараты на основе слоевищ лишайника рода *Cladonia*

Несколько перефразируя один из тезисов Гипократа «Мы есть то, что мы едим», можно сказать, что тело (в том числе и панты) северного оленя есть то, чем он в основном питается. Поэтому следующим объектом биотехнологических

исследований явились лишайники – преимущественный корм северных оленей. Известно, что основу тканей слоевищ лишайников (до 45–50 %) составляет полисахарид лихенин (лишайниковый крахмал). Это очень прочные трехмерные молекулы β -полисахаридов (Л- β -ПС), в ячейках которых практически в иммобилизованном состоянии содержатся низкомолекулярные вторичные лишайниковые вещества (НМВЛВ), в том числе лишайниковые кислоты антиоксидантного, радиопротекторного, антибактериального действия [25]. Причем не только организм человека, но и организмы многих видов жвачных животных лихенин не усваивают. В рубце (отдел желудка) благородного оленя он усваивается не более чем на 45–50 % и только в рубце северного оленя лихенин усваивается на 80–85 %, благодаря гидролизу Л- β -ПС бактериальными β -гликозидазами до лишайниковых β -олигосахаридов (Л- β -ОС).

В биотехнологическом *природоподобном* перделе Л- β -ОС образуются при частичной деполимеризации Л- β -ПС в процессе обработки слоевищ лишайников диоксидом углерода в состоянии сверхкритической жидкости либо в более технологичном процессе механохимической твердофазной активации, в ходе которой происходят гидролиз части β -гликозидных связей и образование Л- β -ОС из Л- β -ПС [26]. При механохимической активации β -гликозидные связи разрываются при протекании химических реакций непосредственно в твердой фазе (без участия любых растворителей) за счет механических воздействий с образованием наноразмерных (40–60 нм) Л- β -ОС. Образование лишайниковых β -олигосахаридов из лишайниковых β -полисахаридов при механоактивации доказано методами: сканирующей электронной микроскопии, атомно-силовой микроскопии, инфракрасной спектроскопии, ЯМР-спектроскопии и др., а также методом прямого химического титрования «восстанавливающих концов» (свободных альдегидных групп гликозидов) [25, 26].

При механохимическом разрушении трехмерной матрицы лишайниковых Л- β -ПС происходит также деиммобилизация НМВЛВ. В этом же процессе в одну биотехнологическую стадию, благодаря бифильности Л- β -ОС (наличию в них как гидрофобных доменов, так и полярных групп: -ОН, -NH₂), могут протекать и реакции образования супрамолекулярных комплексов между образующимися Л- β -ОС и деиммобилизованными НМВЛВ или любыми другими низкомолеку-

лярными ФАВ, вводимыми в механохимический реактор вместе со слоевищами лишайников (фармакон): витаминами, микроэлементами, природными или синтетическими ФАВ, антибиотиками, цитостатиками и другими «активными веществами» («АВ»). При этом, благодаря комплексообразованию Л- β -ОС (являющимися в данном процессе активным носителем – «АН») с «АВ», резко увеличиваются биоусвояемость «АВ» и, соответственно, их биологическая активность даже при уменьшенных дозах. Это особенно важно в терапии, например, препаратами антибактериального, цитостатического, эндокринно-нейрорегуляторного и других направлений действия.

В целом механохимическая активация биосырья приводит к следующему: (1) К разрыву части прочных β -гликозидных связей в Л- β -ПС с образованием Л- β -ОС, обладающих повышенной усвояемостью, и к деиммобилизации из ячеек трехмерной матрицы Л- β -ПС НМВЛВ; (2) к образованию супрамолекулярных комплексов между образующимися Л- β -ОС с НМВЛВ и/или фармаконами за счет взаимодействия полярных групп (например -ОН, -NH₂ и др.) Л- β -ОС (универсальный «АН») и НМВЛВ и/или фармаконами («АВ»).

Л- β -ОС по составу и структуре близки к олигосахаридам гликокаликсового слоя клеточных мембран и к гликозаминогликанам, которые в составе «большого протеогликанового комплекса» (гиалуроновая кислота + коровий белок) образуют на коллагеновой матрице соединительную ткань. Это свойство Л- β -ОС, наряду с их небольшими размерами и бифильным строением, обеспечивает их хорошее всасывание из кишечника в кровь, проникновение через клеточные мембраны, не только повышая биоусвояемость различных фармаконов (витаминов, микроэлементов и др. молекул), но (при десорбции фармаконов во внутренних жидких средах организма: кровь, лимфа, межклеточные жидкости, в клетках) и хорошее связывание гидрофильных и гидрофобных эндо- и экзотоксичных соединений, которые затем выводятся из организма в виде новых супрамолекулярных комплексов.

Преимуществами Л- β -ОС как переносчиков через различные мембранные комплексы фармаконов, эндо- или экзотоксинов являются: (1) негидролизуемость их в ЖКТ (содержат прочные β -гликозидные связи); (2) наличие большого числа полярных функциональных групп (-ОН, -NH₂,

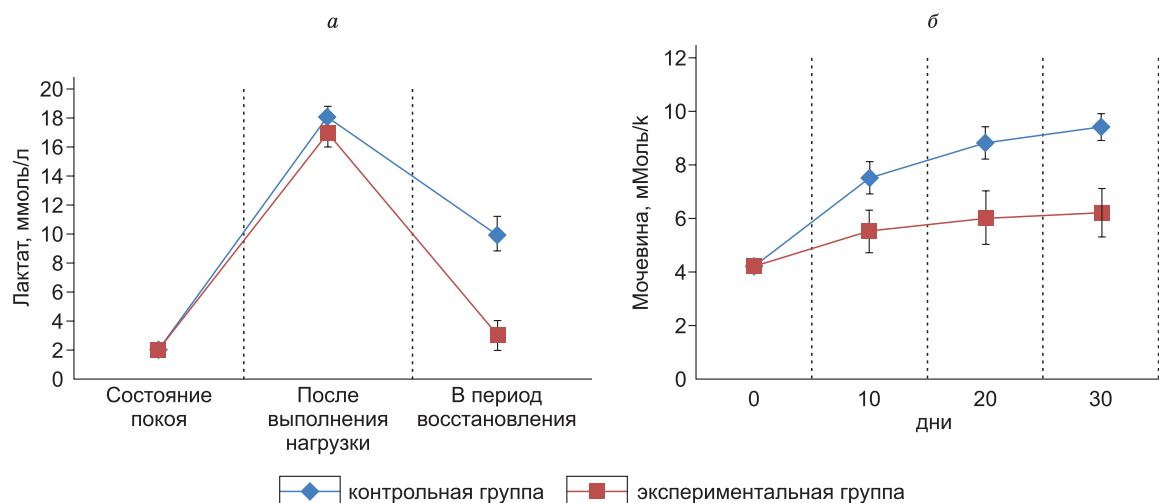


Рис. 1. Динамика уровня лактата в сыворотке крови (а; в период восстановления – через 7 минут после периода нагрузки) и мочевины (б) спортсменов – единоборцев (вольная борьба, бокс, в каждой группе $n = 75$) на этапе специальной подготовки (спортсмены экспериментальной группы принимали БАД «Кладород» по стандартной схеме, спортсмены контрольной группы принимали плацебо)

Fig. 1. Dynamics of the lactate levels in blood serum (а; measured during the recovery period, specifically 7 minutes post-exercise) and urea levels (б) were analyzed in martial artists (freestyle wrestlers and boxers, with $n = 75$ in each group) at the stage of specialized training. Athletes in the experimental group received the nutritional supplement “Kladorod” according to a standard regimen, while those in the control group were administered a placebo)

=CO) и гидрофобных фрагментов, обеспечивающих образование супрамолекулярных комплексов с переносимыми веществами различной природы; (3) легкая транспортируемость всего комплекса через клеточные мембраны и коллагеново-протеогликановый матрикс соединительной ткани, за счет своих размеров и строения, близкого к олигогликозидным фрагментам гликокаликса клеточных мембран и к гликозаминогликанам соединительной ткани. Сочетание этих свойств обеспечивает детоксикационную активность Л-β-ОС, которая в эксперименте доказана для плазмы крови и лимфы, предполагается для интестина.

Способность Л-β-ОС связывать в супрамолекулярные комплексы образующиеся в организме эндотоксины и выводить их из организма была продемонстрирована в работах с добровольцами – спортсменами высшей категории [25] (рис. 1).

Особое значение имели проведенные виварные эксперименты, показавшие способность Л-β-ОС связывать алкогольные токсины (образующиеся в печени и в головном мозгу при окислении этанола и его гомологов альдегида и кетоны). В результате было показано, что введение БАД «Ягель» [26] в водно-спиртовую смесь в соотношении 1:100 в целях детоксикации и профилак-

тики алкогольных патологий позволяет при полном сохранении эйфорического эффекта (создается за счет этанола) снизить в 2–3 раза токсическое действие алкоголя; более чем в 20 раз уменьшить постинтоксикационный эффект, в 5–6 раз уменьшить скорость формирования наркоманической алкогольной зависимости (создаются за счет ацетальдегида). Далее соответствующие эффекты были полностью подтверждены при испытаниях БАД «Ягель» с участием волонтеров ($n = 25$) на основании их письменного согласия и разрешения этической комиссии. В итоге было показано, что при введении микроколичеств БАД «Ягель» в водочные изделия (или прием 10–15 капель на 50 мл воды после либо до приема алкоголя [27]) в целях детоксикации и профилактики алкогольных патологий подтверждаются все количественные результаты, полученные в виварном эксперименте. Это позволило организовать на базе ФАПК «Якутия» масштабное производство водочных изделий с пониженной токсичностью, а также лечебно-профилактических, тонизирующих алкогольсодержащих бальзамов, включающих биоактивные вещества, выделяемые из 26–41 вида природного сырья [28–34]. Только за 10 месяцев 2023 г. и за 10 месяцев 2024 г. ФАПК «Якутия» выпустила и реализовала населению соответствующей, произведенной на основании разрабо-

Таблица 5

**Физиологическая активность животных на 30-й и 45-й день введения БАД «Кладород»
(биокомплекса ягель/родиола розовая; в каждой группе n = 25)**

Table 5

**Physiological activity of animals assessed on the 30th and 45th days following the administration
of the nutritional supplement “Kladorod” (biocomplex of moss/rhodiola rosea; in each group n = 25)**

День	Контроль	Родиола розовая	Смесь родиолы с лишайниками (1/10) грубоизмельченная	Смесь родиолы с лишайниками (1/10) механохимически активированная
Абсолютные значения времени плавания животных, с				
0	96,2±5,6	59,7±5,1	100,3±7,1	106,5±6,5
30	96,3±16,4	107,8±11,3	206,0±14,8	329,4±21,9
45	75,0±6,9	86,7±11,5	231,4±22,1	449,4±17,2
Абсолютные значения двигательной активности животных, см				
0	655,7±75,7	650,0±113,5	711,5±108,9	673,7±71,5
30	762,0±111,7	867,8±50,1	805,4±63,8	794,2±85,7
45	544,7±31,2	557,5±66,2	763,0±122,2	1891,8±61,8
Абсолютные значения исследовательской активности животных (количество стоек)				
0	24,5±2,1	17,3±2,5	24,8±1,2	26,8±3,5
30	25,5±2,8	21,7±3,8	23,6±2,7	28,8±1,5
45	18,7±1,3	15,5±3,0	22,2±3,5	36,2±3,2

Таблица 6

**Средние показатели физического состояния спортсменов, занимающихся ушу и цигун
(отношение результатов измерения после эксперимента к результату до эксперимента,
% после проведения эксперимента/до провед. эксп.; M±m)**

Table 6

**Average indicators of physical condition among athletes engaged in wushu and qigong
(ratio of measurement results obtained after the experiment to those recorded prior to the experiment,
expressed as a percentage (post-experiment/pre-experiment; M±m)**

Показатели	I группа (БАД «Кладород»; родиола/ягель = 1:10) (n = 25)	II группа (механоактивир. родиола) (n = 25)	III группа плацебо (n = 25)
Адаптация к физическим нагрузкам	477±60,3	95±30,5	119±18,7
Тренированность	279±45	142±12,7	89±11,6
Энергообеспечение	340±34,4	126±16	123±21,4
Психоземональное состояние	509±36	110±23,1	84±14,6
Спортивная форма	310±19,8	134±17,5	93±9,7

ток ИБПК СО РАН продукции на сумму около 350 млн рублей.

Способность Л-β-ОС повышать биоусвояемость фармаконов, образующих с ними супрамолекулярные комплексы в процессе механохимической активации (например, ФАВ из корней и корневищ родиолы розовой), была продемонстрирована в эксперименте с лабораторными животными (табл. 5) [35, 36], а затем с участием добровольцев – спортсменов (табл. 6) [37, 38]

Причем в результате как в виварном эксперименте, так и при приеме комплексного биопрепа-

рата спортсменами формируется комплексный детоксикационный, антистрессовый и актопротекторный эффект [39].

Благодаря способности Л-β-ОС модифицировать (фактически восстанавливать) нарушенные при формировании сахарного диабета 2-го типа (СД-2) структуры олигосахаридов гликокаликса клеточных мембран β-клеток поджелудочной железы они оказывают лечебный эффект, восстанавливая секрецию инсулина и процессы окислительного фосфорилирования в митохондриях этих клеток (рис. 2) [40–42].

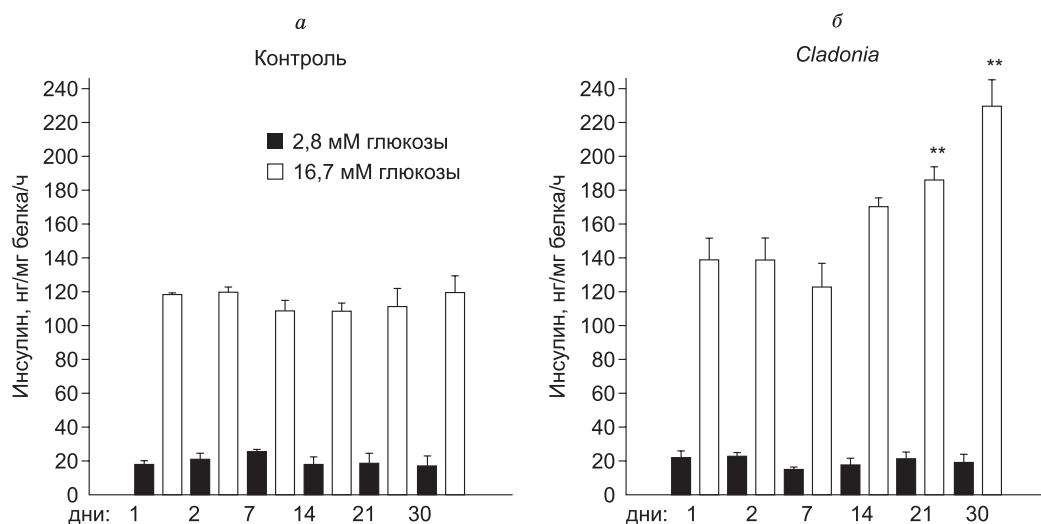


Рис. 2. Секретция инсулина β -клетками 832/13, $n = 25$, ** – $p < 0,01$ в присутствии БАД «Ягель» (б) по сравнению с контрольными клетками (а), культивация без БАД «Ягель»

Fig. 2. Insulin secretion by β -cells 832/13, $n = 25$, ** – $p < 0.01$ in the presence of the nutritional supplement “Yagel” (b), compared to control cells (a), which were cultivated without the nutritional supplement “Yagel”

За счет способности Л- β -ОС восстанавливать нарушенные при формировании атеросклеротических изменений протеогликановые структуры соединительной ткани стенок сосудов биопрепараты, содержащие их, оказывают лечебно-профилактический эффект и при атеросклеротических нарушениях (табл. 7; рис. 3) [43].

Так как структуры Л- β -ОС близки структурам не только олигосахаридных компонентов гликокаликса клеточных мембран, иммунных комплексов и компонентов системы свертывания крови, они способны их модифицировать, влияя тем самым на свойства клеточных мембран, на иммунореактивность (восстановление аутоиммунотолерантности собственных клеток) и на свертываемость крови (профилактика тромбозов; антитромбиновая активность БАД «Ягель» была показана в Гематологическом научном центре РАМН, г. Москва). Все это, наряду с эффектом уменьшения коэффициента атерогенности в 1,3–1,5 раза (см. табл. 7), позволяет рекомендовать его в целях профилактики и купирования последствий тяжелых сосудистых патологий, включая инсульты и инфаркты. В японских клиниках, работающих с фармацевтической компанией «ISKRA INDUSTRY Co., LTD», было показано, что БАД «Ягель» высоко эффективна при коррекции ряда аутоиммунных заболеваний, включая купирование приступов бронхиальной астмы, бронхитов и аллергических состояний с астматическим компонентом.

Как отмечалось выше, при расщеплении лишайниковых β -полисахаридов происходит деиммобилизация низкомолекулярных вторичных лишайниковых метаболитов из прочных трехмерных ячеек, образованных Л- β -ПС в слоевищах лишайников, в том числе антибактериального действия. Последние, благодаря образованию с Л- β -ОС (образующимися при расщеплении Л- β -ПС) супрамолекулярных комплексов, существенно увеличивают свою биоусвояемость. Это приводит к тому, что комплексные БАД, например «Ягель-М» [44], получаемые при биотехнологической переработке лишайникового сырья, начинают проявлять и повышенные антибактериальные свойства (табл. 8).

