

ПРИРОДНЫЕ РЕСУРСЫ АРКТИКИ И СУБАРКТИКИ

(до 2018 г. «Наука и образование»)

Научный журнал

2025, Том 30, № 3

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, «Белый список»
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. 3

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”; 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,
dated February 15, 2018, was issued by the Department
of Federal Service for Supervision in the Sphere
of Communication, Information Technologies
and Mass Communications of the Republic of Sakha (Yakutia)

Enlisted in the Catalogue of Leading Scientific Journals
of the Higher Attestation Commission, RF, RUS White List
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
© 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, Фэрбанкс, 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*
Шахмурадян 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*
Будажаров 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, ИГШ 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. Budazharov, *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. Ubugunov, *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. Okhlopko, *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

- Перспективы территории Чаро-Синского дайкового пояса на обнаружение кимберлитов по геохимическим особенностям базитов
Томшин М.Д., Толстов А.В., Журавлев А.И. 353
- Дистанционный сейсмический мониторинг первой ступени Вилюйского каскада ГЭС по записям сейсмической станции «Чернышевский»
Макаров А.А., Селезнев В.С. 365

Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

- Оценка термической устойчивости мерзлотных ландшафтов к современному потеплению климата (на примере Центральной Якутии)
Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Федоров А.Н. 376
- Моделирование уровня режима межмерзлотных вод и их стока в Центральной Якутии на примере водосборной площади источника Ерюю
Юй М., Павлова Н.А. 392
- Экономическая эффективность использования новых теплоизоляционных материалов в холодных регионах
Галкин А.Ф., Железняк М.Н., Жирков А.Ф., Панков В.Ю., Балута В.И. 404

Биологические науки

Экология

- Почвы тукуланов Лено-Вилюйского междуречья
Десяткин Р.В., Иванова А.З., Оконешникова М.В., Десяткин А.Р., Филиппов Н.В. 416
- Трансформация растительности экотонных участков лесов юго-запада Якутии под влиянием строительства линейных сооружений
Чикидов И.И., Михалева Л.Г. 427
- Полиморфизм пыльцы *Picea obovata* Ledeb. в условиях промышленного загрязнения арктического города
Василевская Н.В., Миронюк Д.В. 440
- Весенние пожары в лесах Центральной Якутии: роль антропогенного воздействия и экономические последствия
Протопопова В.В., Протопопов А.В., Самсонова И.В. 452

Биологические ресурсы

- Современное состояние ресурсов пушных зверей в Якутии
Степанова В.В. 465
- Система автоматизированного мониторинга фенотипических характеристик северных оленей (*Rangifer tarandus*) на основе технологий AutoML
Соболевский В.А., Лайшев К.А. 480

Тепловизионные технологии в изучении животных

Владимиров Л.Н., Мачахтыров Г.Н., Мачахтырова В.А., Шадрина Я.Л., Слепцова В.В., Алексеев В.А. 486

Материаловедение и химические технологии

Управление температурным режимом сварки полиэтиленовых труб в условиях низких температур

Тихонов Р.С., Старостин Н.П. 500

Прочность и электропроводность бетонных композитов, модифицированных оксидом графена

Лепов В.В., Попов Д.Н., Анисимов А.С. 510

Юбилеи

Борису Моисеевичу Кершенгольцу 75 лет 521

CONTENTS

Earth sciences

Geology and mineral resources

- Prospects for discovering kimberlites in the Charo-Sinsk dike swarm territory based on the geochemical features of basites
Tomshin M.D., Tolstov A.V., Zhuravlev A.I. 353
- Remote seismic monitoring of the first stage of the Vilyui HPP cascade using records from the “Chernyshevsky” seismic station
Makarov A.A., Seleznev V.S. 365

Engineering geology, permafrost and soil science

- Assessment of the thermal stability of permafrost landscapes in response to contemporary climate warming: A case study of Central Yakutia
Varlamov S.P., Skachkov Yu.B., Fedorov A.N. 376
- Modeling the water level regime of intrapermafrost waters and their runoff in Central Yakutia: A case study of the Eruu source catchment area
Yu M., Pavlova N.A. 392
- The economic efficiency of using new thermal insulation materials in cold climate
Galkin A.F., Zheleznyak M.N., Zhirkov A.F., Pankov V.Yu., Baluta V.I. 404

Biological sciences

Ecology

- Soils of the Tukulans on the Lena-Vilyui interfluvium
Desyatkin R.V., Ivanova A.Z., Okonshnikova M.V., Desyatkin A.R., Filippov N.V. 416
- Vegetation transformation in ecotone forest areas of Southwestern Yakutia in response to linear infrastructure development
Chikidov I.I., Mikhaleva L.G. 427
- Polymorphism of *Picea obovata* Ledeb. pollen under industrial pollution of the Arctic city
Vasilevskaya N.V., Mironyuk D.V. 440
- Spring forest fires in Central Yakutia: The role of anthropogenic factors and their economic consequences
Protopopova V.V., Protopopov A.V., Samsonova I.V. 452

Biological resources

- The current status of fur-bearing animal resources in Yakutia
Stepanova V.V. 465
- An automated monitoring system for phenotypic characteristics of Reindeer (*Rangifer tarandus*) using AutoML technologies
Sobolevsky V.A., Laishev K.A. 480

Thermal imaging technologies in the study of animals

Vladimirov L.N., Machakhtyrov G.N., Machakhtyrova V.A., Shadrina Ya.L., Slepsova V.V., Alekseev V.A. 486

Materials science and chemical technologies

Temperature control for welding polyethylene pipes in low-temperature conditions

Tikhonov R.S., Starostin N.P. 500

Mechanical strength and electrical conductivity of concrete composites enhanced with graphene oxide

Lepov V.V., Popov D.N., Anisimov A.S. 510

Anniversaries

The 75th Anniversary of Boris Moiseevich Kershengolts 521

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Геология и полезные ископаемые



УДК 552.325(551.24):553.81

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-353-364>

Оригинальная статья

Перспективы территории Чаро-Синского дайкового пояса на обнаружение кимберлитов по геохимическим особенностям базитов

М. Д. Томшин, А. В. Толстов, А. И. Журавлев✉

Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация
✉ Ai.zhuravlevgeo@gmail.com

Аннотация

Проблема поисков кимберлитов в закрытых территориях на сегодня остается весьма актуальной, поскольку легко открываемых, имеющих выход на дневную поверхность и хорошо читаемых в геофизических полях объектов в пределах Якутской алмазоносной провинции практически не осталось. Поэтому при постановке поисковых работ на алмазоносные кимберлиты требуется новый – не традиционный (геологический, минералогический, структурный и т. п.) подход. Установлено, что в долеритах даек Вилюйско-Мархинского пояса, располагающихся вблизи кимберлитов (Накынское, Мало-Ботуобинское и Сюльдюкарское кимберлитовые поля), содержание оксида титана ряда высоkozарядных и редкоземельных элементов (Th, Ta, Hf, Nd, Tb, Gd) увеличивается в два раза и более по сравнению с типичным их содержанием в целом в долеритах полей. Эту особенность в поведении названных элементов предложено использовать как один из поисковых на кимберлиты критериев. Учитывая факт наличия в пределах Чаро-Синского дайкового пояса долеритов с аномально повышенным количеством оксида титана и ряда высоkozарядных (Th, Hf, Ta, Zr, Y), редкоземельных (Nd, Tb, Gd) элементов, проведено сравнительное изучение долеритов даек вблизи этих тел. Установлено, что в сторону от дайки с максимальным содержанием реперных элементов их концентрация постепенно уменьшается. Предложено считать такие участки перспективными на обнаружение кимберлитов. К подобным участкам отнесены территории в пределах Чаро-Ленского междуречья и правобережья р. Лена напротив п. Синск. Полученные в работе результаты и выделенные участки предложено рекомендовать геолого-производственным предприятиям для постановки поисковых работ на кимберлиты на конкретных, локальных территориях.

Ключевые слова: Сибирская платформа, Вилюйский палеорифт, дайковые пояса, долериты, кимберлиты, поиски кимберлитов

Финансирование. Работа выполнена в рамках планов НИР государственного задания ИГАБМ СО РАН (проект № FUGG-2024-0007).

Для цитирования: Томшин М.Д., Толстов А.В., Журавлев А.И. Перспективы территории Чаро-Синского дайкового пояса на обнаружение кимберлитов по геохимическим особенностям базитов. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(3):353–364. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-353-364>

Prospects for discovering kimberlites in the Charo-Sinsk dike swarm territory based on the geochemical features of basites

Mikhail D. Tomshin, Alexander V. Tolstov, Anatolii I. Zhuravlev✉

*Diamond and Precious Metals Geology Institute,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation*
✉Ai.zhuravlevgeo@gmail.com

Abstract

The search for kimberlites in covered territories remains highly relevant today, as there are no longer any easily accessible kimberlite objects within the Yakut diamond-bearing province that are exposed at the surface and clearly visible in geophysical fields. Therefore, planning search operations for diamond-bearing kimberlites requires a novel, integrative approach that combines geological, mineralogical, structural, and other criteria. We found that in the dolerites of the Vilyui-Markhinsky belt—located near kimberlites in the Nakynskoye, Malo-Botuobinskoye, and Syuldyukarskoye kimberlite fields—the content of titanium oxide and several high field strength and rare earth elements (Th, Ta, Hf, Nd, Tb, Gd) is approximately twice as high compared to their typical content in dolerites of the kimberlite fields overall. We propose using this feature of the above-mentioned elements as one of the criteria for kimberlite searching. Considering the presence of dolerites with unusually high concentrations of titanium oxide and several high field strengths (Th, Hf, Ta, Zr, Y) and rare earth (Nd, Tb, Gd) elements within the Charo-Sinsk dike swarm, a comparative study of dolerites from dikes near these bodies was conducted. A gradual decrease in the concentration of these reference elements was observed with increasing distance from the dike exhibiting the maximum element content. We suggest considering such areas as promising targets for kimberlite discovery. Specifically, areas within the Charo-Lensky interfluvium and the right bank of the Lena River opposite the village of Sinsk are classified as prospective. The results obtained in this study and the identified target areas are recommended to geological and mining companies for conducting focused exploration of kimberlites in these specific local areas.

Keywords: Siberian platform, Vilyui paleorift, dike swarm, dolerites, kimberlites, kimberlite search

Funding. This study was conducted within the framework of the state assignment for the DPMGI SB RAS (project No. FUGG-2024-0007).

For citation: Tomshin M.D., Tolstov A.V., Zhuravlev A.I. Prospects for discovering kimberlites in the Charo-Sinsk dike swarm territory based on the geochemical features of basites. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(3):353–364. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-353-364>

Введение

Легко открываемых, тем более выходящих на дневную поверхность, кимберлитовых трубок на сегодня на территории Якутской алмазоносной провинции не осталось. В настоящее время внимание геологов обращено на так называемые закрытые территории, т. е. территории, где потенциально кимберлитовмещающие породы перекрыты более молодыми образованиями. На западе и в центральной части провинции – это области распространения площадных траппов пермо-триасового возраста, а на юге, в районе сочленения Алданской антеклизы и Вилуйской синеклизы – юрско-меловые отложения.

Ранее при изучении базитов Западной Якутии было установлено, что в долеритах Вилуйско-Мархинского дайкового пояса (ВМДП), рас-

полагающихся в контурах полей кимберлитов (Мало-Ботуобинского, Накынского и Сюльдюкарского), содержание оксида титана и ряда высокозарядных и редкоземельных элементов (Th, Ta, Hf, Y, Nd, Tb, Gd) по сравнению с типичным их содержанием в долеритах пояса увеличивается в среднем в два раза [1]. Аналогичные данные получены и по другим дайковым поясам Сибирской платформы, в частности, по Молодинскому дайковому поясу Оленекского палеорифта [2]. Предложено установленный факт использовать в качестве одного из поисковых критериев на кимберлиты, что дало основание выделить в пределах ВМДП два новых участка, перспективных на открытие кимберлитов [1, 2]. О перспективности территории Чаро-Синского дайкового пояса (ЧСДП) – южной части Якутской алмазоносной

провинции, на открытие алмазоносных месторождений говорилось неоднократно [3–6]. В 1960–1970 гг. в пределах ЧСДП геологами объединения «Якуталмаз» по рекам Намана, Джерба, Марха (Ленская) предпринимались попытки проведения локальных поисков кимберлитов традиционными методами, которые из-за неблагоприятной поисковой обстановки (район перекрыт чехлом мезо-кайнозойских осадочных отложений) не дали положительного результата. Учитывая опыт, полученный при изучении долеритов ВМДП, проведено сравнение геохимического состава базитовых даек ЧСДП, являющегося прототипом ВМДП [4]. В результате удалось выделить два участка, в пределах которых содержание оксида титана и ряда высокозарядных (HFSE – Th, Hf, Ta, Zr, Y) и редкоземельных (REE – Nd, Tb, Gd) элементов аналогично их повышенным содержаниям, отмеченным в долеритах даек, расположенных в пределах кимберлитовых полей ВМДП. Характеристике состава даек ЧСДП и выделению перспективных на кимберлиты участков посвящена данная работа.

Методы исследования

Проведено изучение и отбор образцов из дайковых тел долеритов, вскрывающихся в береговых обнажениях. Исследование пород в шлифах выполнено на поляризационном микроскопе Laborlux 12 Pol. Определение петрогенных элементов проводилось классическим методом «мокрой химии» в лаборатории физико-химических методов анализа ИГАБМ СО РАН (аналитики Кулагина Д.А. и Васильева А.С.). Содержание редких элементов – методом масс-спектрометрии с индукционно связанной плазмой (ICP-MS) в стандартном режиме на приборах Elan 6100 DRC (ИМГРЭ, аналитик Журавлев Д.З.) и Element II в ЦКП «Геодинамика и геохронология» (ИЗК СО РАН, аналитик Пантева С.В.).

Геологическая характеристика

Вилуйско-Мархинский и Чаро-Синский дайковые пояса (рис. 1) контролируются системой одноименных глубинных разломов, связанных со становлением в среднем палеозое Вилуйского палеорифта и приуроченных соответственно к северо-западному и южному его бортам [7, 9–11]. Чаро-Синский дайковый пояс вытянут в северо-восточном направлении на ~ 350 км при ширине пояса от 230 км на юге и до 175 км на севере.

Преобладающая форма интрузивов – дайки и лишь в южной части пояса появляются силлы, хотя по данным буровых работ силловая фация имеет более широкое распространение. Все дайки пояса имеют генеральное северо-восточное простирание. Вмещающими как для даек, так и для силлов являются карбонатные отложения кембрия. Согласно изотопной геохронологии по наибольшему количеству сближенных значений, становление интрузивов произошло в позднедевонское время – 364–360 млн лет [7, 9–12]. В отличие от даек ВМДП, возраст которых 371–373 млн лет, дайки ЧСДП более молодые, они были сформированы на этапе завершения магматических событий, сопровождавших формирование Вилуйского палеорифта [9]. Мощность даек колеблется от 5 до 200 м, а протяженность – в основном до 1 км, увеличиваясь в юго-восточной периферии пояса до десятка и даже до 200 км (Туолбинская дайка [8]).

Для магматитов ЧСДП в отличие от интрузивов ВМДП характерно наличие сложных многофазных даек типа «дайка в дайке» [8, 13]. Последние имеют следующую последовательность пород: габбро-долериты → кварцевые габбро-долериты → субщелочные габбро-долериты → кварцевые монзонит-порфиры → кварцевые сиенит-порфиры. Преобладают дайки, выполненные габбро-долеритами и кварцевыми габбро-долеритами. Единичны случаи, когда интрузив представлен лишь сиенит-порфирами (например – Олекминский шток) либо монзонит-порфирами, как, например, дайка в районе устья руч. Шаман (приток р. Олекма).

Обобщенная информация о составе пород Чаро-Синского дайкового пояса дана в табл. 1. От дифференциата к дифференциату снижаются основность и количество плагиоклаза, растет железистость и уменьшается доля клинопироксена. В направлении к сиенит-порфирам увеличивается доля позднемагматического кварца и калиевого полевого шпата. Для всех разновидностей пород, наряду с основными породообразующими минералами, характерны такие сквозные минералы, как кварц, апатит, биотит и роговая обманка, содержание которых увеличивается от долеритов к сиенит-порфирам. Изучение сложных даек в комплексе со всеми типами пород, встречающихся в интрузивах ЧСДП, и анализ последовательных изменений их вещественного состава позволили заключить, что все они возникли в ходе докамер-

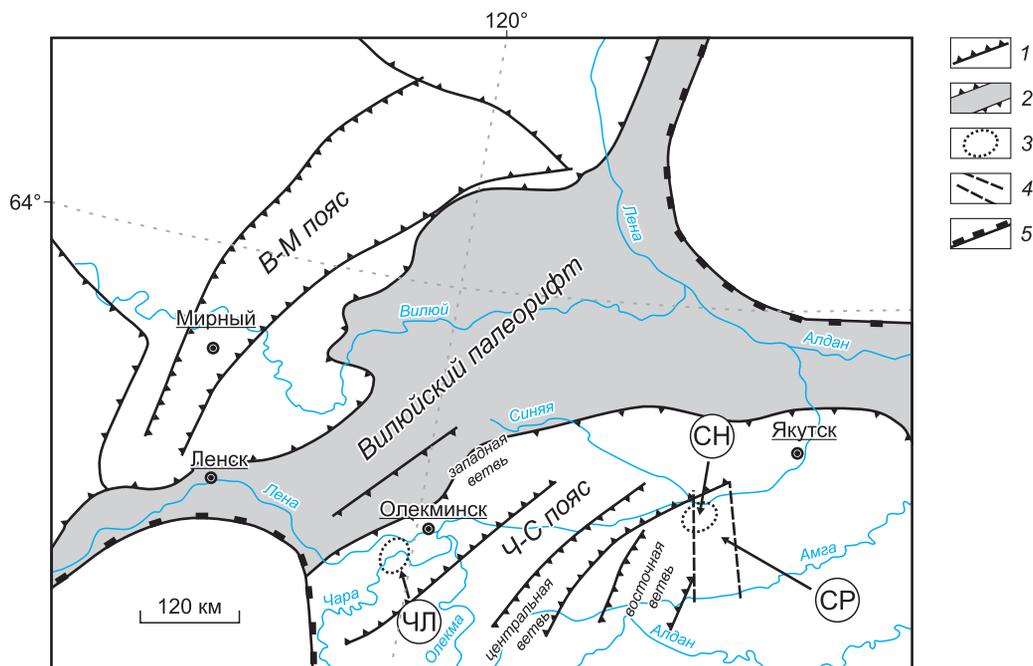


Рис. 1. Структурная схема Вилуйского палеорифта по [12] с изменениями. 1 – дайковые пояса (В-М – Вилуйско-Мархинский, Ч-С – Чаро-Синский и его ветви: западная, центральная, восточная), 2 – осевая часть Вилуйского палеорифта, 3 – предполагаемые поля кимберлитов (ЧЛ – Чаро-Ленское, СН – Синское), 4 – Синский рой даек (СР), 5 – границы складчатых областей

Fig. 1. Structural scheme of the Vilyui paleorift according to [12] with changes. 1 – dike swarms (B-M – Vilyui-Markhinsky, Ч-С – Charo-Sinsk and its branches: western, central, eastern), 2 – axial part of the Vilyui paleorift, 3 – presumed kimberlite fields (ЧЛ – Charo-Lensky, СН – Sinsk), 4 – Sinsk dike swarm (СР), 5 – boundaries of folded areas

ной дифференциации единой толеит-базальтовой магмы субщелочной специализации в ходе взаимодействия с трансмагматическим флюидом [13, 14]. Фракционирование расплава проходило последовательно в два этапа в двух промежуточных камерах, располагавшихся на глубинах 35–40 км от палеоповерхности (первая, ранняя) и на глубине 15–20 км (вторая) [14]. Именно фракционирование магмы в этих очагах привело к скачкообразному (дискретному) повышению значений кремнекислотности и щелочности магматитов при переходе от типичных габброидов к кварцевым монцитит-порфирам и сиенит-порфирам (табл. 2, рис. 2).

Поведение титана в долеритах и габбро-долеритах

Установлено, что среди даек долеритов ЧСДП находятся тела с геохимически аномальным содержанием оксида титана. Типичное его количество в долеритах пояса 2,5–2,8 мас.% с незначительным увеличением в щелочных разностях долеритов и в базитах, расплав которых эволюционировал в докамерной обстановке. В щелочно-

кремнекислых дифференциатах идет закономерное его уменьшение (см. табл. 2). В аномальных же участках доля оксида титана в долеритах может превышать 4 мас.%. Одновременно с увеличением в долеритах содержания титана в них идет увеличение содержания ряда высокозарядных (HFSE) и редкоземельных (REE) элементов (рис. 3, табл. 3). Один из таких участков находится в Чаро-Ленском междуречье, а второй на правом берегу р. Лена против устья р. Синяя (см. рис. 1).

Чаро-Ленский район. В левом борту р. Чара в 10 км ниже по течению от устья ее левого притока, р. Молбо, располагается Хайыргасская дайка (М-57) кварцевых габбро-долеритов (рис. 4). Дайка имеет северо-восточное простирание, мощность тела около 50 м, а протяженность до 7 км. По простиранию дайки через 15 км на правом берегу р. Лена вскрывается еще один ее выход (М-110). Далее в северо-восточном направлении уже в левом борту р. Лена она трассируется в виде кулисообразно расположенных тел, (обнажение М-70) еще на протяжении 30 км, вплоть до р. Намана.

Состав породообразующих минералов пород Чаро-Синского дайкового пояса [15]

Table 1

Composition of rock-forming minerals in rocks of Charo-Sinsk dike swarm [15]

| Порода | Плагиоклаз An | Пироксен | | | Оливин | Поздне- и постмагматические минералы |
|----------------------------|---------------|----------|-------|-------|---------------|--|
| | | Wo | En | Fs | Fa | |
| Долерит, габбро-долерит | 80-76 70-34 | 37-38 | 45-46 | 16-17 | 20-25 | Ti-Mt(до 6%), Ttn, Qz, Ap, Hbl, Bt |
| Кварцевый габбро-долерит | 75-68 67-50 | 30-38 | 43-52 | 17-22 | 21-24, 54 | Ti-Mt(до 7%), Ttn, Qz (до 3%), Fsp (до 2%), Ap, Hbl, Bt |
| Субщелочной габбро-долерит | 65-58 56-27 | 37-41 | 35-62 | 6-29 | Псевдоморфозы | Ti-Mt(до 6%), Ttn, Qz (до 6%), Fsp (до 9%), Ab (3%), Ap, Hbl, Bt |
| Кварцевый монзонит порфир | 53-42 41-32 | 39-40 | 30-34 | 25-31 | Отсутствует | Ti-Mt(до 5%), Ttn, Qz (10%), Fsp (15%), Ab, Ap, Hbl, Bt |
| Кварцевый сиенит порфир | 40-30 57-10 | 35 | 35-40 | 25-30 | Отсутствует | Ti-Mt(1%), Qz (10%), Fsp (50%), Ab (10%), Ap, Hbl, Bt |

Примечание. Составы породообразующих минералов приведены в мол. %. Ti-Mt – титаномagnetит, Ttn – титанит, Qz – кварц, Ap – апатит, Hbl – роговая обманка, Bt – биотит, Fsp – калиевый полевоы шпат, Ab – альбит.

Note. The compositions of rock-forming minerals are given in mol.%. Ti-Mt – titanomagnetite, Ttn – titanite, Qz – quartz, Ap – apatite, Hbl – hornblende, Bt – biotite, Fsp – potassium feldspar, Ab – albite.