Были проведены доклинические испытания «Ягель-М» *in vivo* на лабораторных мышах, инфицированных трехнедельной культурой клинического штамма МБТ № 238 микобактерий туберкулеза с множественной и широкой лекарственной устойчивостью. Мышей заражали введением под кожу спины взвеси 0,1 мг бактериальной массы в 0,5 мл физиологического раствора, длительность эксперимента 75 дней. В результате летальность мышей, не получавших лечения (контроль заражения), составила за период от 20 до 73 дней 100 % при средней продолжительности жизни 39 дней, что указывает на высокую вирулентность использованной культуры МБТ. Общая потеря массы тела в этой группе составила 32 %. Летальность мышей, получающих стандартное

Таблица 7

Средние значения биохимических показателей в сыворотке крови у людей группы риска по СД2 и атеросклероза, при начальных стадиях метаболических нарушений обмена углеводов-липидов, до и после приема БАД «Ягель», (M ± m)

Table 7

Average values of biochemical parameters in the blood serum of individuals at risk for type 2 diabetes and atherosclerosis, during the initial stages of metabolic disorders related to carbohydrate-lipid metabolism, before and after the administration of the nutritional supplement “Yagel”, (M ± m)

Биохимический показатель	Референтные значения	До приема	После приема	p
АЛАТ, ед/л	До 40	40,6 ± 8,0	25,5 ± 5,5	0,003
АсАТ, ед/л	До 30	34,7 ± 6,3	33,6 ± 6,1	
Коэффициент де Ритиса	1,3–1,5	0,94 ± 0,08	1,42±0,42	0,049
Гамма-ГТ, ед/л	ж. 7–32; м. 11–50	74,9 ± 34,6	70,0±32,2	
Щелочная фосфатаза, ед/л	до 258	252,2±30,6	238,7±29,5	
ЛДГ, ед/л	225–450	358,3±14,1	381,6±13,9	
Креатинкиназа (общ.), ед/л	<190	156,4±55,1	129,4±12,0	
Глюкоза, ммоль/л	3,3–5,5	5,53 ± 0,07	4,72 ± 0,10	0,001
Общий белок, г/л	65–85	78,08±0,62	74,69±0,85	0,002
Альбумин, г/л	34–48	46,5 ± 0,4	46,4±0,76	
Мочевина, ммоль/л	1,7–8,3	4,61 ± 0,24	5,53±0,35	0,036
Мочевая кислота, мкмоль/л	ж. 155–357; м. 268–488	239,4±18,6	249,4±18,4	
Креатинин, мкмоль/л	ж. 44–80; м. 53–97	80,9 ± 2,62	80,2 ± 2,9	
Общий холестерин, ммоль/л	3,6–6,5	6,99 ± 0,16	6,09 ± 0,19	0,04
Триглицериды, ммоль/л	0,5–1,7	1,24 ± 0,16	1,25 ± 0,12	
ХС ЛПВП, ммоль/л	0,78–2,2	1,56 ± 0,09	1,71 ± 0,11	
ХС ЛПНП, ммоль/л	1,68–4,53	3,57 ± 0,41	3,73 ± 0,16	
ХС ЛПОНП, ммоль/л	0,8–1,5	0,56 ± 0,07	0,56 ± 0,06	
Коэффициент атерогенности	<3	3,48 ± 0,25	2,56 ± 0,27	0,005

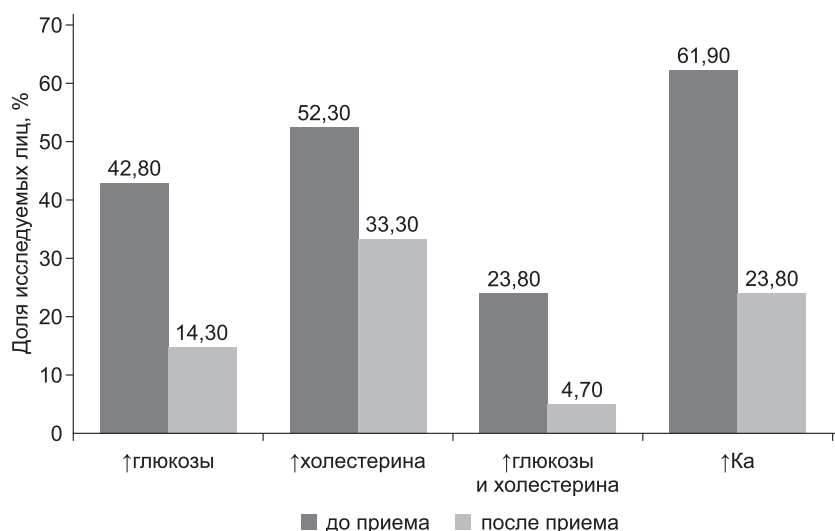


Рис. 3. Доля лиц с повышенными содержанием глюкозы, холестерина, (глюкозы и холестерина вместе), коэффициентом атерогенности (Ka) до и после приема БАД «Ягель» [43]

Fig. 3. The percentage of individuals exhibiting elevated levels of glucose, cholesterol (glucose and cholesterol together), and the atherogenic coefficient (Ka) both prior to and following the administration of the nutritional supplement “Yagel” [43]

**Антибактериальное действие порошка (контроль) и препарата
механохимически активированного ягеля на культуры
условно-патогенных и патогенных бактериальных штаммов**

Table 8

**Antibacterial effects of powder (control) and mechanochemically activated lichen preparations
on cultures of opportunistic and pathogenic bacterial strains**

Бактериальный штамм	Антибактериальное действие порошка грубоизмельченных слоевищ лишайников	Антибактериальное действие порошка механохимически активированных слоевищ лишайников
<i>Enterobacter cloacae</i>	+	+++
<i>Staphylococcus aureus</i>	+	++++
<i>Lactose negative E. coli</i>	++	++++
<i>Klebsiella pneumonia</i>	+	++++
<i>Proteus vulgaris</i>	++++	++++
Гемолитическая <i>E. coli</i>	+	++++
<i>E. coli</i> M-17	++	++++
<i>Salmonella enteritidis</i>	+	++++

Примечание. + – слабый лизис; ++ – частичное лизирование; +++ – почти полный лизис; ++++ – полный лизис.

Note. + – weak lysis; ++ – partial lysis; +++ – almost complete lysis; ++++ – complete lysis.

противотуберкулезное лечение, за 75 дней составила 50 % при средней продолжительности жизни 51,5 дня, общая потеря массы тела – 8 %. Летальность мышей, получающих БАД «Ягель-М» на фоне стандартного противотуберкулезного лечения, за 75 дней составила 0 %! При этом за время эксперимента их средняя масса тела выросла на 16–19 %, т. е. мыши развивались, как будто их совсем не инфицировали.

Клинические испытания БАД «Ягель-М», проведенные на базе НПЦ «Фтизиатрия» МЗ РС(Я) под руководством д.м.н. М.К. Винокуровой в 2016–2017 гг., показали высокую способность БАД «Ягель-М» повышать эффективность лечения туберкулеза легких с множественной и широкой лекарственной устойчивостью по основным клиническим показателям, а также в отношении снижения токсического действия стандартной противотуберкулезной химиотерапии по отношению к печени, другим внутренним органам и системам (рис. 4) [45].

Дополнительным преимуществом природных лишайниковых антибактериальных препаратов является то, что на них *не развивается* «реакция устойчивости микроорганизмов», не происходит формирования супербактерий. Причина заключается в том, что комплекс НМВЛВ антибактериального действия включает много фракций (в том числе стереоизоформы усниновой кислоты), каждая из которых содержится в малой «до-

пороговой» концентрации, ниже которой «реакция привыкания микроорганизмов» к данной структуре антибиотика не формируется. При этом все фракции вносят свой вклад в формирование интегрального антибактериального эффекта.

Еще более выраженного противoinфекционного эффекта не только в отношении бактериальных, но и вирусных инфекций удастся добиться при разработке комплексных биопрепаратов на основе использования Л-β-ОС как «активного носителя» и лишайниковых кислот антибактериального действия в качестве «фармакона», при введении в качестве дополнительного «фармакона» природных веществ противовирусного действия, например, бетулина, выделяемого из коры березы. Так, с использованием биотехнологии совместной механохимической активации слоевищ лишайников и бетулина была создана БАД «Бетукладин» [46, 47].

Бетулин содержится в коре березы (60–85 мас.%), обладает высоко эффективным антибактериальным, противовирусным, гепатопротекторным, иммуномодуляторным, противовоспалительным, ранозаживляющим действием. Его противовирусная активность установлена в мировой практике в отношении РНК-вирусов: гриппа птиц, гриппа типа А, герпеса простого, гепатита С, ВИЧ-1 и других возбудителей вирусных инфекций. Бетулин препятствует полноценной репродукции вируса

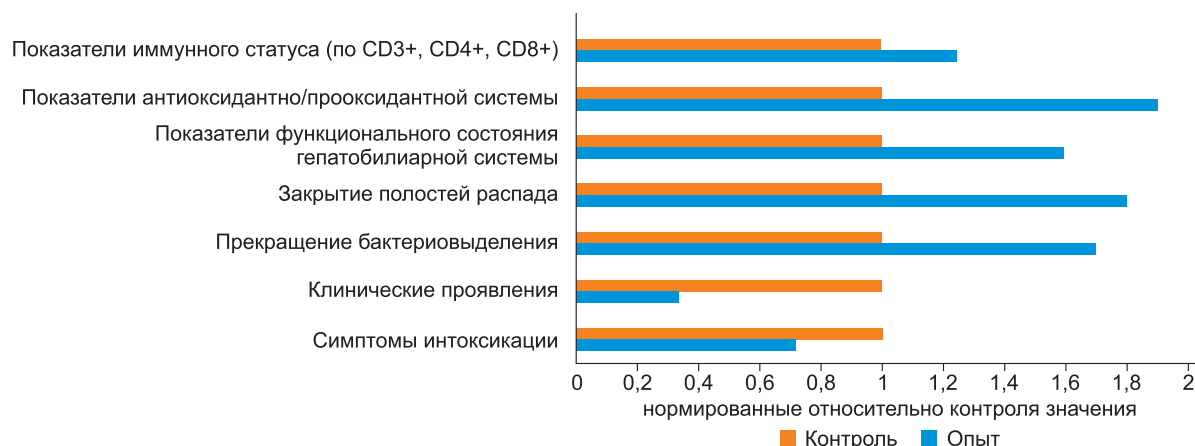


Рис. 4. Эффективность 8-месячной терапии деструктивного туберкулеза легких с множественной и широкой лекарственной устойчивостью микобактерий стандартными препаратами, применяемыми во фтизиатрии (контроль), и БАД «Ягель-М» на фоне стандартной терапии (опыт). Результаты опытной группы приведены в виде нормированных к результатам контрольной группы (n = 30 в каждой из групп больных)

Fig. 4. Efficiency of an 8-month therapeutic regimen for the treatment of destructive pulmonary tuberculosis with extensive multidrug-resistant mycobacteria with standard drugs used in phthisiology (control group) and nutritional supplement “Yagel-M” administered alongside standard therapy (experimental group). The outcomes for the experimental group are presented as normalized values relative to the control group, with each group comprising 30 patients

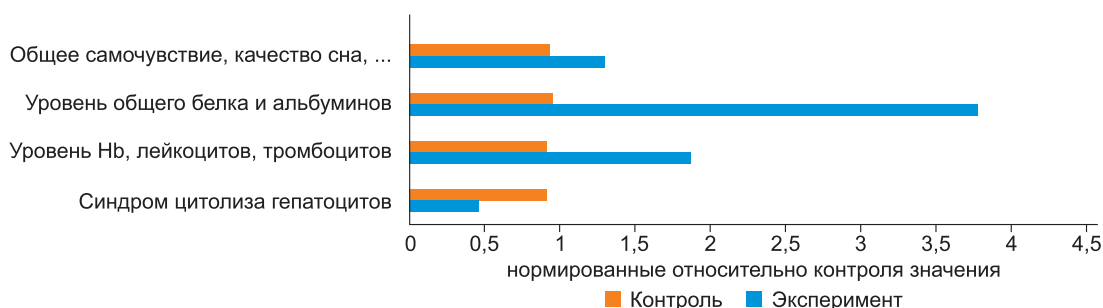


Рис. 5. Показатели эффективности использования «Бетукладин» в комплексной терапии больных вирусным гепатитом «В» с дельта-агентом

Fig. 5. Indicators of the effectiveness of Betucladin in the comprehensive treatment of patients with viral hepatitis B with a delta agent

в клетках-мишенях, блокируя сайт в молекуле вирусного белка, с которым в норме связывается протеиназа, в результате чего вирус лишается возможности инфицировать другие клетки [48]. Иммуномодулирующее действие бетулина связано с тем, что он нормализует действие цитокиновой системы, а также активирует фагоцитоз [49].

Вторая группа ФАВ: Л-β-ОС, обладающие, как описано выше, детоксикационной активностью в отношении внутренних сред организма, антикоагуляционным и иммуномодулирующим действием, увеличивают биодоступность бетулина и деиммобилизующихся при механохимической активации слоевищ лишайников НМВЛВ

антибактериального действия. В результате БАД «Бетукладин» обладает всем комплексом свойств, присущих входящим в него ФАВ.

Клинические испытания БАД «Бетукладин», проведенные в 2019 г. под руководством д.м.н. С.С. Слепцовой, в целях повышения эффективности лечения в рамках комплексной терапии наиболее тяжелой формы вирусных гепатитов – хронического вирусного гепатита «В» с дельта-агентом позволили существенно повысить ее эффективность, что выразилось в снижении в 1,8 раза синдромов цитолиза гепатоцитов (АЛТ, АСТ), увеличении в 1,8–2,1 раза уровня лейкоцитов, тромбоцитов, гемоглобина и в 3,9 раза – уровня общего белка и альбумина, а также

Таблица 9

Эффективность химиотерапии деструктивного туберкулеза легких с МЛУ и ШЛУ МБТ с дополнительным приемом БАД «Бетукладин» (через 18–24 мес.)

Table 9

Efficiency of chemotherapy in treating destructive pulmonary tuberculosis resulted from multidrug-resistant (MDR) and extensively drug-resistant (XDR) *Mycobacterium tuberculosis* (MBT), combined with the nutritional supplement “Betucladin” after a duration of 18 to 24 months

Показатель	Основная группа		Контрольная группа	
	Абс.	%	Абс.	%
Уменьшение частоты и выраженности симптомов интоксикации	23	100,0	9	60,0
Прекращение бактериовыделения	20	87,0	6	40,0
Закрытия полостей распада	19	82,6	6	40,0
Излечение/улучшение гнойных эндобронхитов	11	84,6	5	62,5
Клиническое излечение туберкулеза	18	78,3	6	40,0

в улучшении в 1,3–1,4 раза общего самочувствия, качества сна и повышения трудоспособности (рис. 5) [50, 51].

Клинические испытания БАД «Бетукладин», проведенные на базе НПЦ «Фтизиатрия» МЗ Якутии под руководством д.м.н. М.К. Вннукоровой в 2019–2020 гг., показали его высокую эффективность, в качестве дополнительного компонента в лечении деструктивного туберкулеза легких с множественной и широкой лекарственной устойчивостью микобактерий туберкулеза (МЛУ и ШЛУ МБТ) по основным клиническим показателям, а также в снижении токсического действия стандартной противотуберкулезной химиотерапии по отношению к печени, другим внутренним органам и системам (табл. 9) [51].

Достигнуто 100%-е излечение по критериям частоты и выраженности симптомов интоксикации, а также повышение эффективности химиотерапии; в 2,0–2,2 раза по критериям прекращения бактериовыделения и закрытия полостей распада, в 1,4 раза – по излечению гнойного эндобронхита, в 2,0 раза – по критерию клинического излечения туберкулеза через 24 мес. комплексного лечения. Отмечено достоверное снижение токсического действия стандартной противотуберкулезной химиотерапии в 1,9 раза по отношению к печени, другим внутренним органам и системам. Улучшилась также переносимость антибактериальных и противотуберкулезных препаратов при проведении интенсивной фазы химиотерапии.

После того как к лету 2020 г. мировой вирусологией были выяснены основные механизмы патогенеза COVID-19 [52], стало понятно, что «Бетукладин» может оказать хороший комплексный

дополнительный эффект при профилактике и реабилитации больных, перенесших COVID-19, по всем основным аспектам патогенеза: противовирусный, антикоагуляционный, иммуномодуляторный (антиаутоиммунный), причем без побочных негативных эффектов. Масштабные клинические испытания, проведенные в 2020–2022 гг., явились доказательством этого (табл. 10).

В группах принимавших БАД «Бетукладин» на этапе профилактики ($n = 1531$) заболеваемость снизилась в 4,5–8,8 раза: с 12,5–26,4 % в группе не принимавших «Бетукладин» до 2,8–3,0 %; длительность периода реабилитации ($n = 3598$) уменьшилась в 2,4–3,2 раза, в зависимости от степени поражения легких по результатам КТ-исследования; тяжесть протекания снизилась в 2–3 раза по таким показателям, как быстрая утомляемость, депрессии, восстановление работоспособности и обоняния, прекращение алопеции и др., т. е. удалось практически купировать развитие постковидного синдрома, включая отложенные осложнения [51]. Последующие клинические исследования показали высокую эффективность БАД «Бетукладин» при профилактике, в качестве дополнительного препарата при лечении и при реабилитации и других вирусных и бактериальных инфекций, включая грипп и другие ОРВИ.

На основе микродобавок Л-β-ОС и «Бетулина», выделенного из коры березы, в хлебобулочные изделия Якутским хлебокомбинатом в промышленном масштабе в 2021–2024 гг. налажен выпуск двух сортов функциональных хлебобулочных продуктов: «Хлеб с ягелем» – эффективен при различного рода интоксикациях,

Таблица 10

Эффективность приема исследуемого биопрепарата в целях профилактики и реабилитации больных, перенесших COVID-19 в тяжелой форме

Table 10

**Efficiency of the studied biopreparation for the prevention and rehabilitation of patients
recovering from severe COVID-19**

Группа	Профилактика COVID-19					
	Принимали «Бетукладин»			Не принимали «Бетукладин»		
	п человек	Переболело COVID-19, человек		п (человек)	Переболело COVID-19, чел.	
Медицинские работники в красной зоне	133	4 (в легкой форме)		40	5	
Родственники, проживающие вместе с больными COVID-19, проходившими амбулаторное лечение, соблюдающие все меры предосторожности	1398	39		318	84	
Группы (степень поражения легких «матовое стекло» по КТ, %)	Реабилитация больных, перенесших COVID-19					
	Принимали «Бетукладин»			Не принимали «Бетукладин»		
	п	Период ремиссии, сутки	Тяжесть ремиссии, баллы по 10-балльной шкале	п	Период ремиссии, сутки	Тяжесть ремиссии, баллы по 10-балльной шкале
20–30	2568	5–10	2	95	14–22	6
30–50	875	7–14	3	27	18–35	7
50–70	98	10–21	5	17	25–65	10
70–90	57	15–28	5	9	45–95 и более	10

с повышенным сроком хранения без черствления и плеснения [53]; «Хлеб с бетулином» – популяционная профилактика в отношении широкого спектра вирусных инфекций. Только за 20 месяцев 2023–2024 гг. выпущено и реализовано населению хлебобулочной продукции данных сортов на 8,5 млн рублей

Перспективные работы по получению высокоэффективных БАД и из других видов арктического биосырья

На основе комплексов ФАВ, выделяемых из костно-соединительной ткани холодадаптированных крупных северных животных (северный олень, якутская лошадь) создан биопрепарат, эффективно способствующий увеличению плотности костной ткани в целях профилактики и лечения остеопений и остеопорозов, ускорения регенерации костной ткани после переломов [54, 55].

Из мышечно-жировой ткани холодадаптированной якутской лошади получена БАД, обладающая выраженным защитным эффектом в отношении ионизирующей и неионизирующей радиации, – биопрепарат радиопротекторного действия [56].

Из позднеосенней и зимней хвои сосны получен биопрепарат криопротекторного действия – активное вещество косметологических средств, защищающих от действия низких температур [57].

Комплекс омега-3-полиненасыщенных жирных кислот, обладающих выраженным профилактическим и лечебным противоатеросклеротическим действием, получен из жира нерпы кольчатой [58].

Биопрепарат из тканей эндокринных органов (тестикул) северного оленя и якутской лошади, обладающий выраженным андрогено- и тестостероностимуляционным, геронтологическим (омолаживающим) действием, оптимизирует основной обмен веществ (профилактика сахарного диабета, атеросклероза и других метаболических нарушений).

Заключение

В Республике Саха (Якутия) имеются все составляющие для реализации Национального проекта России «Биоэкономика» на Северо-Востоке Евразии: растительное и животное биосырье, содержащее, благодаря экстремальным климатическим условиям, уникальный по количеству

и разнообразию изоформ комплекс биоактивных веществ; опытно-экспериментальный биоцех в ИБПК СО РАН, в котором используются самые современные физико-химические биотехнологии для интактного выделения комплексов ФАВ из тканей холодоадаптированных дикоросов и абorigенных видов животных; кадровый потенциал биотехнологов, а также медицинских работников, проводящих доклинические и клинические испытания разрабатываемых биопрепаратов; квалифицированные заказчики в медицинских учреждениях и на предприятиях пищевой промышленности; большой задел в виде созданных БАД, прошедших Сертификацию в Роспотребнадзоре (ЕВРАЗЭС; г. Москва), производимых в небольших количествах в биоцехе ИБПК СО РАН и практически используемых в организациях и на предприятиях квалифицированных заказчиков.

Задачи следующего этапа: масштабирование производства созданных биопрепаратов с участием промышленных партнеров и создание новых биокомплексов из уникального по составу и свойствам, экологически чистого и возобновляемого арктического биосырья.

Список литературы / References

1. Wessler J., Spielman D.S., Demont M. The future of governance in the global bioeconomy: policy, regulation, and investment challenges for the biotechnology and bioenergy sectors. *AgBioForum*; 2011;13(4):288–290.
2. Albrecht J., Carrez D., Cunningham P., et al. *The knowledge based bio-economy (kbbe) in europe: achievements and challenges (Technical report)*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36049.94560>
3. Голдовский А.М. Закон множественности представителей отдельных групп веществ в растительном организме. *Успехи современной биологии*. 1941;14(1):140–146.
- Goldovsky A.M. The law of multiplicity of representatives of certain groups of substances in a plant organism. *Uspehi sovremennoj biologii=Advances in Current Biology*. 1941;14(1):140–146.
4. Знаменская Л.А. Химический состав некоторых растений Крайнего Севера Якутии. В кн.: Куваев В.Б. (ред.) *Материалы по растительности Якутии*. Л.; 1961. С. 253–290.
- Znamenskaya L.A. 1. The chemical composition of some plants from the Far North of Yakutia. In: Kuvaev V.B. (ed.) *Materials on the Vegetation of Yakutia*. Leningrad; 1961, pp. 253–290. (In Russ.)
5. Егоров А.Д. Результаты биохимического и биогеохимического изучения растительного покрова. В кн.: Тавровский В.А. (ред.) В кн.: *Основные итоги биологических исследований в Якутской АССР*. Якутск: Якуткнигоиздат; 1969. С. 33–40.
- Egorov A.D. Results of biochemical and biogeochemical studies of vegetation cover. In: Tavrovsky V.A. (ed.) *The main results of biological research in the Yakut Autonomous Soviet Socialist Republic*. Yakutsk: Yakutknigoizdat Publ.; 1969, pp. 33–40. (In Russ.)
6. Кершенгольц Б.М., Аньшакова В.В., Филиппова Г.В., Кершенгольц Е.Б. Влияние температурно-влажностных условий на качественный и количественный состав эфирных масел полыней Якутии. *Химия растительного сырья*. 2009;(3):89–94.
- Kerchengolts B.M., Anshakova V.V., Philippova G.V., Kerchengolts E.B. Influence of meteorological conditions (temperature, humidity) on quality and quantity composition of Yakutian wormwood's essential oils. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*. 2009;(3):89–94. (In Russ.)
7. Кершенгольц Е.Б. Экологические особенности состава биологически активных веществ растений и животных Якутии, их свойства и применение: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Якутск; 2005. 19 с.
- Kershengolts E.B. Ecological features of the composition of biologically active substances in plants and animals of Yakutia: their properties and applications: Abstr. ... Diss. Cand. Sci., Yakutsk. 2005. 19 p. (In Russ.)
8. Слепцов И.В., Журавская А.Н. Динамика накопления флавоноидов в листьях *Amarantus retroflexus*, *Agastache rugosa* и *Thlaspi arvense*, собранных в Центральной Якутии. *Химия растительного сырья*. 2016;(3):67–72.
- Sleptsov I.V., Zhuravskaya A.N. Dynamics of accumulation in leaves flavonoids *Amarantus retroflexus*, *Agastache rugosa* and *Thlaspi arvense* in the Central Yakutia. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*. 2016;(3):67–72. (In Russ.)
9. Пригожин И., Стенгерс И. *Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой*. М.: Едиториал УРСС; 2003. 288 с.
- Prigogine I., Stengers I. *Order out of Chaos*. Moscow: URSS; 2024. 320 p. (In Russ.)
10. Кершенгольц Б.М., Чернобровкина Т.В., Шеин А.А. и др. *Нелинейная динамика (синергетика) в химических, биологических и биотехнологических системах*. Якутск: Изд-во ЯГУ; 2009. 284 с.
- Kershengolts B.M., Chernobrovkina T.V., Shein A.A., et al. *Nonlinear dynamics (synergetics) in chemical, biological and biotechnological systems*. Yakutsk: Yakut State University Publishing House; 2009. 284 p. (In Russ.)
11. Кершенгольц Б.М., Егоров В.В. *Социум и самоорганизация систем*. Новосибирск: Издательство СО РАН; 2024. 267 с.
- Kershengolts B.M., Egorov V.V. *Society and self-organization of systems*. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2024. 267 p. (In Russ.)
12. Свидетельство о государственной регистрации ЕВРАЗЭС № 77.99.11.003.E.009443.10.15 от 07.10.2015. БАД «Эпсорин. Экстракт из пантов северного оленя».
- Certificate of State Registration No. 77.99.11.003.E.009443.10.15 dt. 07.10.2015, issued by EURASEC.

Nutritional supplement "Epsorin. Extract from reindeer antlers". (In Russ.)

13. Авторское свидетельство № 1822785 А1 СССР, МПК А61К 35/32. Способ получения экстракта из пантов оленя : № 4877777 : заявл. 03.08.1990: опубл. 23.06.1993 / Б.М. Кершенгольц, А.К. Ахременко, В.В. Рогожин

Certificate No. 1822785 А1 USSR, IPC А61К 35/32. Method of obtaining extract from deer antlers: No. 4877777: registered 03.08.1990: published 23.06.1993 / B.M. Kershengolts, A.K. Akhremenko, V.V. Rogozhin. (In Russ.)

14. Временная Фармокопейная статья (ВФС) № 42-2467-95 от 20 июня 1995.

Provisional Pharmacopoeia of the Russian Federation, No. 42-2473-95, dt. 20.06.1995. (In Russ.)

15. Патент № 2771686 Российская Федерация, МПК А23L 29/275 (2016.01), А61К 35/32 (2015.01). Способ получения экстракта из пантов северного оленя: № 2021130771 : заявл. 21.10.2021 : опубл. 11.05.2022 / Кершенгольц Б.М., Ремигайло П.А., Таюрская С.Н. и др.

Patent No. 2771686 Russian Federation, IPC А23L 29/275 (2016.01), А61К 35/32 (2015.01). Method for obtaining extract from reindeer antlers: No. 2021130771: registered 21.10.2021 : published 11.05.2022 / Kershengolts B.M., Remigailo P.A., Tayurskaya S.N., et al. (In Russ.)

16. Шеина Н.Е., Шейн А.А., Кузьмина В.Ф. и др. Возобновляемое биосырье Якутии: состав, свойства, биотехнологические аспекты переработки (обзор). Часть 1. Разработки на основе животного сырья. *Наука и образование*. 2011;(4):59–64.

Sheina N.E., Shein A.A., Kuzmina V.F., et al. Renewable bio-raw materials of Yakutia: composition, properties, and biotechnological aspects of processing (review). Part 1: Developments based on animal raw materials. *Nauka i Obrazovanie*. 2011;4:59–64. (In Russ.)

17. Алексеева С.Н. Влияние адаптогенов на иммунную и кроветворную системы в условиях радиационного и цитостатического воздействия: Автореф. дис. ... канд. мед. наук. Новосибирск. 1996. 16 с.

Alekseeva S.N. The influence of adaptogens on the immune and hematopoietic systems under radiation and cytostatic effects: Abstr. ... Diss. Cand. Sci., Novosibirsk. 1996. 16 p. (In Russ.)

18. Мельцер И.М., Алексеева М.Н., Кершенгольц Б.М. *Способ лечения вирусных гепатитов с помощью индивидуализируемых доз Эпсорина*. Методич. реком. Утв. МЗ РС(Я) 25.10.97. Якутск: Изд. ЯГУ; 1997. 16 с.

Meltzer I.M., Alekseeva M.N., Kershengolts B.M. *A Method of treating viral hepatitis using individualized doses of Epsorine. Methodical recommendations approved by the Ministry of Health of the Republic of Sakha (Yakutia), dated 25 October 1997*. Yakutsk: Yakut State University Publishing House; 1997. 16 p. (In Russ.)

19. Кершенгольц Б.М., Сорова О.Н., Петрова П.Г. и др. Применение Эпсорина в лечении больных хро-

ническими обструктивными бронхитами (ХОБ). *International Journal on Immunorehabilitaion*. 1997;(4):9.

Kershengolts B.M., Serova O.N., Petrova P.G., et al. The use of Epsorine in the treatment of patients with chronic obstructive bronchitis (COPD). *International Journal on Immunorehabilitaion*. 1997;(4):9. (In Russ.)

20. Корнилов А.А., Миронов А.А., Павлова В.Г. и др. Клинические испытания препарата из пантов северного оленя «Эпсорин» во фтизиатрии. В кн.: Кривошапкин В.Г. (ред.) *Актуальные вопросы здоровья населения Республики Саха (Якутия)*. Якутск: Изд. ЯНЦ СО РАН; 1993. С. 94–96.

Kornilov A.A., Mironov A.A., Pavlova V.G., et al. Clinical trials of the preparation from reindeer antlers "Epsorin" in phthisiology. In: Krivoschapkin V.G. (ed.) *Topical Issues of Public Health in the Republic of Sakha (Yakutia)*. Yakutsk: YaSC SB RAS Publishing House; 1993, pp. 94–96. (In Russ.)

21. Патент № 2099067 Российская Федерация, МПК А61К 35/32 (1995.01). Способ получения лекарственного средства : № 93036517/14 : заявл. 15.07.1993 : опубл. 20.12.1997 / Ахременко А.К., Николаева Р.Н., Кузьмина В.Ф.

Patent No. 2099067, Russian Federation, IPC А61К 35/32 (1995.01). Method of preparation of the medicinal product: No. 93036517/14; registered 15.07.1993; published 20.12.1997 / Akhremenko A.K., Nikolaeva R.N., Kuzmina V.F. (In Russ.)

22. Патент № 2792990 Российская Федерация, МПК А23L2/00(2006-01-01), А23L2/38(2006-01-01). Композиция тонизирующего безалкогольного напитка: № 2022123308 : заявл. 31.08.2022 : опубл. 28.03.2022 / Кершенгольц Б.М., Осипова С.Г., Кардашевская Е.Г.

Patent No. 2792990, Russian Federation, IPC А23L 2/00(2006-01-01), А23L 2/38(2006-01-01). Composition of a tonic soft drink: No. 2022123308; registered 31.08.2022; published 28.03.2022 / Kershengolts B.M., Osipova S.G., Kardashevskaya E.G. (In Russ.)

23. Патент № 2112524 Российская Федерация, МПК А61К 35/32 (1995.01), А61К 35/413 (1995.01), А61К 35/78 (1995.01). Композиция ингредиентов для лекарственного средства : № 95119282/14 : заявл. 16.11.1995 : опубл. 10.06.1998 / Кершенгольц Б.М., Журавская А.Н., Иванов Б.И. и др.

Patent No. 2112524, Russian Federation, IPC А61К 35/32 (1995.01), А61К 35/413 (1995.01), А61К35/78 (1995.01). Composition of ingredients for the medicinal product: No. 95119282/14; registered 16.11.1995; published 10.06.1998 / Kershengolts B.M., Zhuravskaya A.N., Ivanov B.I., et al. (In Russ.)

24. Гаркави Л.Х., Квакина Е.Б., Кузьменко Т.С. *Антистрессорные реакции и активационная терапия*. М.: ИМЕДИС; 1998. 656 с.

Garkavi L.H., Kvakina E.B., Kuzmenko T.S. *Antistress reactions and activation therapy*. Moscow: IMEDIS; 1998. 656 p. (In Russ.)

25. Наумова К.Н., Кершенгольц Б.М., Аньшакова В.В. и др. Коррекция функционального состояния

организма спортсменов с помощью биопрепаратов растительного происхождения – сорбентов эндотоксинов. *Спортивная медицина: наука и практика*. 2017;7(2):46–51. <https://doi.org/10.17238/ISSN2223-2524.2017.2.46>

Naumova K.N., Kershengoltz B.M., Anshakova V.V., et al. Correction of a functional condition of athletes with herbal medicines – sorbents of endotoxins. *Sportivnaya Meditsina: Nauka i Praktika (Sports Medicine: Research and Practice)*. 2017;7(2):46–51. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/ISSN2223-2524.2017.2.46>

26. Свидетельство о государственной регистрации ЕВРАЗЭС № RU.77.99.11.003.E.051236.11.11 от 17.11.2011. БАД к пище «Ягель» (флаконы по 50 мл).

Certificate of State Registration No. RU.77.99.11.003.E.051236.11.11 dt. 17.11.2011, issued by EURASEC. Nutritional supplement “Yagel” (50 ml vials). (In Russ.)

27. Патент № 2608657 Российская Федерация, МПК А61К 36/09 (2006.01), А61Р 25/32 (2006.01). Способ профилактики и купирования похмелья с помощью питьевой воды : № 2015121345 : заявл. 27.12.2016: опубл. 23.01.2017/ Кершенгольц Б.М., Кунгурцев С.В., Шашурин М.М.

Patent No. 2608657, Russian Federation, IPC A61K 36/09 (2006.01), A61P 25/32 (2006.01). Method of prevention and relief of hangover with drinking water: No. 2015121345; registered 27.12.2016; published 23.01.2017 / Kershengolts B.M., Kungurtsev S.V., Shashurin M.M. (In Russ.)

28. Кершенгольц Б.М., Шашурин М.М. К вопросу о снижении токсичности водки. *Производство спирта и ликеро-водочных изделий*. 2015;(2):30–34.

Kershengolts B.M., Shashurin M.M. On the question about decreasing of vodka toxicity. *Manufacture of Alcohol Liqueur & Vodka Products*. 2015;(2):30–34. (In Russ.)

29. Патент № 2745450 Российская Федерация, МПК C12G 3/05 (2019.01), C12G 3/08 (2006.01). Способ и состав для производства водки : № 2020129218: заявл. 04.09.2020 : опубл.: 25.03.2021 / Кершенгольц Б.М., Шеин А.А., Баранов Н.А. и др.

Patent No. 2745450, Russian Federation, IPC C12G 3/05 (2019.01), C12G 3/08 (2006.01). Method and composition for vodka production: No. 2020129218; registered 04.09.2020; published: 25.03.2021 / Kershengolts B.M., Shein A.A., Baranov N.A., et al. (In Russ.)

30. Патент № 2021342 Российская Федерация, МПК C12G 3/06 (1990.01). Композиция ингредиентов для тонизирующего бальзама : № 92000573/13: заявл. : 28.10.1992 : опубл. : 15.10.1994 / Черенова Л. К., Иванов Б. И., Кершенгольц Б. М., Журавская А. Н., и др.

Patent No. 2021342, Russian Federation, IPC C12G 3/06 (1990.01). Composition of ingredients for tonic balm: No. 92000573/13; registered 28.10.1992; published 15.10.1994 / Cherenova L.K., Ivanov B.I., Kershengolts B.M., et al. (In Russ.)

31. Патент № 2764075 Российская Федерация, МПК C12G 3/06 (2006.01). Композиция ингредиентов

для алкогольсодержащего тонизирующего бальзама : № 2021105040 : заявл. : 28.02.2021 : опубл. : 13.01.2022/ Таюрская С.Н., Пыльнова В.И., Ксенофонтова Ф.И. и др.

Patent No. 2764075, Russian Federation, IPC C12G 3/06 (2006.01). Composition of ingredients for alcohol-containing tonic balm: No. 2021105040; registered 28.02.2021; published 13.01.2022 / Tayurskaya S.N., Pylnova V.I., Ksenofontova F.I., et al. (In Russ.)

32. Патент № 2794653 Российская Федерация, МПК C12G 3/06 (2006.01). Композиция водки особой с пониженной токсичностью и наркотичностью (Подледка) : № 2022120967: заявл. 01.08.2022 : опубл. : 24.04.2023 / Таюрская С.Н., Ксенофонтова Ф.И., Пыльнова В.И. и др.

Patent No. 2794653, Russian Federation, IPC C12G 3/06 (2006.01). Special vodka composition with reduced toxicity and narcotic properties (Podledka): No. 2022120967; registered 01.08.2022; published: 24.04.2023 / Tayurskaya S.N., Ksenofontova F.I., Pylnova V.I., et al. (In Russ.)

33. Патент № 2819241 Российская Федерация, МПК C12G 3/06 (2006.01). Композиция водки: № 2023109522: заявл. 13.04.2023 опубл. 15.05.2024 / Кершенгольц Б.М., Журавская А.Н., Шашурин М.М. и др.

Patent No. 2819241, Russian Federation, IPC C12G 3/06 (2006.01). Vodka composition: No. 2023109522; registered 13.04.2023; published 15.05.2024 / Kershengolts B.M., Zhuravskaya A.N., Shashurin M.M., et al. (In Russ.)

34. Патент № 2821049 Российская Федерация, МПК C12G 3/06 (2006.01). Композиция ингредиентов для алкогольсодержащего тонизирующего бальзама : № 2023118748 : заявл. 16.07.2023 : опубл. 17.06.2024 / Кершенгольц Б.М., Таюрская С.Н., Пыльнова В.И. и др.

Patent No. 2821049, Russian Federation, IPC C12G 3/06 (2006.01). Composition of ingredients for alcohol-containing tonic balm: № 2023118748: registered 16.07.2023; published 17.06.2024 / Kershengolts B.M., Tayurskaya S.N., Pylnova V.I., et al. (In Russ.)

35. Аньшакова В.В. *Биотехнологическая механохимическая переработка лишайников рода Cladonia*. М.: Издательский дом Академии Естествознания; 2013. 116 с.

Anshakova V.V. *Biotechnological mechanochemical processing of lichens of the genus Cladonia*. Moscow: Academy of Natural Sciences Publishing House; 2013. 116 p. (In Russ.)

36. Кершенгольц Б.М. *Лишайники: биотехнологии переработки, биопрепараты на их основе*. Изд-во LAP LAMBERT Academic Publishing; 2017. 100 с.

Kershengolts B.M. *Lichens: biotechnologies of processing, biologics based on them*. Published by LAP LAMBERT Academic Publishing; 2017. 100 p. (In Russ.)

37. Патент № 2604126 Российская Федерация, МПК А61К 36/41 (2006.01), А61К 36/09 (2006.01),

A61P 43/00 (2006.01). Способ повышения психофизиологического состояния организма спортсменов, занимающихся массовыми видами спорта: № 2015122612/15: заявл. 15.06.2015 : опублик. 10.12.2016 / Наумова К.Н., Кершенгольц Б.М.

Patent No. 2604126, Russian Federation, IPC A61K 36/41 (2006.01), A61K 36/09 (2006.01), A61P43/00 (2006.01). Method of improving the psychophysiological state of athletes engaged in mass sports: No. 2015122612/15; registered 15.06.2015; published 10.12.2016 / Naumova K.N., Kershengolts B.M. (In Russ.)

38. Наумова К.Н., Кершенгольц Б.М., Уваров Д.М. и др. Коррекция физиологических механизмов адаптации организма спортсменов к высоким физическим нагрузкам. *Теория и практика физической культуры*. 2018;(3):60–61.

Naumova K.N., Kershengolts B.M., Uvarov D.M., et al. Correction of adaptive physiological responses of bodily systems under high physical loads. *Theory and Practice of Physical Culture*. 2018;(3):21.

39. Патент № 2661623 Российская Федерация, МПК A61K 36/09 (2006.01), A61K 36/41 (2006.01), A61P 39/00 (2006.01), A61P 43/00 (2006.01). Твердофазная композиция, обладающая актопротекторным, адаптогенным и детоксикационным действием: № 2017130293 : заявл. 28.08.2017: опублик. 17.07.2018 / Кершенгольц Б.М., Киселев А.А., Кунгурцев С.В., Наумова К.Н.

Patent No. 2661623, Russian Federation, IPC A61K 36/09 (2006.01), A61K 36/41 (2006.01), A61P39/00 (2006.01), A61P43/00 (2006.01). Solid-phase composition with actoprotective, adaptogenic and detoxifying effects: No. 2017130293; registered 28.08.2017; published 17.07.2018 / Kershengolts B.M., Kiselev A.A., Kungurtsev S.V., Naumova K.N. (In Russ.)

40. Патент № 2661622 Российская Федерация, A61K 36/09 (2006.01), A61K 36/28 (2006.01), A61P 3/10 (2006.01). Твердофазная композиция природных биоактивных ингредиентов для коррекции метаболических нарушений при сахарном диабете второго типа : № 2017130292 : заявл. 28.08.2017: опублик. : 17.07.2018 / Кершенгольц Б.М., Киселев А.А., Кунгурцев С.В. и др.

Patent No. 2661622, Russian Federation, IPC A61K 36/09 (2006.01), A61K 36/28 (2006.01), A61P 3/10 (2006.01). Solid-phase composition of natural bioactive ingredients for the correction of metabolic disorders in type 2 diabetes mellitus: No. 2017130292; registered 28.08.2017; published 17.07.2018 / Kershengolts B.M., Kiselev A.A., Kungurtsev S.V., et al. (In Russ.)

41. Патент № 2613271 Российская Федерация, МПК A61K 36/09 (2006.01), A61K 36/45 (2006.01), A61P 3/10 (2006.01). Способ коррекции метаболических нарушений при сахарном диабете второго типа: № 2015155627 : заявл. 24.12.2015 : опублик. 15.03.2017 / Уваров Д.М., Сыдыкова Л.А., Анышакова В.В. и др.

Patent No. 2613271, Russian Federation, IPC A61K 36/09 (2006.01), A61K 36/45 (2006.01), A61P 3/10 (2006.01). Metallic type of diabetes method of receiving sugar correction trading violations: No. 2015155627; registered 24.12.2015; published 15.03.2017 / Uvarov D.M., Sydykova L.A., Anshakova V.V., et al. (In Russ.)