В юго-западном направлении от обнажения М-57 эпизодические выходы дайки фиксируются на протяжении 20 км. Содержание оксида титана в Хайыргасской дайке в обнажении на

р. Чара – 4,2 мас.%, а в наиболее удаленных от нее участках доля титана 2,5–2,7 мас.% (табл. 4, рис. 4). В долеритах даек (М-33, М-70), расположенных в береговых отложениях, р. Лена (~20 км

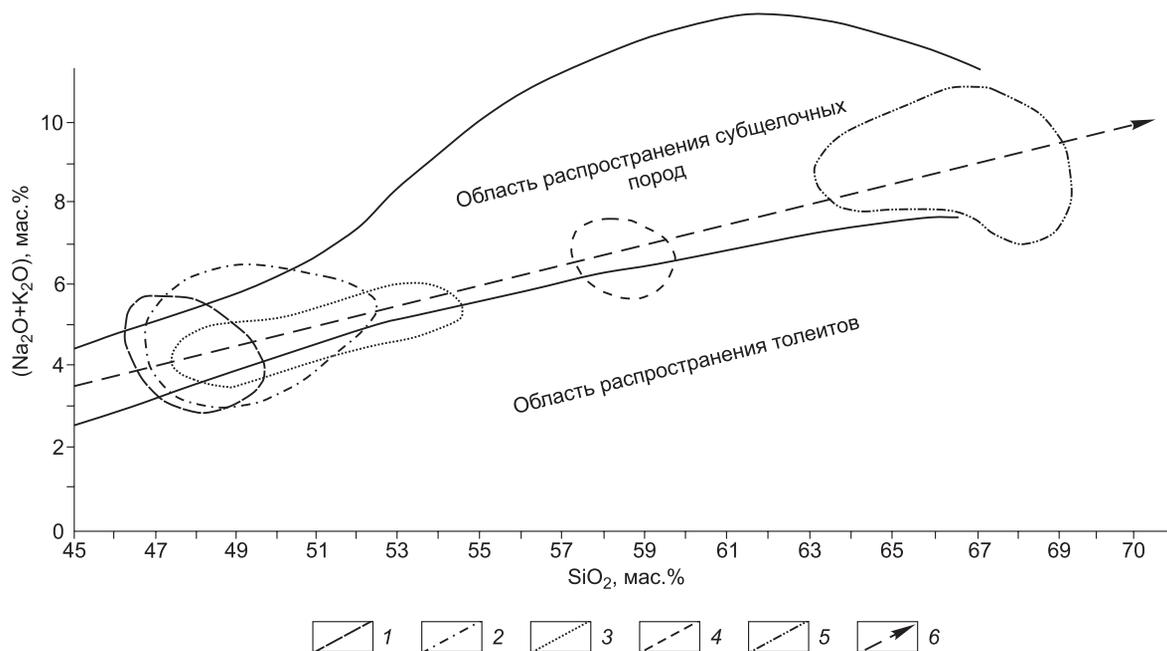


Рис. 2. Поля распространения частных анализов пород Чаро-Синского дайкового пояса на диаграмме кремнезем–щелочность по [16] и по [14] с изменениями. 1 – габбро-долериты, 2 – кварцевые габбро-долериты, 3 – субщелочные габбро-долериты, 4 – кварцевые монзонит-порфиры, 5 – кварцевые сиенитпорфиры, 6 – тренд дифференциации пород

Fig. 2. Distribution fields of individual analyses of rocks from Charo-Sinsk dike swarm on an alkali-silica diagram according to [16] and according to [14] with changes. 1 – gabbro-dolerites, 2 – quartz gabbro-dolerites, 3 – subalkaline gabbro-dolerites, 4 – quartz monzonite porphyry, 5 – quartz syenite porphyry, 6 – rock differentiation trend

Таблица 2

Средний химический состав пород различных групп интрузивов Чаро-Синской магмоподводящей зоны, вес. %, [14]

Table 2

Average chemical composition of rocks of various groups of intrusions in the Charo-Sinsk magma-feeder zone, wt. %, [14]

| Компонент | Габброиды | | | Монцитонитоиды | | Среднее |
|------------------------------------|--|----------------------------------|--|--|-------------------------------------|---------|
| | Интрузивы долеритов и габбро-долеритов | Дайки кварцевых габбро-долеритов | Дайки субщелочных кварцевых габбро-долеритов | Фазы монцитонит-порфиров многократных даек | Интрузивы кварцевых сиенит-порфиров | |
| SiO ₂ | 48,05 | 49,20 | 50,44 | 58,59 | 66,28 | 52,00 |
| TiO ₂ | 3,20 | 3,09 | 3,15 | 2,09 | 1,01 | 2,75 |
| Al ₂ O ₃ | 14,38 | 14,52 | 12,78 | 13,39 | 13,87 | 13,55 |
| Fe ₂ O ₃ | 5,13 | 5,02 | 7,27 | 5,43 | 2,31 | 5,55 |
| FeO | 8,04 | 8,84 | 7,70 | 5,46 | 2,46 | 7,58 |
| MnO | 0,16 | 0,18 | 0,22 | 0,18 | 0,05 | 0,18 |
| MgO | 5,68 | 4,38 | 4,42 | 2,43 | 1,50 | 4,03 |
| CaO | 9,18 | 8,94 | 7,11 | 4,53 | 1,99 | 7,27 |
| Na ₂ O | 2,96 | 2,74 | 3,41 | 2,97 | 3,84 | 3,03 |
| K ₂ O | 1,02 | 1,76 | 1,12 | 3,66 | 5,02 | 1,96 |
| P ₂ O ₅ | 0,36 | 0,46 | 0,54 | 0,42 | 0,31 | 0,43 |
| П.п.п | 1,91 | 0,88 | 1,85 | 0,96 | 1,22 | 1,55 |
| Сумма | 100,07 | 100,01 | 100,01 | 100,11 | 99,86 | 99,94 |
| f | 68,0 | 76,0 | 77,2 | 81,8 | 76,1 | – |
| Na ₂ O/K ₂ O | 2,9 | 1,6 | 3,0 | 0,8 | 0,08 | 1,54 |
| n | 34 | 45 | 27 | 24 | 33 | 102 |

Таблица 3

Содержание микроэлементов (г/т) в представительных частных анализах долеритов [10]

Table 3

Trace element content (ppm) in representative partial analyses of dolerites [10]

| | Y | Zr | Nb | La | Nd | Sm | Eu | Gd | Tb | Er | Yb | Hf | Ta | Th |
|---|-------|--------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|------|------|-------|------|------|
| 1 | 57,55 | 451,07 | 51,59 | 56,67 | 65,0 | 14,48 | 3,51 | 13,20 | 1,99 | 5,43 | 4,59 | 11,14 | 4,14 | 6,21 |
| 2 | 31,42 | 148,95 | 10,19 | 10,63 | 17,63 | 4,80 | 4,58 | 5,57 | 0,92 | 3,13 | 2,69 | 4,12 | 1,10 | 1,18 |

Примечание. 1 – высокотитанистый габбро-долерит, обр. М-19/13-3г, Синская дайка; 2 – кварцевый габбро-долерит, обр. М-20/13-4, Титаринская дайка.

Note. 1 – gabbro-dolerite with high TiO₂ content, samp. М-19/13-3g, Sinsk dike; 2 – quartz gabbro-dolerite, samp. М-20/13-4, Titarinskaya dike.

от обн. М-57) его содержание 3,5–3,8 мас.%. Особенность долеритов Хайыргасской дайки – повышенное содержание протокристаллов плагиоклаза.

Таким образом, в районе обнажения М-57 находится участок распространения даек с аномальной геохимией, аналогичный таковым ВМДП. Поэтому территорию междуречья Чары и Лены вдоль глубинного разлома, контролирующего

Хайыргасскую дайку и прежде всего район вокруг самой дайки, следует считать перспективной на нахождение здесь кимберлитов. Более того, при проведении в 2019 г. компанией АГД «Даймондс» (г. Архангельск) ревизионных геолого-поисковых работ, предпринятых на основании геохимических данных по долеритам даек обн. М-33 и М-110 (см. рис. 4), в одной из крупнообъемных проб, взятых в приустьевой части

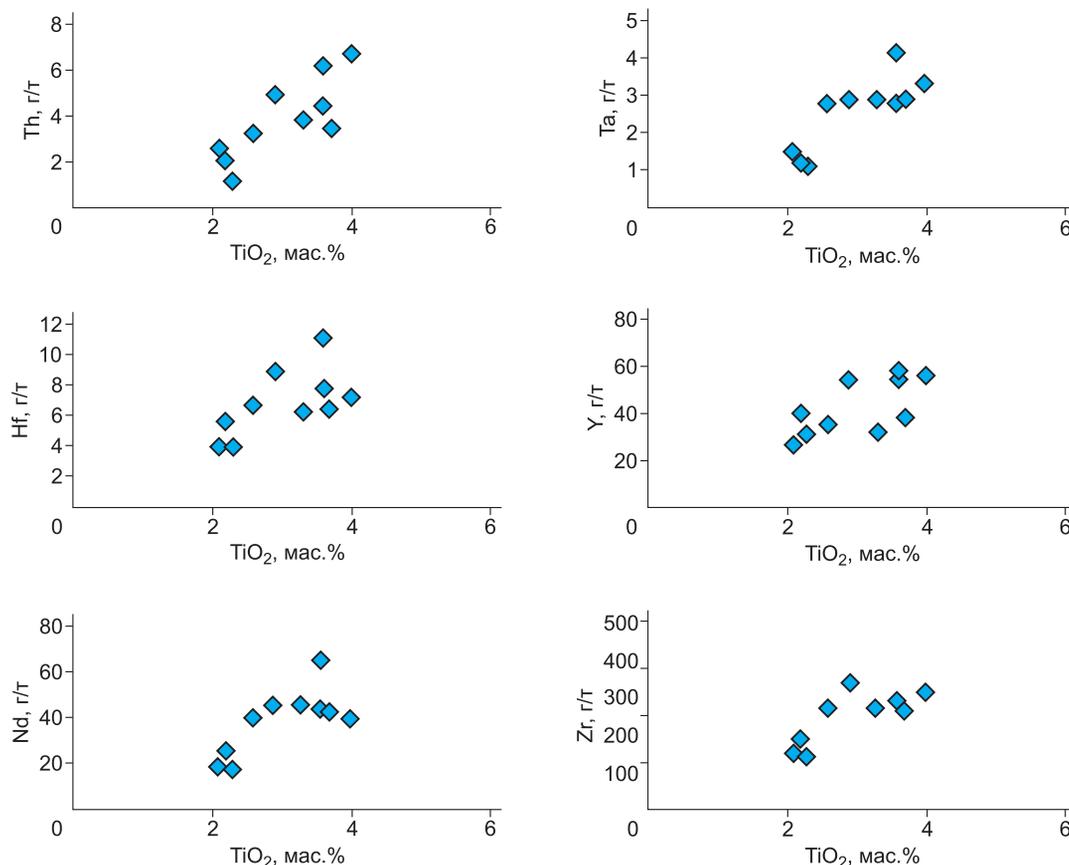


Рис. 3. Отношение ряда редкоземельных (REE) и высокозарядных (HFSE) элементов к оксиду титана в долеритах даек Чаро-Ленской и Синской площадей

Fig. 3. The ratio of some rare earth (REE) and high field strength elements (HFSE) to titanium oxide in dolerite dikes of Chara-Lensk and Sinsk areas

р. Бирюк (район расположения дайки М-33), было поднято несколько мелких кристаллов алмаза (устное сообщение И.Л. Махоткина).

Синский район. Еще одна группа даек долеритов с повышенной (более 4 %) долей оксида титана (см. табл. 3) находится на правом берегу р. Лена, напротив п. Синск (рис. 5). В скальных обнажениях реки, выполненных карбонатными отложениями кембрия, вскрываются две дайки – основная (мощностью 63 м) и сопутствующая (мощностью 2 м). Обе дайки имеют вертикальное падение и входят в Синский рой даек, имеющих близкое к меридиональному простиранию. Дайки ЧСДП, северо-восточного направления, как бы упираются в них, но не пересекают (см. рис. 1). Выполнены они средне-, крупнозернистыми габбро-долеритами, переходящими в сторону контактов в тонко-мелкозернистые разновидности. Минеральный и химический состав, структура пород даек соответствуют кварцевым габбро-

долеритам ЧСДП, усредненные данные по которым приведены в табл. 1 и 2.

Содержание оксида титана (см. табл. 4) в долеритах Синской дайки (М-19) выше средних значений для пород пояса на 1,5–2 % и колеблется от 3,7 до 4,8 мас.%, увеличиваясь в краевых частях тел. В дайке (М-18), расположенной на противоположном берегу р. Лена, примерно в 5 км от Синской дайки и являющейся ее продолжением, содержание оксида титана составляет 3,1 мас.%, а в дайках ближнего окружения в 8–20 км от Синской дайки М-14 и М-20 – 2,3 вес. %. Таким образом, в правобережной части р. Лена против п. Синск фиксируется еще один геохимически аномальный участок даек долеритов ЧСДП.

Обсуждение

Процесс кимберлитобразования был продолжительным [17], связанным с длительностью про-

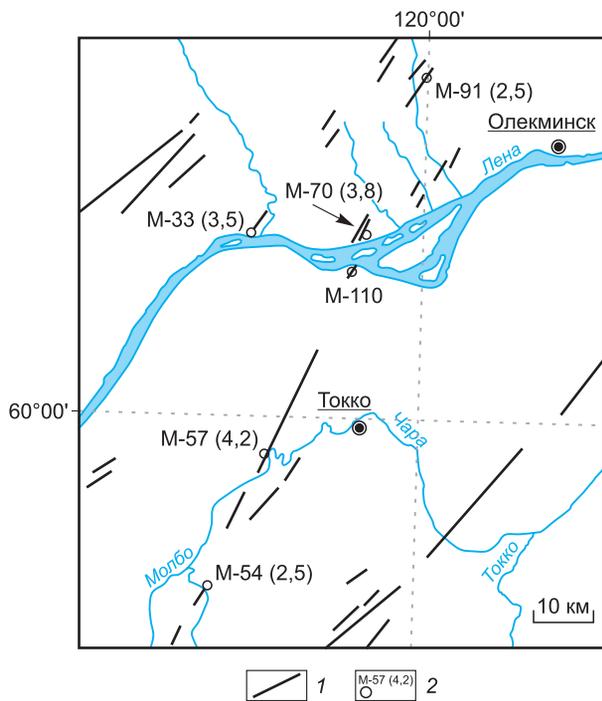


Рис. 4. Карта-схема Чаро-Ленской площади. 1 – дайки долеритов, 2 – места отбора проб с указанием номеров образований (в скобках содержание TiO_2 в долеритах, мас.%)

Fig. 4. Map-scheme of Charo-Lena area. 1 – dolerite dikes, 2 – sampling sites with numbers of outcrops (in brackets is indicated TiO_2 content in dolerites, wt. %)

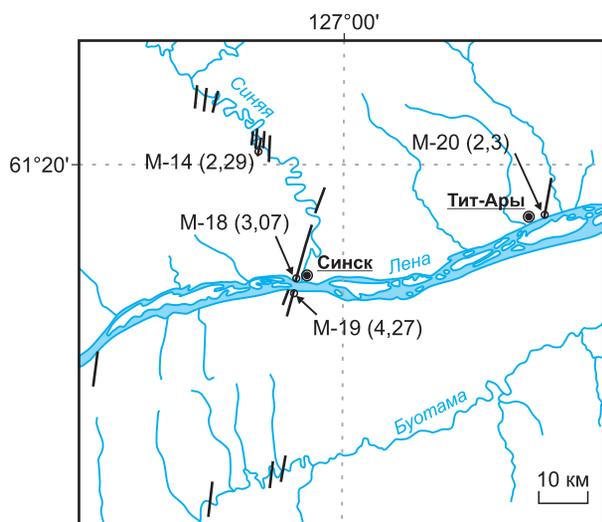


Рис. 5. Карта-схема Синской площади. Условные обозначения см. рис. 4

Fig. 5. Map-scheme of Sinsk area. For legend, see fig. 4

процесса карбонатитового метасоматоза деплетированных перидотитов основания литосферы [18, 19]. На момент образования базальтовой линзы, связанной с формированием Вилюйского палео-

рифта, вторично обогащенные перидотиты основания литосферы уже существовали [2]. Процесс взаимодействия протокимберлитового вещества и базитового расплава подробно рассмотрен в работе [2], здесь подчеркнем основные моменты. Всплывающий диапир протокимберлитового вещества был диаметром не более 1 км [20] и имел сублитосферную температуру ($>1400\text{ }^\circ\text{C}$) [18, 21]. Последнее обусловило вовлечение в процесс плавления более тугоплавкого компонента, в том числе содержащего титан и высокозарядные и редкоземельные элементы [2].

Восходящий поток этого вещества взаимодействовал с толеитами базальтовой линзы и, локально, изменял состав базальтов. Выравнивание геохимического состава между высокотитанистым и остальным расплавом базитов было незначительным. В дальнейшем, внедряясь в верхние горизонты земной коры, оба расплава формировали дайки как обычных базитов, так и, локально, высокотитанистых долеритов.

На примере изученных даек долеритов, располагающихся в контурах кимберлитовых полей ВМДП, установлено, что увеличение количества реперных (TiO_2 и HFSE, REE) элементов начинает фиксироваться на расстоянии в 10–12 км от кимберлитового тела, достигая максимально отличных от типичных значений величин непосредственно вблизи кимберлитовых тел. Тем самым использование данного метода существенно сокращает время на поиски перспективных площадей и опойсковываемые территории. Так, например, предлагаемые в работе перспективные площади (Чаро-Ленская и Синская) находятся за пределами выделенных в работе [5] перспективных на обнаружение алмазосных кимберлитовых площадей, более того – Синский участок располагается между Алдано-Мальканской и Тамма-Кенкеменской площадями. Тем самым предложенный в настоящей работе метод позволит локализовать поиски.

Локальное появление среди пород ЧСДП даек долеритов, содержащих повышенные концентрации оксида титана, ряда редкоземельных и высокозарядных элементов, согласно [2] следует связывать с процессами кимберлитобразования. На этом основании при постановке поисковых работ на алмазосные кимберлиты на новых территориях рекомендуется не только использовать

Средний химический состав долеритов с высоким содержанием TiO₂, мас. %

Table 4

Average chemical composition of dolerites with increased TiO₂, wt. %

| Элемент обнажения | Чаро-Ленская площадь | | | | | Синская площадь | | | | | Среднее ЧСДП |
|--------------------------------|----------------------|-------|-----------|-------|-------|-----------------|-----------|-------|--------|-------|-----------------|
| | Номер обнажения | | | | | | | | | | |
| | M-57 | M-70 | M-33/13-2 | M-54 | M-91 | M-19 | M-18/13-2 | M-14 | M-20 | | |
| SiO ₂ | 48,30 | 47,32 | 46,32 | 47,91 | 50,29 | 47,98 | 50,31 | 49,78 | 48,20 | 52,10 | |
| TiO ₂ | 4,17 | 3,81 | 3,55 | 2,5 | 2,49 | 4,27 | 3,07 | 2,29 | 2,30 | 2,75 | |
| Al ₂ O ₃ | 12,54 | 13,80 | 13,83 | 14,64 | 13,90 | 13,18 | 13,54 | 15,41 | 15,10 | 13,55 | |
| Fe ₂ O ₃ | 4,34 | 4,83 | 4,23 | 3,06 | 2,87 | 5,11 | 2,75 | 3,78 | 3,74 | 5,55 | |
| FeO | 11,35 | 9,03 | 9,99 | 9,79 | 9,62 | 9,03 | 8,07 | 8,80 | 8,86 | 7,58 | |
| MnO | 0,20 | 0,17 | 0,13 | 0,18 | 0,18 | 0,15 | 0,11 | 0,16 | 0,18 | 0,18 | |
| MgO | 4,91 | 5,98 | 0,18 | 5,99 | 5,47 | 4,95 | 4,36 | 5,65 | 5,83 | 4,03 | |
| CaO | 7,96 | 7,69 | 9,16 | 10,46 | 9,67 | 8,70 | 10,32 | 10,19 | 10,46 | 7,23 | |
| Na ₂ O | 2,73 | 2,57 | 3,14 | 2,20 | 2,68 | 2,36 | 2,86 | 2,55 | 2,41 | 3,03 | |
| K ₂ O | 1,35 | 2,12 | 1,28 | 0,76 | 0,94 | 2,34 | 1,81 | 0,67 | 0,40 | 1,96 | |
| P ₂ O ₅ | 0,49 | 0,43 | 0,39 | 0,26 | 0,27 | 0,49 | 0,81 | 0,25 | 0,22 | 0,43 | |
| П.п.п | 1,60 | 2,18 | 2,30 | 2,12 | 1,59 | 1,08 | 0,91 | 0,36 | 2,43 | 1,55 | |
| Сумма | 99,94 | 99,91 | 100,49 | 99,87 | 99,97 | 99,62 | 99,34 | 99,89 | 100,13 | 99,94 | |
| n | 5 | 8 | 1 | 4 | 3 | 4 | 1 | 6 | 3 | 102 | |

Примечание. Номера обнажений соответствуют номерам на рис. 4, 5; n – количество проб.

Note. Outcrop numbers correspond to numbers in fig. 4, 5; n – number of samples.

основные (геологические и минералого-геохимические) признаки структур, контролирующих алмазоносные кимберлиты [22], но и учитывать новые нетрадиционные методы. Тем более, что основная часть территории Чаро-Синской кимберлитоперспективной зоны перекрыта мезозойскими морскими отложениями. По опыту работ последних лет в Западной Якутии, это требует новых подходов к геохимическим поискам кимберлитов на перекрытых территориях [23].

Подобный подход, с учетом локальных особенностей, необходимо масштабировать при апробации на новых перспективных площадях Чаро-Синской минерагенической зоны [6]. Однако при этом необходимо особо отметить, что обязательно следует учитывать наработанные многочисленными рекомендациями предшественников [3, 5, 6, 12; и др.].

Заключение

1. Установлено, что в пределах Чаро-Синского дайкового пояса находятся два участка с аномаль-

ным содержанием в долеритах оксида титана, ряда редкоземельных и высокозарядных элементов.

2. По аналогии с долеритами Вилуйско-Мархинского дайкового пояса, где появление долеритов с высоким содержанием титана, ряда высокозарядных и редкоземельных элементов приурочено к кимберлитам, подобная тенденция предполагается и для долеритов ЧСДП. На основании этого подобные участки следует считать перспективными на выявление кимберлитов.

3. Слабая изученность долеритов ЧСДП (в основном это долины крупных водотоков) не исключает возможность обнаружения и других перспективных участков.