42. Патент № 2747985 Российская Федерация, МПК A61K 36/09 (2006.01), A61K 36/28 (2006.01), A61P 3/10 (2006.01). Твердофазная композиция для коррекции метаболических нарушений при сахарном диабете второго типа : № 2020125686 : заявл. 03.08.2020 : опублик. 18.05.2021. / Афанасьева О.В., Баранов Н.А., Кершенгольц Б.М. и др.

Patent No. 2747985, Russian Federation, IPC A61K 36/09 (2006.01), A61K 36/28 (2006.01), A61P 3/10 (2006.01). Solid-phase composition for the correction of metabolic disorders in type 2 diabetes mellitus: No. 2020125686; registered 03.08.2020; published 18.05.2021 / Afanasyeva O.V., Baranov N.A., Kershengolts B.M., et al. (In Russ.)

43. Гольдерова А.С., Кривошапкина З.Н., Миронова Г.Е., и др. Влияние БАД «Ягель» на биохимические показатели крови. *Якутский медицинский журнал*. 2010;(4):73–76.

Golderova A.S., Krivoshapkina Z.N., Mironova G.E., et al. Influence of nutritional supplement "Yagel" on blood biochemical indexes. *Yakut Medical Journal*. 2010;(4):73–76. (In Russ.)

44. Патент № 2467063 Российская Федерация, МПК C12N 1/14 (2006.01), A61K 36/09 (2006.01). Способ получения высокоактивного твердофазного биопрепарата антибиотического действия Ягель-М из слоевищ лишайников : № 2011118318/10 : заявл. 05.05.2011 : опублик. 20.11.2012 / Анышакова В.В., Кершенгольц Б.М.

Patent No. 2467063, Russian Federation, IPC C12N 1/14 (2006.01), A61K 36/09 (2006.01). Method for obtaining a highly active solid-phase biopreparation of antibiotic action Yagel-M from lichen layers: No. 2011118318/10; registered 05.05.2011; published 20.11.2012 / Anshakova V.V., Kershengolts B.M. (In Russ.)

45. Патент № 2673555 Российская Федерация, МПК A61K 36/09 (2006.01), A61P 11/00 (2006.01). Способ применения «Ягель-М» в качестве средства для лечения туберкулеза с множественной лекарственной устойчивостью : № 2017117711 : заявл. 22.05.2017: опублик. 22.11.2018 / Винокурова М.К., Евдокимова Н.Е., Павлов Н.Г. и др.

Patent No. 2673555, Russian Federation, IPC A61K 36/09 (2006.01), A61P 11/00 (2006.01). Method of application of "Yagel-M" as a treatment for multidrug-resistant tuberculosis: No. 2017117711; registered 22.05.2017; published 22.11.2018 / Vinokurova M.K., Evdokimova N.E., Pavlov N.G., et al. (In Russ.)

46. Патент № 2710236 Российская Федерация, МПК A61K 36/09 (2006.01), A61K 31/015 (2006.01),

A61P 31/04 (2006.01), A61P 31/12 (2006.01). Композиция на основе бетулина и слоевищ лишайников, обладающая антибактериальным, противовирусным и детоксикационным действием : № 2019106553 : заявл. 07.03.2019 : опубл. 25.12.2019 / Шашурин М.М., Кершенгольц Б.М.

Patent No. 2710236, Russian Federation, IPC A61K 36/09 (2006.01), A61K 31/015 (2006.01), A61P31/04 (2006.01), A61P31/12 (2006.01). Composition based on betulin and lichen layers with antibacterial, antiviral and detoxifying effects: No. 2019106553; registered 07.03.2019; published 25.12.2019 / Shashurin M.M., Kershengolts B.M. (In Russ.)

47. Свидетельство о государственной регистрации ЕВРАЗЭС № RU.77.99.11.003.R.003857.10.21 от 27.10.2021. БАД к пище «Бетукладин» (капсулы массой 350 мг).

Certificate of State Registration No. RU.77.99.11.003.R.003857.10.21 dt. 27.10.2021, issued by EURASEC. Nutritional supplement "Betukladin" (capsules 350 mg). (In Russ.)

48. Воробьева О.А., Малыгина Д.С., Грубова Е.В. и др. Производные бетулина. Биологическая активность и повышение растворимости. *Химия растительного сырья*. 2019;(4):407–430. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2019045419>

Vorobyeva O.A., Malygina D.S., Grubova E.V., et al. Derivatives of betulin. Biological activity and increased solubility. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*. 2019;(4):407–430. (In Russ.) <https://doi.org/10.14258/jcprm.2019045419>

49. Толстиков Г.А., Флехтер О.Б., Шульц Э.Э. и др. Бетулин и его производные. Химия и биологическая активность. *Химия в интересах устойчивого развития*. 2005;13(1):1–30.

Tolstikov G.A., Flekhter O.B., Shultz E.E., et al. Betulin and its Derivatives. *Chemistry for Sustainable Development*. 2005;13(1):1–30. (In Russ.)

50. Слепцова С.С., Стручкова Т.Ф., Колосова О.Н. и др. Эффективность природного комплекса «Бетукладин» в комплексной терапии хронического вирусного гепатита «В» с дельта агентом. *Современные проблемы науки и образования*. 2021;(1):51–56. <https://doi.org/10.17513/spno.30521>.

Sleptsova S.S., Struchkova T.F., Kolosova O.N., et al. Efficiency of the Betucladine natural complex in complex therapy for chronic viral hepatitis "B" with delta agent. *Modern Problems of Science and Education*. 2021;(1): 51–56. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/spno.30521>.

51. Кершенгольц Б.М., Шашурин М.М., Слепцова С.С. и др. Биопрепарат из природного северного биосырья и возможности его использования при профилактике, лечении и на этапе ремиссии после перенесенных бактериальных и вирусных инфекций, включая COVID-19. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2021;26(3):120–135. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-120-135>

Kershengolts B.M., Shashurin M.M., Sleptsova S.S., et al. Biological product from natural northern biological

raw materials with possible use in the prevention, treatment and remission stages after bacterial and viral infections, including COVID-19. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2021;26(3):120–135. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-120-135>

52. Harrison A.G., Lin T., Wang P. Mechanisms of SARS-CoV-2 transmission and pathogenesis. *Trends in Immunology*. 2020;41(12):1100–1115. <https://doi.org/10.1016/j.it.2020.10.004>.

53. Аньшакова В.В., Каратаева Е.В., Кершенгольц Б.М. Повышение качества хлебобулочных изделий с помощью механохимического биопрепарата из лишайников. *Фундаментальные исследования*. 2011;(8-3):593–596.

Anshakova V.V., Karataeva E.V., Kershengolts B.M. Bakery products quality improvement by means of the mechanically activated bioadditives from lichens. *Fundamental Research*. 2011;(8-3):593–596. (In Russ.)

54. Патент № 2723584 Российская Федерация, МПК A23L 33/17 (2016.01), A23J 1/10 (2006.01). Композиция на основе коллагена из соединительной ткани якутской лошади и глюконата кальция : № 2019131766 : заявл. 08.10.2019 : опубл. 16.06.2020 / Слепцов И.В., Колосова О.Н., Епанов В.В. и др.

Patent No. 2723584, Russian Federation, IPC A23L 33/17 (2016.01), A23J 1/10 (2006.01). Composition based on collagen from the connective tissue of the Yakut horse and calcium gluconate: No. 2019131766; registered 08.10.2019; published 16.06.2020 / Sleptsov I.V., Kolosova O.N., Epanov V.V., et al. (In Russ.)

55. Патент № 2778611 Российская Федерация, МПК A61F 7/00 (2006.01), A61K 38/39 (2006.01), A61K 31/401 (2006.01), A61P 19/00 (2006.01). Способ комплексного лечения дегенеративно-дистрофических заболеваний опорно-двигательного аппарата : № 2021113403, заявл. : 12.05.2021: опубл. : 22.08.2022 / Епанов В.В., Колосова О.Н., Кершенгольц Б.М. и др.

Patent No. 2778611, Russian Federation, IPC A61F 7/00 (2006.01), A61K 38/39 (2006.01), A61K 31/401 (2006.01), A61P19/00 (2006.01). Method of complex treatment of degenerative-dystrophic diseases of the musculoskeletal system: No. 2021113403, registered 12.05.2021; published 22.08.2022 / Epanov V.V., Kolosova O.N., Kershengolts B.M., et al. (In Russ.)

56. Кершенгольц Б.М., Журавская А.Н., Владимиров Л.Н. Влияние внутреннего жира молодняка якутской лошади на радиорезистентность лабораторных мышей при однократном воздействии рентгеновского излучения. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2019;24(3):134–144. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-3-12>

Kershengolts B.M., Zhuravskaya A.N., Vladimirov L.N. Effect of the internal fat of young Yakut horse on the radio resistance of laboratory mice under single X-ray impact. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2019;24(3):134–144. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-3-12>

57. Михайлов В.В., Слепцов И.В., Рожина С.М. и др. Перспективность рационального использования биологически активных веществ из хвои *Pinus sylvestris* для создания биопрепаратов. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;27(4):610–617. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-610-617>

Mikhailov V.V., Sleptsov I.V., Rozhina S.M., et al. The prospects for the rational use of biologically active substances from *Pinus sylvestris* needles in the creation of biopreparations. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(4):610–617. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-610-617>

58. Патент № 2662316 Российская Федерация, МПК A61K 35/35 (2015.01), A61K 6/09 (2006.01),

A61P 9/10 (2006.01). Жидкофазная композиция с повышенным содержанием природных устойчивых к окислению омега-3 полиненасыщенных жирных кислот : № 2017130807 : заявл. 31.08.2017: опубл. 25.07.2018 / Кершенгольц Б.М., Киселев А.А., Кунгурцев С.В. и др.

Patent No. 2662316 Russian Federation, IPC A61K 35/35 (2015.01), A61K 6/09 (2006.01), A61P9/10 (2006.01). Liquid-phase composition with an increased content of natural oxidation-resistant omega-3 poly-marginal fatty acids: No. 2017130807; registered 31.08.2017; published 25.07.2018 / Kershengolts B.M., Kiselyov A.A., Kungurtsev S.V., et al. (In Russ.)

Об авторе

КЕРШЕНГОЛЬЦ Борис Моисеевич, доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-8823-3981>, SPIN: 1717-5123, e-mail: kerschen@mail.ru

Конфликт интересов

Доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник Кершенгольц Борис Моисеевич является членом Редакционной коллегии журнала «Природные ресурсы Арктики и Субарктики». Автору неизвестно о каком-либо другом потенциальном конфликте интересов, связанном с этой рукописью.

About the author

KERSHENGOLTS, Boris Moiseevich, Dr. Sci. (Biol.), Professor, Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-8823-3981>, SPIN: 1717-5123, e-mail: kerschen@mail.ru

Conflict of interest

Kershengolts Boris Moiseevich, Dr. Sci. (Biol.), Professor, Senior Researcher is a member of the Editorial Board for the journal “Arctic and Subarctic Natural Resources”. The author is not aware of any other potential conflict of interest relating to this article.

Поступила в редакцию / Submitted 12.03.2025

Поступила после рецензирования / Revised 18.04.2025

Принята к публикации / Accepted 23.04.2025

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 678.073

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-326-336>



Оригинальная статья

Влияние механохимической активации диоксида церия на структуру и свойства политетрафторэтилена

А. П. Васильев[✉], А. А. Охлопкова, Т. С. Стручкова, А. Г. Алексеев

Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация
[✉]gtvap@mail.ru

Аннотация

В условиях растущих требований к надежности и долговечности полимерных материалов, используемых в узлах трения и уплотнительных системах, актуальной задачей является разработка композитов с улучшенными триботехническими и механическими свойствами. Политетрафторэтилен (ПТФЭ) широко применяется благодаря своим уникальным антифрикционным характеристикам, однако его низкая износостойкость ограничивает использование в экстремальных условиях. Модификация ПТФЭ наполнителями, такими как диоксид церия (CeO_2), позволяет улучшить его эксплуатационные свойства. Цель исследования: изучение влияния механохимической активации оксида церия на свойства и структуру ПТФЭ для улучшения механических и триботехнических характеристик. В работе использовались методы переработки полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе ПТФЭ. Механохимическая активация CeO_2 проводилась в планетарной мельнице. Для анализа структуры и свойств применялись рентгеноструктурный анализ, дифференциальная сканирующая калориметрия, ИК-спектроскопия, а также механические и триботехнические испытания. Установлено, что введение 2 мас.% CeO_2 в ПТФЭ повышает степень кристалличности и энтальпию плавления ПКМ при использовании механоактивированного наполнителя. Триботехническими испытаниями установлено повышение износостойкости ПКМ с механоактивированным CeO_2 в 254 раза при сохранении коэффициента трения на уровне исходного полимера. Исследование поверхностей трения ПКМ методом ИК-спектроскопии выявило образование перфторкарбоксилатных солей в процессе изнашивания, что свидетельствует о протекании трибохимических процессов. Разработанные ПКМ на основе ПТФЭ с механоактивированным CeO_2 демонстрируют улучшенные механические и триботехнические свойства, что делает их перспективными материалами для применения в узлах трения и уплотнительных системах.

Ключевые слова: политетрафторэтилен, диоксид церия, полимерный композиционный материал, механическая активация, триботехнические свойства, износостойкость

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (НИР № FSRG-2023-0026).

Для цитирования: Васильев А.П., Охлопкова А.А., Стручкова Т.С., Алексеев А.Г. Влияние механохимической активации диоксида церия на структуру и свойства политетрафторэтилена. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(2):326–336. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-326-336>

Original article

Effect of mechanochemical activation of cerium dioxide on the structure and properties of polytetrafluoroethylene

Andrey P. Vasilev[✉], Aitalina A. Okhlopkova, Tatyana S. Struchkova, Aleksey G. Alekseev

Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation
[✉]gtvap@mail.ru

Abstract

As the demand for reliability and durability in polymer materials used in friction units and sealing systems continues to grow, it is essential to develop composites that exhibit enhanced tribological and mechanical properties. Polytetrafluoroethylene (PTFE) is a popular choice due to its exceptional antifriction qualities; however, its limited wear resist-

ance restricts its application in extreme environments. To address this, we explored the modification of PTFE with cerium dioxide (CeO_2) fillers to enhance its performance. The objective of this study was to examine how the mechanochemical activation of cerium oxide influences the properties and structure of PTFE, ultimately aiming to improve its mechanical and tribological characteristics. We employed traditional processing methods for polymer composite materials (PCM) based on PTFE. The mechanochemical activation of CeO_2 was conducted using a planetary mill, and we utilized various analytical techniques, including X-ray diffraction analysis, differential scanning calorimetry, and IR spectroscopy, alongside mechanical and tribological testing to evaluate the structure and properties of the composites. Our findings revealed that incorporating 2 wt.% of CeO_2 into PTFE significantly increases the degree of crystallinity and the enthalpy of melting of the PCM when using the mechanically activated filler. Notably, tribological tests indicated a remarkable 254-fold increase in wear resistance for the PCM with mechanically activated CeO_2 , while the friction coefficient remained consistent with that of the initial polymer. Additionally, IR spectroscopy analysis of the friction surfaces of the PCM indicated the formation of perfluorocarboxylate salts during wear, suggesting the occurrence of tribochemical processes. In conclusion, the developed PCM based on PTFE with mechanically activated CeO_2 demonstrates enhanced mechanical and tribotechnical properties, positioning them as promising materials for use in friction units and sealing systems.

Keywords: polytetrafluoroethylene, cerium dioxide, polymer composite material, mechanical activation, tribotechnical properties, wear resistance

Funding. This study was conducted within the project of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. FSRG-2023-0026).

For citation: Vasilev A.P., Okhlopko A.A., Struchkova T.S., Alekseev A.G. Effect of mechanochemical activation of cerium dioxide on the structure and properties of polytetrafluoroethylene. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(2):326–336. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-326-336>

Введение

В условиях глобальных экологических и ресурсных вызовов, а также растущих требований к надежности и функциональности транспортных и технологических систем проблема снижения металлоемкости изделий машиностроения при сохранении их долговечности в различных условиях эксплуатации приобретает особую актуальность [1]. Одно из перспективных направлений в решении этой задачи – использование полимерных композиционных материалов (ПКМ). Эти материалы активно применяются для изготовления как крупно-, так и малогабаритных корпусных деталей, а также конструктивно сложных и ответственных узлов машин и механизмов. Их популярность в различных отраслях промышленности обусловлена возможностью создания изделий с заданными физико-механическими, теплофизическими, диэлектрическими и другими свойствами [2].

Особое внимание уделяется разработке материалов для узлов трения и уплотнительных систем, которые подвергаются значительным температурным и агрессивным воздействиям. Среди полимерных материалов политетрафторэтилен (ПТФЭ) выделяется благодаря своей высокой химической стойкости и широкому диапазону рабочих температур. ПТФЭ представляет собой высокомолекулярный полимер, широко используемый в промышленности благодаря уникальным свойствам, таким как термическая и хими-

ческая стойкость, антиадгезионность и низкий коэффициент трения [3, 4]. Однако ПТФЭ имеет и недостатки, в частности, низкие твердость и износостойкость. Для устранения этих негативных свойств ПТФЭ модифицируют путем введения твердых наполнителей, что позволяет расширить области его применения.

Наполненный твердыми наполнителями ПТФЭ находит применение в производстве уплотнительных изделий, подшипников скольжения, покрытий, втулок, медицинских имплантатов и других изделий, где требуется сочетание высокой химической стойкости и антифрикционных свойств [5]. В качестве наполнителей популярны оксид алюминия, углеродные волокна, стекловолокна, графит и т. п., что позволяет улучшить эксплуатационные свойства материала [6, 7]. Например, введение углеродных волокон существенно повышает износостойкость и механические характеристики ПТФЭ в зависимости от концентрации наполнителей [8]. Аналогичный эффект достигается при использовании оксида алюминия, что подтверждается многочисленными исследованиями [9]. Кроме того, в ряде работ [10–12] изучено влияние других оксидов металлов на свойства ПТФЭ, что демонстрирует перспективность данного подхода.

Диоксид церия (CeO_2) – химическое соединение, состоящее из редкоземельного металла церия и кислорода. Это тугоплавкий порошок бледно-желтовато-белого цвета с плотностью 7,13 г/см³

и температурой плавления около 2600 °С. CeO_2 обладает уникальными свойствами, такими как высокая термическая стабильность, химическая инертность, диэлектрическая проницаемость, способность поглощать ультрафиолетовое излучение, а также повышенная твердость [13, 14]. Благодаря этим свойствам диоксид церия широко применяется в качестве компонента полирующих смесей, абразивов, противокоррозионных покрытий, катализаторов, а также модификатора полимерных материалов [15]. Добавление CeO_2 в полимеры позволяет улучшить их механические свойства, устойчивость к высоким температурам, а также повысить стойкость к ультрафиолетовому излучению и окислению [16–18]. Кроме того, исследования [19–21] показали, что гидрофобная природа диоксида церия делает его перспективным компонентом для создания защитных покрытий, в том числе на основе ПТФЭ.

Несмотря на обширные исследования структуры и свойств диоксида циркония, а также его активное использование в качестве функциональной добавки в полимерах, влияние CeO_2 как наполнителя на свойства ПТФЭ изучено недостаточно. В данной работе исследовано влияние механохимической активации диоксида церия на его характеристики. Изучены механические и трибологические свойства ПТФЭ, модифицированного диоксидом церия. Проанализированы изменения структуры и термодинамических параметров ПКМ в зависимости от механохимической активации. Также проведен анализ поверхностей образцов до и после трения методом ИК-спектроскопии.

Цель работы – исследование влияния механохимической активации диоксида церия на свойства и структуру ПТФЭ.

Материалы и методы

В работе использовали политетрафторэтилен (ПТФЭ) марки ПН-90 производства АО «Гало-Полимер» (Россия). Порошок ПТФЭ имел средний размер частиц ~90 мкм и плотность 2,16 г/см³. В качестве наполнителя применяли порошок диоксида церия (CeO_2), соответствующий ГОСТ 23862.16-79, производства ООО «Комплексные модификаторы» (Россия). CeO_2 представляет собой порошок светло-желтого цвета с плотностью 7,22 г/см³ и средним размером частиц 0,8 мкм.

Образцы композитов изготавливали по стандартной технологии переработки ПТФЭ, включающей следующие этапы:

- Прессование порошковой смеси при давлении 50 МПа в пресс-форме.

- Спекание в программируемой печи при температуре 375 ± 5 °С.

Для улучшения дисперсности и активации поверхности наполнителя проводили механохимическую активацию (м/а) порошка CeO_2 в планетарной мельнице «Активатор-2S» («Активатор», Россия) в соответствии с методикой, описанной в работе [22].

Удельную поверхность частиц наполнителя определяли на анализаторе Quantachrome NOVAtouch LX (США) с использованием статического объемного метода измерения адсорбции азота. Подготовку образцов проводили в соответствии со стандартом ISO 9277:2010. Удельная поверхность ($S_{уд}$) рассчитывалась по методу БЭТ, а суммарный объем пор определяли по количеству адсорбированного азота при относительном давлении $p/p_0 = 0,99$.

На испытательной машине Autograf AGS-J (Shimadzu, Япония) определяли прочность при растяжении и относительное удлинение при разрыве образцов в соответствии с ГОСТ 11262–2017. Образцы в виде лопаток тип 5, скорость перемещения захватов составляла 50 мм/мин (погрешность 0,5–1 %). Для каждого испытания использовалось пять образцов. На твердомере ТВР-D («Восток-7», Россия) определяли твердость по Шору Д в соответствии с ГОСТ 24621–2015 (ISO 868–2003). Методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 15139–69 измеряли плотность образцов.

На трибомашине CETR UMT-3 (CETR, США) определяли интенсивность изнашивания и коэффициент трения по схеме «палец – диск». Образцы представляли собой цилиндры диаметром $10,00 \pm 0,01$ мм и высотой $20,00 \pm 0,01$ мм. В качестве контртела использовали стальной диск из стали марки 45 с твердостью 45–50 HRC и шероховатостью $R_a = 0,06–0,08$ мкм. Испытания проводили при следующих условиях:

- Удельное давление: 2 МПа.
- Линейная скорость скольжения: 0,2 м/с.
- Температура: комнатная.
- Время испытания: 3 часа.

Перед испытаниями образцы очищали и взвешивали на аналитических весах с точностью 0,00001 г. По уравнению

$$k = \frac{\Delta m}{\rho \cdot F_N \cdot d} \quad (1)$$

определяли интенсивность изнашивания. Здесь F_N – нормальная сила, Н; d – путь трения, м;

Δm – потеря массы образца после трения, г;
 ρ – плотность, г/см³.

Термодинамические параметры образцов определяли на дифференциальном сканирующем калориметре (ДСК) DSC 204F1 Phoenix (Netzsch, Германия) с погрешностью не более $\pm 0,1$ %. По кривым ДСК определяли температуру плавления ($T_{пл}$), энтальпию плавления ($H_{пл}$), степень кристалличности ($\chi_{ДСК}$).

ИК-спектры образцов регистрировали на спектрометре Varian 7000 FT-IR (Varian, США) с использованием приставки нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) в диапазоне 550–4000 см⁻¹. Метод позволяет исследовать изменения химической структуры поверхности образцов до и после трибологических испытаний.

Результаты и обсуждение

Исследование методом порометрии показало, что удельная поверхность ($S_{уд}$) CeO_2 после механохимической активации увеличивается с 2,1 до 8,8 м²/г. Это свидетельствует о значительном уменьшении размера частиц наполнителя. Для изучения влияния изменения $S_{уд}$ на структуру ПТФЭ проводили рентгеноструктурный анализ в соответствии с методикой, описанной в работе [23]. В табл. 1 приведены результаты исследования степени кристалличности ($\chi_{РСА}$) и среднего размера кристаллитов (L) для исходного ПТФЭ и ПКМ.

Результаты рентгеноструктурного анализа (см. табл. 1) свидетельствуют, что введение в ПТФЭ CeO_2 повышает степень кристалличности во всех ПКМ независимо от механохимической активации наполнителя. Известно, что наполнители, введенные в аморфно-кристаллические полимеры, приводят к гетерогенному зародышеобразованию. При этом частицы наполнителя становятся центрами кристаллизации, способствуя формированию более упорядоченной кристаллической структуры полимера. [24]. В ПКМ с неактивированным CeO_2 степень кристалличности возрастает с увеличением содержания наполнителя. Наибольшее значение степени кристалличности (72 %) достигнуто при содержании 5 мас.% CeO_2 , что на 8 % выше, чем у исходного ПТФЭ. В композитах с механоактивированным CeO_2 степень кристалличности достигает максимума (74 %) при содержании 2 мас.% CeO_2 , что на 10 % выше, чем у исходного ПТФЭ, и на 2 % выше, чем у ПКМ с 5 мас.% CeO_2 без механохимической активации. Это связано с тем, что уменьшение размера частиц наполнителя в

результате механохимической активации увеличивает количество активных центров кристаллизации. Полученные результаты согласуются с данными, приведенными в работе [25].

Средний размер кристаллитов (L) во всех ПКМ уменьшается по сравнению с исходным ПТФЭ. В композитах без механохимической активации CeO_2 размеры кристаллитов увеличиваются с ростом содержания наполнителя от 39,5 до 71,5 нм. В ПКМ с механоактивированным CeO_2 наблюдается обратная тенденция: с увеличением содержания CeO_2 размер кристаллитов уменьшается. Механохимическая активация CeO_2 приводит к увеличению удельной поверхности (с 2,1 до 8,8 м²/г). Исходя из этого, можно предположить, что при использовании неактивированного наполнителя укрупнение кристаллитов происходит из-за образования центров кристаллизации на частицах наполнителя [26]. В случае механохимически активированного наполнителя уменьшение размера кристаллитов (с 71,4 до 53,7 нм) можно объяснить возрастанием количества центров кристаллизации, которые сдерживают рост друг друга. Таким образом, механохимическая активация наполнителя усиливает эффект гетерогенного зародышеобразования, так как приводит к увеличению количества активных центров кристаллизации и способствует образованию более мелких кристаллитов.

В табл. 2 приведены результаты исследования термодинамических свойств ПТФЭ и ПКМ на

Таблица 1
 Степень кристалличности и средний размер кристаллитов ПТФЭ и ПКМ

Table 1
 Degree of crystallinity and average crystallite size of PTFE and PCM

Образец	$\chi_{РСА}$, %	L , нм
ПТФЭ исходный	64	74,0
<i>Без механохимической активации</i>		
0,5 мас.% CeO_2	66	39,5
1 мас.% CeO_2	68	47,7
2 мас.% CeO_2	69	63,7
5 мас.% CeO_2	72	71,5
<i>С механохимической активацией</i>		
0,5 мас.% CeO_2	66	71,4
1 мас.% CeO_2	70	69,2
2 мас.% CeO_2	74	53,7
5 мас.% CeO_2	72	57,3

Таблица 2
Термодинамические свойства ПТФЭ и ПКМ

Table 2

Thermodynamic properties of PTFE and PCM

Образец	$T_{пл}$, °C	$H_{пл}$, Дж/г	$\chi_{дск}$, %
ПТФЭ исходный	332,0	34,1	41,6
<i>Без механохимической активации</i>			
0,5 мас.% CeO ₂	332,6	29,5	35,9
1 мас.% CeO ₂	332,8	30,1	36,7
2 мас.% CeO ₂	332,9	28,8	35,2
5 мас.% CeO ₂	333,7	34,6	42,2
<i>С механохимической активацией</i>			
0,5 мас.% CeO ₂	332,6	33,9	41,4
1 мас.% CeO ₂	333,2	35,1	43,2
2 мас.% CeO ₂	334,6	42,9	52,3
5 мас.% CeO ₂	334,5	32,6	39,8

его основе. Из таблицы видно, что температура плавления ПКМ с неактивированным CeO₂ практически не изменяется при увеличении его содержания, оставаясь в диапазоне 332,6–332,9 °C. Незначительное увеличение $T_{пл}$ ПКМ наблюдается при содержании 5 мас.% CeO₂ (333,7 °C). Такое изменение может быть связано с увеличением степени кристалличности. В случае ПКМ с механоактивированным CeO₂ наблюдается увеличение $T_{пл}$ с ростом содержания CeO₂, достигая 334,6 °C при 2 мас.%. Это может свидетельствовать о повышении термической стабильности композитов за счет формирования более упорядоченной структуры. Данный вывод согласуется с результатами рентгеноструктурного анализа.

Введение CeO₂ в количестве 0,5–2 мас.% без механохимической активации в ПТФЭ приводит как к снижению степени кристалличности, так и энтальпии плавления на 11–15 % по сравнению с исходным полимером. Установлено, что введение механоактивированного CeO₂ в количестве 0,5–2 мас.% также сохраняет энтальпию плавления и степень кристалличности ПКМ, причем эти значения выше, чем у композитов без активации. Наибольшие значения энтальпии плавления и степени кристалличности зафиксированы при содержании 2 мас.% CeO₂ с механохимической активацией. При этом степень кристалличности достигает 52,3 %, что на 26 % выше, чем у исходного ПТФЭ. При увеличении концентрации наполнителя в диапазоне от 2 до 5 мас.% отмечается уменьшение энтальпии плавления и степени кристалличности ПКМ. Данное явление

объясняется ограничением подвижности макромолекул в расплавленном состоянии [27]. В системах, содержащих наполнитель, адсорбционное взаимодействие между высокоэнергетической поверхностью частиц наполнителя и макромолекулами полимера приводит к снижению их способности к тепловому движению [28]. Это, в свою очередь, влияет на энергетические и кинетические характеристики процесса кристаллизации в переохлажденном расплаве, что в большинстве случаев замедляет формирование кристаллической структуры. При достижении предельно высоких концентраций наполнителя может наблюдаться подавление кристаллизации полимерной матрицы [29]. Следовательно, добавление механохимически активированного диоксида церия способно препятствовать образованию упорядоченных кристаллических структур ПТФЭ. Кроме того, снижение степени кристалличности при высоких концентрациях наполнителя может быть связано с увеличением числа дефектов в полимерной матрице, что нарушает процесс упорядоченного формирования кристаллов. Также важно учитывать, что при высоком содержании наполнителя происходит агрегация частиц, что снижает их эффективность как центров кристаллизации. Это подтверждается исследованиями, согласно которым при превышении определенного порога концентрации наполнителя его положительное влияние на кристаллизацию сменяется негативным [30]. Таким образом, механохимическая активация CeO₂, хотя и повышает дисперсность частиц, при высоких концентрациях может приводить к ухудшению кристаллизационной способности полимера.

Результаты исследования физико-механических свойств ПТФЭ и ПКМ в зависимости от механохимической активации наполнителя представлены на рис. 1.

Из рис. 1, а видно, что прочность при растяжении ПКМ с содержанием CeO₂ от 0,5 до 2 мас.% без механохимической активации остается на уровне исходного ПТФЭ. Однако при увеличении содержания наполнителя до 5 мас.% прочность при растяжении ПКМ снижается на 17 % по сравнению с ПТФЭ. Относительное удлинение при разрыве для ПКМ с активированным и исходным CeO₂ повышается на 24–73 % при содержании 0,5–2 мас.% (см.рис. 1, б). В случае механохимически активированного CeO₂ прочностные свойства сохраняются при содержании 0,5–1 мас.%, но при 2–5 мас.% прочность при

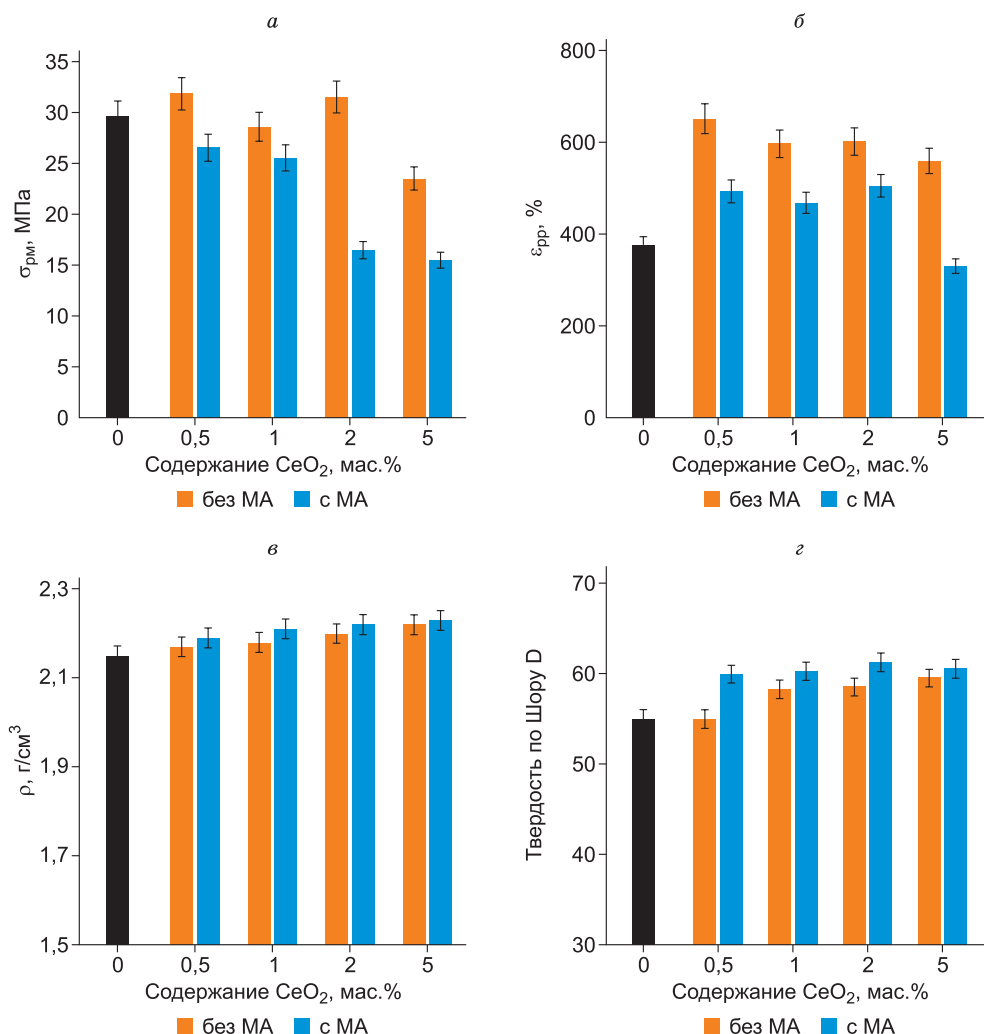


Рис. 1. Прочность при растяжении (а), относительное удлинение при разрыве (б), плотность (в) и твердость по Шору D (г) исходного ПТФЭ и ПКМ в зависимости от механохимической активации наполнителя

Fig. 1. Tensile strength (а), relative elongation at break (б), density (в), and Shore D hardness (г) of the initial PTFE and PCM in relation to the mechanochemical activation of the filler

растяжении снижается на 48 %. Такое снижение связано с образованием дефектов в полимерной матрице, что ухудшает способность материала к пластической деформации [30]. Относительное удлинение при разрыве ПКМ с 5 мас.% механохимически активированного CeO₂ снижается до значений исходного ПТФЭ, что также свидетельствует о снижении пластичности материала.

Как видно из рис. 1, в, плотность композитов с механоактивированным наполнителем увеличилась на 7 %, а с неактивированным – на 3 % по сравнению с исходным ПТФЭ. Это объясняется двумя факторами: 1) наполнитель выступает в качестве дополнительных центров кристаллизации, что повышает степень кристалличности, что подтверждено результатами PCA и ДСК;

2) плотность CeO₂ (7,22 г/см³) выше, чем у полимерной матрицы (2,16 г/см³). Из рис. 1, г следует, что твердость ПКМ с добавлением CeO₂ увеличивается. Для композитов с активированным наполнителем этот показатель возрастает на 11 %, а с неактивированным – на 8 %. Увеличение твердости обусловлено армирующим эффектом твердых частиц наполнителя, что согласуется с данными работы [31]. Таким образом, введение CeO₂ в полимер при содержании 0,5–2 мас.% позволяет сохранить деформационно-прочностные свойства и повысить твердость ПТФЭ.

Результаты исследования триботехнических характеристик разработанных композитов и исходного ПТФЭ представлены на рис. 2. Анализ данных показывает, что введение наполнителя

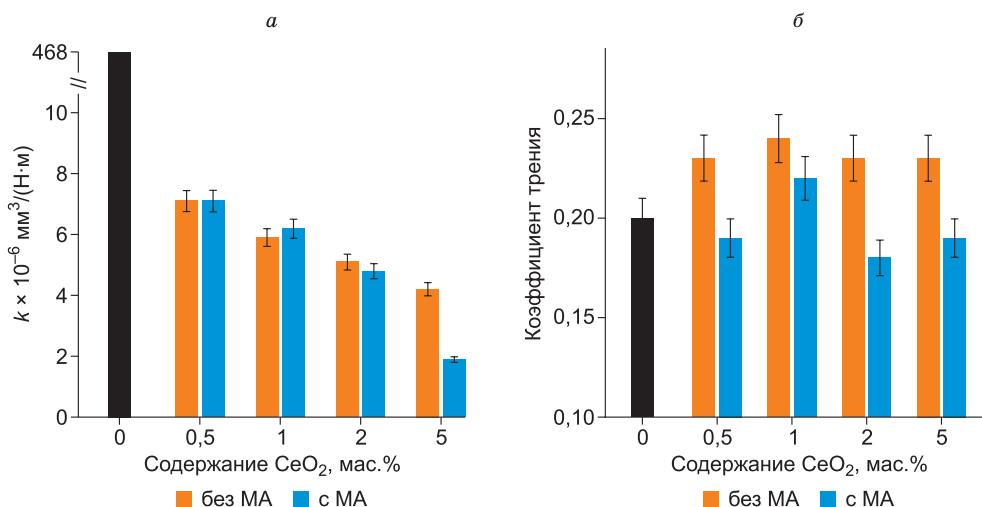


Рис. 2. Интенсивность изнашивания (а) и коэффициент трения (б) исходного ПТФЭ и ПКМ

Fig. 2. Wear intensity (a) and the coefficient of friction (b) of the initial PTFE and PCM

CeO_2 положительно влияет на износостойкость полимерной матрицы.

Из рис. 2, а видно, что интенсивность изнашивания ПКМ с CeO_2 без механохимической активации снижается с увеличением содержания наполнителя. Наибольшее значение износостойкости получено для ПТФЭ+5 мас. % CeO_2 – в 115 раз выше, чем у полимерной матрицы. В случае композитов с механоактивированным CeO_2 износостойкость также увеличивается с повышением содержания наполнителя. В ПКМ с 5 мас. % CeO_2 износостойкость повысилась в 254 раза. Данный композит обладает наибольшей износостойкостью, которая в 2,2 раза выше, чем у ПКМ без активации. Коэффициент трения ПКМ без механохимической активации повышается по сравнению с исходным ПТФЭ (см. рис. 2, б). Коэффициент трения для ПКМ с механоактивированным CeO_2 остается на уровне исходного ПТФЭ. Коэффициент трения для ПКМ с механохимической активацией наполнителя на 8–21 % ниже, чем у композитов без активации. Все композиты демонстрируют низкие значения коэффициента трения, соответствующие требованиям для антифрикционных материалов при сухом трении [32].

ИК-спектры образцов до трения имеют относительно простую структуру и содержат характерные для ПТФЭ пики поглощения при 1200 и 1145 cm^{-1} , соответствующие деформационным и валентным колебаниям групп $-\text{CF}_2-$ в полимере. В области ниже 650 cm^{-1} наблюдаются деформа-

ционные, внеплоскостные и веерные колебания тех же групп $-\text{CF}_2-$ [33]. На рис. 3 представлены ИК-спектры композитов после трения.

Анализ ИК-спектров после триботехнических испытаний свидетельствует о значительных изменениях в поверхностных слоях ПКМ в ходе изнашивания образцов. Появляются новые пики в областях 1645 и 1435 cm^{-1} , соответствующие колебаниям связей $\text{C}-\text{O}$, что характерно для карбоксилатных групп (COO^-). Стоит отметить, что интенсивность указанных пиков выше для ПКМ с механохимически активированным наполнителем. Согласно данным [34], указанные пики в ИК-спектрах свидетельствуют об образовании перфторкарбоновых солей, которые являются ингибиторами изнашивания. Приведенное утверждение согласуется с результатами триботехнических испытаний. Так, износостойкость ПКМ с механохимически активированным диоксидом церия выше по сравнению с неактивированным. Широкий пик в области 3600–3200 cm^{-1} можно отнести к комплексу связанных $-\text{OH}$ -групп и/или пероксидным радикалам. Их появление связано с окислением, вызванным трибохимическими процессами. Появление дополнительных пиков подтверждает, что при трении композитов ПТФЭ происходят сложные трибохимические реакции, включающие как механическое разрушение, так и химические превращения.