Список литературы / References

1. Томшин М.Д., Гоголева С.С. Высокотитанистые долериты как новый критерий поисков кимберлитов. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;24(4):499–513. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-499-513>
Tomshin M.D., Gogoleva S.S. High-titanium dolerites as a new criterion for search of kimberlites. *Arctic and Subarctic*

- Natural Resources*. 2022;24(4):499–513. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-499-513>
2. Томшин М.Д., Похиленко Н.П., Гоголева С.С., Земнухов А.Л. Локализация высокотитанистых долеритов на территории кимберлитовых полей: возможные причины и новый критерий поиска. *Геология и геофизика*. 2024; 65(9): 1234–1245. <https://doi.org/10.15372/GIG2024105>
- Tomshin M.D., Pokhilenko N.P., Gogoleva S.S., Zemnuhov A.L. Localization of high-titanium dolerites in kimberlite fields: possible causes and a new criterion for kimberlite search. *Russian Geology and Geophysics*. 2024;65(9):1234–1245. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/GIG2024105>
3. Никулин В.И., Лелюх М.И., Фон-дер-Флаасс Г.С. *Алмазопрогностика*. Иркутск: НПФ «Алмаз-Прогноз»; 2002. 320 с.
- Nikulin V.I., Lelykh M.I., Fon-Der-Flaass G.S. *Алмазопрогностика*. Irkutsk: NPF “Алмаз-Прогноз”; 2002. 320 p. (In Russ.)
4. Избеков Э.Д., Подъячев Б.П., Афанасьев В.П. Признаки симметричной алмазности восточной части Сибирской платформы (относительно оси Вилюйской синеклизы). *Докл. РАН*. 2006;411(3):352–353.
- Izbekov E.D., Pod'yachev B.P., Afanas'ev V.P. Signs of symmetric diamond concentration in the eastern Siberian platform (relative to the Vilyui synecise axis). *Doklady Earth Sciences*. 2006;411(9):1339–1340.
5. Смелов А.П., Прокопьев А.В., Олейников О.Б. и др. Перспективы алмазности Алданской антеклизы. *Отечественная геология*. 2012;(5):3–10.
- Smelov A.P., Prokopiev A.V., Oleynikov O.B., et al. Prospects for diamond bearing capacity of the Aldan antecline. *Otechestvennaya geologia [Domestic Geology]*. 2012;(5):3–10. (In Russ.)
6. Толстов А.В., Максимкина Л.В., Колесник А.Ю. и др. Перспективы алмазности Чаро-Синской зоны разломов. *Руды и металлы*. 2021;(3):46–58. <https://doi.org/10.47765/0869-5997-2021-10017>
- Tolstov A.V., Maksimkina L.V., Kolesnik A.Yu., et al. Prospects for diamond potential of the Charo-Sinskaya fault zone. *Ores and Metals*. 2021;(3):46–58. (In Russ.) <https://doi.org/10.47765/0869-5997-2021-10017>
7. Гайдук В.В. *Вилюйская среднепалеозойская рифтовая система*. Якутск: ЯФ СО АН СССР; 1988. 128 с.
- Gaiduk V.V. *Vilyui Middle Palaeozoic rift system*. Yakutsk: YaF SB AS USSR; 1988. 128 p. (In Russ.)
8. Масайтис В.Л., Михайлов М.В., Селивановский Т.В. *Вулканизм и тектоника Патомско-Вилюйского среднепалеозойского авлакогена*. М.: Недра; 1975. 181 с.
- Masaitis V.L., Mikhailov M.V., Selivanovskii T.V. *Volcanism and tectonics of the Patom-Vilyui Middle Paleozoic aulacogen*. Moscow: Nedra; 1975. 181 p. (In Russ.)
9. Томшин М.Д., Копылова А.Г., Константинов К.М., Гоголева С.С. Базиты Вилюйского палеорифта. Геохимия и последовательность становления. *Геология и геофизика*. 2018;59(10):1503–1518. <https://doi.org/10.15372/GiG20181002>
- Tomshin M.D., Kopylova A.G., Konstantinov K.M., Gogoleva S.S. Basites of the Vilyui paleorift: geochemistry and sequence of intrusive events. *Russian geology and geophysics*. 2018;59(10):1204–1216. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2018.09.002>
10. Киселев А.И., Константинов К.М., Ярмолюк В.В., Иванов А.В. Чаро-Синский дайковый рой в структуре среднепалеозойской Вилюйской рифтовой системы (Сибирский кратон). *Докл. РАН*. 2016; 471(2):209–213. <https://doi.org/10.7868/S0869565216320220>
- Kiselev A.I., Konstantinov K.M., Yarmolyk V.V., Ivanov A.V. The Chara-Sina dyke swarm in the structure of the middle paleozoic Vilyui rift system (Siberian craton). *Doklady Earth Sciences*. 2016;471(1):1179–1182. <https://doi.org/10.1134/S1028334X16110167>
11. Гузев В.Е. Козлов Г.А., Терехов А.В. и др. Чаро-Синский дайковый пояс (среднее течение р. Лена): локальный U-Pb возраст циркона и петролого-геохимические особенности. *Региональная геология и металлогения*. 2021;(87): 28–41. https://doi.org/10.52349/0869-7892_2021_87_28-41
- Guzev V.E., Kozlov G.A., Terekhov A.V., et al. Chara-Sinsk dike swarm (middle reach of the Lena River): local U-Pb age of zircon and petrological and geochemical features of rocks. *Regional Geology and Metallogeny*. 2021;(87):28–41. (In Russ.) https://doi.org/10.52349/0869-7892_2021_87_28-41
12. Проценко Е.В., Толстов А.В., Горев Н.И. Критерии поисков кимберлитов и новые перспективы коренной алмазности Якутии. *Руды и металлы*. 2018;(4):14–23. <https://doi.org/10.24411/08695997201810009>
- Protsenko E.V., Tolstov A.V., Gorev N.I. Kimberlite prospecting criteria and new prospects for Yakutia primary diamond potential. *Ores and metals (Rudy i Metally)*. 2018;(4):14–23. (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/08695997201810009>
13. Томшин М.Д., Олейников Б.В., Королева О.В. Монзонитоидная тенденция глубинной эволюции толеит-базальтовой серии расплавов на Сибирской платформе. В кн.: Ковальский В.В., Кочетков А.Я., Лазебник К.А. (ред.) *Петролого-геохимические черты глубинной эволюции вещества кимберлитовой и базитовой магматических систем*. Якутск: ЯФ СО АН СССР; 1985. С. 164–188.
- Tomshin M.D., Oleynikov B.V., Koroleva O.V. Monzonitoid trend in the deep evolution of the toleite-basalt series of melts on the Siberian Platform. In: Kovalsky V.V., Kochetkov A.Ya., Lazebnik K.A. (eds.) *Petrological and geochemical features of the deep evolution of kimberlite and basalt magmatic systems*. Yakutsk: YaF SO AN SSSR; 1985, pp. 164–188. (In Russ.)
14. Олейников Б.В., Томшин М.Д., Королева О.В. и др. Глубинная эволюция субщелочной толеит-базальтовой магмы в режиме палеорифтогенеза (на примере Чаро-Синской зоны). Якутск: ЯФ СО АН СССР; 1984. 32 с.
- Oleynikov B.V., Tomshin M.D., Koroleva O.V., et al. Deep evolution of subalkaline tholeiitic-basaltic magma in the paleoriftogenesis regime (on example of the Charo-Sinsk zone). Yakutsk: YaF SB AS USSR; 1984. 32 p. (In Russ.)
15. Томшин М.Д., Королева О.В. Composite dykes of the Vilyuisk paleorift system, Siberian Platform, Yakutia, USSR. In: Parker A.J., Rickwood P.C., Tucker D.H. (eds.) *Mafic dykes and emplacement mechanisms: proceedings of the second international dyke conference, Adelaide. 12-16 September 1990*. Rotterdam: Balkema; 1990, pp. 535–540.
16. Богатиков О.А., Гоньшакова В.И., Михайлов Н.П. *Классификация и номенклатура магматических горных пород*. М.: Недра; 1981. 160 с.
- Bogatikov O.A., Gon'shakova V.I., Mikhailov N.P. *Classification and nomenclature of igneous rocks*. Moscow: Nedra; 1981. 160 p. (In Russ.)

17. Зайцев А.И., Смелов А.П. *Изотопная геохронология пород кимберлитовой формации Якутской провинции*. Якутск: ООО РИЦ «Офсет»; 2010. 108 с.

Zaitsev A.I., Smelov A.P. *Isotope geochronology of rocks of kimberlite formation of Yakutsk province*. Yakutsk: LLC "Offset"; 2010. 108 p. (In Russ)

18. Pokhilenko N.P., Sobolev N.V., Kuligin S.S., Shimizu N. Peculiarities of distribution of pyroxenite paragenesis garnets in Yakutian kimberlites and some aspects of the evolution of the Siberian craton lithospheric mantle. In: *Proceedings of 7th Int. Kimberlite Conference, Cape Town, South Africa, April, 1998*. Cape Town: Red Roof Design; 1999, pp. 689–698. <https://doi.org/10.29173/ikc2852>

19. Агашев А.М., Похиленко Н.П., Черепанова Ю.В., Головин А.В. Геохимическая эволюция пород основания литосферной мантии по результатам изучения ксенолитов деформированных перидотитов из кимберлитовой трубки Удачная. *Докл. РАН*. 2010;432(4):510–513.

Agashev A.M., Pokhilenko N.P., Cherepanova Yu.V., Golovin A.V. Geochemical evolution of rocks at the base of the lithospheric mantle: evidence from study of xenoliths of deformed peridotites from kimberlite of the Udachnaya pipe. *Doklady Earth Sciences*. 2010;432(4):746–749. <https://doi.org/10.1134/s1028334x10060073>

20. Похиленко Н.П., Агашев А.М., Литасов К.Д., Похиленко Л.Н. Взаимоотношения карбонатитового метасоматоза деплетированных перидотитов литосферной мантии

с алмазообразованием и карбонатит-кимберлитовым магматизмом. *Геология и геофизика*. 2015;56(1-2):361–383.

Pokhilenko N.P., Agashev A.M., Litasov K.D., Pokhilenko L.N. Carbonatite metasomatism of peridotite lithospheric mantle: implications for diamond formation and carbonatite-kimberlite magmatism. *Russian Geology and Geophysics*. 2015;56(1-2):280–295. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.01.020>

21. Ashchepkov I.V., Vladykin N.N., Ntaffos T., et al. Layering of the Lithospheric mantle beneath the Siberian craton: modeling using thermobarometry of mantle xenolith and xenocrysts. *Tectonophysics*. 2014;634:55–75. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.07.017>

22. Симоненко В.И., Толстов А.В., Васильева В.И. Новый подход к геохимическим поискам кимберлитов на закрытых территориях. *Разведка и охрана недр*. 2008;(4-5):108–112.

Simonenko V.I., Tolstov A.V., Vasilieva V.I. New approach to geochemical search for kimberlite at the overburden areas. *Exploration and protection of mineral resources*. 2008;(4-5):108–112. (In Russ.)

23. Игнатов П.А., Бушков К.Ю., Штейн Я.И. и др. Геологические и минералого-геохимические признаки структур, контролирующих алмазоносные кимберлиты Накынского поля Якутии. *Руды и металлы*. 2006;(4):59–67.

Ignatov P.A., Bushkov K. Yu., Shtein Ya.I., et al. Geological and mineralogical-geochemical characteristics of structures controlling diamond-bearing kimberlites in the Nakyin field of Yakutia. *Ores and Metals*. 2006;(4):59–67. (In Russ.)

Об авторах

ТОМШИН Михаил Дмитриевич, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-5865-7521>, ResearcherID: AAO-2284-2020, Scopus Author ID: 8983453800, SPIN: 4097-4251, e-mail: tmd@diamond.ysn.ru

ТОЛСТОВ Александр Васильевич, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-3863-5071>, ResearcherID: O-2643-2013, Scopus Author ID: 6603548567, SPIN: 7895-6601, e-mail: tols61@mail.ru

ЖУРАВЛЕВ Анатолий Иванович, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-0115-5146>, ResearcherID: AAC-6095-2019, Scopus Author ID: 57200217371, SPIN: 1793-5956, e-mail: ai.zhuravlevgeo@gmail.com

Вклад авторов

Томшин М.Д. – разработка концепции, методология, верификация и анализ литературных и архивных данных по лабораторно-аналитическим исследованиям, проведение исследования, администрирование данных, создание черновика рукописи, редактирование рукописи, визуализация, руководство исследованием по геохимии базитов, администрирование проекта; **Толстов А.В.** – разработка концепции, методология, верификация и анализ литературных и архивных данных по геолого-минералогическим исследованиям, проведение исследования, работа и редактирование черновика рукописи, визуализация и руководство исследованием по геологии, минералогии и петрографии; **Журавлев А.И.** – визуализация, верификация данных, редактирование рукописи, анализ литературных данных

Конфликт интересов

Один из авторов – доктор геолого-минералогических наук Толстов Александр Васильевич является членом редколлегии журнала «Природные ресурсы Арктики и Субарктики». Авторам неизвестно о каком-либо другом потенциальном конфликте интересов, связанном с этой рукописью.

About the authors

TOMSHIN, Mikhail Dmitrievich, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-5865-7521>, ResearcherID: AAO-2284-2020, Scopus Author ID: 8983453800, SPIN: 4097-4251 e-mail: tmd@diamond.ysn.ru

TOLSTOV, Alexander Vasilevich, Dr. Sci (Geol. and Mineral.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-3863-5071>, ResearcherID: O-2643-2013, Scopus Author ID: 6603548567, SPIN:7895-6601, e-mail: tols61@mail.ru

ZHURAVLEV, Anatolii Ivanovich, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-0115-5146>, ResearcherID: AAC-6095-2019, Scopus Author ID: 57200217371, SPIN: 1793-5956, e-mail: ai.zhuravlevgeo@gmail.com

Authors' contribution

Tomshin M.D. – conceptualization, methodology, validation of data on laboratory-analytical researches, investigation, data curation, writing – original draft, writing – review & editing, visualization, supervision of research in the geochemistry of basalts, project administration; **Tolstov A.V.** – conceptualization, methodology, validation of geological, mineralogical and laboratory analytical research, investigation, writing – review & editing, visualization, supervision of research in the areas of mineral resources and petrography; **Zhuravlev A.I.** – visualization, validation, writing – review & editing

Conflict of interest

One of the authors – Alexander V. Tolstov, Dr. Sci. (Geol. and Mineral.) is a member of the Editorial Board for the journal “Arctic and Subarctic Natural Resource”. The authors are not aware of any other potential conflict of interest relating to this article.

Поступила в редакцию / Submitted 06.06.2025

Поступила после рецензирования / Revised 10.09.2025

Принята к публикации / Accepted 12.09.2025



Оригинальная статья

Дистанционный сейсмический мониторинг первой ступени Вилуйского каскада ГЭС по записям сейсмической станции «Чернышевский»

А. А. Макаров^{✉,1,2}, В. С. Селезнев³

¹Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

²Якутский филиал Единой геофизической службы РАН, г. Якутск, Российская Федерация

³Сейсмологический филиал Единой геофизической службы РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

✉Makarov.2A@yandex.ru

Аннотация

В связи с развитием методов цифровой обработки сейсмических сигналов расширились возможности анализа малоамплитудных сигналов как естественного, так и техногенного происхождения. В данной статье рассматривается возможность дистанционного определения сейсмических сигналов работающего оборудования первой и второй очередей каскада Вилуйской гидроэлектростанции (КВГЭС-1 и КВГЭС-2) в инженерно-геологических условиях криолитозоны при помощи методики и программного обеспечения, разработанных в Федеральном исследовательском центре «Единая геофизическая служба РАН» (ФИЦ ЕГС РАН). С использованием в качестве фактического материала сейсмических наблюдений сети Якутского филиала ФИЦ ЕГС РАН были обработаны записи сейсмической станции «Чернышевский», удаленной от КВГЭС-1 и КВГЭС-2 на 1,256 и 1,456 км соответственно. Построены графики усредненных спектров сейсмических сигналов за различные промежутки времени, на которых наблюдалось множество монохромных сигналов. Анализ построенных графиков и технической документации оборудования каскада ГЭС позволил установить корреляцию между обрабатываемым сигналом и характеристиками работающего оборудования, являющегося возбуждающим источником. На примере анализа нештатной ситуации, возникшей 4 марта 2023 г. в результате некорректной работы систем регулирования генерирующего оборудования каскада ГЭС, был подтвержден факт принадлежности выделенных сигналов к генерирующему оборудованию. Были установлены величины отклонений выделенных частот работающего оборудования от номинальных, а также время возникновения технических неполадок. Опробована и подтверждена применимость использованной методики для проведения сейсмогеотехнического мониторинга инженерных объектов, расположенных в криолитозоне.

Ключевые слова: Вилуйская ГЭС, сейсмостанция, микросейсмы, сейсмический мониторинг, дистанционный контроль

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания НИР ИГАБМ СО РАН (№ FUFU-2024-0005), а также при поддержке Минобрнауки РФ (в рамках государственного задания № 075-00682-24) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

Благодарности. Авторы выражают благодарность рецензенту за ценные рекомендации.

Для цитирования: Макаров А.А., Селезнев В.С. Дистанционный сейсмический мониторинг первой ступени Вилуйского каскада ГЭС по записям сейсмической станции «Чернышевский». *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(3):365–375. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-365-375>

Remote seismic monitoring of the of the first stage of the Vilyui HPP cascade using records from the “Chernyshevsky” seismic station

Alexander A. Makarov^{✉,1,2}, Victor S. Seleznev³

¹*Diamond and Precious Metal Geology Institute,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation*

²*Yakut Regional Seismological Centre of the Geophysical Survey
of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation*

³*Seismological Branch of the Geophysical Survey
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*

✉Makarov.2A@yandex.ru

Abstract

Advancements in digital seismic signal processing have significantly enhanced the ability to analyze low-amplitude signals from both natural and anthropogenic sources. This article investigates the potential for remotely detecting seismic signals generated by operating equipment at the first and second stages of the Vilyui Hydroelectric Power Plant cascades (HPP-1 and HPP-2) within the engineering and geological conditions of the permafrost region. The study employs methods and software developed by the Federal Research Center “Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences”. Seismic data from the Yakut Regional Seismological Centre network, including records from the “Chernyshevsky” seismic station and the Vilyui HPP-1 and HPP-2 - located 1.256 kilometers and 1.456 kilometers away, respectively—were processed. Averaged spectral graphs of seismic signals over various time intervals were constructed, revealing numerous monochromatic signals. Analysis of these graphs, combined with technical documentation for the Vilyui HPP-1 and HPP-2 equipment, enabled the establishment of correlations between the processed signal and the operational characteristics of the equipment. An analysis of an emergency event on March 4, 2023, caused by incorrect operation of the control systems for the generating equipment at the Vilyui HPP-1 and HPP-2, confirmed that the identified signals are related to the generating equipment. The deviations of the operating equipment frequencies from their nominal values, along with the timing of technical malfunctions, were identified. In conclusion, the methodology was assessed and confirmed to be appropriate for conducting seismic and geotechnical monitoring of engineering structures located in permafrost environments.

Keywords: Vilyui HPP, seismic station, microseisms, seismic monitoring, remote control

Funding. This study was conducted within the framework of the state assignment for the DPMGI SB RAS (No. FUG-2024-0005), with support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (state assignment No. 075-00682-24). It also used data obtained from the unique scientific facility “Seismic and ultrasonic monitoring system of the Arctic Cryolithozone, and the continuous seismic monitoring system of the Russian Federation, adjacent territories, and the world”.

Acknowledgements. The authors express their sincere appreciation to the reviewer for the insightful and constructive feedback.

For citation: Makarov A.A., Seleznev V.S. Remote seismic monitoring of the of the first stage of the Vilyui HPP cascade using records from the “Chernyshevsky” seismic station. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(3):365–375. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-365-375>

Введение

Плотины гидроэлектростанций относятся к особо опасным объектам с множеством факторов, ухудшающих эксплуатационные качества гидротехнических сооружений, приводящих к снижению несущей способности конструкций и изменению деформационных свойств подстилающего грунта. В эти факторы входят воздействия филь-

трации, температуры, работы оборудования, сейсмичности и т. д. [1–5]. Согласно нормативным документам, на таких объектах обязательна установка автоматизированных систем мониторинга и управления инженерными системами сооружений [6, 7]. С этой целью в ФИЦ ЕГС РАН был разработан инженерно-сейсмический метод мониторинга состояния крупных промышленных объектов и ди-

станционного контроля вибрационного состояния промышленного оборудования [8–11], основанный на анализе сейсмических записей, полученных с локальных сейсмологических сетей.

В статье рассматривается подход к дистанционному сейсмическому наблюдению за работой генерирующего оборудования каскада Вилуйских гидроэлектростанций (КВГЭС-1 и КВГЭС-2). Данный энергообъект является основным источником электроснабжения Западной Якутии и обеспечивает нужды алмазной и нефтяной отраслей промышленности [12]. Немаловажным является и тот факт, что со дня запуска первого агрегата прошло более 55 лет [13]. В результате могут проявляться различные эффекты, связанные со «старением» плотины и вырабатывающего электроэнергию оборудования. Наглядным примером может являться нештатная ситуация, вызванная техническими неполадками на каскаде ГЭС, произошедшая 4 марта 2023 г. [14]. Таким образом, становятся актуальными сейсмический мониторинг работающего оборудования для обеспечения безопасной эксплуатации и изучение характера изменения излучаемого сейсмического сигнала.

Объект исследования

Верхняя ступень каскада Вилуйских ГЭС представляет собой каменно-набросную плотину с приплотинными зданиями КВГЭС-1 на правом и КВГЭС-2 – на левом берегах реки. Каждая из ГЭС оснащена четырьмя гидроагрегатами [13]. На первой станции установлены поворотнлопастные турбины (ПЛ 70/3164-ВМ410) с гидрогенераторами (СВВ 780/190-32), а на второй – радиально-осевые турбины (РО 75/3123-В450) с генераторами (СВВ 872/150-44ХЛ4). Мощность каждой из турбин составляет 85 МВт. Общая мощность всей системы составляет 680 МВт [15]. Согласно литературным источникам, на территории исследуемого объекта проводились геофизические работы, включающие: электроразведку, термометрию и сейсморазведку правобережного примыкания плотины. В результате комплексного анализа было обосновано сложное квазистабильное термодинамическое состояние, связанное как с технологическими особенностями строительства, так и с инженерно-геокриологической обстановкой [16–18]. Это подтверждает необходимость постоянного мониторинга за энергообъектом и его оборудованием.

Исходные данные и методы обработки

Регистрация сейсмических сигналов ведется сейсмической станцией «Чернышевский», которая входит в сеть наблюдений ЯФ ФИЦ ГС РАН. Пункт наблюдения был открыт в 2011 г. на правобережье р. Вилуй в поселке Чернышевский. Он оборудован сейсмоприемником «KS-2000» и регистратором «Байкал-8». Данные передаются путем «Ethernet» соединения, что позволяет вести ежедневную запись сейсмического сигнала [19]. Сейсмостанция находится на расстоянии 1,256 км и 1,456 км от зданий Вилуйских ГЭС 1 и 2 соответственно (рис. 1).

Обработка сейсмических записей была произведена программным обеспечением «SpectrumSeism» путем преобразования исходного сигнала в спектры и спектрограммы. На них возможно выделить изменение амплитудно-частотного состава записи с течением времени и проследить варьирование частот, излучаемых целевыми (исследуемыми) источниками возбуждения. Построение графиков изменения сейсмических колебаний со временем для выделенных частот осуществляется посредством следующего вида оконного преобразования Фурье [20]:

$$A(\omega, t) = \left| \int_{t-T/2}^{t+T/2} f(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \right|,$$

где $f(\tau)$ – зарегистрированный сейсмический сигнал, ω – частота, для которой строится график, t – время, T – интервал времени (окно), в котором определяется амплитуда $A(\omega, t)$, $|\dots|$ – обозначает модуль комплексного числа.

Диапазон регистрации сейсмического сигнала от исследуемого объекта ограничивается частотами 0,01 до 50 Гц. Преимуществами используемой методики являются высокая детальность в частотно-временной области и оперативность обработки, а также непрерывная регистрация сигнала без непосредственного вмешательства в работу ГЭС.