Закключение

Проведенные исследования показали, что механохимическая активация CeO_2 значительно

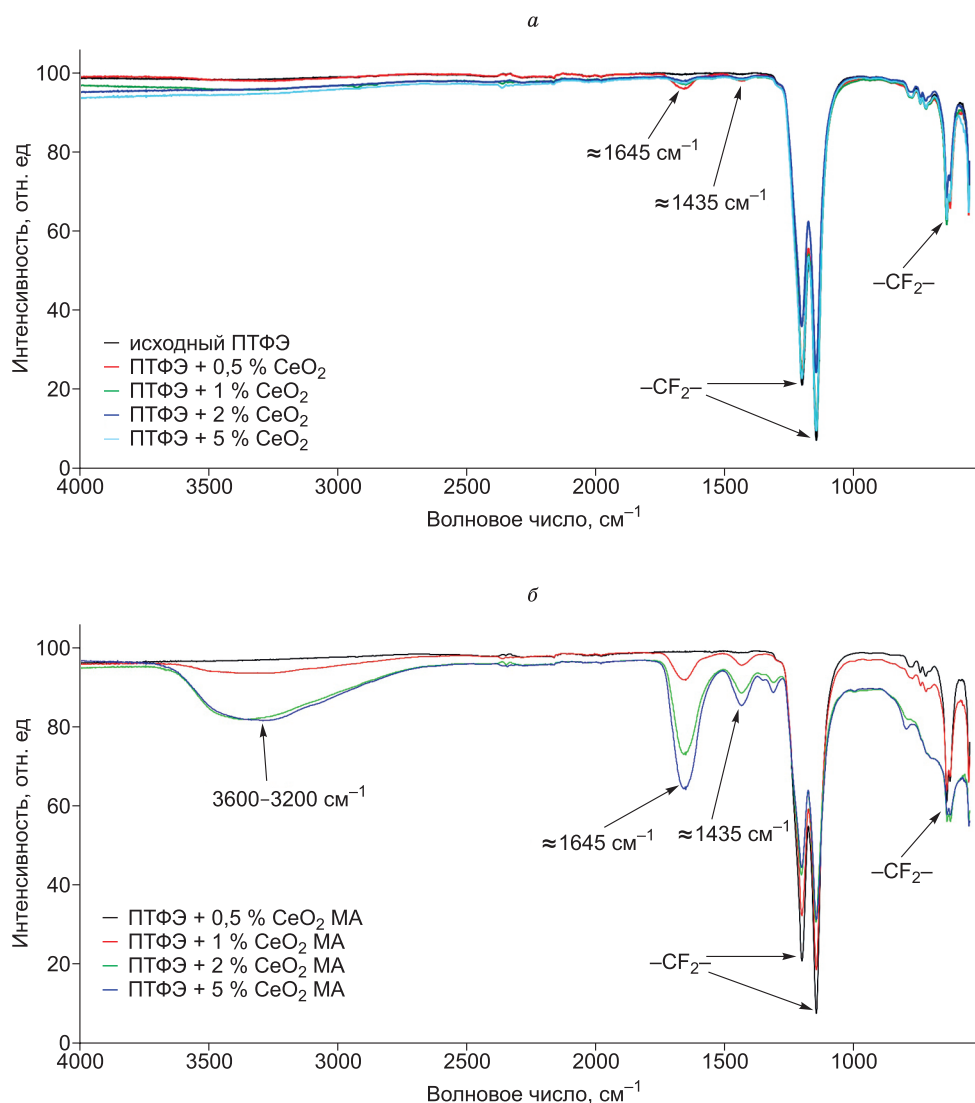


Рис. 3. ИК-спектры ПТФЭ и ПКМ с механохимической активацией (а) и без механохимической активации (б) наполнителя

Fig. 3. IR spectra of PTFE and PCM: (a) with mechanochemical activation of the filler and (b) without mechanochemical activation of the filler

улучшает свойства композитов на основе ПТФЭ: увеличиваются удельная поверхность и дисперсность наполнителя, повышается степень кристалличности полимера и термическая стабильность, сохраняются деформационно-прочностные характеристики, а также значительно улучшаются триботехнические свойства, такие как износостойкость (снижение интенсивности изнашивания в 68–254 раза) и коэффициент трения (снижение на 8–21 %). Это делает композиты с механоактивированным CeO_2 перспективными для применения в условиях сухого трения. Анализ ИК-спектров выявил образование перфторкарбоксилатных анио-

нов и солей, окисленных функциональных групп, что подтверждает протекание сложных трибохимических реакций, которые способствуют формированию защитных слоев на поверхности трения.

Список литературы / References

1. Kosenko E.A., Baurova N.I., Zorin V.A. Impact toughness of carbon fiber-reinforced polymers under extremely low arctic temperature conditions: the role of hybrid matrix components. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2023;(13):2167–2172. <https://doi.org/10.1134/S0036029523700246>
2. Kosenko E.A., Baurova N.I., Zorin V.A. Investigation of the mechanical properties of polymer composite materials with various types of hybrid matrices in the ex-

- treme conditions of the Arctic. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1159:012053. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1159/1/012053>
3. Liu F., Feihua Liu, Jin Y., et al. Improved coefficient thermal expansion and mechanical properties of PTFE composites for high-frequency communication. *Composites Science and Technology*. 2023;241:110142. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2023.110142>
4. Mhaske S.T., Mohanty J.D., Chugh K.W. Fluoropolymers: brief history, fundamental chemistry, processing, structure, properties, and applications. In: Deshmukh K., Hussain Ch.M. (eds.) *Advanced Fluoropolymer Nanocomposites*. Woodhead Publishing; 2023, pp. 1–27. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95335-1.00006-2>
5. Пугачев А.К., Росляков О.А. *Переработка фторопласта в изделия*. Л.: Химия; 1987. 166 с.
- Pugachev A.K., Roslyakov O.A. *Processing of fluoroplastic into products*. Leningrad: Khimiya Publ.; 1987. 166 p. (In Russ.)
6. Sonawane A., Deshpande A., Chinchani S., Munde Y. Dry sliding wear characteristics of carbon filled polytetrafluoroethylene (PTFE) composite against Aluminium 6061 alloy. *Materials Today: Proceedings*. 2021;44(5):3888–3893. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.929>
7. Rajak D.K., Wagh P.H., Linul E. Manufacturing technologies of carbon/glass fiber-reinforced polymer composites and their properties: a review. *Polymers*. 2021;13(21):3721. <https://doi.org/10.3390/polym13213721>
8. Markova M.A., Petrova P.N. Influence of carbon fibers and composite technologies on the properties of PCM based on polytetrafluoroethylene. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2021;12:551–7. <https://doi.org/10.1134/S2075113321020362>
9. Sidebottom M.A., et al. Nanomechanical filler functionality enables ultralow wear polytetrafluoroethylene composites. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2022;14(48):54293–54303. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c13644>
10. Van Meter K.E., Babuska T.F., Junk C.P., et al. Ultralow wear behavior of iron–cobalt-filled PTFE composites. *Tribology Letters*. 2023;71:4. <https://doi.org/10.1007/s11249-022-01679-z>
11. Li G., Li H., Xu Y., et al. Dual-function hybrid coatings based on polytetrafluoroethylene and Cu₂O for anti-biocorrosion and anti-wear applications. *Coatings*. 2024;14(5):592. <https://doi.org/10.3390/coatings14050592>
12. Shiv J.K., Kumar K., Jayapalan S. Recent advances in polymer using metal oxides nanocomposite and its hybrid fillers for tribological application. *Advances in Materials and Processing Technologies*. 2024;10(4):2720–2731. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2023.2171673>
13. Иванов В.К., Шарилов Ф.Ю., Полежаева О.С., Третьяков Ю.Д. Формирование нанокристаллического диоксида церия из водно-спиртовых растворов нитрата церия (III). *Доклады Академии наук*. 2006; 411(4):485–487.
- Ivanov V.K., Sharikov F.U., Polezhaeva O.S., Tretyakov Yu.D. Formation of nanocrystalline ceria from cerium(III) nitrate solutions in aqueous alcohol. *Doklady Chemistry*. 2006;411(2): 223–225.
14. Аристова Н.М. Термодинамические свойства диоксида церия в конденсированном состоянии. *Теплофизика высоких температур*. 2022;60(6):824–829. <https://doi.org/10.31857/S0040364422040093>
- Aristova N.M. Thermodynamic properties of cerium dioxide in the condensed state. *Teplofizika Vysokikh Temperatur*. 2022;60(6):824–829. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0040364422040093>
15. Иванов В.К., Полежаева О.С., Копица Г.П. и др. Особенности высокотемпературного роста наночастиц диоксида церия. *Журнал неорганической химии*. 2009;54(11):1767–1775.
- Ivanov V.K., Polezhaeva O.S., Kopitsa G.P., et al. Specifics of high-temperature coarsening of ceria nanoparticles. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. 2009; 54(11):1689–1696.
16. Panda P.K., Dash P., Yang J.M., et al. Development of chitosan, graphene oxide, and cerium oxide composite blended films: structural, physical, and functional properties. *Cellulose*. 2022;29:2399–2411. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-04348-x>
17. Li H., Wang Z., Song Q., et al. Polyetheretherketone microspheres loaded with cerium dioxide nanoparticles mitigate damage from cellular oxidative stress and promote bone repair. *Materials & Design*. 2023;225: 111426. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111426>
18. Selvaraj S., Chauhan A., Radhakrishnan A., et al. Cerium oxide nanoparticles and their polymeric composites: advancements in biomedical applications. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*. 2024;34:5691–5717. <https://doi.org/10.1007/s10904-024-03263-5>
19. Oh S., Shim J., Seo D., et al. Organic/inorganic hybrid cerium oxide-based superhydrophobic surface with enhanced weather resistance and self-recovery. *Progress in Organic Coatings*. 2022;170:106998. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.106998>
20. Popescu I., Ionita G., Dobrinescu D., et al. Improved characteristics of hydrophobic polytetrafluoroethylene–platinum catalysts for tritium recovery from tritiated water. *Fusion Engineering and Design*. 2008; 83(10-12):1392–1394. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2008.05.026>
21. Singh H., Sodhi G.P.S., Singh M., et al. Study: wear and superhydrophobic behaviour of PTFE-ceria composite. *Surface Engineering*. 2019;35(6):550–556. <https://doi.org/10.1080/02670844.2018.1499176>
22. Васильев А.П., Охлопкова А.А., Стручкова Т.С., Алексеев А.Г. Влияние модифицированного серицита на свойства и структуру политетрафторэтилена. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2020; 25(2):147–1556. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-2-12>

Vasilev A.P., Okhlopko A.A., Struchkova T.S., Alekseev A.G. Influence of modified sericite on the properties and structure of polytetrafluoroethylene. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2020;25(2):147–1556. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-2-12> (In Russ.)

23. Стручкова Т.С., Васильев А.П., Охлопкова А.А. и др. Исследование влияния талька и технического углерода на структуру и свойства политетрафторэтилена. *Полимерные материалы и технологии*. 2021; 7(4):39–49.

Struchkova T.S., Vasilev A.P., Okhlopko A.A., et al. Study of the effect of talc and industrial carbon black on the structure and properties of polytetrafluoroethylene. *Polimernye materialy i tekhnologii [Polymer Materials and Technologies]*. 2021;7(4):39–49. (In Russ.)

24. Кахраманов Н.Т., Гулиев А.Д., Аллавердиева Х.В. Состояние проблемы получения и исследования структуры и свойств наноккомпозитов на основе полиолефинов и минеральных наполнителей. *Пластические массы*. 2022;(11-12):46–52. <https://10.35164/0554-2901-2021-11-12-46-52>

Kahramanov N.T., Guliev A.D., Allahverdiyeva H.V. Obtaining and studying the structure and properties of nanocomposites based on polyolefins and mineral fillers: state of the art. *Plasticheskie massy*. 2022; 1 (11-12): 46–52. (In Russ.) <https://10.35164/0554-2901-2021-11-12-46-52>

25. Охлопкова А.А., Охлопкова Т.А., Борисова Р.В. Управление процессами структурообразования в полимерных композиционных материалах на основе СВМПЭ. *Наука и образование*. 2015;78(2):85–90.

Okhlopko A.A., Okhlopko T.A., Borisova R.V. Control of structure formation processes in polymer composite materials based on UHMWPE. *Nauka i Obrazovanie*. 2015;78(2):85–90. (In Russ.)

26. Teplov A.A., Belousov S.I., Golovkova E.A., et al. Tribological, physicomachanical, and other properties of composites based on ultra-high molecular-weight polyethylene, polytetrafluoroethylene, and ethylene-tetrafluoroethylene copolymer with quasicrystalline filler Al–Cu–Fe. *Crystallography Reports*. 2021;66:883–96. <https://doi.org/10.1134/S1063774521060420>

27. Zhang R., Tian J., Wu Y., et al. An investigation on shape memory behaviors of UHMWPE-based nano-

composites reinforced by graphene nanoplatelets. *Polymer Testing*. 2021;99:107217. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107217>

28. Sleptsova S.A., Okhlopko A.A. Study of the thermodynamic parameters of composite materials based on polytetrafluoroethylene and ultrafine fillers. *International Polymer Science and Technology*. 2001;28(7):44–48. <https://doi.org/10.1177/0307174X0102800708>

29. Ning N., Fu S., Zhang W., et al. Realizing the enhancement of interfacial interaction in semicrystalline polymer/filler composites via interfacial crystallization. *Progress in Polymer Science*. 2012;37(10):1425–55. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.12.005>

30. Mazur K., Gadek-Moszczak A., Liber-Kneć A., et al. Mechanical behavior and morphological study of polytetrafluoroethylene (PTFE) composites under static and cyclic loading condition. *Materials*. 2021;14(7):1712. <https://doi.org/10.3390/ma14071712>

31. Vishal K., Rajkumar K., Sabarinathan P. Effect of recovered silicon filler inclusion on mechanical and tribological properties of polytetrafluoroethylene (PTFE) composite. *Silicon*. 2022;14:4601–4610. <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01250-w>

32. Adamov A.A., Keller I.E., Ostrer S.G., et al. Evaluation of the performance of antifriction PTFE composites at a pressure over 60 MPa. I. Comparison of their hardness and deformation properties under free and constrained compression. *Mechanics of Composite Materials*. 2022;58(5):673–678. <https://doi.org/10.1007/s11029-022-10058-7>

33. Адаменко Н.А., Игнатова Л.Н., Агафонова Г.В. и др. Исследование молекулярной структуры политетрафторэтилена после взрывной обработки. *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2014;136(9):45–48.

Adamenko N.A., Ignatova L.N., Agafonova G.V., et al. Study of the molecular structure of polytetrafluoroethylene after explosive treatment. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2014; 136(9):45–48. (In Russ.)

34. Van Meter K.E., Junk Ch.P., Campbell K.L., et al. Ultralow wear self-mated PTFE composites. *Macromolecules*. 2022;55(10):3924–3935. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.1c02581>

Об авторах

ВАСИЛЬЕВ Андрей Петрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-7699-533X>, ResearcherID: R-8924-2016, SPIN: 5488-6525, e-mail: gtvap@mail.ru

ОХЛОПКОВА Айталиа Алексеевна, доктор технических наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0003-0691-7066>, ResearcherID: A-6594-2014, SPIN: 5495-1617, e-mail: okhlopko@yandex.ru

СТРУЧКОВА Татьяна Семеновна, кандидат технических наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-6469-1491>, ResearcherID: E-5047-2014, SPIN: 1217-0855, e-mail: sts_23@mail.ru

АЛЕКСЕЕВ Алексей Гаврильевич, старший преподаватель, <https://orcid.org/0000-0001-5148-2837>, SPIN: 9203-2620, e-mail: alexalekseev.z@gmail.com

Вклад авторов

Васильев А.П. – методология, проведение исследования, визуализация, создание черновика рукописи; **Охлопкова А.А.** – редактирование рукописи, руководство исследованием, получение финансирования, администрирование проекта; **Стручкова Т.С.** – разработка концепции, методология, администрирование данных; **Алексеев А.Г.** – верификация данных, проведение исследования, проведение статистического анализа

Конфликт интересов

Один из авторов – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Охлопкова А.А. является членом Редакционной коллегии журнала «Природные ресурсы Арктики и Субарктики». Авторам неизвестно о каком-либо другом потенциальном конфликте интересов, связанном с этой рукописью.

About the authors

VASILEV, Andrey Petrovich, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, <http://orcid.org/0000-0001-7699-533X>, ResearcherID: R-8924-2016, SPIN: 5488-6525, e-mail: gtvap@mail.ru

OKHLOPKOVA, Aitalina Alekseevna, Dr. Sci. (Eng.) Professor, Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-0691-7066>, ResearcherID: A-6594-2014, SPIN: 5495-1617, e-mail: okhlopkova@yandex.ru

STRUCHKOVA, Tatyana Semenovna, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-6469-1491>, ResearcherID: E-5047-2014, SPIN: 1217-0855, e-mail: sts_23@mail.ru

ALEKSEEV, Alexsey Gavrilievich, Senior Lecturer, <https://orcid.org/0000-0001-5148-2837>, SPIN: 9203-2620, e-mail: alexalekseev.z@gmail.com

Authors' contribution

Vasiliev A.P. – methodology, investigation, visualization, writing - original draft; **Okhlopkova A.A.** – writing – review & editing, supervision, funding acquisition, project administration; **Struchkova T.S.** – conceptualization, methodology, data curation; **Alexeev A.G.** – validation, investigation, formal analysis

Conflict of interest

One of the authors, Okhlopkova A.A., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher is a member of the Editorial Board for the journal “Arctic and Subarctic Natural Resources”. The authors are not aware of any other potential conflict of interest relating to this article.

Поступила в редакцию / Submitted 17.02.2025

Поступила после рецензирования / Revised 20.03.2025

Принята к публикации / Accepted 08.04.2025



Оригинальная статья

Исследование изменения свойств СВМПЭ в натуральных условиях г. Якутск в зависимости от сезона экспонирования

Ксю М.¹, Гоголева О.В.^{✉,2}, Соколова М.Д.², Петрова П.Н.², Федоров А.Л.²,
Кондаков М.Н.², Чжан Д.¹

¹Высокотехнологичная промышленная база (промежуточных исследований) Шаньдунской Академии наук
(бизнес-инкубатор обучающихся за границей), Цзинань, Китай

²Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

✉ oli-gogoleva@yandex.ru, 1225602976@qq.com

Аннотация

В работе приведены результаты сравнительных исследований физико-механических свойств сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) и модифицированных полимерных композиционных материалов (ПКМ) после стендовых натуральных испытаний на климатическом полигоне в г. Якутск, проведенных в марте и в октябре. Исследования физико-механических показателей экспонированных образцов проводились через 30, 105, 135, 180, 270 и 365 дней. Выявлено, что старение образцов СВМПЭ приходится на летние месяцы, независимо от сезона выставления. Рассмотрены изменения физико-химической структуры методом ИК-спектроскопии. Установлена интенсификация процессов фотохимической деструкции СВМПЭ в присутствии углеродных волокон. Проведены расчеты температур поверхности образцов при облучении солнечной радиацией в условиях натурной экспозиции в г. Якутск, используя линейную регрессионную модель для оценки температуры поверхности материалов с покрытиями разного цвета.

Получены новые данные о влиянии климатических факторов Якутии на изменение деформационно-прочностных свойств СВМПЭ. Установлены механизмы воздействия факторов окружающей среды: температуры, солнечной радиации, сезона экспонирования на процессы старения СВМПЭ и его композитов. Результаты получат развитие в полимерном материаловедении для решения вопросов по снижению старения полимеров. На основании проведенных работ композиционные материалы на основе СВМПЭ, предназначенные для работы под открытым воздухом в условиях Якутии, например футеровки, рекомендуется дополнительно модифицировать эффективными стабилизаторами с целью предотвращения процессов светового старения.

Ключевые слова: сверхвысокомолекулярный полиэтилен, старение, деградация, солнечная активность, температура

Благодарности. Данная работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ №122011100162-9 с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук».

Для цитирования: Ксю М., Гоголева О.В., Соколова М.Д., Петрова П.Н., Федоров А.Л., Кондаков М.Н., Чжан Д. Исследование изменения свойств СВМПЭ в натуральных условиях г. Якутск в зависимости от сезона экспонирования. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(2):337–346. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-337-346>

Original article

Study of the changes in the properties of UHMWPE under the natural environmental conditions of Yakutsk based on seasonal exposure

Mingxian Xu¹, Olga V. Gogoleva^{✉,2}, Marina D. Sokolova², Pavlina N. Petrova²,
Andrey L. Fedorov², Mikhail N. Kondakov², Daifeng Jiang¹

¹The Science of Technology Service Platform of Shandong Academy of Sciences
(Shandong Academy of Sciences Overseas Chinese Entrepreneurship Park), Jinan, China

²Institute of Oil and Gas Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

✉ oli-gogoleva@yandex.ru, 1225602976@qq.com

Abstract

This research presents the results of comparative analyses of the physical and mechanical properties of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) and modified polymer composite materials (PCMs) following field bench

testing. These analyses were conducted at a climatic testing facility in Yakutsk during March and October. The study examined changes in the physical and mechanical properties of the samples after exposure durations of 30, 105, 135, 180, 270, and 365 days. The findings indicate that the aging process of UHMWPE predominantly occurs during the summer months, despite variations associated with seasonal changes. Infrared (IR) spectroscopy was utilized to investigate modifications in the physicochemical structure of the materials. A notable acceleration in the photochemical degradation of UHMWPE was observed in the presence of carbon fibers. Additionally, surface temperature calculations for samples exposed to solar radiation under real-world conditions in Yakutsk were performed using a linear regression model. This model was employed to evaluate the surface temperatures of materials with varying colored coatings. The study elucidates the mechanisms by which environmental variables, including temperature, solar radiation, and seasonal exposure, affect the aging processes of UHMWPE and its composites in Yakutia. The results are expected to have significant implications for addressing challenges related to the mitigation of polymer aging. Consequently, it is recommended to further enhance UHMWPE composite materials intended for outdoor applications in Yakutia, such as linings, by incorporating effective stabilizers to reduce light-induced aging effects.

Keywords: ultra-high molecular weight polyethylene, aging, degradation, solar activity, temperature

Funding. This study was conducted within the state assignment from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. 122011100162-9), using the scientific equipment available at the Core Shared Research Facilities of the Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.”

For citation: Xu M., Gogoleva O.V., Sokolova M.D., Petrova P.N., Fedorov A.L., Kondakov M.N., Jiang D. Study of the changes in the properties of UHMWPE under the natural environmental conditions of Yakutsk based on seasonal exposure. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(2):337–346. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-337-346>

Введение

В условиях реальной эксплуатации полимерные изделия подвергаются воздействию климатических факторов (температура, влажность, атмосферное давление, осадки, солнечная радиация, ветер и т. д.), абразивных частиц (пыль, песок), ветер и т. д. и эксплуатационных нагрузок (растягивающие и сжимающие напряжения, вибрация, трение, изменение внешнего давления, деформация, удары и др.), и эти воздействия приводят к интенсификации процессов старения, деструкции и разрушения полимерных материалов, что существенно влияет на их работоспособность.

Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) обладает широким спектром ценных функциональных свойств и в настоящее время является перспективным материалом для применения в аэрокосмической области, строительстве, машиностроении в качестве триботехнических деталей, уплотнений, для футеровки бункеров, кузовов, вагонов и конструкций в горнорудной промышленности, медицинских изделиях, бронезащитных материалах, спортивной индустрии и т. п. [1–5]. Изделия из СВМПЭ характеризуются низким коэффициентом трения, высокой износостойкостью, кроме этого, они обладают высокой стойкостью к действию агрессивных сред и повышенной морозостойкостью [6–9]. Однако ранее проведенные исследования климатической стойкости СВМПЭ и композитов на его основе с углеродными волокнами показали, что при натурной экспозиции в условиях г. Якутск

под действием света, кислорода, влажности, перепада температур они подвергаются в основном световому старению, приводящему к фотохимической деструкции полимерных цепей или их нежелательному, неконтролируемому сшиванию, в результате чего в течение 3–6 месяцев они становятся хрупкими и жесткими [10].

Материалы и методы исследований

В качестве полимерной матрицы использовали СВМПЭ марки Gur-4150 с молекулярной массой 9,2 млн. В качестве армирующего наполнителя использованы дискретные углеродные волокна (УВ) марки «Белум». Переработку СВМПЭ и композиций на его основе проводили с использованием технологии горячего прессования при давлении 10 МПа и температуре 180 °С.

Экспериментальные исследования проводили на образцах полимерных материалов и ПКМ в виде прессованных деталей. Предел прочности при растяжении, относительное удлинение при разрыве, модуль упругости определяли по ГОСТ 11262-2017 на испытательной машине “UTS-20K”.

Метод инфракрасной спектроскопии использован для изучения изменений физико-химической структуры ПКМ. ИК-спектры образцов ПКМ регистрировали методом неполного внутреннего отражения на спектрометре Varian FTIR 7000 Spectrometer в области частот 400–4000 см⁻¹. Идентификацию и анализ ИК-спектров осуществляли по известным методикам с использованием библиотеки спектрометра и данных по ИК-спектрам полимеров.

Исследование изменения основных свойств композитов при естественном старении в климатических условиях, характерных для г. Якутск, проводили по ГОСТ 9.708-83.

Обсуждение результатов

Для дополнительного подтверждения, что доминирующим механизмом старения являются процессы фотохимической деструкции, проведены сравнительные исследования изменения свойств СВМПЭ, экспонированных в разные сезоны, сильно различающихся значениями суммарной солнечной радиации. В связи с тем, что ранее проведенные климатические испытания СВМПЭ были начаты в марте 2021 г., когда начинает повышаться прямая солнечная радиация, как рекомендовано в ГОСТ 9.708-83, для сравнительного эксперимента образцы СВМПЭ для натурной экспозиции выставлены в октябре 2022 г., в период ее снижения (рис. 1).

На рисунках 2 и 3 приведены изменения деформационно-прочностных показателей образцов СВМПЭ в зависимости от сезона экспонирования. Время экспонирования в обоих случаях – 1 год.

Как видно из рис. 2, судя по изменению значений относительного удлинения при разрыве экспонированных образцов СВМПЭ, процесс старения существенно зависит от температуры окружающего воздуха и солнечной активности. У образцов, выставленных в марте, когда солнечная активность начинает возрастать, процесс

изменения деформационно-прочностных характеристик, в особенности относительного удлинения при разрыве, идет в сторону повышения. Максимальные значения относительного удлинения зарегистрированы у СВМПЭ в июне, когда достигается пик значений средних за месяц суточных сумм прямой радиации. Видимо, это связано с релаксацией внутренних напряжений и перестройкой надмолекулярной структуры полимерной матрицы под воздействием УФ-излучения и температуры. На 135 день (июль) экспонирования зарегистрирован резкий спад относительного удлинения при разрыве, происходит хрупкое разрушение образца. Это можно связать с тем, что в июне и июле увеличиваются продолжительность солнечного сияния (12,5 и 10,8 часов соответственно) и суточные суммы прямой радиации (см. рис. 1), приводящие к интенсификации процессов старения. Повышение температуры окружающего воздуха в этот период также способствует ускорению процессов фотохимической деструкции полимерной матрицы вплоть до разрушения материала.

Также низкая климатическая стойкость СВМПЭ может быть связана с процессами получения, так как синтез СВМПЭ производится с применением катализаторов циглеровского типа, содержащих в своем составе хлориды титана и магния. Реакции окисления полимера ускоряются в присутствии света или в присутствии ионов металлов, так как технически получение «абсолютно

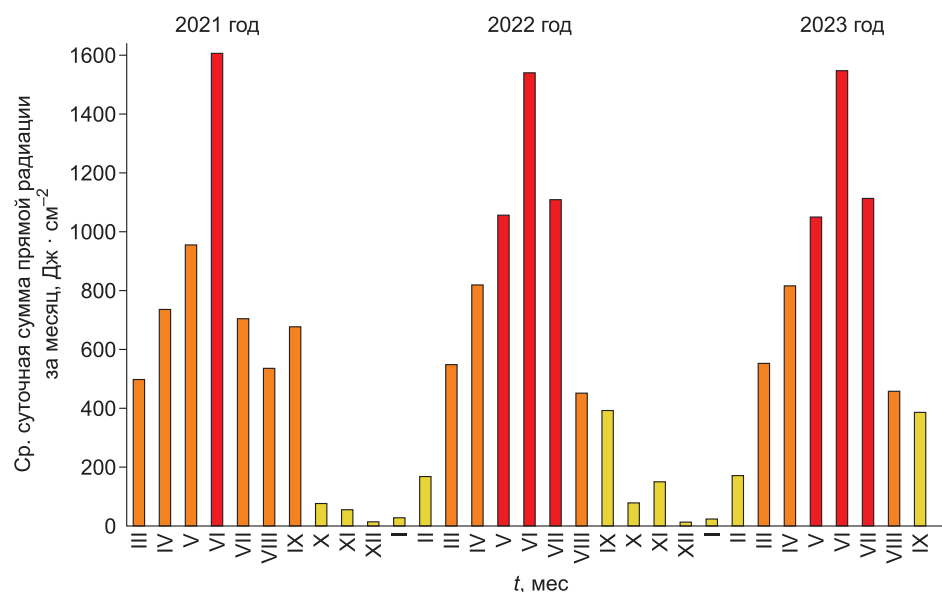


Рис. 1. Значения средних за месяц суточных сумм прямой радиации [11]

Fig. 1. Monthly average daily totals of direct solar radiation [11]

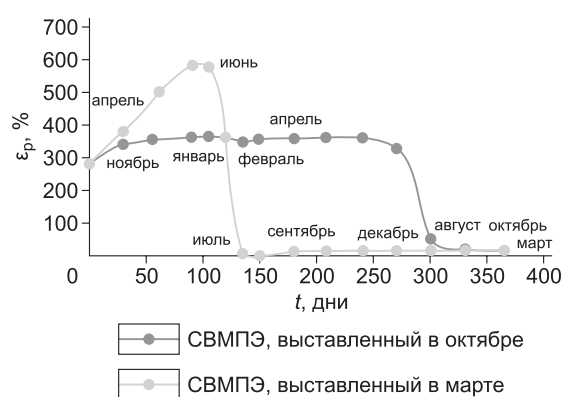


Рис. 2. Значения относительного удлинения при разрыве СВМПЭ в зависимости от сезона экспонирования

Fig. 2. Values of elongation at break of UHMWPE based on the exposure season

чистого» полимера просто невозможно и в полимере могут присутствовать дефекты структуры и примеси в виде остатков катализаторов, содержащих ионы металлов [12, 13].

У СВМПЭ, экспонированного в октябре, процесс старения носит сначала после первого месяца экспонирования установившийся характер, т. е. в течение 9 мес. не наблюдается сильного изменения механических свойств. Затем на 10-й месяц экспонирования (август) у образца наблюдается резкое снижение значения относительного удлинения при разрыве. Характер деформационной кривой от нагрузки образца СВМПЭ после экспонирования в течение 10 месяцев соответствует хрупкому разрушению (рис. 4).

Таким образом, из рис. 4 видно, что изменения механизма разрушения (переход от пластич-

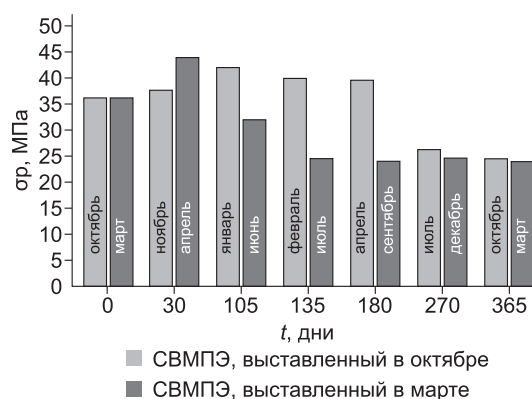


Рис. 3. Значения предела прочности при растяжении СВМПЭ в зависимости от сезона экспонирования

Fig. 3. Tensile strength values of UHMWPE based on the exposure season

ного к хрупкому разрушению) образцов СВМПЭ приходится на летние месяцы июнь–июль, в которых солнечная активность и температура окружающего воздуха г. Якутск максимальны. В эти месяцы активизируются окислительно-деструктивные процессы в поверхностном слое экспонированных образцов, процессы диффузии и растворения кислорода происходят преимущественно в аморфных областях. Механические свойства полиолефинов в значительной степени определяются зацеплениями проходных молекул, поэтому окисление в аморфных областях быстро приводит к снижению деформационно-прочностных характеристик [14].

В работах [15, 16] была показана перспективность использования углеродных волокон (УВ) марки «Белум», полученных из гидратцеллю-

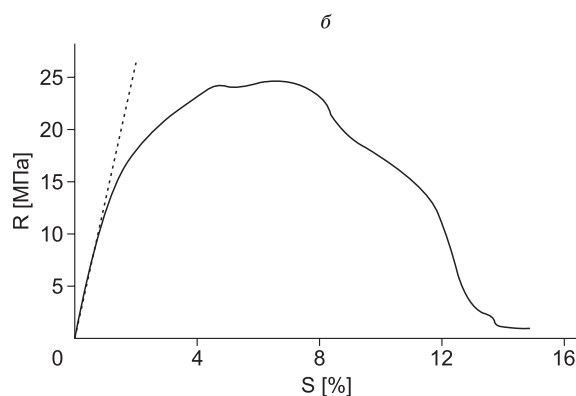
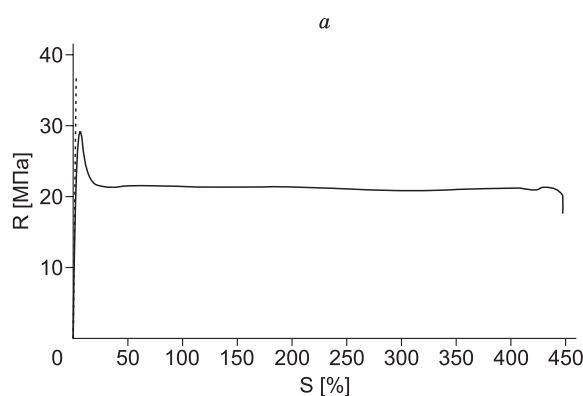


Рис. 4. Характер деформационной кривой от нагрузки: *а* – СВМПЭ, экспонированный 9 месяцев; *б* – СВМПЭ, экспонированный 10 месяцев

Fig. 4. The deformation curve in response to the load: *a* – UHMWPE exposed for 9 months; *b* – UHMWPE exposed for 10 months

лозного сырья в качестве армирующего элемента СВМПЭ. Установлено, что наполнение углеродными волокнами сверхвысокомолекулярного полиэтилена приводит к улучшению триботехнических свойств композитов с сохранением физико-механических свойств на уровне исходного полимера.

Однако, было выявлено, что при натурном экспонировании в условиях г. Якутск ПКМ, модифицированные углеродными волокнами, быстрее подвергаются процессам старения, чем немодифицированный СВМПЭ [10]. Это связано с тем, что углеродный наполнитель марки «Белум» представляет собой углеродные волокна, получаемые путем термической обработки целлюлозных волокон в инертной атмосфере. На рис. 5 представлена структурная формула целлюлозы. Как видно, она имеет в своем составе множество $-\text{CH}_2-\text{OH}$ -групп, часть из которых, вероятно, сохраняется при термической обработке целлюлозы и выступает как хромофорные группы, способные поглощать УФ-излучение, находясь уже в составе ПКМ. Наличие хромофорных групп способствует интенсификации процессов фотохимической деструкции полимерной матрицы [6].

Интенсификация фотохимической деструкции СВМПЭ в присутствии УВ марки «Белум» подтверждается ИК-спектроскопическими исследованиями (рис. 6). Интенсивность полосы поглощения при 1712 см^{-1} , относящейся к карбонильным группам, свидетельствуют

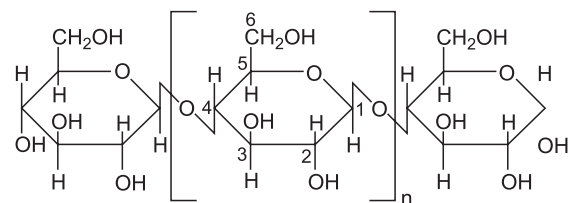


Рис. 5. Структурная формула целлюлозы

Fig. 5. The structural formula of cellulose

щей о протекании окислительных процессов с участием кислорода воздуха, инициированных УФ-частью спектра солнечного излучения, на спектрах ПКМ выше по сравнению с исходным СВМПЭ.

С другой стороны, УВ являются адсорберами ультрафиолетового излучения, т. е. поглощают энергию ультрафиолетового и видимого света практически во всем частотном диапазоне и преобразуют преимущественно в тепло. В работе [17] обсуждается эффект перегрева поверхности образцов ПКМ, вызванный солнечным излучением. Показано, что даже с учетом ночного времени, при котором не происходит нагрев солнечными лучами, среднесуточная температура образцов может превысить среднегодовую температуру более чем на $30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В связи с этим проведены расчеты температур поверхности образцов при облучении солнечной радиацией в условиях натурной экспозиции в г. Якутск, используя линейную регрессионную модель для оценки температуры поверхности ма-

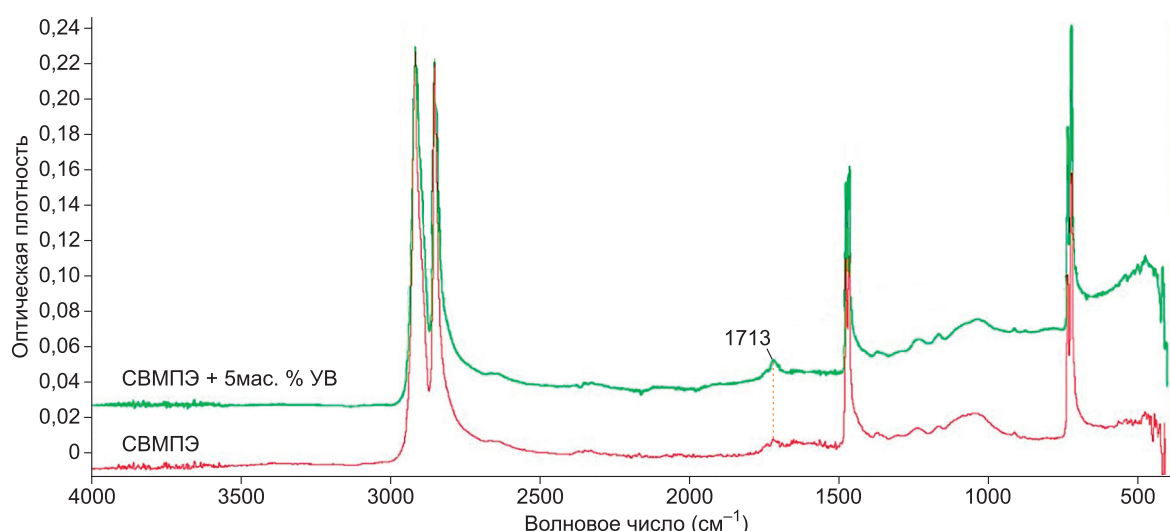


Рис. 6. ИК-спектры СВМПЭ и СВМПЭ + 5 мас. % УВ, экспонированных в течение 12 месяцев

Fig. 6. IR spectra of UHMWPE and UHMWPE containing 5 wt. % hydrocarbons after 12 months of exposure

териалов T_s с покрытиями разного цвета, представленную в работе [18]:

$$T_s = T_a + \frac{a \cdot I_{UV}}{h},$$

где T_a – максимальная температура воздуха; a – коэффициент поглощения солнечной радиации (для белых образцов СВМПЭ 0,2, для черных образцов ПКМ – 0,9); I_{UV} – интенсивность солнечной радиации для ультрафиолетового излучения; h – коэффициент теплопроводности материала (Вт/(м·К)).