Результаты

С целью выделения частот работающего оборудования КВГЭС-1 и -2 были построены графики усреднения спектров с различными параметрами. В результате ретроспективного анализа записей 2023 г. выявлено более десятка высокодобротных сигналов. В качестве примера приведен график усреднения за трехдневный проме-

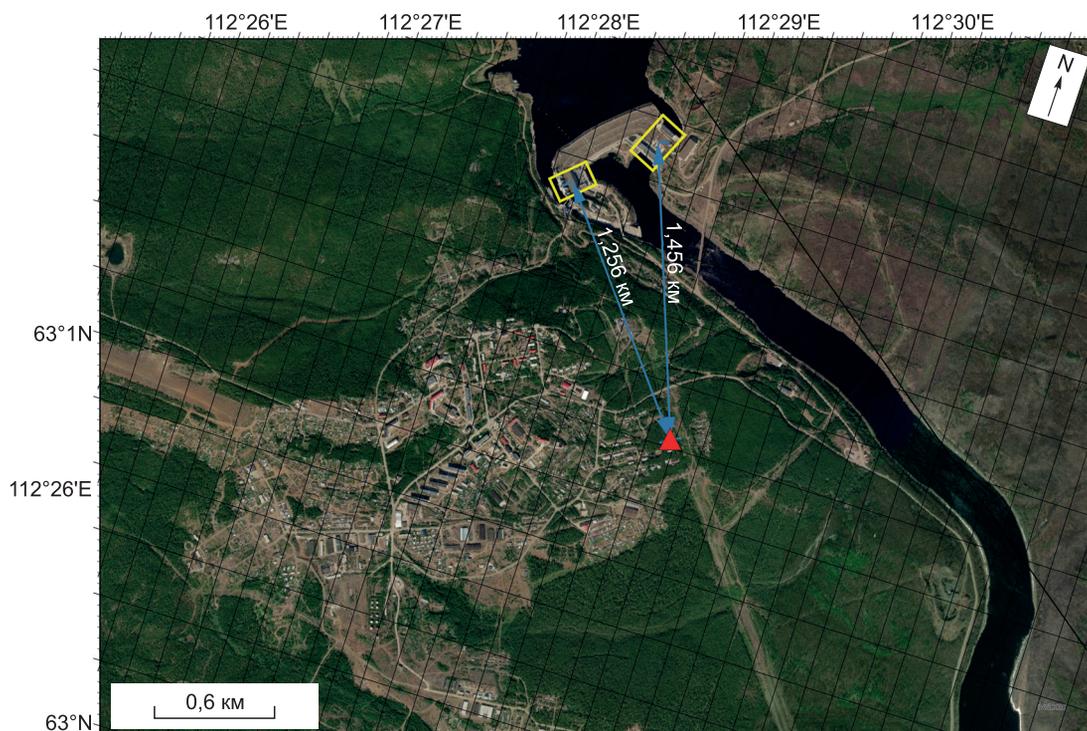


Рис. 1. Схема расположения верхней ступени каскада Вилуйских ГЭС и местоположение сейсмической станции «Чернышевский» (красный треугольник). Желтые прямоугольники – ГЭС-1 и ГЭС-2

Fig. 1. Scheme of the upper stage of the Vilyuy HPP cascade and the location of the “Chernyshevsky” seismic station (red triangle). Yellow rectangles indicate HPP-1 and HPP-2

жуток с параметрами размера окна 1000 с и шагом 100 с (рис. 2, а).

В диапазоне частот от 0,01 до 50 Гц наблюдается более десятка монохроматических сигналов. Для большинства сейсмических пиков наблюдается закономерность распределения частот, кратных 2,273 Гц и 3,125 Гц.

Для детализации сигналов в низкочастотной области (до 5 Гц) были построены графики усреднения для максимумов, зафиксированных в данном диапазоне (рис. 2, б, в). Точность таких наблюдений составляет 0,001 Гц. Частоты 2,273 Гц и 3,125 Гц в дальнейшем условно назовем «базовые».

Для апробации метода и установления принадлежности выделенных сигналов к рассматриваемому объекту была рассмотрена нештатная ситуация, возникшая 4 марта 2023 г., в результате которой Западный энергорайон Республики Саха (Якутия) перешел на изолированную работу от Объединенной энергосистемы (ОЭС) Востока с избытком мощности на 258 МВт [14].

С целью фиксации возникновения аномалий были построены спектрограммы частот, крат-

ных «базовым». На каждой из них отчетливо прослеживаются качания частот. Наиболее выраженный сигнал выделяется на частотах 25 Гц и 18,184 Гц (рис. 3), в 8 раз превышая «базовые» сигналы.

На часовых графиках отражаются постоянство и высокая добротность сигналов при штатном режиме работы до возникновения качаний. Для детализации развития процесса возникновения технических неполадок были построены пятиминутные графики для «базовых» частот. На них фиксируются отклонения частот от заданной на 0,035 и 0,023 Гц соответственно, а для 25 Гц оно составляет 0,271 Гц. На всех приведенных графиках отмечается интервал возникновения аномалий в интервале времени 02:40:00 – 02:45:00 GСMT (рис. 4).

Таким образом, рассматривая выделенный пятиминутный интервал, можно подробно зафиксировать время возникновения технических неполадок на КВГЭС. Для решения этой задачи и наглядности изменения амплитуд сигналов были созданы графики изменения амплитуд частот в интервале времени 02:00:00 – 04:00:00

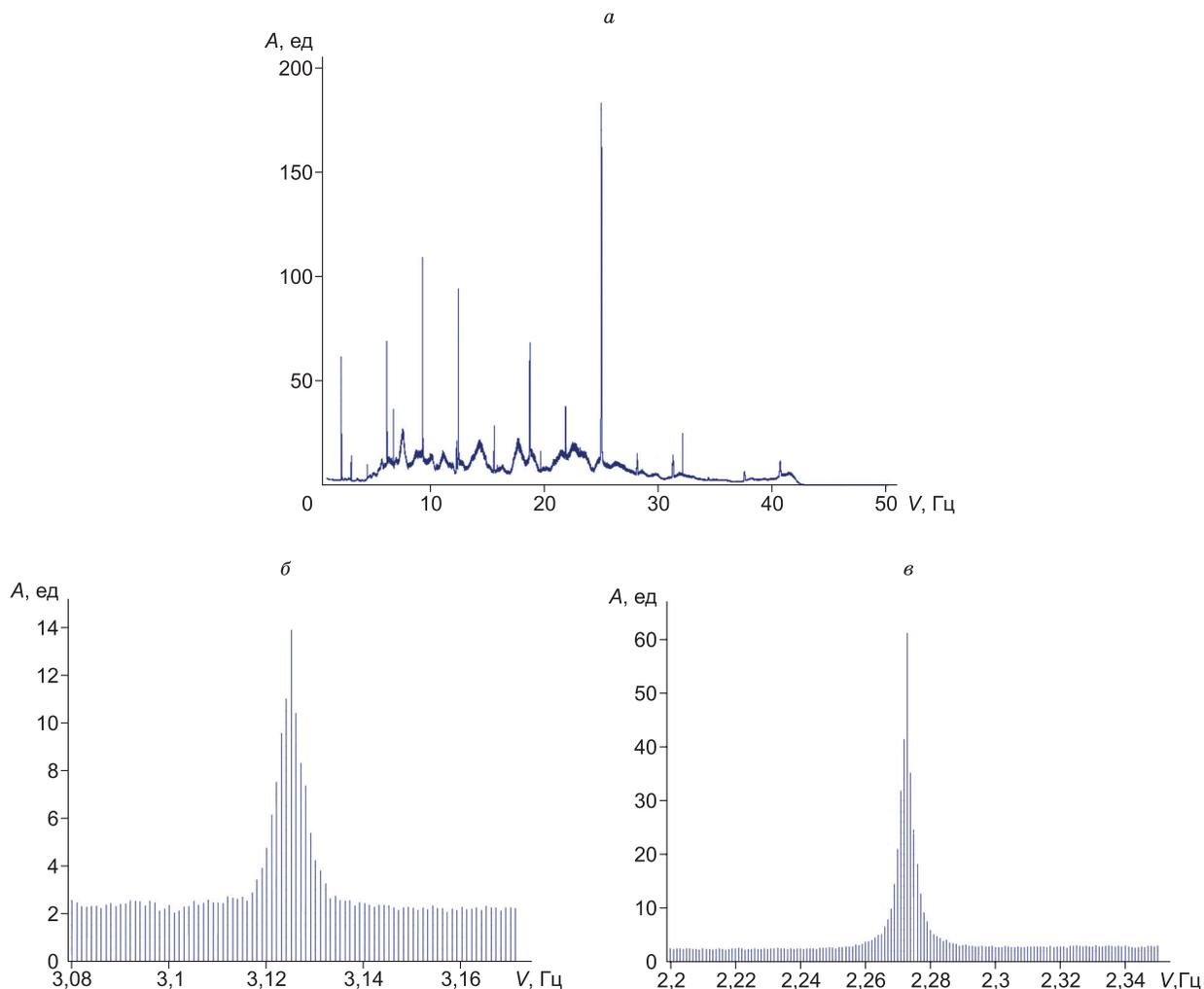


Рис. 2. Усредненный спектр за трое суток по записям сейсмической станции «Чернышевский» по каналу N (a) и графики усредненных спектров горизонтального канала N: б – оборотная частота гидроагрегатов ГЭС-1, в – оборотная частота гидроагрегатов ГЭС-2)

Fig. 2. a) Averaged spectrum over three days from the records from the “Chernyshevsky” seismic station by channel N; б, в – Graphs of averaged spectra for the horizontal channel N: б – turnover frequency of hydropower units of HPP-1, в – turnover frequency of hydropower units of HPP-2

GСMT (рис. 5) и было установлено время появления аномального сигнала. На всех рассмотренных частотах их качания зарегистрированы в 02:44:12 GСMT.

На юге и западе Якутии на спектрограммах записей сейсмостанций «Алдан», «Олёкма» и «Тында» были также зафиксированы отклонения на монохромных сигналах в интервале 24–25 Гц. На станции «Чульман» подобные отклонения отмечены в интервале 48,8–48,3 Гц в течение двух дней со дня возникновения технических неполадок, что предположительно является следствием срабатывания АЧР (автоматической частотной разгрузки). Однако наиболее информативными

и наглядными являются записи со станции «Чернышевский», где наблюдаются качания частот в зависимости от времени.

Заклучение

1. В результате проведенного анализа установлено, что закономерность, выделенная на точных графиках усредненных спектров по записям сейсмической станции «Чернышевский», предположительно является следствием кавитации лопастей и износа других деталей гидротурбин КВГЭС. Аналогичная картина наблюдалась при катастрофической аварии на Саяно-Шушенской ГЭС в 2009 г. [21].

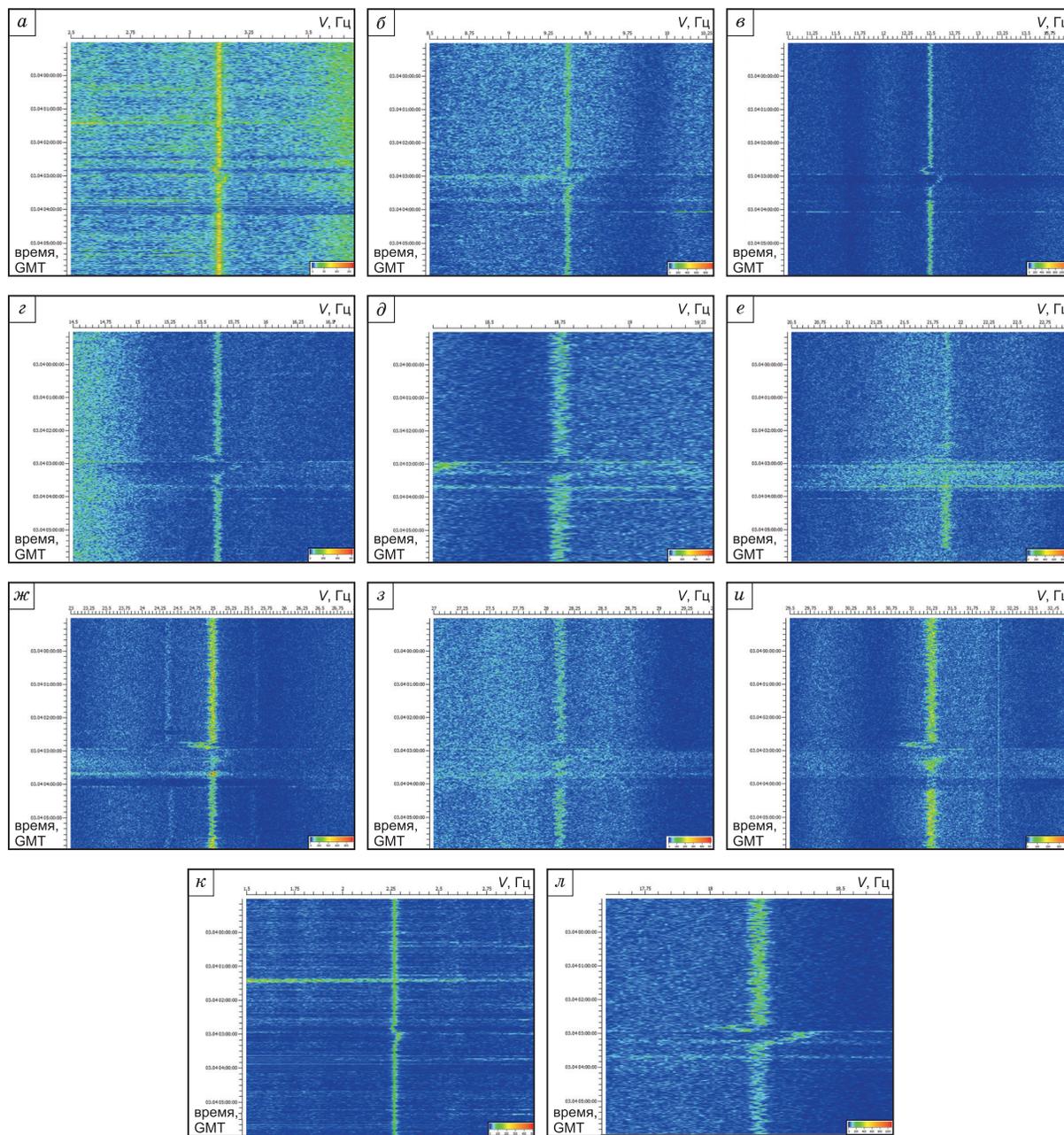


Рис. 3. Спектрограммы записей сейсмической станции «Чернышевский» по каналу N для монохромных сигналов во время технических неполадок на КВГЭС, Гц: а – 3,125, б – 6,25, в – 12,5, г – 15,625, д – 18,75, е – 21,825, ж – 25, з – 28,125, и – 31,25, к – 2,273, л – 18,184

Fig. 3. Spectrograms of recordings from the “Chernyshevsky” seismic station by channel N, showing monochrome signals during the emergency situation at the Vilyui HPP, Hz: а – 3.125, б – 6.25, в – 12.5, г – 15.625, д – 18.75, е – 21.825, ж – 25, з – 28.125, и – 31.25, к – 2.273, л – 18.184

2. Установлено, что «базовые» частоты совпадают со скоростями вращения гидрогенераторов СВВ 780/190-32 и СВВ 872/150-44ХЛ4 [22]. Этот факт позволяет утверждать, что эти частоты являются оборотными частотами 3,125 Гц и 2,273 Гц гидроагрегатов ГЭС 1 и 2, соответственно.

3. Установленная частота 25 Гц, по мнению авторов, соответствует частоте вращения лопастей КВГЭС-1 согласно уравнению $V_{\text{лоп}} = V_{\text{об}} \cdot n$, где $V_{\text{лоп}}$ – лопастная частота, $V_{\text{об}}$ – оборотная частота, n – количество лопастей. Таким образом, произведение оборотной частоты, равной

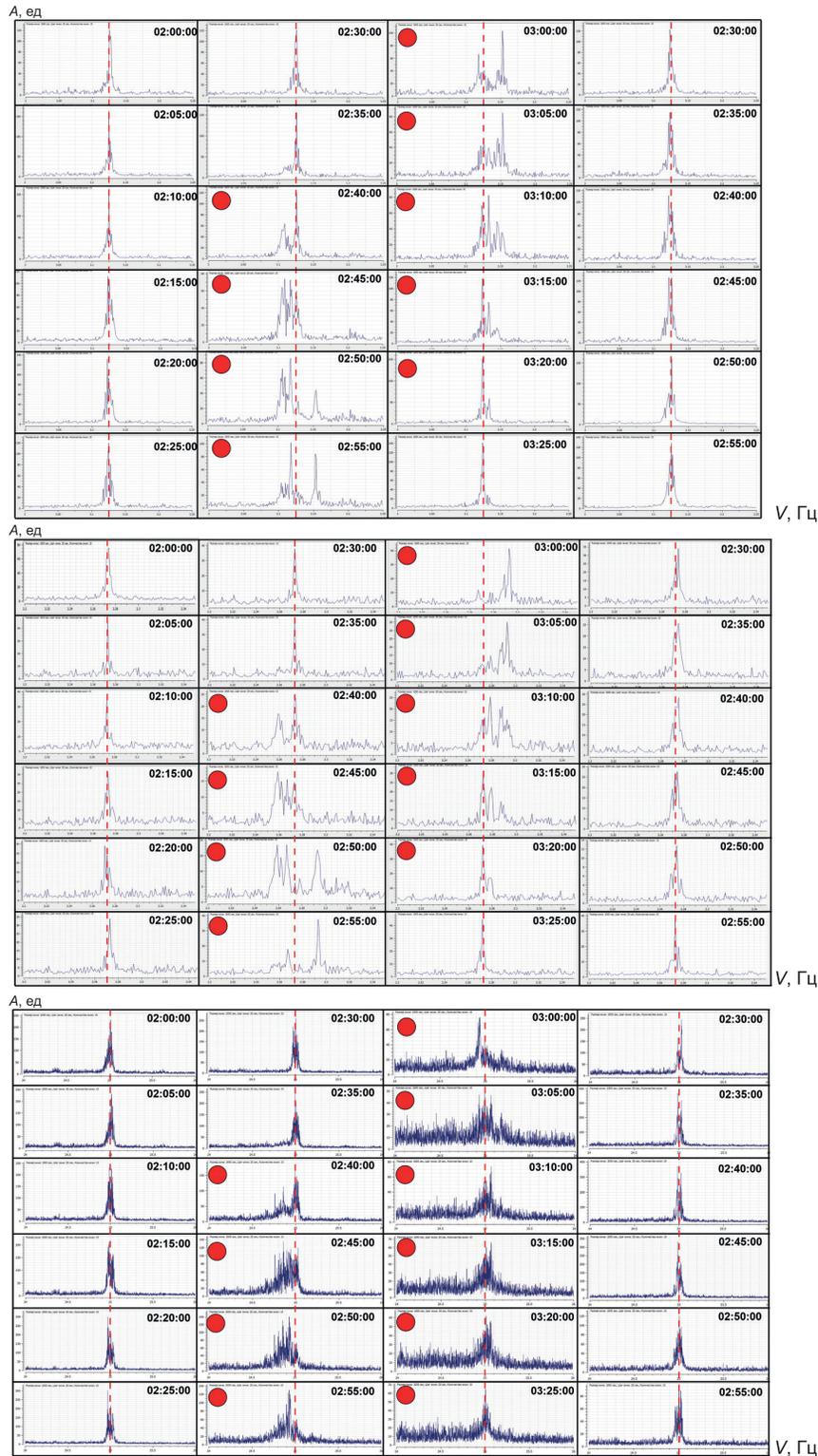


Рис. 4. Пятиминутные графики усреднения спектров записей сейсмической станции «Чернышевский» по каналу N во время технических неполадок на КВГЭС для частот 2,273, 3,125, 25 Гц. Красными кругами показаны графики с отклонениями от заданных частот

Fig. 4. Five-minute plots showing the averaged spectra of recordings from the “Chernyshevsky” seismic station by channel N during the emergency situation at the Vilyui HPP cascade for frequencies 2.273, 3.125, 25 (Hz). Red circles indicate the plots with deviations from the specified frequencies

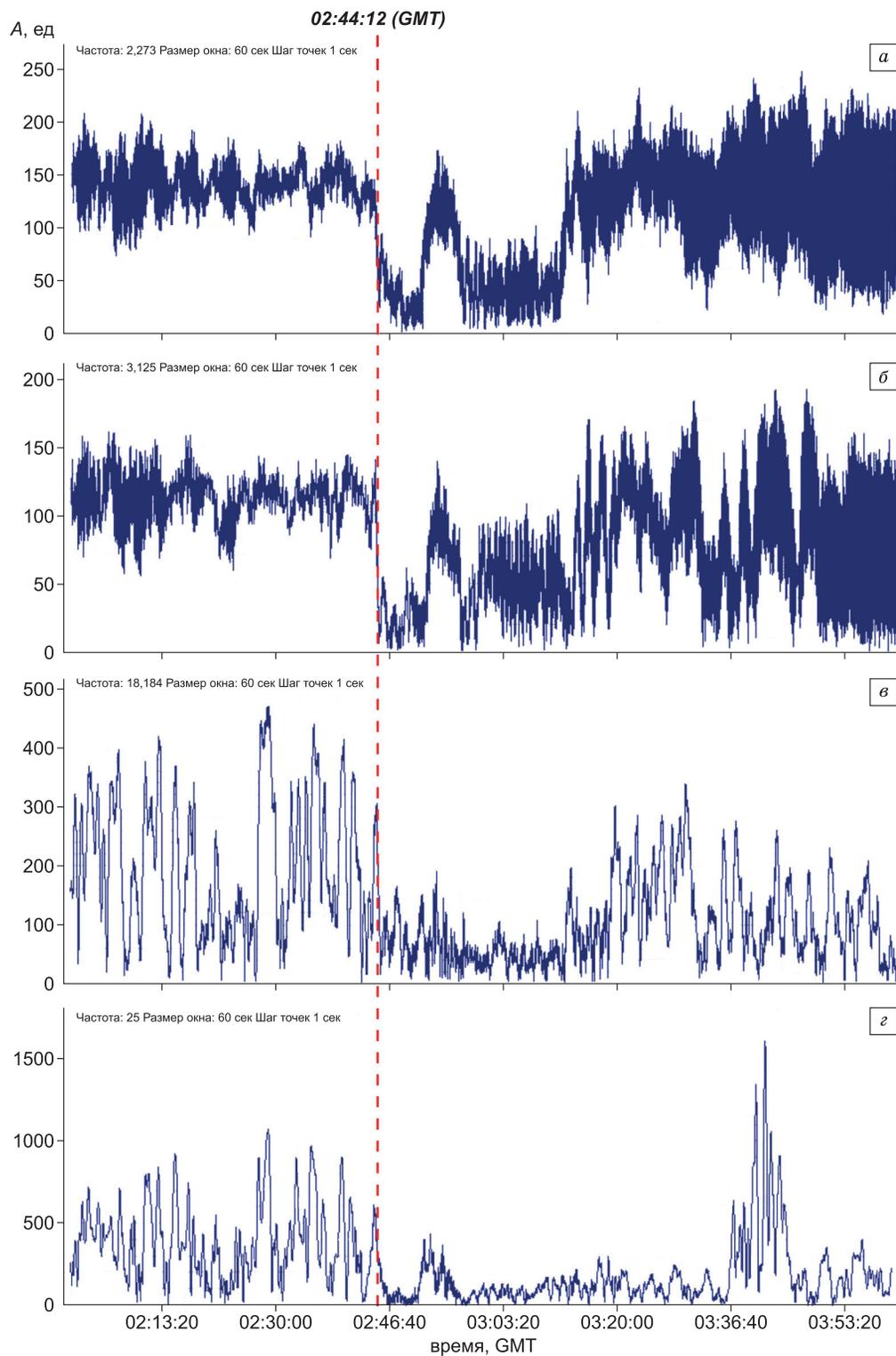


Рис. 5. Графики изменения амплитуд на частотах, Гц: *а* – 2,273, *б* – 3,125, *в* – 18,184, *г* – 25

Fig. 5. Plots showing changes in the amplitudes of frequencies, Hz: *a* – 2.273, *б* – 3.125, *в* – 18.184, *г* – 25

3,125 Гц, и количества лопастей на поворотной лопастью турбине КВГЭС-1 ($n = 8$) дает в результате лопасть частоту 25 Гц.

4. Установлены диапазоны отклонений во время возникновения технических неполадок 4 марта 2023 г. оборотных и лопастных частот гидроагрегатов. Одновременное появление сейсмических аномалий на монохромных частотах позволяет утверждать, что эти сигналы связаны именно с работой турбин ГЭС-1 и ГЭС-2. В результате анализа графиков изменения амплитуд частот установлено время возникновения технических неполадок на исследуемом объекте – 02:44:12 GСMT.

Результаты исследований подтверждают возможность применения в условиях криолитозоны данной методики для контроля физических параметров агрегатов ГЭС в течение длительного времени и мониторинга других инженерных сооружений.

Список литературы / References

1. Судакова М.С., Брушков А.В., Великин С.А. и др. Геофизические методы в геокриологическом мониторинге. *Вестник Московского университета. Серия 4: Геология*. 2022;(6):141–151.

Sudakova M.S., Brushkov A.V., Velikin S.A., et al. Geophysical methods in permafrost monitoring. *Moscow University Geol. Bull.* 2022;(6):141–151. (In Russ.)

2. Трифонов Б.А., Милановский С.Ю., Несынов В.В. Геофизические методы исследования природно-техногенных изменений массивов грунтов криолитозоны. *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*. 2024;(5):82–94. <https://doi.org/10.31857/S0869780924050087>

Trifonov B.A., Milanovskii S.Yu., Nesynov V.V. Geophysical methods for the study of natural and human-induced changes in ground massifs of the permafrost zone. *Geoekologiya. Inzhenernaya Geologiya. Gidrogeologiya*. 2024;(5):82–94. <https://doi.org/10.31857/S0869780924050087>. (In Russ.)

3. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Полянский П.О. и др. Сейсмические воздействия на плотину Новосибирской ГЭС. *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2023;10(3):50–55. <https://doi.org/10.15372/FPVGN2023100308>

Emanov A.F., Emanov A.A., Poljanskiy P.O., et al. Seismic impacts to Novosibirsk hydroelectric dam. *Mining Sciences: Fundamental and Applied Issues*. 2023;10(3):50–55. <https://doi.org/10.15372/FPVGN2023100308>. (In Russ.)

4. Чжан Р.В., Великин С.А., Шестернев Д.М. Температурно-криогенный режим гидроузла Вильюйской ГЭС-1, 2: геокриологический мониторинг. *Гидротехническое строительство*. 2017;(6):10–23.

Zhang R.V., Velikin S.A., Shesternev D.M. Temperature and cryogenic regime of the Vilyuyskaya hydroelectric power station-1, 2: geocryological monitoring. *Hydraulic Structures Construction*. 2017;(6):10–23. (In Russ.)

5. Бах А.А., Еманов А.Ф., Шеболтасов А.Г. и др. Высокоточные определения методом стоячих волн характеристик собственных колебаний плотин средненапорных ГЭС.

Вопросы инженерной сейсмологии. 2025;52(1):120–131. <https://doi.org/10.21455/VIS2025.1-6>

Bakh A.A., Emanov A.F., Sheboltasov A.G., et al. High-precision determinations of the characteristics of natural oscillations of medium-pressure hydroelectric power station dams by the standing wave method. *Problems of Engineering Seismology*. 2025;52(1):120–131. <https://doi.org/10.21455/VIS2025.1-6>. (In Russ.)

6. Короленко Д.Б., Кузьменко А.П., Москвичев В.В., Сабуров В.С. Информационная система сейсмометрического мониторинга технического состояния гидротехнических сооружений: опыт моделирования, разработки и внедрения. *Вычислительные технологии*. 2019;24(5):13–37. <https://doi.org/10.25743/ICT.2019.24.5.003>

Korolenko D.B., Kuzmenko A.P., Moskvichev V.V., Saburov V.S. Information system for seismometric monitoring of technical condition of hydraulic structures: experience in modelling, development and implementation. *Computational Technologies*. 2019;24(5):13–37. <https://doi.org/10.25743/ICT.2019.24.5.003>. (In Russ.)

7. ГОСТ Р 55260.1.5-2012 Гидроэлектростанции. Часть 1-5. Сооружения ГЭС гидротехнические. Требования к проектированию в сейсмических районах. заявл. 01.07.2014 : опубл. 04.03.2023 / Зотова Г.В., Прусакова В.Н., Ментова Р.А.

GOST R 55260.1.5-2012 Hydro power plants. Part 1-5. Hydrotechnical constructions of hydroelectric power stations. Requirements for projection in seismic areas. Registered 07.01.2014; published 03.04.2023 / Zotova G.V., Prusakova V.N., Mentova R.A. (In Russ.)

8. Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Коковкин И.В., Соловьев В.М. Изменение значений частот собственных колебаний зданий и сооружений в зависимости от внешних факторов. *Геология и геофизика*. 2024;65(7):1036–1044. <https://doi.org/10.15372/GiG2024102>

Seleznev V.S., Liseikin A.V., Kokovkin I.V., Solovyov V.M. Change in natural oscillation frequencies of buildings and structures depending on external factors. *Russian Geology and Geophysics*. 2024;65(7):1036–1044. <https://doi.org/10.15372/GiG2024102>. (In Russ.)

9. Патент № 2461847 Российская Федерация, МПК G01V 1/28 G01M 7/02. Способ непрерывного мониторинга физического состояния зданий и способ непрерывного мониторинга физического состояния зданий и/или сооружений и устройство для его осуществления: № 2010128394/28: заявл. 08.07.2010 : опубл. 20.09.2012 / Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Брыксин А.А.

Patent No. 2461847, Russian Federation, IPC G01V 1/28 G01M 7/02. A method for continuous monitoring of the physical condition of buildings and a method for continuous monitoring of the physical condition of buildings and/or structures and a device for its implementation: No. 2010128394/28; registered 07.08.2010; published 09.20.2012 / Seleznev V.S., Liseikin A.V., Bryksin A.A. (In Russ.)

10. Лисейкин А.В., Селезнев В.С. Методика дистанционного контроля разрушительных процессов по малоамплитудным сейсмическим сигналам при эксплуатации крупных промышленных объектов. *Вопросы инженерной сейсмологии*. 2024;51(3):86–106. <https://doi.org/10.21455/VIS2024.3-5>

Liseikin A.V., Seleznev V.S. An approach for remote control of destructive processes by low-amplitude seismic signals during service of large industrial facilities. *Problems of Engineering Seismology*. 2024;51(3):86–106. <https://doi.org/10.21455/VIS2024.3-5>. (In Russ.)

11. Брыксин А.А., Громыко П.В., Севостьянов Д.Б. Использование регистраторов «Байкал-8» для сейсмического мониторинга зданий и сооружений в режиме реального времени в СЕФ ФИЦ ЕГС РАН. *Российский сейсмологический журнал*. 2022;4(3):68–80. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2022.3.06>
- Bryksin A.A., Gromyko P.V., Sevostyanov D.B. Using the Baikal-8 recorders for seismic monitoring of buildings and structures in real time in Seismological Branch of the GS RAS. *Russian Journal of Seismology*. 2022;4(3):68–80. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2022.3.06>. (In Russ.)
12. Лаппарова И.Ф. Новый этап в энергетическом развитии Якутии с конца 50-х по 80-е гг. XX в. В кн.: Роднина Н.В. и др. (ред.) *Аграрная наука: от философии до экономики: Сборник научных статей внутривузовской научно-практической конференции экономического факультета, посвященной 65-летию высшего аграрного образования Республики Саха (Якутия) и 100-летию образования Якутской АССР, г. Якутск, 03 октября 2022 года*. Якутск: Издательский дом СВФУ; 2022. С. 119–121.
- Lapparova I. F. A new stage in the energy development of Yakutia from the late 50s to the 80s of the twentieth century. In: Rodnina N.V., et al. (eds.) *Agrarian science: from philosophy to economics: Collection of scientific articles at the intrauniversity scientific and practical conference of the Faculty of Economics, dedicated to the 65th anniversary of higher agricultural education in the Republic of Sakha (Yakutia) and the 100th anniversary of the establishment of the Yakut ASSR, Yakutsk, October 03, 2022*. Yakutsk: NEFU Publishing House; 2022, pp. 119–121. (In Russ.)
13. Дворецкая М.И., Жданова А.П., Лушников О.Г., Слива И.В. *Возобновляемая энергия. Гидроэлектростанции России: справочник*. СПб.: Изд-во Политехнического университета; 2018. 224 с.
- Dvoretzskaya M.I., Zhdanova A.P., Lushnikov O.G., Sliva I.V. *Renewable energy. Hydroelectric power plants of Russia*. St. Petersburg: Polytechnic University Publishing House. 2018. 224 p. (In Russ.)
14. Коковкин И.В., Селезнев В.С., Дежнев В.Э., Лопатин Г.А. Разработка сейсмических методов для мониторинга геомеханического состояния Саяно-Шушенской ГЭС. *Геология и геофизика*. 2025;66(2):247–256. <https://doi.org/10.15372/GIG2024155>
- Development of seismic methods for monitoring the geomechanical condition of the Sayano-Shushenskaya HPP. *Russian Geology and Geophysics*. 2025;66(2):247–256. <https://doi.org/10.15372/GIG2024155>. (In Russ.)
14. Сайт Ленского управления Ростехнадзора. Режим доступа: <https://lensk.gosnadzor.ru> (дата обращения: 09.04.2025)
- Website of the Lena Department of Rostekhnadzor. Available at: <https://lensk.gosnadzor.ru> (accessed: 09.04.2025) (In Russ.)
15. Абрамов А.А. Реконструкция электрических сетей напряжением 110 кВ Республики Саха (Якутия) в связи с подключением подстанции Маччоба: Бакалаврская работа. Благовещенск. 2021. 118 с.
- Abramov A.A. Reconstruction of 110 kV electrical networks in the Republic of Sakha (Yakutia) in connection with the connection of the substation Machchoba: Bachelor's thesis, Blagoveshchensk. 2021. 118 p. (In Russ.)
16. Неклюдов В.В. Идентификация инженерно-геологического строения массива пород в криолитозоне нестандартными методами инженерной сейсмологии. *Разведка и охрана недр*. 2014;(3):37–42.
- Neklyudov V.V. Identification of the engineering geological structures of permafrost rocks by means of nonstandard engineering seismic methods. *Prospect and Protection of Mineral Resources*. 2014;(3):37–42. (In Russ.)
17. Чжан Р.В., Великин С.А., Кузнецов Г.И., Крук Н.В. *Грунтовые плотины в криолитозоне России*. Новосибирск: Академическое издательство «Гео»; 2019. 427 с. <https://doi.org/10.21782/B978-5-6043021-1-8>
- Zhang R.V., Velikin S.A., Kuznetsov G.I., Kruk N.V. *Embankment dams in the Russian permafrost zone*. Novosibirsk: Geo Publ. 2019. 427 p. <https://doi.org/10.21782/B978-5-6043021-1-8>. (In Russ.)
18. Великин С.А., Снегирев А.М. Локальный геофизический мониторинг состояния правобережного примыкания плотины Вилюйской ГЭС-1. Вестник КРАУНЦ. *Серия: Науки о Земле*. 2005;2(6):77–85.
- Velikin S. A., Snegirev A.M. Local geophysical monitoring of the right-bank continuity of the dam at the Vilyuy Hydroelectric Power Plant. *Bulletin KRASEC. Sciences of the Earth*. 2005;2(6):77–85. (In Russ.)
19. *Сейсмологический бюллетень (сеть телесейсмических станций)*, 2020. (2024). ФИЦ ЕГС РАН [сайт] Режим доступа: http://www.gsras.ru/ftp/Teleseismic_bulletin/2020/ (дата обращения: 09.04.2025)
- Seismological Bulletin (network of teleseismic stations), 2020. (2024). Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (GS RAS) [website] Available at: http://www.gsras.ru/ftp/Teleseismic_bulletin/2020/ (accessed: 04.09.2025) (In Russ.)
20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021666241 Российская Федерация. SpectrumSeism : № 2021665611 : заявл. 11.10.2021 : опубл. 11.10.2021 / Селезнев В.С. Лисейкин А.В., Севостьянов Д.Б., Брыксин А.А.
- Certificate of State Registration for Computer Programme No. 2021666241 Russian Federation. SpectrumSeism : No. 2021665611 : registered 11.10.2021 : published 11.10.2021 / Seleznev V.S., Liseikin A.V., Sevostyanov D.B., Bryksin A.A. (In Russ.)
21. Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Альжанов Р.Ш., Громыко П.В. Влияние работы гидроагрегатов на собственные колебания плотины Саяно-Шушенской ГЭС. *Гидротехническое строительство*. 2013;(7):2–7.
- Seleznev V.S., Liseikin A.V., Alzhanov R.Sh., Gromyko P.V. The effect of the operation of hydraulic units on the natural vibrations of the Sayano-Shushenskaya HPP dam. *Hydraulic Structures Construction*. 2013;(7):2–7. (In Russ.)
22. НПО «ЭЛСИБ» ПАО. Режим доступа: <https://elsib.ru/ru/services/gidrogenerator/> (дата обращения: 09.04.2025)
- NPO 'ELSIB' PAO. Available at: <https://elsib.ru/ru/services/gidrogenerator/> (accessed: 09.04.2025) (In Russ.)

Об авторах

МАКАРОВ Александр Александрович, ведущий инженер; ведущий инженер-геофизик (совместитель), <https://orcid.org/0000-0001-6527-5863>, ResearcherID: HKD-9633-2023, SPIN: 6462-8845, e-mail: Makarov.2A@yandex.ru

Alexander A. Makarov, Victor S. Seleznev ♦ Remote seismic monitoring of the of the first stage of the Vilyui HPP cascade...

СЕЛЕЗНЕВ Виктор Сергеевич, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-2366-550X>, ResearcherID: I-9924-2018, Scopus Author ID: 7006319338, SPIN: 9354-5200, e-mail: svsv0428@mail.ru

Вклад авторов

Макаров А.А. – проведение исследования, создание черновика рукописи, визуализация, верификация данных, проведение статистического анализа; **Селезнев В.С.** – руководство исследованием, редактирование рукописи, разработка концепции, методология

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

MAKAROV, Alexander Alexandrovich, Leading Engineer; Leading Engineer-Geophysicist, <https://orcid.org/0000-0001-6527-5863>, ResearcherID: HKD-9633-2023, SPIN: 6462-8845, e-mail: Makarov.2A@yandex

SELEZNEV, Victor Sergeevich, Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-2366-550X>, ResearcherID: I-9924-2018, Scopus Author ID: 7006319338, SPIN: 9354-5200, e-mail: svsv0428@mail.ru

Authors' contribution

Makarov A.A. – investigation, writing – original draft, visualization, validation, formal analysis; **Seleznev V.S.** – supervision, writing – review & editing, conceptualization, methodology

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 25.08.2025

Поступила после рецензирования / Revised 08.09.2025

Принята к публикации / Accepted 10.09.2025

Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

УДК 551.345-047.36(571.56)

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-376-391>



Оригинальная статья

Оценка термической устойчивости мерзлотных ландшафтов к современному потеплению климата (на примере Центральной Якутии)

С. П. Варламов ✉, Ю. Б. Скачков, А. Н. Федоров

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

✉ svarlamov@mpi.ysn.ru

Аннотация

Оценка устойчивости ландшафтов к современному потеплению климата – один из основных острых вопросов современности. Наблюдаемая в настоящее время активизация криогенных процессов в Центральной Якутии, особенно на нарушенных и антропогенных ландшафтах, показывает актуальность проблемы. Целью исследования является оценка термической устойчивости мерзлотных ландшафтов Центральной Якутии в условиях усиливающегося потепления климата, начиная с 1970-х годов. Основой для оценки послужили результаты натуральных наблюдений за температурой многолетнемерзлых пород в слое годовых теплооборотов за период 1981–2023 гг., данные метеостанций по температуре воздуха на высоте 2 м и почвы на глубине 1,6 м. Мониторинг, включая создание сети, наблюдения на стационарах и мониторинговых участках Института мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН, и анализ полученных данных в контексте изменения климата были основными методами исследований. Были оценены пространственно-временные изменения мощности деятельного слоя и среднегодовой температуры пород в слое годовых теплооборотов и их тренды как показатель отклика на потепление климата. Проведен региональный анализ изменчивости коэффициента термической устойчивости (K_{α}) многолетнемерзлых пород в девяти типах местностей по температурным данным на подошвах деятельного слоя и в слое годовых теплооборотов (глубина 10 м). Положительные значения K_{α} , превышающие 1,0, свидетельствуют о деградации многолетнемерзлых пород, встречаются и отрицательные тренды, которые связаны с изменениями режима снегонакопления и биомассы экосистем. Оценка термической устойчивости мерзлотных ландшафтов затрагивает важные аспекты природы окружающей среды и социально-экономической устойчивости Центральной Якутии. Результаты исследований могут быть использованы государственными органами по планированию развития территорий, природоохранными организациями, хозяйствующими субъектами и образовательными заведениями.

Ключевые слова: термическая устойчивость, потепление климата, мерзлотные ландшафты, многолетнемерзлые породы, деятельный слой, температура, мониторинг

Финансирование. Сбор и систематизация данных натурального исследования проведены в рамках НИОКТР № 122011800062-5 «Тепловое поле и криогенная толща Северо-Востока России. Особенности формирования и динамика», анализ данных и подготовка статьи осуществлены за счет гранта Российского научного фонда «Разработка методов гибридного интеллекта для решения задач диагностики состояния объектов инфраструктуры в районах Крайнего Севера на базе высокопроизводительных вычислительных систем» (проект № 23-61-10032).

Благодарности. Авторы выражают благодарность к.г.н. П.Н. Скрыбину за многолетние совместные исследования.

Для цитирования: Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Федоров А.Н. Оценка термической устойчивости мерзлотных ландшафтов к современному потеплению климата (на примере Центральной Якутии). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(3):376–391. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-376-391>

Original article

Assessment of the thermal stability of permafrost landscapes in response to contemporary climate warming: A case study of Central Yakutia

Stepan P. Varlamov ✉, Yuri B. Skachkov, Alexandr N. Fedorov

Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

✉ svarlamov@mpi.ysn.ru

Abstract

Assessing the resilience of landscapes in response to current climate warming represents a critical challenge today. The current intensification of cryogenic processes in Central Yakutia, particularly in disturbed and anthropogenic

landscapes, highlights the urgency of this issue. This study aims to evaluate the thermal stability of permafrost landscapes in Central Yakutia amid increasing climate warming since the 1970s. The assessment is based on field observations of permafrost rock temperatures within the annual heat turnover layer from 1981 to 2023, alongside meteorological data on air temperature at 2 meters above ground and soil temperature at a depth of 1.6 meters. The primary research method involved monitoring, including establishing a network, observation at sites and monitoring stations of the Melnikov Permafrost Institute of SB RAS, and analyzing the collected data in the context of climate change. Spatiotemporal changes in the thickness of the active layer and the mean annual temperature of ground within the annual heat turnover layer were estimated, with their trends serving as indicators of the landscape's response to climate warming. A regional analysis of the variability of the thermal stability coefficient ($K\alpha$) of permafrost rocks across nine types of localities was conducted, based on temperature data at the base of the active layer and within the annual heat turnover layer (10 meters depth). Positive $K\alpha$ values exceeding 1.0 indicate permafrost degradation, while negative trends are associated with changes in snow accumulation regimes and ecosystem biomass. Assessing the thermal stability of permafrost landscapes has significant implications for the natural environment and the socio-economic stability in Central Yakutia. The research findings can inform government agencies in territorial development planning and support environmental organizations, businesses, and educational institutions.

Keywords: thermal stability, climate warming, permafrost landscapes, permafrost rocks, active layer, temperature, monitoring

Funding. Field data collection and classification were conducted as part of the research project titled "Thermal field and permafrost in North-East Russia: Formation and dynamics" (No. 122011800062-5). Data analysis and manuscript preparation were supported by the Russian Science Foundation under the project titled "Development of hybrid intelligence methods for solving infrastructure assessment problems in the Far North based on high-performance computing systems" (grant No. 23-61-10032).

Acknowledgements. The authors express their gratitude to Cand. Sci. (Geogr.) Pavel N. Scryabin for his long-term and valuable collaboration in their research.

For citation: Varlamov S.P., Skachkov Yu.B., Fedorov A.N. Assessment of the thermal stability of permafrost landscapes in response to contemporary climate warming: A case study of Central Yakutia. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(3):376–391. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-376-391>

Введение

При активном освоении северных регионов в хозяйственный оборот вовлекаются территории, в пределах которых происходит нарушение компонентов природной обстановки: почвенно-растительного, микрорельефа, режима снеготложения, что отражается на мерзлотных и гидрологических условиях. Это может вызвать развитие криогенных процессов (термокарста, солифлюкции, оврагообразования и др.), в том числе опасных для устойчивости инфраструктурных сооружений. В семидесятые годы прошлого века зарубежные и отечественные исследователи обратили пристальное внимание на проблемы устойчивости поверхности к техногенным воздействиям [1–5] и моделирование температурного режима грунтов в естественных и нарушенных условиях в области распространения многолетней мерзлоты [6–12]. Начиная с 1970-х годов метеорологическими наблюдениями фиксируется потепление климата в Северном полушарии [13, 14]. Оно продолжается более полувека, прогнозируется его развитие в дальнейшем. В связи с этим в последнее время исследователи холодных регионов обратили пристальное внимание на изменение теплового состояния верх-

них горизонтов криолитозоны в естественных условиях, не тронутых хозяйственной деятельностью [15–22].

Цель работы – оценка термической устойчивости мерзлотных ландшафтов Центральной Якутии в условиях усиливающегося потепления климата, начиная с 1970-х годов.

Объектом исследований является литогенная основа мерзлотных ландшафтов.

Оценка термической устойчивости мерзлотных ландшафтов основывается на реальных многолетних данных натурного комплексного мониторинга в Центральной Якутии Института мерзловедения им. П.И. Мельникова СО РАН, организованного на экспериментальных площадках стационаров «Туймаада» и «Чабыда», на мониторинговых полигонах на право- и левобережье р. Лена. Также использовались данные метеостанций по температуре воздуха и почвогрунтов на глубине 1,6 м, характеризующие региональные особенности изменения тепловых характеристик на относительно однородных открытых участках.

Показателями изменения теплового состояния верхней толщ многолетнемерзлых пород (ММП) при колебаниях климата являются среднегодовая температура на подошве деятельного

слоя (T_z), температура в слое годовых теплооборотов (глубина 10 м) (T_0) и мощность деятельного слоя (ξ).

Наблюдательная сеть и методика проведения натурных исследований

Наблюдательные пункты в Центральной Якутии организованы в семи физико-географических районах и охватывают элементарные ландшафтные комплексы девяти типов местности с различными вариациями их литогенной основы (табл. 1, 2), что позволило выявить их многолетнюю динамику в широком спектре природных условий в период 1980–2024 гг.

Для измерения температуры пород использовались термокосы с датчиками температуры на глубинах 0,5; 1; 2; 3; 4; 6; 8; 10; 12; 14; 16; 18 и 20 м.

В качестве регистраторов температуры пород использовались полупроводниковые терморезисторы ММТ-4 с точностью измерений 0,1 °С.