Интенсивность солнечной радиации (Вт/м²) вычисляли по формуле

$$I = \frac{M \cdot 10000}{T \cdot 3600},$$

где M – средние значения за месяц суточной суммы прямой радиации, Дж/см², T – средние значения за месяц суточной суммы продолжительности солнечного сияния, ч.

Средние значения за месяц суточной суммы прямой радиации вычисляли по формуле

$$M = M_G - M_D,$$

где M_G – средние значения за месяц суточной суммы суммарной радиации (Дж/см²), M_D – средние значения за месяц суточной суммы рассеянной радиации (Дж/см²) [11].

Коэффициент теплопроводности исходного СВМПЭ принимался равным 0,42 Вт/(м·К), для композита коэффициент теплопроводности равен 0,93 Вт/(м·К). Рассчитан согласно уравнению Максвелла для двухфазных систем [19].

Далее учитываем долю ультрафиолетового излучения (350 нм) от всего солнечного спектра, где она может варьировать в зависимости от климатических условий от 1 до 9 % [20, 21]. В данном случае для образцов, экспонированных в условиях Якутии, доля УФ-излучения принята равной 7 % на основе анализа суммарной солнечной радиации (МДж/м²) по регионам РФ [7]. С учетом этого интенсивность ультрафиолетового излучения составляет

$$I_{UV} = I \cdot 0,07.$$

На рис. 7 представлены рассчитанные значения температур на поверхности образцов ΔT при доле УФ-излучения 7 %. В летние месяцы зарегистрирован эффект перегрева поверхности образцов ПКМ.

Видно, что для белых образцов СВМПЭ наибольшая разность температур окружающего воздуха и на поверхности образцов фиксируется в июне и составляет 11,4 °С, для черных образцов ПКМ – 23,2 °С, что согласуется с выводами работы [22]. Основываясь на данных вычислениях, проведены

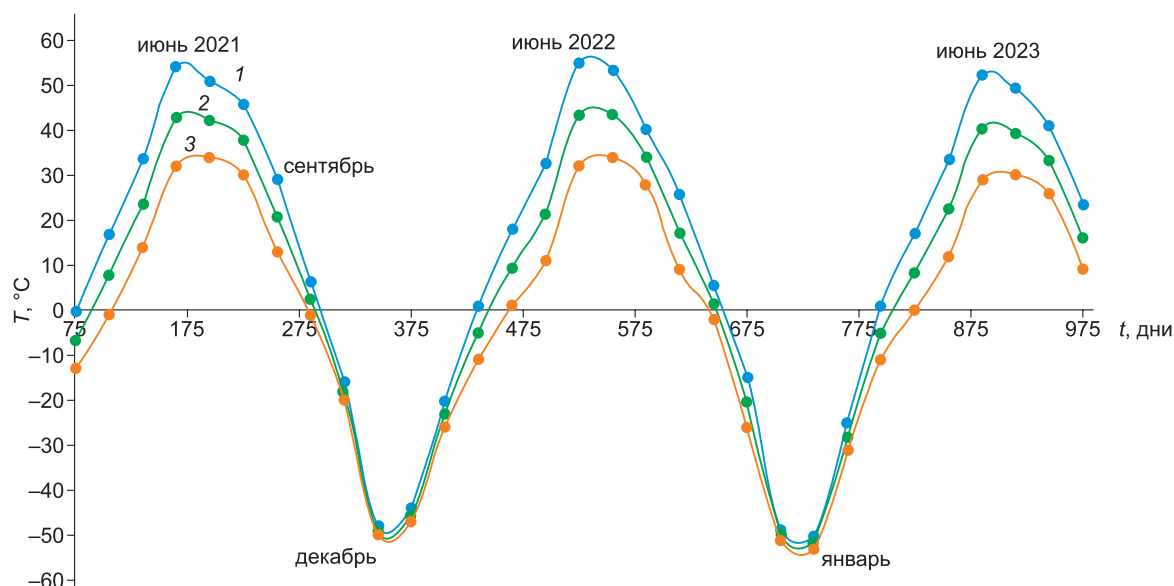


Рис. 7. Показатели вычисленных значений температур на поверхности образцов СВМПЭ с УФ и без: 1 – ПКМ (черные образцы); 2 – СВМПЭ (белые образцы); 3 – температура окружающего воздуха

Fig. 7. Indicators of the calculated temperature values on the surface of the samples: UHMWPE with and without CF: 1 – PCM (black samples); 2 – UHMWPE (white samples); 3 – ambient air temperature

испытания физико-механических свойств СВМПЭ и ПКМ при температурах 50 и 60 °С (см. таблицу).

Показано, что чем выше температура проведения эксперимента, тем выше показатели относительного удлинения при разрыве, что объясняется увеличением сегментальной подвижности макромолекул и облегчением протекания релаксационных процессов. Зарегистрировано, что по мере повышения температуры прочность у СВМПЭ и ПКМ снижается. Это связано с тем, что разрушение полимерных образцов при растяжении происходит не только под действием нагрузки, но и в значительной степени в результате теплового движения сегментов макромолекул. Вследствие флуктуации тепловой энергии происходит разрушение межмолекулярных связей, обеспечивающих прочность материала, а деформирующее напряжение существенно уменьшает энергетический барьер, и это способствует снижению разрывной прочности образцов [23–25].

Заключение

На основании проведенных исследований получены новые данные о влиянии климатических факторов Якутии на изменение деформационно-

Физико-механические показатели образцов в зависимости от температуры

Physical and mechanical properties of samples depending on temperature

T, °C	Образцы	ε_p , %	σ_p , МПа	E, МПа
23	СВМПЭ	280	36,0	810
	СВМПЭ + 5 мас. % УВ	290	36,0	863
50	СВМПЭ	400	30,4	508
	СВМПЭ + 5 мас. % УВ	360	28,2	570
60	СВМПЭ	410	27,3	316
	СВМПЭ + 5 мас. % УВ	395	26,5	475

прочностных свойств СВМПЭ. Установлены механизмы воздействия факторов окружающей среды: температуры, солнечной радиации, влияния сезона экспонирования на процессы старения СВМПЭ и его композитов.

Композиционные материалы на основе СВМПЭ, предназначенные для работы под открытым воздухом в условиях Якутии, например футеровки, рекомендуется дополнительно модифицировать эффективными стабилизаторами с целью предотвращения процессов светового старения.

Список литературы / References

1. Валуева М.И. Современные материалы и технологии для получения бронезащитных изделий. *Вопросы материаловедения*. 2017;(2):197–207.
1. Valueva M.I. Modern materials and technologies used for body armor. *Voprosy Materialovedeniya*. 2017;(2):197–207 (In Russ.).
2. Валуева М.И., Железина Г.Ф., Гуляев И.Н. Полимерные композиционные материалы повышенной износостойкости на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена. *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2017;(6):23–29.
2. Valueva M.I., Zhelezina G.F., Gulyaev I.N. Polymer composite materials with increased wear resistance based on ultra-high molecular weight polyethylene. *All Materials. Encyclopedic Reference Book*. 2017;(6):23–29 (In Russ.).
3. Михайлин Ю.А. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (часть 1). *Полимерные материалы*. 2003;(3):18–21.
3. Mikhailin Yu.A. Ultra-high molecular weight polyethylene (part 1). *Polymer materials*. 2003;(3):18–21. (In Russ.).
4. Колесова Е.С., Гоголева О.В., Петрова П.Н., Протопопов Ф.Ф. Исследование работоспособности сверхвысокомолекулярного полиэтилена при трении в среде различных смазочных масел. *Нефтегазовое дело*. 2021;19(4):97–106. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2021-4-97-106>.
4. Research Ultra-High Molecular Weight Polyethylene performance at friction in the medium of various lubricating oils. *Petroleum Engineering*. 2021;19(4):97–106. (In Russ.). <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2021-4-97-106>.
5. Сенатов Ф.С. Микроструктура и свойства композитов медицинского назначения на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М. 2013. 158 с.
5. Senatov F.S. *Microstructure and properties of medical grade composites based on ultra-high molecular weight polyethylene*: Diss. ... Cand. Sci. Moscow. 2013. 158 p. (In Russ.).
6. Данилова С.Н., Охлопкова А.А., Оконешникова А.В. Разработка композиционных материалов на основе СВМПЭ и углеродного и базальтового волокон. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(4):661–674. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-661-674>
6. Danilova S.N., Okhlopko A.A., Okoneshnikova A.V. Development of composite materials based on UHMWPE using carbon and basalt fibers. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(4):661–674 (In Russ.). <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-661-674>
7. Борисова Р.В., Никифоров Л.А., Спиридонов А.М., et al. Brominated UHMWPE influence on tribological characteristics and wearing features of polymeric nanocomposites based on UHMWPE and nanoparticles. *Journal of Friction and Wear*. 2019;40:27–32. <https://doi.org/10.3103/S1068366619010045>

8. Дайюб Т., Максимкин А.В. Влияние химической модификации на механические, трибологические и адгезионные свойства ориентированных лент СВМПЭ. *Машиностроение*. 2024;11(2):86–91. <https://doi.org/10.24892/RIJE/20240214>
- Dayyub T., Maksimkin A.V. Influence of chemical modification on mechanical, tribological and adhesive properties of oriented UHMWPE tapes. *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*. 2024;11(2):86–91 (In Russ.). <https://doi.org/10.24892/RIJE/20240214>
9. Спиридонов А.М. *Адсорбция цетилтриметиламмоний бромида природным цеолитом и свойства его модифицированной поверхности*: Дис. ... канд. хим. наук. Якутск. 2021. 115 с.
- Spiridonov A.M. *Adsorption of cetyltrimethylammonium bromide by natural zeolite and properties of its modified surface*: Diss. ... Cand. Sci. Yakutsk. 2021. 115 p. (In Russ.).
10. Колесова Е.С., Гоголева О.В., Петрова П.Н. Разработка ПКМ на основе СВМПЭ с высокой стабильностью свойств в условиях резко-континентального климата. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2021;26(4):122–131. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-4-122-131>.
- Kolesova E.S., Gogoleva O.V., Petrova P.N. Development of polymer composite materials based on Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene with the high stability of characteristics under the conditions of sharply continental climate. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2021;26(4):122–131 (In Russ.). <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-4-122-131>.
11. Мировой Центр Радиационных Данных [Электронный ресурс]. 2023. Режим доступа: https://wrdc.mgo.rssi.ru/wwwrootnew/wrdc_ru_new.htm (дата обращения: 23.11.2023).
- World Radiation Data Center [Electronic resource]. 2023. Available at: https://wrdc.mgo.rssi.ru/wwwrootnew/wrdc_ru_new.htm (accessed: 23.11.2023).
12. Гостев С.С. *Реакторные полимерные композиции сверхвысокомолекулярного полиэтилена с низкомолекулярным полиэтиленом высокой плотности: синтез на металлоценовых и пост-металлоценовых катализаторах, морфология, свойства*. Дис. ... канд. хим. наук. М. 2023. 141 с.
- Gostev S.S. *Reactor polymer compositions of ultrahigh molecular weight polyethylene with low molecular weight high-density polyethylene: synthesis on metallocene and post-metallocene catalysts, morphology, properties*. Diss. ... Cand. Sci. Moscow. 2023. 141 p. (In Russ.).
13. Stein H.L. *Ultrahigh molecular weight polyethylenes (UHMWPE)*. In: *Engineered materials handbook*. 1998;(2):167 p.
14. Мельникова М.А. *Полимерные материалы: свойства, практическое применение: учебное пособие*. Благовещенск: Амурский гос. ун-т; 2013. 86 с.
- Melnikova M.A. *Polymer materials: properties, practical application: textbook*. Blagoveshchensk: Amur State University; 2013. 86 p. (In Russ.).
15. Gogoleva O.V., Petrova P.N., Kolesova E.S. Development of polymer composite materials based on Ultrahigh-Molecular Weight Polyethylene and Carbon Fillers. *Materials Science Forum*. 2019;(945):362–368.
16. Колесова Е.С., Гоголева О.В., Петрова П.Н. и др. Разработка композитов триботехнического назначения на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена. *Материаловедение*. 2020;(9):34–37. <https://doi.org/10.31044/1684-579X-2020-0-9-34-37>.
- Kolesova E.S., Gogoleva O.V., Petrova P.N., et al. Development of composites for tribotechnical purposes, based on Ultrahigh-Molecular Weight Polyethylene. *Materials Science*. 2020;(9):34–37. (In Russ.). <https://doi.org/10.31044/1684-579X-2020-0-9-34-37>.
17. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. III. Значимые факторы старения. *Деформация и разрушение материалов*. 2011;(1):34–40.
- Kablov E.N., Startsev O.V., Krotov A.S., Kirillov V.N. Climatic aging of composite materials for aviation purposes. III. Significant aging factors. *Deformatsiya i Razrushenie materialov=Deformation and Fracture of Materials*. 2011;(1):34–40 (In Russ.).
18. Fisher R.M., Ketola W.D. Surface temperatures of materials in interior exposures and accelerated tests. In: Ketola W.D., Grossman D. (eds.) *Accelerated and Outdoor Durability Testing of Organic Materials*. Philadelphia, USA; 1994, pp. 88–114.
19. Shi W., Dong H., Bell T. Tribological behaviour and microscopic wear mechanisms of UHMWPE sliding against thermal oxidation-treated Ti₆Al₄V. *Materials Science and Engineering*. 2000;29(1-2):27–36.
20. Diffey B. L. Sources and measurement of ultraviolet radiation. *Methods*. 2002;28(1):4–13. [https://doi.org/10.1016/s1046-2023\(02\)00204-9](https://doi.org/10.1016/s1046-2023(02)00204-9).
21. Wolf A.T. Environmental degradation factors, their characterization and effects on sealed building joints. In: Wolf A.T. (ed.) *Durability of Building Sealants. State-of-the-Art Report of RILEM TC 139-DBS*; Cachan: RILEM Publications; 1999, pp. 41–72.
22. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Измерение и прогнозирование температуры образцов материалов при экспонировании в различных климатических зонах. *Авиационные материалы и технологии*. 2020;(4-61):47–58. <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2020-0-4-47-58>
- Kablov E.N., Startsev V.O. Measurement and forecasting of materials samples' temperature during weathering in different climatic zones. *Aviation Materials and Technologies*. 2020;(4-61):47–58 (In Russ.). <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2020-0-4-47-58>
23. Шевченко А.А. *Химическое сопротивление неметаллических материалов и защита от коррозии*. М.: Химия, КолосС; 2004. 248 с.
- Shevchenko A.A. *Chemical resistance of non-metallic materials and corrosion protection*. Moscow: Khimiya, KolosS; Publ.; 2004. 248 p. (In Russ.).

24. Кулезнев В.Н., Шершнева В.А. *Химия и физика полимеров*. М.: Химия, Колосс; 2007. 367 с.

Kuleznev V.N., Shershnev V.A. *Chemistry and physics of polymers*. Moscow: Khimiya, KolosS Publ.; 2007. 367 p (In Russ.).

25. Тагер А.А. *Физико-химия полимеров*. Москва: Химия; 1968. 536 с.

Tager A.A. *The physical and chemical properties of polymers*. Moscow: Khimiya Publ.; 1968. 536 p. (In Russ.).

Об авторах

КСЮ Мингсян, профессор, заместитель директора, <https://orsid.org/0009-0009-9422-9298>, Scopus Author ID: 58069441600, e-mail: 1225602976@qq.com

ГОГОЛЕВА Ольга Владимировна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-5425-2295>, ResearcherID: A-5450-2014, Scopus Author ID: 13905668500, SPIN: 9737-9437, e-mail: oli-gogoleva@yandex.ru

СОКОЛОВА Мария Дмитриевна, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник, <https://orsid.org/0000-0003-2306-5870>, ResearcherID: A-5266-2014, Scopus Author ID: 56896257700, SPIN: 7603-7126, e-mail: marsokol@mail.ru

ПЕТРОВА Павлина Николаевна, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-1859-8034>, ResearcherID: A-6427-2014, Scopus Author ID: 13906602000, SPIN: 4704-0089, e-mail: ppavlina@yandex.ru

ФЕДОРОВ Андрей Леонидович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-1718-2643>, ResearcherID: A-5442-2014, Scopus Author ID: 55845420304, SPIN: 6079-2229, e-mail: gelvirb@mail.ru

КОНДАКОВ Михаил Николаевич, кандидат технических наук, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-9771-7427>, ResearcherID: AAZ-8507-2020, Scopus Author ID: 57193235069, SPIN: 2340-6526, e-mail: kondakovmix@mail.ru

ЧЖАН Дайфен, PhD, ассистент профессора, <https://orsid.org/0009-0003-3019-0060>, Author ID: 55847205900, e-mail: lichenjdf@lzb.com

Вклад авторов

Ксю М. – администрирование проекта; **Гоголева О.В.** – разработка концепции, методология, администрирование данных, визуализация, создание черновика рукописи; **Соколова М.Д.** – администрирование проекта; **Петрова П.Н.** – редактирование рукописи, руководство исследованием, администрирование проекта; **Федоров А.Л.** – верификация данных, проведение исследования, проведение статистического анализа; **Кондаков М.Н.** – верификация данных, проведение исследования, проведение статистического анализа; **Чжан Д.** – верификация данных, проведение статистического анализа.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

XU Mingxian, Associate Professor, Chief Sector, <https://orsid.org/0009-0009-9422-9298>, Scopus Author ID: 58069441600, e-mail: 1225602976@qq.com

GOGOLEVA, Olga Vladimirovna, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-5425-2295>, ResearcherID: A-5450-2014, Scopus Author ID: 13905668500, SPIN: 9737-9437, e-mail: oli-gogoleva@yandex.ru

SOKOLOVA, Marina Dmitrievna, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Chief Researcher, <https://orsid.org/0000-0003-2306-5870>, ResearcherID: A-5266-2014, Scopus Author ID: 56896257700, SPIN: 7603-7126, e-mail: marsokol@mail.ru

PETROVA, Pavlina Nikolaevna, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-1859-8034>, ResearcherID: A-6427-2014, Scopus Author ID: 13906602000, SPIN: 4704-0089, e-mail: ppavlina@yandex.ru

FEDOROV, Andrey Leonidovich, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-1718-2643>, ResearcherID: A-5442-2014, Scopus Author ID: 55845420304, SPIN: 6079-2229, e-mail: gelvirb@mail.ru

KONDAKOV, Mikhail Nikolaevich, Cand. Sci. (Eng.), Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-9771-7427>, ResearcherID: AAZ-8507-2020, Scopus Author ID: 57193235069, SPIN: 2340-6526, e-mail: kondakovmix@mail.ru

JIANG Daifeng, PhD, Assistant Professor, <https://orsid.org/0009-0003-3019-0060>, <https://orsid.org/0009-0003-3019-0060>, Author ID: 55847205900, e-mail: lichenjdf@lzb.com

Authors' contribution

Xu M. – project administration; **Gogoleva O.V.** – conceptualization, methodology, data curation, visualization, writing – original draft; **Sokolova M.D.** – project administration; **Petrova P.N.** – writing – review & editing, supervision, project administration; **Fedorov A.L.** – validation, investigation, formal analysis; **Kondakov M.N.** – validation, investigation, formal analysis; **Jiang D.** – validation, formal analysis

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 25.06.2024

Поступила после рецензирования / Revised 27.02.2025

Принята к публикации / Accepted 14.03.2025

Редактор *Н.А. Лившиц*
Корректурa *З.А. Корнилова*
Компьютерная верстка *И.В. Мелехов*
Обложка *Б.В. Яковлев*

Дата выхода в свет 30.06.2025. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая
Усл. п.л. 19,75. Тираж 100 экз. Заказ № 2171. Цена свободная.

Адрес редакции:

677007, г. Якутск, пр. Ленина, 33, тел. 8(4112) 33-57-11, <https://resar.elpub.ru>

Адрес издателя:

677007, г. Якутск, пр. Ленина, 33, ГБУ «Академия наук Республики Саха (Якутия)»,
тел. 8(4112) 33-57-11, e-mail: anrsya@mail.ru

Адрес типографии:

ООО «Компания «Дани-Алмас»
677008, г. Якутск, ул. Билибина, д. 10А
тел. 8(4112) 36-93-38, e-mail: ardah@inbox