Основные наблюдения проводились на мониторинговых полигонах, с количеством замеров 3–4 раза в год. В пунктах температурных наблюдений после бурения и установки термокосы стволы скважин заполнялись ранее извлеченным грунтом. Анализировались данные по температуре пород на глубине 10 м. Высота снега определялась в декабре и в период максимального снежного накопления (конец марта–начало апреля). Более детальные исследования проводились на стационарах «Чабыда» и «Туймаада», где замеры температуры пород и высоты снежного покрова выполнялись ежемесячно. Термокосы устанавливались стационарно в обсаженных скважинах. Анализи-

Таблица 1

Мониторинговые полигоны в различных ландшафтных комплексах

Table 1

Monitoring sites across various landscape complexes

| Стационар*, полигон | Начало наблюдений, год | Тип местности | Физико-географический район (подрайон) |
|--|------------------------|---------------------------------------|---|
| Чабыда* | 1980 | Мелкодолинный, склоновый | Приленский левобережный песчаниковый |
| Зеленый луг* | 1986 | Пойменный | Приленский долинно-лесостепной |
| Хаптагай, Кердем | 1988 | | |
| Туймаада (Якутск)* | 1969–1980, 1995 | Надпойменно-низкотеррасовый | |
| Ус-Хатын, Хатассы | 2003 | | |
| Шестаковка, Сатагай | 1986 | | |
| Хаптагай, Кердем | 1988 | | |
| Нижняя Лютенга, Менда, Улахан Тарын, Джаптада, Эльген, Тамма | 1987 | Песчано-грядовый, межгрядово-низинный | Бестяхский песчано-грядовый (подрайон Тамма-Мендинский) |
| Тамма | 1987 | Песчано-грядовый, межгрядово-низинный | Бестяхский песчано-грядовый (подрайон Нижнебестяхский) |
| Мыла, Юнкюр | 1993 | | |
| Тамма | 1987 | Мелкодолинный | |
| Мундулах | 1993 | Межаласный, аласный | Тюнгюлюнский аласно-котловинный (подрайон суглинистый) |
| Булуус, Кетюрен | 1987 | Песчано-грядовый, межгрядово-низинный | Тюнгюлюнский аласно-котловинный (подрайон песчано-грядовый) |
| Быльдана, Тарынг | 1987, 1989 | Межаласный, аласный, мелкодолинный | Лено-Амгинский аласно-долинный супесчано-суглинистый |
| Верхняя Лютенга, Кирым | 1995, 2006 | Плакорный, склоновый | Лено-Амгинский пологоволнистый (подрайон песчаниковый) |
| | | Межаласный | Лено-Амгинский пологоволнистый (подрайон суглинистый переходной полигенетической равнины) |
| Маган | 2002 | Межаласный | Кенкеме-Ленский мелкодолинно-аласный |

Экспериментальные площадки (Пл) и скважины (Скв) по типам местности

Experimental sites and boreholes categorized by terrain type

| Номер скважины или площадки | Растительность | Преобладающие виды грунтов |
|------------------------------------|--|----------------------------|
| Надпойменно-низкотеррасовый | | |
| Пл «Луг» | Разнотравный луг | Суглинок, песок |
| Пл «Лес» | Разнотравный сосняк | Суглинок, песок |
| Скв-5/86 | Разнотравный сосново-лиственничник | Супесь, суглинок, песок |
| Песчано-грядовый | | |
| Скв-3/87 | Мертвопокровный сосняк | Песок |
| Скв-22/87 | Брусничный сосново-лиственничник | Супесь, песок |
| Скв-24/87 | Мертвопокровный сосняк | Песок |
| Скв-59/87 | Мертвопокровный сосняк | Песок, супесь |
| Скв-167/89 | Брусничный сосново-лиственничник с ольховым подлеском | Песок |
| Скв-2/93 | Мертвопокровный лиственничник | Супесь, песок |
| Межгрядово-низинный | | |
| Скв-1/87 | Разнотравно-бруснично-багульниковый березово-лиственничник | Песок |
| Скв-5/87 | Сфагново-багульниковый ерник | Торф, песок |
| Скв-39/87 | Сфагново-багульничково-ерниковое лиственничное редколесье | Торф, песок |
| Скв-9/93 | Мохово-багульничково-брусничный лиственничник | Торф, песок |
| Скв-30а | Мохово-голубично-багульниковый лиственничник | Песок |
| Скв-14/93 | Осоковая западина | Песок с прослоями глины |
| Аласный | | |
| Скв-125/87 | Разнотравно-злаковый луг | Суглинок, супесь |
| Скв-127/87 | Осоково-разнотравный луг | Торф, супесь |
| Скв-192/89 | Разнотравно-злаковый березняк | Торф, песок |
| Скв-162/89 | Разнотравно-злаковый луг | Супесь, суглинок |
| Межаласный | | |
| Скв-57/87 | Бруснично-голубичный лиственничник | Супесь, песок |
| Скв-61/87 | Брусничный лиственничник | Суглинок |
| Скв-163/89 | Травяно-брусничный лиственничник с ивово-березовым подлеском | Супесь |
| Скв-185/89 | Мохово-брусничный лиственничник | Песок, супесь |
| Скв-193/89 | Травяно-брусничный березово-лиственничник | Супесь, суглинок |
| Скв-210/90 | Толкнянково-брусничный лиственничник | Песок, супесь |
| Скв-10/93 | Брусничный лиственничник | Суглинок |
| Скв-2/95 | Бруснично-голубично-багульниковый лиственничник | Суглинок |
| Скв-1/03 | Вейничково-березово-лиственничник | Суглинок, супесь, песок |
| Скв-28/08 | Брусничный лиственничник | Суглинок |
| Скв-12/09 | Мохово-брусничный лиственничник | Суглинок |
| Скв-17/09 | Мохово-брусничный лиственничник | Суглинок |
| Скв-39/09 | Брусничный лиственничник | Суглинок |
| Скв-40/09 | Брусничный лиственничник | Суглинок |
| Пойменный | | |
| Скв-168/89 | Разнотравно-злаковый луг | Супесь, песок |
| Мелкодолинный | | |
| Скв-1/82 | Сфагново-осоковый ерник | Торф, песок |
| Пл 8 | Мохово-багульничково-брусничный лиственничник | Песок |
| Пл 3а | Сфагново-багульниковый ерник | Торф, песок |

| Номер скважины или площадки | Растительность | Преобладающие виды грунтов |
|-----------------------------|--|----------------------------|
| Пл 8а | Осоково-вейниковая низина | Торф, песок |
| Скв-11/87 | Сфагново-багульниковый ерник | Торф, суглинок, песок |
| Скв-12/87 | Голубично-брусничный листовенничник с примесью березы | Песок |
| Скв-25/87 | Багульниково-брусничный листовенничник | Песок |
| Скв-174/89 | Зеленомошный елово-лиственничник | Песок |
| Плакорный | | |
| Скв-8/95 | Брусничный листовенничник | Супесь, песок |
| Скв-11/95 | Бруснично-голубичный листовенничник | Супесь, суглинок |
| Склоновый | | |
| Пл 5 | Мертвопокровно-толокнянковый сосняк | Песок |
| Пл 6б | Мертвопокровно-толокнянковый сосняк | Песок |
| Пл 7б | Бруснично-толокнянковый сосняк с примесью листовенницы | Супесь, песок |
| Пл 9 | Брусничный листовенничник | Супесь, суглинок, песок |
| Пл 10 | Брусничный сосняк | Супесь, песок, суглинок |
| Пл 11 | Толокнянковый сосняк | Супесь, песок, суглинок |

ровались данные о температуре пород на подошве деятельного слоя (от 0,5 до 4 м) и на глубинах 3 и 10 м.

Мощность деятельного слоя определялась непосредственно в пунктах наблюдений ручным бурением или металлическим щупом в конце теплого сезона.

Для оценки термических изменений в криолитозоне исследователями часто используются данные метеорологических станций по температуре почвы (до глубины 1,6 и 3,2 м). Массовые наблюдения в бывшем СССР начались еще в 1930–1950-е гг. На севере России к началу 1990-х гг. наблюдения за температурой почвы проводились на 100–110 метеостанциях. Из них 45–50 метеостанций функционировало на территории сплошного распространения криолитозоны и 55–60 метеостанций – на территории ее прерывистого распространения. Наибольший объем наблюдений за температурой почвы в условиях сплошной криолитозоны выполнен в Якутии (45 пунктов) и на Северо-Востоке, а прерывистой криолитозоны – в средней части Западной Сибири, Забайкалье и Приамурье [17]. Регулярные измерения температуры верхнего слоя многолетнемерзлых грунтов на метеостанциях проводились ежегодно с помощью вытяжных термометров (0,2; 0,4; 0,8; 1,6; 2,4; 3,2 м). Анализ этих данных в ряде случаев показал существенные погрешности. Поэтому данные о температуре грунтов,

получаемые на метеостанциях, требуют весьма осторожной интерпретации.

В данной работе привлечены данные наблюдений по 15 метеостанциям (табл. 3). Наблюдательные пункты на метеорологических станциях были организованы на открытых участках. Следует отметить, что с 60-х годов прошлого века по настоящее время из рассматриваемых метеостанций в семи был перенос местоположений. Имеющиеся доступные материалы по температуре почвы имели разный (по длительности) период наблюдений. В период с 1989 по 2023 г. имеются данные только на четырех станциях. Это затрудняло интерпретацию и сравнение результатов наблюдений за температурой почвы.

При оценке эволюции криолитозоны в условиях меняющегося климата представляет интерес сравнение трендов среднегодовой температуры: воздуха ($\alpha T_{\text{воз}}$); многолетнемерзлых пород на подошве деятельного слоя ($\alpha T_{\text{г}}$) и в слое годовых теплооборотов на глубине 10 м ($\alpha T_{\text{г}}$). По пунктам наблюдений рассчитан относительный коэффициент термической устойчивости мерзлых грунтов ($K\alpha = \alpha T_{\text{г}}/\alpha T_{\text{воз}}$), предложенный А. В. Павловым [18]. При значениях $K\alpha < 0,50$ отмечается высокая термическая устойчивость мерзлых грунтов, при $0,5 < K\alpha < 0,75$ – средняя устойчивость и при $0,75 < K\alpha < 1,0$ – слабая устойчивость [19]. Положительные значения коэффициента $K\alpha$, превышающие 1,0 (при условии, когда

Метеорологические станции Центральной Якутии

Table 3

Meteorological stations in Central Yakutia

| № п/п | Наименование станции | Координаты станции | | Высота площадки, м | Перенос станции |
|-------|----------------------|--------------------|---------|--------------------|----------------------|
| | | широта | долгота | | |
| 1 | Сангар | 63°58' | 127°28' | 96 | |
| 2 | Виллойск | 63°47' | 121°37' | 110 | |
| 3 | Верхневиллойск | 63°29' | 120°11' | 115 | |
| 4 | Намцы | 62°44' | 129°40' | 90 | |
| 5 | Ытык-Кюёль | 62°22' | 133°33' | 177 | 1967, 1986, 1994 гг. |
| 6 | Бердигестях | 62°16' | 127°04' | 231 | 1977 г. |
| 7 | Чурапча | 62°02' | 132°36' | 181 | 1967, 2000 г. |
| 8 | Якутск | 62°01' | 129°43' | 98 | 1964 г. |
| 9 | Тонгулах | 61°55' | 124°33' | 199 | 1971 г. |
| 10 | Охотский Перевоз | 61°52' | 135°30' | 140 | |
| 11 | Покровск | 61°29' | 129°09' | 115 | 2001 г. |
| 12 | Амга | 60°58' | 131°57' | 146 | 1968 г. |
| 13 | Иситель | 60°49' | 125°19' | 117 | |
| 14 | Олекминск | 60°24' | 120°25' | 223 | |
| 15 | Усть-Мая | 60°23' | 134°27' | 169 | |

αT_0 значительно превышают $\alpha T_{\text{гг}}$), свидетельствуют о неустойчивости грунта и деградации многолетнемерзлых пород. Отрицательные значения коэффициента $K\alpha$ показывают охлаждение многолетнемерзлых пород в условиях потепления климата, подтверждающие агградационные процессы.

Результаты исследований

Оценка изменений термического состояния литогенной основы мерзлотных ландшафтов Центральной Якутии по результатам натурных наблюдений на стационарах и мониторинговых участках. В пределах исследуемой территории ξ с разным литологическим составом, в зависимости от характера растительного, почвенного покровов и влагосодержания отложений изменяется в больших пределах от 0,4 до 4,2 м, T_0 варьирует от +0,9 до -6,4 °C, а (ΔT_0) от -0,1 до -6,5 °C (табл. 4) [15].

Наиболее высокие температуры грунтов наблюдаются в крупнодисперсных песках, характеризующихся, в зависимости от разнообразия и изменчивости теплофизических свойств (влажности, теплопроводности) покровов и подстилающих песков, наибольшим диапазоном изменения температур. Для песчаных отложений

характерно большое разнообразие ландшафтных урочищ. Наиболее низкая температура пород формируется в торфяных отложениях и суглинках, перекрытых торфом. Эти участки отличаются однообразием поверхностных условий, наименьшим набором урочищ и узким диапазоном изменения температуры. За песками по изменчивости ΔT_0 следуют пески, перекрытые торфом. Пески, перекрытые супесями, супесчано-суглинистые и суглинистые отложения характеризуются узким диапазоном изменения T_0 .

На рис. 1 показана пространственно-временная изменчивость среднегодовой температуры грунтов в слое годовых теплооборотов (глубина 10 м) по девяти типам местности в Центральной Якутии. Разность пространственной изменчивости среднегодовой температуры грунтов на глубине 10 м по типам местности следующая: пойменный - 2,6; надпойменно-низкотеррасовый - 2,0; песчано-грядовый - 3,3; межгрядово-низинный - 3,4; межлассный - 4,5; аласный - 1,3; мелкодолинный - 5,3; склоновый - 2,1 и плакорный - 0,8 °C (см. рис. 1).

Максимальные значения межгодовой изменчивости температуры грунтов (T_0) составляют по типам местности: пойменный - 1,0; надпойменно-низкотеррасовый - 1,1; песчано-грядовый - 1,7;

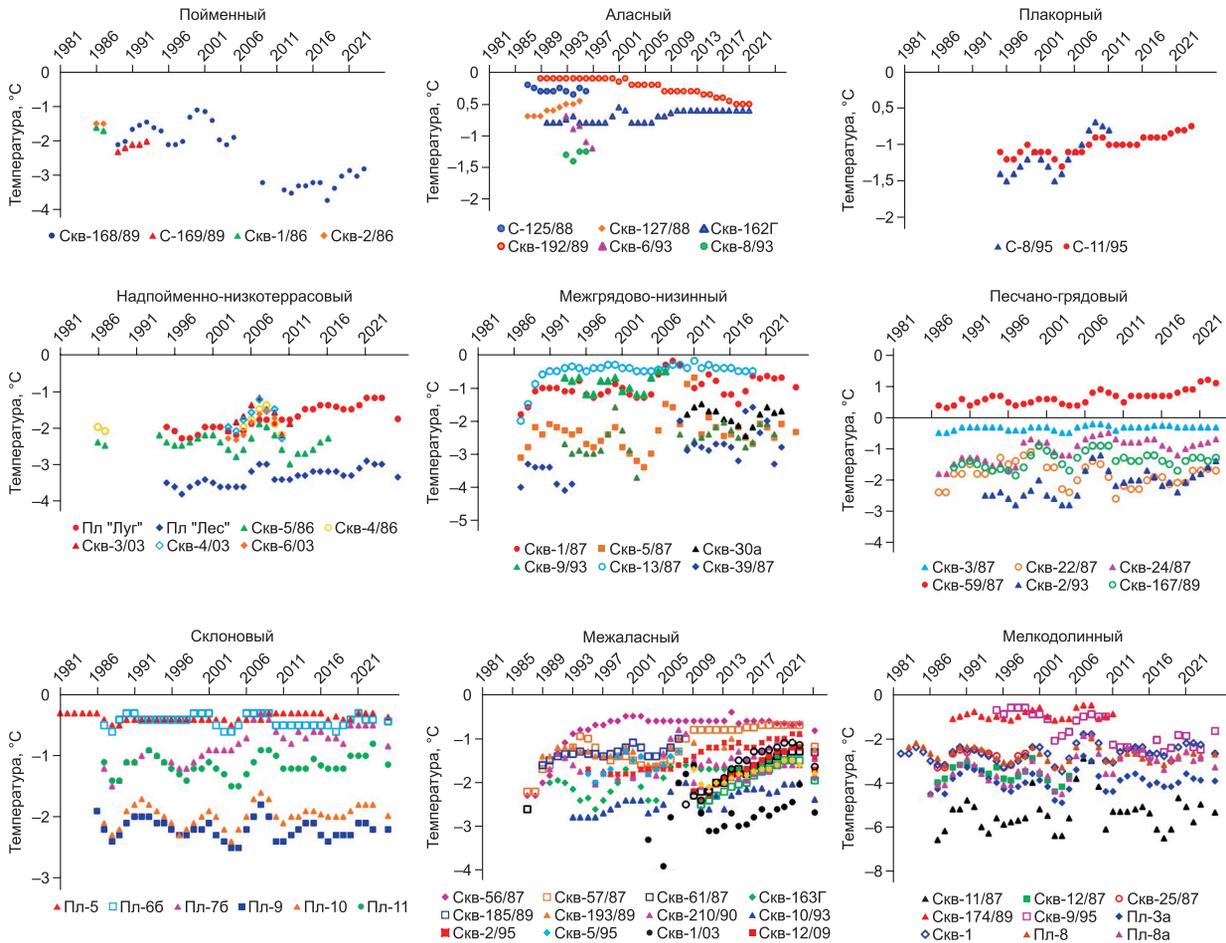


Рис. 1. Динамика среднегодовой температуры грунтов на глубине 10 м по типам местности в Центральной Якутии
Fig. 1. Dynamics of the mean annual ground temperature at a depth of 10 m by terrain type in Central Yakutia

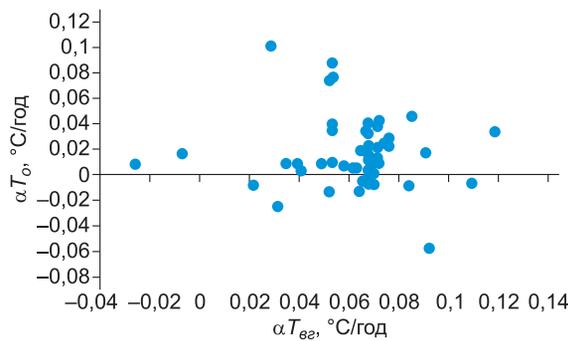


Рис. 2. Зависимость тренда температуры грунтов на глубине 10 м (αT_0 , °C/год) и тренда среднегодовой температуры воздуха ($\alpha T_{вз}$, °C/год)

Fig. 2. Dependence of the trend in ground temperature at a depth of 10 m (αT_0 , °C/year) and the trend of the mean annual air temperature ($\alpha T_{вз}$, °C/year)

межгрядово-низинный – 2,7; межаласный – 3,5; аласный – 0,4; мелкодолинный – 3,7; склоновый – 1,1 и плакорный – 0,8 °C (см. рис. 1).

Тренды среднегодовой температуры в слое годовых теплооборотов как показателя отклика на потепление климата (αT_0), в Центральной Якутии по типам местности распределены следующим образом: положительные – в межаласном (0,0086–0,1009 °C/год), в плакорном (0,0134–0,0428 °C/год); преимущественно положительные – в песчано-грядовом (–0,0069–0,0287 °C/год), в межгрядово-низинном (–0,0571–0,0176 °C/год), в мелкодолинном (–0,0246–0,0339 °C/год), в склоновом (–0,0028–0,0222 °C/год); отрицательные и положительные – в надпойменно-низкотеррасовом (–0,0087–0,0378 °C/год) и преимущественно отрицательные – в аласном (–0,0132–0,0342 °C/год). При этом отрицательные тренды часто встречаются в менее дренированных типах местности (аласном, мелкодолинном), приуроченных к отрицательным формам рельефа (табл. 5). Не выявлено четкой эмпирической зависимости

между трендами αT_0 и среднегодовой температурой воздуха ($\alpha T_{\text{вз}}$) (рис. 2).

Наибольшие значения мощности деятельного слоя присущи крупнодисперсным пескам. В то же время они характеризуются, в зависимости от поверхностных условий (растительного и напочвенного покровов) и изменчивости их свойств (влажности, теплопроводности), наибольшим диапазоном его изменения. За песками по изменчивости $\Delta\xi$ и значениям ξ следуют супеси, перекрытые песками, и суглинки, перекрытые супесями. Наименьшими значениями мощности деятельного слоя характеризуются торф (0,4–0,5 м) и минеральные грунты, перекрытые торфом (0,4–1,2 м). Мощность деятельного слоя в супесях и суглинках изменяется соответственно в пределах 1,3–2,5 и 0,9–2,0 м.

Пространственно-временная изменчивость мощности деятельного слоя (рис. 3) и межгодовая ее изменчивость (рис. 4) по девяти типам местности соответственно составляют: пойменный – 0,56 (0,56); надпойменно-низкотеррасовый – 0,47 (0,39); песчано-грядовый – 1,24 (1,18); межгрядово-низинный – 0,89 (0,76); межаласный – 1,25 (0,97); аласный – 0,98; мелкодолинный – 2,41 (1,03); склоновый – 2,59 (0,6) и плакорный – 1,30 (1,30) м (см. рис.3 и 4).

Преимущественно отрицательные тренды мощности деятельного слоя ($\alpha\xi$) характерны для дренированных песчано-грядового (–2,81–0,73 см/год) и склонового (–1,16–0,43 см/год) типов местности; преимущественно положительные – в надпойменно-низкотеррасовом (–0,19–0,32 см/год), в межгрядово-низинном (–2,72–0,60 см/год), в межаласном (–1,29–6,00 см/год), в мелкодолинном (–0,25–1,09 см/год). При этом зависимость между трендами мощности деятельного слоя ($\alpha\xi$, см/год) и суммы положительных среднемесячных температур воздуха ($\alpha\Sigma T_{\text{вл}}$, °C/сезон) в дренированных типах местности (песчано-грядовом, межаласном, плакорном и склоновом) имеет обратный характер. В недренированных (мелкодолинном, межгрядово-низинном, пойменном и надпойменно-низкотеррасовом) типах местности – прямой (см. рис. 4).

По данным многолетних наблюдений за тепловым состоянием грунтов естественных ландшафтов по типам местности по пунктам наблюдений рассчитаны: экстремумы и средние многолетние значения мощности деятельного слоя (ξ), среднегодовой температуры грунтов на глубине 10 м (T_0), их тренды (α) и термическая устойчивость ($K\alpha$) (см. табл. 5).

Таблица 4

Среднегодовые температуры грунтов (T_0) и пределы их изменчивости (ΔT_0) в зависимости от состава грунтов в сезоннопротаивающем слое [16]

Table 4

The mean annual ground temperatures (T_0) and the limits of their variability (ΔT_0), depending on their composition in the active layer [16]

| Состав грунта | T_0 , °C | ΔT_0 , °C |
|------------------------------|-------------|-------------------|
| Пески | –4,4...0,9 | 5,3 |
| Пески, перекрытые супесями | –3,8...–1,1 | 2,7 |
| Пески, перекрытые суглинками | –1,4 | – |
| Пески, перекрытые торфом | –3,5...–0,1 | 3,4 |
| Супеси | –3,8...–0,7 | 3,1 |
| Супеси, перекрытые песками | –2,6...–0,1 | 2,5 |
| Супеси, суглинки | –2,7...–0,8 | 1,9 |
| Суглинки | –2,3...–0,2 | 2,1 |
| Суглинки, перекрытые торфом | –6,4...–3,7 | 2,7 |
| Торф | –4,5...–3,3 | 1,2 |

Отрицательные значения коэффициента $K\alpha$, встречающиеся в большинстве типов местности за исключением плакорного и межаласного, показывают охлаждение ММП, несмотря на потепление климата.

Положительные значения коэффициента $K\alpha$, превышающие 1,0, отмечаются, когда тренды повышения среднегодовой температуры грунтов равны и превышают тренды роста среднегодовой температуры воздуха. Это свидетельствует о деградации многолетнемерзлых пород.

Оценка изменений термического состояния грунтов деятельного слоя на открытых участках по данным метеостанций. По данным ряда метеостанций нами рассчитаны коэффициенты термической устойчивости грунтов на глубине 1,6 м (рис. 6). По наблюдаемым относительно однородным открытым площадкам $K\alpha$ изменяется в пределах от 0,123 до +3,0. Из рассматриваемых 15 метеостанций в семи грунты деятельного слоя относятся к деградируемым (неустойчивым) грунтам. Из этих семи метеостанций в четырех наблюдаемые площадки переносились. К грунтам с высокой термической устойчивостью относятся почвогрунты метеостанций Исить, Намцы, Охотский Перевоз и Якутск. Средней термической устойчивостью грунтов характеризуются площадки метеостанций Пок-

Экстремумы и средние многолетние значения мощности деятельного слоя (ξ), среднегодовой температуры грунтов на глубине 10 м (T_0), их тренды (α) и термическая устойчивость ($K\alpha$) мерзлых толщ по типам местности

Table 5

Extremes and long-term average values of active layer thickness (ALT) (ξ), mean annual ground temperature at a depth of 10 m (T_0), their trends (α), and the thermal stability ($K\alpha$) of permafrost by terrain types

| Номер скважины или площадки | Период наблюдений | Межгодовая изменчивость | | Тренды: $\alpha\xi$ и αT_0 | | Термическая устойчивость мерзлых толщ $K\alpha = \alpha T_0 / \alpha T_{вг}$ |
|------------------------------------|-------------------------|------------------------------------|--|------------------------------------|-----------------------|---|
| | | ξ , м | T_0 , °C | $\alpha\xi$, см/год | αT_0 , °C/год | |
| Надпойменно-низкотеррасовый | | | | | | |
| Пл «Луг» | 1995–2023 | <u>1,82–1,97</u> 1,87 (27) | <u>–2,3...–1,2</u> –1,77 (29) | 0,32 | 0,0378 | 0,53 |
| Пл «Лес» | 1995–2023 | <u>1,70–1,90</u> 1,84 (27) | <u>–3,8...–2,9</u> –3,33 (29) | 0,07 | 0,0213 | 0,30 |
| Скв-5/86 | 1994–2016, 1986–2016 | <u>1,66–2,05</u> 1,92 (25) | <u>–3,0...–1,9</u> –2,42 (22) | –0,19 | –0,0087 –0,0049 | –0,10 –0,07 |
| Песчано-грядовый | | | | | | |
| Скв-3/87 | 1987–2023 | <u>3,48</u> – | <u>–0,5...–0,2</u> –0,33 (37) | – | 0,0032 | 0,05 |
| Скв-22/87 | 1987–2023 | <u>1,64–2,50</u> 1,85 (16) | <u>–2,6...–0,9</u> –1,82 (37) | –2,29 | –0,0069 | –0,10 |
| Скв-24/87 | 1987–2023 | <u>1,80–3,08</u> 2,41 (15) | <u>–1,8...–0,5</u> –1,04 (37) | –2,81 | 0,0234 | 0,35 |
| Скв-59/87 | 1987–2023 | – | <u>0,3...1,2</u> 0,65 (37) | – | 0,0155 | 0,23 |
| Скв-167/89 | 1989–2023 | <u>1,50–1,96</u> 1,73 (16) | <u>–1,9...–0,9</u> –1,37 (34) | 0,73 | 0,0069 | 0,12 |
| Скв-2/93 | 1993–2023 | <u>1,14–1,80</u> 1,48 (12) | <u>–2,8...–1,2</u> –2,13 (31) | –1,62 | 0,0287 | 0,38 |
| Межгрядово-низинный | | | | | | |
| Скв-1/87 | 1987–2023 | <u>0,85–1,61</u> 1,23 (19) | <u>–1,8...–0,2</u> –0,98 (37) | 0,48 | 0,0143 | 0,21 |
| Скв-5/87 | 1987–2023 | <u>0,40–1,17</u> 0,75 (19) | <u>–3,4...–0,7</u> –2,34 (37) | 0,03 | 0,122 | 0,18 |
| Скв-39/87 | 1987–1994, 2009–2023 | <u>0,31–1,15</u> 0,75 (21) | <u>–4,1...–3,3</u> –3,67 (8) <u>–3,3...–1,6</u> –2,56 (15) | 0,60 | –0,0571 0,0096 | 0,62 0,10 |
| Скв-9/93 | 1993–2003, 2009–2022 | – <u>0,90–1,15</u> 1,03 (14) | <u>–3,7...–1,6</u> –2,76 (11) <u>–2,8...–2,1</u> –2,41 (14) | – –1,04 | 0,0055 0,0176 | 0,09 0,19 |
| Скв-30a | 2010–2023 | <u>0,94–1,35</u> 1,13 (15) | <u>–2,5...–1,5</u> –1,85 (14) | –2,72 | –0,0139 | –0,27 |
| Скв-14/93 | 1993–2007 | 0,78 | <u>–1,2...–0,5</u> –0,87 (15) | – | 0,0089 | 0,25 |
| Аласный | | | | | | |
| Скв-125/87 | 1987–1996 | 2,00 | <u>–0,35...–0,2</u> –0,28 (10) | – | –0,0067 | –0,06 |
| Скв-127/87 | 1987–1995 | 2,86 | <u>–0,7...–0,45</u> –0,59 (9) | – | 0,0342 | 0,29 |

| Номер скважины или площадки | Период наблюдений | Межгодовая изменчивость | | Тренды: $\alpha\zeta$ и αT_{σ} | | Термическая устойчивость мерзлых толщ |
|--------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|---|---|------------------------------|--|
| | | ζ , м | T_{σ} , °C | $\alpha\zeta$, см/год | αT_{σ} , °C/год | $K\alpha = \alpha T_{\sigma} / \alpha T_{\text{вг}}$ |
| СКВ-192/89 | 1989–2008, 1989–2020 | 1,84–1,92 | $\underline{-0,5...-0,1}$ -0,20 (26) | – | -0,0079 -0,0132 | -0,36 -0,21 |
| СКВ-162/89 | 1990–2021, 1990–2008 | 1,88–2,15 | $\underline{-0,8...-0,6}$ -0,72 (25) | – | 0,0073 0,0037 | 0,11 0,09 |
| Межаласный | | | | | | |
| СКВ-57/87 | 1987–2023 | 1,33–1,83 1,57 (17) | $\underline{-2,2...-0,7}$ -1,18 (37) | 0,07 | 0,0321 | 0,47 |
| СКВ-61/87 | 2010–2023, 1987–2023 | $\underline{1,12-1,77}$ 1,44 (11) | $\underline{-2,2...-1,3}$ -1,76 (15) | 0,51 | 0,0739 0,0400 | 1,42 0,59 |
| СКВ-163/89 | 1990–2020 | $\underline{1,27-2,03}$ 1,70 (5) | $\underline{-2,6...-1,4}$ -1,90 (31) | 0,98 | 0,0249 | 0,34 |
| СКВ-185/89 | 1989–2007 | 1,98 | $\underline{-1,6...-1,0}$ -1,32 (19) | – | 0,0167 | 2,39 |
| СКВ-193/89 | 1989–2016 | $\underline{1,13-1,81}$ 1,63 (8) | $\underline{-1,6...-0,9}$ -1,27 (28) | -1,29 | 0,0086 | 0,18 |
| СКВ-210/90 | 1990–2023 | $\underline{1,53-1,83}$ 1,65 (17) | $\underline{-2,1...-0,8}$ -1,46 (34) | -0,23 | 0,0186 | 0,29 |
| СКВ-10/93 | 1993–2023 | $\underline{1,25-1,86}$ 1,55 (17) | $\underline{-2,8...-2,0}$ -2,39 (31) | -0,39 | 0,0228 | 0,30 |
| СКВ-2/95 | 1995–2023 | $\underline{1,24-1,90}$ 1,51 (8) | $\underline{-2,0...-0,9}$ -1,42 (29) | 1,25 | 0,0382 | 0,54 |
| СКВ-1/03 | 2003–2023 | $\underline{1,01-2,00}$ 1,28 (19) | $\underline{-5,1...-2,1}$ -2,80 (21) | -2,78 | 0,0456 | 0,54 |
| СКВ-28/08 | 2008–2023 | $\underline{0,78-1,75}$ 1,34 (14) | $\underline{-2,5...-1,1}$ -1,65 (16) | 6,00 | 0,1009 | 3,54 |
| СКВ-12/09 | 2009–2023 | $\underline{0,82-1,43}$ 1,12 (17) | $\underline{-2,4...-1,2}$ -1,71 (15) | 3,00 | 0,0875 | 1,64 |
| СКВ-17/09 | 2009–2023 | $\underline{0,77-1,42}$ 1,02 (17) | $\underline{-2,5...-1,5}$ -1,95 (15) | 2,66 | 0,0761 | 1,43 |
| СКВ-39/09 | 2009–2023 | $\underline{0,68-1,31}$ 1,04 (16) | $\underline{-2,1...-1,6}$ -1,84 (15) | 2,42 | 0,0395 | 0,74 |
| СКВ-40/09 | 2009–2023 | $\underline{0,73-1,41}$ 1,20 (15) | $\underline{-2,1...-1,5}$ -1,78 (15) | 3,61 | 0,0355 | 0,67 |
| Пойменный | | | | | | |
| СКВ-168/89 | 1989–2005, | $\underline{1,40-1,96}$ 1,66 (10) | $\underline{-2,1...-1,1}$ -1,71 (17) | -1,11 | 0,0085 | -0,33 |
| | 2009–2023 | – | $\underline{-3,5...-2,8}$ -2,22 (12) | – | 0,0347 | 0,65 |
| Мелкодолинный | | | | | | |
| СКВ-1/82 | 1982–2023 | $\underline{0,81-1,30}$ 1,06 (43) | $\underline{-3,5...-1,8}$ -2,67(42) | 0,12 | 0,0091 | 0,13 |
| Пл 8 | 1983–2023 | $\underline{0,86-1,37}$ 1,17 (41) | $\underline{-3,3...-1,9}$ -2,74 (41) | 0,20 | -0,0071 | -0,10 |
| Пл 3а | 1986–2023 | $\underline{0,37-0,53}$ 0,47 (37) | $\underline{-4,9...-2,8}$ -3,94 (38) | 0,29 | 0,0031 | 0,05 |
| Пл 8а | 1986–2023 | $\underline{0,65-1,45}$ 1,02 (37) | $\underline{-3,6...-1,8}$ -3,29 (38) | -0,25 | 0,0339 | 0,50 |
| СКВ-11/87 | 1987–2023 | $\underline{0,47-1,50}$ 0,68 (22) | $\underline{-6,6...-2,9}$ -5,35 (37) | -0,12 | 0,0113 | 0,17 |

| Номер скважины или площадки | Период наблюдений | Межгодовая изменчивость | | Тренды: $\alpha\zeta$ и αT_o | | Термическая устойчивость мерзлых толщ |
|--------------------------------|----------------------|-------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|---|
| | | ζ , м | T_o , °C | $\alpha\zeta$, см/год | αT_o , °C/год | $K\alpha = \alpha T_o / \alpha T_{вг}$ |
| Скв-12/87 | 1987–2005 | <u>0,88–1,35</u> 1,12 (6) | <u>–4,4...–2,9</u> –3,62 (19) | 1,09 | –0,0246 | –0,78 |
| Скв-25/87 | 1987–1999 | <u>1,05–1,24</u> 1,12 (3) | <u>–3,3...–2,5</u> –2,85 (13) | – | 0,0060 | 0,10 |
| Скв-174/89 | 1989–2011 | <u>2,78</u> – | <u>–1,2...–0,5</u> –0,93 (23) | – | 0,0089 | 0,23 |
| Плакорный | | | | | | |
| Скв-8/95 | 1995–2011 | <u>1,45</u> – | <u>–1,5...–0,7</u> –1,16 (17) | – | 0,0428 | 0,59 |
| Скв-11/95 | 1995–2023 | <u>1,35–2,65</u> 1,90 (16) | <u>–1,3...–0,7</u> –1,01 (29) | 3,42 | 0,0134 | 0,19 |
| Склоновый | | | | | | |
| Пл 5 | 1981–2023 | <u>3,26–3,86</u> 3,50 (42) | <u>–0,5...–0,3</u> –0,37 (43) | –0,60 | 0,0010 | 0,01 |
| Пл 66 | 1987–2023 | <u>3,54–4,11</u> 3,76 (38) | <u>–0,6...–0,3</u> –0,43 (37) | –1,16 | –0,0015 | –0,02 |
| Пл 76 | 1987–2023 | <u>1,70–2,00</u> 1,88 (38) | <u>–1,5...–0,3</u> –0,84 (37) | 0,18 | 0,0222 | 0,33 |
| Пл 9 | 1986–2023 | <u>1,31–1,72</u> 1,52 (39) | <u>–2,5...–1,8</u> –2,20 (38) | –0,11 | –0,0028 | –0,04 |
| Пл 10 | 1987–2023 | <u>1,63–2,18</u> 1,93 (39) | <u>–2,4...–1,6</u> –1,98 (37) | 0,43 | 0,0049 | 0,07 |
| Пл 11 | 1987–2023 | <u>1,73–2,27</u> 1,90 (39) | <u>–1,5...–0,8</u> –1,15 (37) | –0,21 | 0,0047 | 0,07 |

Примечание. В числителе – экстремумы, в знаменателе – средние многолетние значения, в скобках – количество рядов наблюдений (лет).

Note. The numerator represents the extremes, the denominator shows the long-term average values, and the number of observation series (years) is indicated in parentheses.

ровск (переносилась) и Сангар. На площадках Амга и Крест-Хальджай грунты деятельного слоя отмечаются понижением температуры, т. е. охлаждающим эффектом. Отметим, что данные метеостанций Бердигестях, Верхневиллойск, Тонгулах, Чурапча и Ытык-Кюель по температуре грунтов на глубине 1,6 м подтверждают существенное повышение температуры грунтов деятельного слоя.

Интересно сравнение коэффициентов термической устойчивости грунтов на подошве деятельного слоя и на разных глубинах (3 и 10 м) слоя годовых теплооборотов по данным стационаров «Туймаада» и «Чабыда» за длительный период наблюдений, соответственно 29 и 39–43 года (табл. 7).

На стационаре «Туймаада» на открытых луговых комплексах супесчано-песчаные грунты на

подошве деятельного слоя (1,8–2,0 м) отличаются слабой термической устойчивостью ($K\alpha = 0,98$), постепенно переходя в среднеустойчивое состояние на глубине 10 м ($K\alpha = 0,60$). В лесных комплексах в этих же типах грунтов термическое состояние на подошве деятельного слоя (аналогичная глубина) с среднеустойчивого ($K\alpha = 0,68$) переходит на глубине 10 м в высокоустойчивое ($K\alpha = 0,35$).

На территории стационара «Чабыда» литогенная основа природных комплексов, представленная песчаными отложениями, на подошве деятельного слоя характеризуется стабильно высокой термической устойчивостью. Здесь исключение составляют участки со средней термической устойчивостью расположенные в низинах, часто затопливаемых тальми водами (см. табл. 7, Пл-8а), и участки с отрицательной термической устойчи-

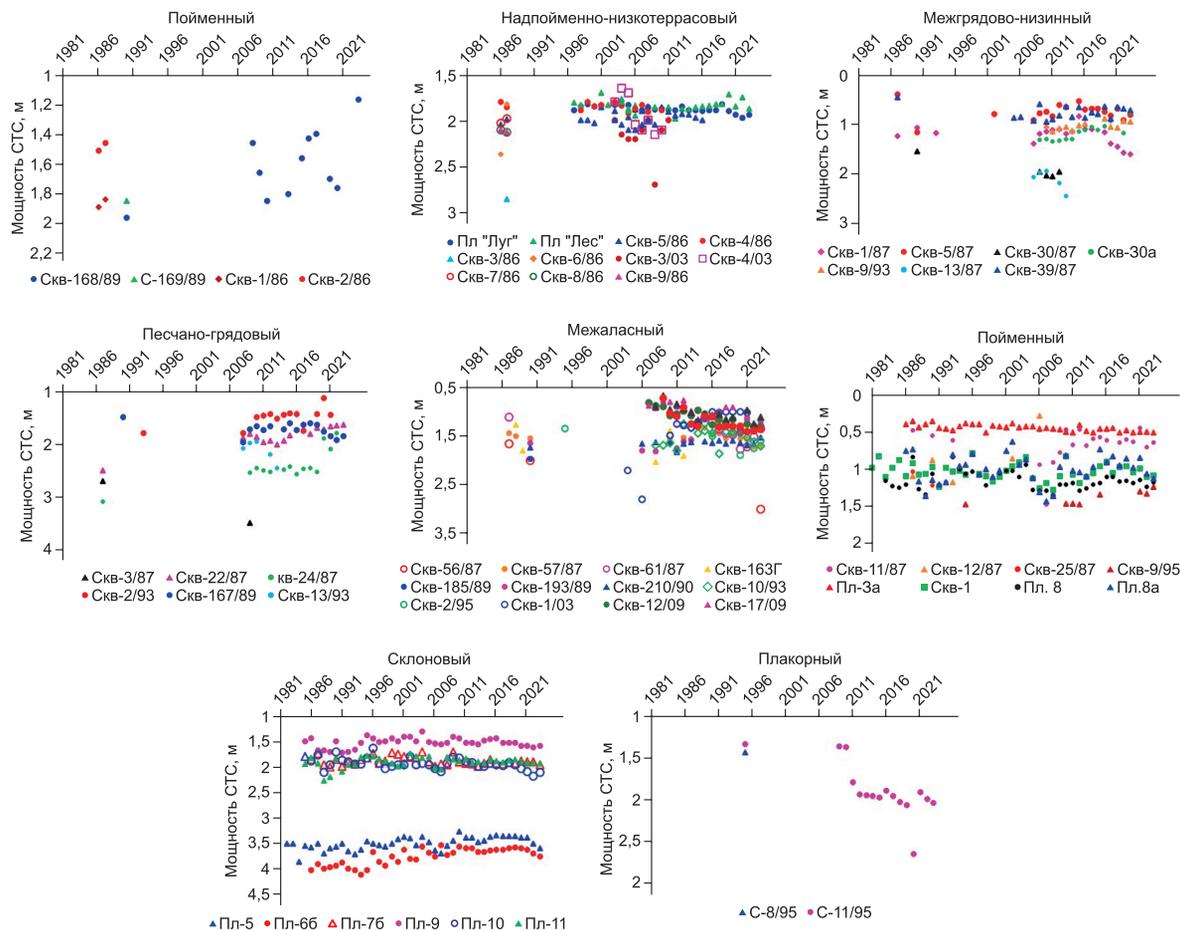


Рис. 3. Динамика мощности деятельного слоя по типам местности в Центральной Якутии

Fig. 3. Dynamics of active layer thickness by terrain type in Central Yakutia

востью ($K\alpha = -0,11$) расположенные на приводораздельных склонах с брусничным лиственничником, где с потеплением климата происходит увеличение биомассы и соответственно повышение затеняющей роли леса (см. табл. 7, Пл-9). В слое годовых теплооборотов на глубине 3 м $K\alpha$ стабильно высокий на всех площадках, за исключением площадки 8а. На глубине 10 м в условиях потепления климата (44-летний период) грунты характеризуются высокой термической устойчивостью. На некоторых площадках (см. табл. 7, площадки 8, 6б и 9) $K\alpha$ даже имеют отрицательные значения.

Заклучение

Для рассматриваемого региона количественно оценена реакция теплового состояния верхних горизонтов ММП на современное потепление климата, определяемого совокупным влиянием

повышения температуры воздуха и основных параметров мерзлотных ландшафтов (растительного, напочвенного и снежного покровов, состава отложений).

Несмотря на существенное потепление современного климата Центральной Якутии, динамика термического состояния многолетнемерзлых пород в естественных ландшафтах имеет разнонаправленную тенденцию, объясняемую в основном большой межгодовой изменчивостью режима снегонакопления и увеличением биомассы ландшафтов. В годы значительного уменьшения мощности снежного покрова (особенно в начальный период его формирования) происходит переохлаждение грунтовой толщи, что нивелирует общую тенденцию к потеплению.

Последние десятилетия реакция температуры грунтов, в зависимости от ландшафтных условий, характеризуется преимущественно высокой

Таблица 6

**Термическая устойчивость почвы на глубине 1,6 м
по данным метеостанций для разных периодов**

Table 6

**Thermal stability of soil at a depth of 1.6 m
according to weather station data over various time periods**

| Метеостанция | Коэффициент термической устойчивости ($K\alpha = \alpha T_{1,6} / \alpha T_{\text{вз}}$) | | | | | |
|------------------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | Период | $K\alpha$ | Период | $K\alpha$ | Период | $K\alpha$ |
| Амга | 1966–2006 | –0,41 | 1966–1988 | –1,23 | 1989–2006 | –0,08 |
| Бердигестях | 1965–1994 | 1,93 | 1966–1988 | 3,00 | – | – |
| Верхневиллойск | 1958–1997 | 1,06 | 1966–1988 | 1,76 | – | – |
| Виллойск | 1964–2023 | 0,08 | 1966–1988 | 2,62 | 1989–2023 | –0,09 |
| Иситель | 1957–1997 | 0,09 | 1966–1988 | 0,40 | – | – |
| Крест-Хальджай | 1961–1989 | –1,24 | 1966–1988 | –0,81 | – | – |
| Намцы | 1966–1996 | 0,58 | 1966–1988 | 0,46 | – | – |
| Олекминск | 1966–2023 | 0,45 | 1966–1988 | 1,47 | 1989–2023 | 1,17 |
| Охотский Перевоз | 1956–2007 | 0,27 | 1966–1988 | 0,33 | – | – |
| Покровск | 1931–1996 | 2,48 | 1966–1988 | 0,75 | – | – |
| Сангар | 1964–1997 | 0,81 | 1966–1988 | 0,54 | – | – |
| Тонгулах | 1964–1988 | 1,59 | 1966–1988 | 1,48 | – | – |
| Чурапча | 1959–1996 | 1,89 | 1966–1988 | 1,38 | – | – |
| Ытык-Кюель | 1958–1990 | 1,63 | 1966–1988 | 1,44 | – | – |
| Якутск | 1965–2023 | 0,51 | 1966–1988 | 0,37 | 1989–2023 | 0,47 |

Примечание. Метеостанции, где был перенос местоположения: Амга (1968 г.), Бердигестях (1977 г.), Покровск (2001 г.), Тонгулах (1971 г.), Чурапча (1967, 2000 гг.), Ытык-Кюель (1967, 1986, 1994 гг.).

Note. The meteorological stations that underwent location changes are as follows: Amga (1968), Berdigestyakh (1977), Pokrovsk (2001), Tongulakh (1971), Churapcha (1967 and 2000), and Ytyk-Kuyuel (1967, 1986, and 1994).

Таблица 7

**Термическая устойчивость почвы на подошве деятельного слоя (ξ) и грунтов
на глубинах 3 и 10 м по данным стационаров «Туймаада» и «Чабыда»**

Table 7

**Thermal stability of the soil at the bottom of the active layer (ξ) and of the ground
at depths of 3 m and 10 m, according to data from the Tuymaada and Chabyda stations**

| Площадка | Период наблюдений | Коэффициент термической устойчивости $K\alpha = \alpha T_{\text{г}} / \alpha T_{\text{в}}$ | | |
|----------------------|-------------------|--|----------------|-----------------|
| | | на подошве ξ | на глубине 3 м | на глубине 10 м |
| Стационар «Туймаада» | | | | |
| Пл-«Луг» | 1995/96–2023/24 | 0,98 | 0,92 | 0,60 |
| Пл-«Лес» | 1995/96–2023/24 | 0,68 | 0,55 | 0,35 |
| Стационар «Чабыда» | | | | |
| Скв-1 | 1981/82–2023/24 | 0,13 | 0,16 | 0,14 |
| Пл-3а | 1986/87–2023/24 | 0,43 | 0,13 | 0,03 |
| Пл-8а | 1986/87–2023/24 | 0,70 | 0,58 | 0,50 |
| Пл-8 | 1982/83–2023/24 | 0,14 | 0,04 | –0,10 |
| Пл-5 | 1981/82–2023/24 | 0,07 | 0,12 | 0,02 |
| Пл-6б | 1986/87–2023/24 | 0,01 | 0,12 | –0,02 |
| Пл-7б | 1986/87–2023/24 | 0,15 | 0,19 | 0,19 |
| Пл-9 | 1985/86–2023/24 | –0,11 | 0,08 | –0,04 |
| Пл-10 | 1986/87–2023/24 | 0,19 | 0,17 | 0,08 |
| Пл-11 | 1986/87–2023/24 | 0,17 | 0,02 | 0,08 |

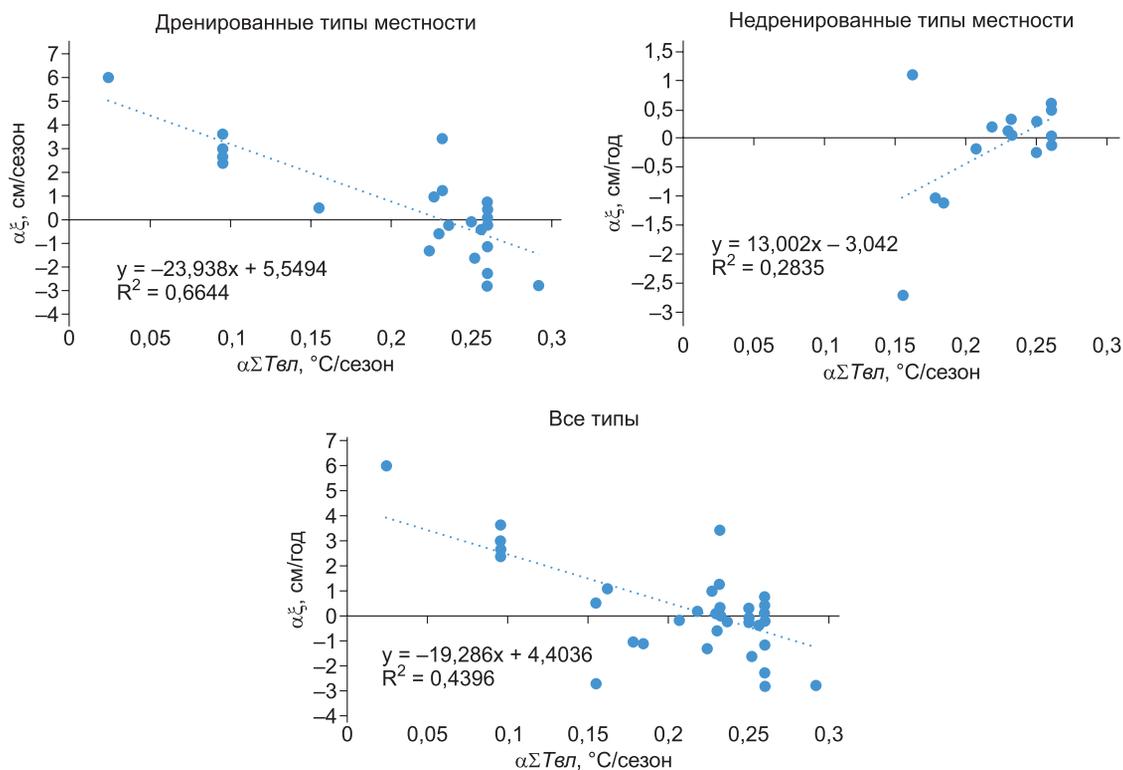


Рис. 4. Зависимость тренда мощности деятельного слоя ($\alpha\xi$, см/год) и тренда суммы положительных месячных температур воздуха ($\alpha\Sigma T_{вл}$, °C/сезон) в дренированных, недренированных и целом во всех типах местности

Fig. 4. Dependence of the trend in the active layer thickness ($\alpha\xi$, cm/year) and the trend in the sum of positive monthly air temperatures ($\alpha\Sigma T_{вл}$, °C/season) in drained, undrained, and overall terrain types

и средней термической устойчивостью. Однако на локальных участках наблюдаются как агрегационные, так и деградационные процессы. Понижение температуры грунтов в основном связано с режимом снегонакопления и увеличением биомассы природных комплексов, приуроченных к отрицательным формам рельефа. Наиболее интенсивно выраженная деградация мерзлых толщ (интенсивные просадки поверхности) отмечается на участках с близко залегающими подземными льдами, где происходит активизация термокарста.

Мощность деятельного слоя в естественных ландшафтах является преимущественно достаточно стабильной величиной и характеризуется малой межгодовой изменчивостью. Тенденция возрастания мощности деятельного слоя статистически незначимая. В то же время локально встречаются участки со значимой тенденцией как возрастания, так и уменьшения его мощности, связанные с теми же факторами, что и температура пород.

Критерии устойчивости мерзлотных ландшафтов, впервые приводимые в работе, несомненно

будут использоваться при картировании и прогнозе состояния природной среды.

Список литературы / References

1. Мельников П.И. Задачи охраны окружающей среды и освоения области многолетнемерзлых пород. *Вестник Академии наук СССР*. 1976;(10):37–45.
Melnikov P.I. Tasks of environmental protection and development of the permafrost area. *Herald of the USSR Academy of Sciences*. 1976;(10):37–45. (In Russ.)
2. Berger T.R. *Northern frontier, northern homeland: the report of the Mackenzie Valley Pipeline Inquiry. V. 1.* Ottawa: Supply and Services Canada; 1977. 213 p.
3. Berger T.R. *Northern frontier, northern homeland. Report of the Mackenzie Valley Pipeline Inquiry. V. 2.* Ottawa: Supply and Services Canada; 1977. 268 p.
4. Eedy W. *Environmental cause/effect phenomena relating to technological development in the Canadian Arctic.* Ottawa: National Research Council of Canada, NRC Associate Committee on Scientific Criteria for Environmental Quality; 1974. 125 p.
5. Браун Дж., Граве Н.А. *Нарушение поверхности и ее защита при освоении Севера.* Новосибирск: Наука; 1981. 88 с.
Brown J., Grave N.A. *Surface disturbance and its protection during the development of the North.* Novosibirsk: Nauka; 1981. 88 p. (In Russ.)
6. Павлов А.В. *Теплообмен почвы с атмосферой в северных и умеренных широтах территории СССР.* Якутск: Кн. изд-во; 1975. 302 с.

- Pavlov A.V. *Heat exchange between soil and atmosphere in high and mid-latitudes of the USSR*. Yakutsk: Knizhnoe izdatel'stvo; 1975. 302 p. (In Russ.)
7. Павлов А.В. *Теплофизика ландшафтов*. Новосибирск: Наука; 1979. 285 с.
- Pavlov A.V. *Thermal physics of landscapes*. Novosibirsk: Nauka; 1979. 285 p. (In Russ.)
8. Фельдман Г.М. *Методы расчета температурного режима мерзлых грунтов*. М.: Наука; 1973. 251 с.
- Feldman G.M. *Methods for calculating the temperature regime of frozen soils*. Moscow: Nauka; 1973. 251 p. (In Russ.)
9. Rosswall T., Heal O.W. Structure and function of tundra ecosystems. *Ecological Bulletins N. 20*, Stockholm: Swedish Natural Science Research Council; 1975. 450 p.
10. Фельдман Г.М. *Прогноз температурного режима грунтов и развития криогенных процессов*. Новосибирск: Наука; 1977. 191 с.
- Feldman G.M. *Forecast of soil temperature regime and development of cryogenic processes*. Novosibirsk: Nauka; 1977. 191 p. (In Russ.)
11. Гречищев С.Е., Чистотинов Л.В., Шур Ю.Л. *Криогенные физико-геологические процессы и их прогноз*. М.: Недра; 1980. 384 с.
- Grechishchev S.E., Chistotinov L.V., Shur Yu.L. *Cryogenic physico-geological processes and their forecast*. Moscow: Nedra; 1980. 384 p. (In Russ.)
12. Фельдман Г.М., Тетельбаум А.С., Шендер Н.И., Гаврильев Р.И. *Пособие по прогнозу температурного режима грунтов Якутии*. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР; 1988. 240 с.
- Feldman G.M., Tetelbaum A.S., Shender N.I., Gavriliev R.I. *Handbook on the forecast of the temperature regime of the soils of Yakutia*. Yakutsk: Permafrost Institute; 1988. 240 p. (In Russ.)
13. Бudyko М.И., Гройсман П.Я. Потепление 80-х годов. *Метеорология и гидрология*. 1989;(3):5–10.
- Budyko M.I., Groisman P.Ya. The warming of the 80s. *Russian Meteorology and Hydrology*. 1989;(3):5–10. (In Russ.)
14. Кондратьев К.Я. *Глобальный климат*. СПб.: Наука; 1992. 359 с.
- Kondratiev K.Ya. *Global climate*. St. Petersburg: Nauka; 1992. 359 p. (In Russ.)
15. Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрыбин П.Н. *Температурный режим грунтов мерзлотных ландшафтов Центральной Якутии*. Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН; 2002. 218 с.
- Varlamov S.P., Skachkov Yu.B., Scryabin P.N. *Ground temperature regime in permafrost landscapes of Central Yakutia*. Yakutsk: Publishing House of the Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2002. 218 p. (In Russ.)
16. Павлов А.В. *Мониторинг криолитозоны*. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео»; 2008. 229 с.
- Pavlov A.V. *Permafrost Monitoring*. Novosibirsk: Publishing House “Geo”; 2008. 229 p. (In Russ.)
17. Малкова Г.В., Павлов А.В., Скачков Ю.Б. Оценка устойчивости мерзлых толщ при современных изменениях климата. *Криосфера Земли*. 2011;15(4):33–36.
- Malkova G.V., Pavlov A.V., Skachkov Yu.B. Assessment of the stability of frozen strata under modern climate changes. *Earth's Cryosphere*. 2011;15(4):33–36. (In Russ.)
18. Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрыбин П.Н. *Мониторинг теплового режима грунтов Центральной Якутии*. Якутск: Изд-во ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН; 2021. 155 с.
- Varlamov S.P., Skachkov Yu.B., Scryabin P.N. *Monitoring of the thermal regime of soils in Central Yakutia*. Yakutsk: Publishing House of the Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2021. (In Russ.)
19. Kaverin D., Malkova G., Zamolodchikov D., et al. Long-term active layer monitoring at CALM sites in the Russian European North. *Polar Geography*. 2021;44(3):203–216. <https://doi.org/10.1080/1088937X.2021.1981476>
20. Васильев А.Н., Облогов Г.Е., Широков Р.С. Долговременный мониторинг глубины сезонного протаивания пород в типичных тундрах Западного Ямала. *Криосфера Земли*. 2023;27(4):3–13. <https://doi.org/10.15372/KZ20230401>
- Vasiliev A.A., Oblogov G.E., Shirokov R.S. Long-term monitoring of the active layer thickness in typical tundras of the Western Yamal. *Earth's Cryosphere*. 2023;27(4):3–13. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/KZ20230401>
21. Fedorov A.N., Konstantinov P.Y., Vasilyev N.F., et al. Climate and Permafrost Shifts in Yakutia's Arctic and Subarctic from 1965 to 2023. *Land*. 2024;13(12):2150. <https://doi.org/10.3390/land13122150>
22. Shan W., Qiu L., Guo Y., et al. Long-term changes in the permafrost temperature and surface frost number in Northeast China. *Atmosphere*. 2024;15(6):652.

Об авторах

ВАРЛАМОВ Степан Прокопьевич, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-2021-9686>, ResearcherID: V-9370-2018, Scopus AuthorID: 22958732100, SPIN: 8889-6227, e-mail: svarlamov@mpi.ysn.ru

СКАЧКОВ Юрий Борисович, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-5602-8956>, Scopus AuthorID: 15120142400, SPIN: 8720-7082, e-mail: ubskachkov@mpi.ysn.ru

ФЕДОРОВ Александр Николаевич, доктор географических наук, главный научный сотрудник, заместитель директора по науке, <https://orcid.org/0000-0002-4016-2149>, ResearcherID: K-2478-2016, Scopus AuthorID: 22957332600, SPIN: 6083-1651, e-mail: anfedorov@mpi.ysn.ru

Вклад авторов

Варламов С.П. – разработка концепции, методология, проведение исследования, создание черновика и редактирование рукописи; **Скачков Ю.Б.** – методология, проведение исследования, создание черновика и редактирование рукописи; **Федоров А.Н.** – методология, редактирование рукописи

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

VARLAMOV, Stepan Prokopievich, Cand. Sci. (Geogr.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-2021-9686>, ResearcherID: V-9370-2018, Scopus AuthorID: 22958732100, SPIN: 8889-6227, e-mail: svarlamov@mpi.ysn.ru

SKACHKOV, Yuri Borisovich, Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5602-8956>, Scopus AuthorID: 63431, SPIN: 8720-7082, e-mail: ubskachkov@mpi.ysn.ru

FEDOROV, Alexandr Nikolaevich, Dr. Sci. (Geogr.), Chief Researcher, Deputy Director for Science, <https://orcid.org/0000-0002-4016-2149>, ResearcherID: K-2478-2016, Scopus AuthorID: 22957332600, SPIN: 6083-1651, e-mail: anfedorov@mpi.ysn.ru

Authors' contribution

Varlamov S.P. – conceptualization, methodology, investigation, writing – original draft, writing – review & editing; **Skachkov Yu.B.** – methodology, investigation, writing – original draft, writing – review & editing; **Fedorov A.N.** – methodology, writing – review & editing

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 15.04.2025

Поступила после рецензирования / Revised 30.07.2025

Принята к публикации / Accepted 12.08.2025



Оригинальная статья

Моделирование уровня режима межмерзлотных вод и их стока в Центральной Якутии на примере водосборной площади источника Ерюю

М. Юй^{1,2}, Н. А. Павлова^{✉,1}

¹Институт мерзлотоведения им П. И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

²Факультет водного хозяйства и электроэнергетики, Хэйлуцзянский университет,
г. Харбин, Китайская Народная Республика

✉ narpavlova@mpi.ysn.ru

Аннотация

В области криолитозоны на фоне изменения климата и возрастающей техногенной нагрузки с каждым годом возрастает актуальность изучения условий формирования ресурсов и режима над- и межмерзлотных вод, которые наиболее чувствительны к внешнему воздействию. Одним из методов изучения динамики подземных вод при невозможности проведения систематических круглогодичных наблюдений является численное моделирование. Цель выполненных исследований – создать математическую модель фильтрации надмерзлотно-межмерзлотных подземных вод, широко распространенных на правобережье р. Лена в Центральной Якутии, и оценить межгодовую изменчивость их ресурсов. Трехмерная стандартная геофильтрационная модель была создана в программе MODFLOW-USG. Исходными данными для ее построения послужили результаты многолетних полевых гидрогеологических и геокриологических исследований, полученные на водосборной площади одного из круглогодично действующих наледообразующих источников на бестяхской террасе р. Лена. Для калибровки численной модели использованы данные натурных наблюдений за уровнем воды в скважине, расположенной в зоне транзита межмерзлотных вод. Корректировка фильтрационных параметров и граничных условий модели проводилась до тех пор, пока расхождение между расчетными и фактическими значениями уровня межмерзлотных вод не составило менее 0,1 м для более чем 90 % измерений. Результаты моделирования позволили оценить динамику водообильности межмерзлотного водоносного талика за последние 15 лет, уточнить влияние различных метеорологических факторов и процессов сезонного промерзания-протаивания пород на формирование режима подземных вод, количественно оценить внутригодовую изменчивость дебита источника. Полученные результаты могут послужить основой для постановки задач по прогнозированию изменения мерзлотно-гидрогеологических условий под действием колебаний климата, а также рассматриваться как эффективный метод количественной оценки динамики подземных вод в области распространения многолетнемерзлых пород.

Ключевые слова: надмерзлотно-межмерзлотный талик, подземные воды, моделирование, MODFLOW-USG, фильтрационные свойства, уровень воды, дебит источника

Финансирование. Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований ИМЗ СО РАН «Подземные воды криолитозоны: закономерности формирования и режима, особенности взаимодействия с поверхностными водами и мерзлыми породами, перспективы использования» (№ 122012400106-7).

Благодарности. Авторы выражают глубокую признательность доктору геол.-мин. наук, академику АН РС (Я) В.В. Шепелёву за научное консультирование в процессе подготовке статьи.

Для цитирования: Юй М., Павлова Н.А. Моделирование уровня режима межмерзлотных вод и их стока в Центральной Якутии на примере водосборной площади источника Ерюю. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(3):392–403. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-392-403>

Modeling the water level regime of intrapermafrost waters and their runoff in Central Yakutia: A case study of the Eruu source catchment area

Miao Yu,^{1,2} Nadezhda A. Pavlova✉,¹

¹Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Yakutsk, Russian Federation

²School of Hydraulic & Electric-Power, Heilongjiang University, Harbin, People's Republic of China

✉napavlova@mpi.ysn.ru

Abstract

In permafrost regions, the combined effects of climate change and increased anthropogenic activity highlight the need to study the formation processes and dynamics of supra- and intrapermafrost waters, due to their strong responsiveness to external influences. When continuous year-round observations are not possible, numerical modeling provides an efficient approach to study groundwater dynamics. This study aims to construct a mathematical model of suprapermafrost and intrapermafrost groundwater flow prevalent along the right bank of the Lena River in Central Yakutia, and to evaluate the interannual variability of these groundwater resources. A three-dimensional groundwater flow model was developed using the MODFLOW-USG software. This model was constructed using baseline data obtained from extensive, long-term field investigations in hydrogeology and geocryology conducted within the catchment area of a perennial icing spring located on the Bestyakh Terrace of the Lena River. The numerical model was calibrated using field-observed water levels from a monitoring well located within the intrapermafrost water transit zone. Calibration involved iterative adjustments of hydraulic parameters and boundary conditions until the deviation between simulated and observed intrapermafrost water levels was less than 0.1 m for more than 90% of the measurements. The simulation results enabled the reconstruction of the water yield dynamics in the intrapermafrost aquifer talik over the past 15 years, clarified the effects of various meteorological factors and seasonal freeze-thaw cycles on groundwater regime formation, and provided a quantitative evaluation of spring discharge variability at intra-annual scales. These findings establish a foundation for developing predictive frameworks of permafrost-hydrogeological evolution in response to climatic variability and provide a robust methodological approach for quantifying groundwater dynamics in permafrost-affected regions.

Keywords: suprapermafrost–intrapermafrost talik, groundwater, modeling, MODFLOW-USG, filtration properties, water level, spring discharge

Funding. This study was conducted with the support of the Scientific Research Program at the Melnikov Permafrost Institute of SB RAS “Groundwater in permafrost: Formation and regime patterns, interaction with surface water and frozen rocks, and prospects for use” (No. 122012400106-7).

Acknowledgements. The authors express their sincere gratitude to Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Victor V. Shepelev, for his invaluable scientific consultation during the preparation of this paper.

For citation: Yu M., Pavlova N.A. Modeling the water level regime of intrapermafrost waters and their runoff in Central Yakutia: A case study of the Eruu source catchment area. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(3):392–403. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-392-403>

Введение

В Центральной Якутии, в условиях глубокого залегания подмерзлотных водоносных горизонтов, одним из вариантов водообеспечения населенных пунктов, удаленных от р. Лена, являются пресные воды межмерзлотных таликов IV (бестяхской) надпойменной террасы этой реки. Несмотря на широкое распространение, условия формирования ресурсов межмерзлотных вод и их режим остаются недостаточно изученными. Во многом это связано с техническими трудностями

ми буровых работ в климатических условиях Якутии, а наличие таликов в кровле многолетнемерзлых пород является причиной образования ледяных пробок в стволах скважин, что существенно осложняет ведение в них систематических гидрогеологических наблюдений [1, 2]. Для исключения влияния этих факторов при изучении динамики подземных вод в области криолитозоны все больше внимания привлекает использование численного моделирования [3–5], позволяющего лучше понять гидрогеологические условия из-

учаемых районов, уточнить геометрию фильтрационной области и свойства водоносных пластов [6].

Создание гидрогеологической численной модели требует определенного информационного обеспечения: исходных данных о фильтрационных параметрах и условиях питания и разгрузки водоносных горизонтов [7–9]. При моделировании непрерывное пространство разделяется на дискретные ячейки, а непрерывное время – на дискретные временные шаги [10,11]. Затем задаются фильтрационные и емкостные свойства горных пород, после чего назначаются граничные условия фильтрации подземных вод [12]. После запуска модели для каждого временного шага рассчитывается новое пространственно-временное распределение уровня (напора) подземных вод на основе комбинации уровня воды, начальных и граничных условий [4, 13].

При создании численных моделей для области криолитозоны необходимо учитывать сезонные изменения свойств деятельного слоя, изолирующие эффекты снежного покрова на поверхности почвы, а также изменения влажности грунта, вызванные инфильтрацией талых вод, что значительно усложняет процесс моделирования [14, 15]. Большинство существующих математических моделей ограничиваются решением одно- или двумерных задач и не учитывают воздействие процессов сезонного промерзания и протаивания горных пород на фильтрационно-емкостные свойства водоносных пластов. Все это сказывается на точности расчетов и приводит к значительным неопределенностям, связанным с количественной оценкой влияния сезонной динамики мерзлого состояния пород на гидрогеологические условия.

Авторами использована трехмерная стандартная модель фильтрации подземных вод MODFLOW-USG (неструктурированная сетка) для изучения урванного режима межмерзлотных вод в криолитозоне и оценки их влияния на формирование наледи на примере источника Ерюю в Центральной Якутии. MODFLOW предполагает моделирование трехмерной стационарной и нестационарной напорно-безнапорной геофильтрации с использованием метода конечных разностей. Эта программа часто применяется для регионов с умеренным климатом, а для холодных регионов ее используют значительно реже.

Первоначально, до создания модели, были проанализированы сведения о природных усло-

виях в пределах предполагаемой области моделирования: собраны данные о распространении многолетнемерзлых пород, мощности слоя сезонного их протаивания, наличии различных типов таликов, расходе источника межмерзлотных вод Ерюю, об абсолютных отметках поверхности земли, количестве атмосферных осадков, высоте снежного покрова. С учетом геокриологических и гидрогеологических условий была создана модель MODFLOW-USG применительно к району исследования.

Природные условия района и гидрогеологическая схематизация

Район исследований расположен на правобережье р. Лена, в ее среднем течении, в пределах бестяхской террасы с абсолютными отметками ее рельефа от 110 до 140 м. Относительно ровная поверхность террасы осложнена песчаными грядами высотой от 2–3 до 10–20 м. В разделяющих их эрозионных депрессиях распространены озера глубиной 2,5–4,0 м, которые нередко расположены цепочкой. Мощность многолетнемерзлых пород в районе исследований изменяется от 185 до 420 м [16]. Характерной особенностью мерзлотно-гидрогеологического строения территории является наличие в толще песчаных четвертичных отложений и в верхней части подстилающих их коренных пород разветвленной сети надмерзлотно-межмерзлотных водоносных таликов мощностью от 20 до 100 м и более [16–18]. Их ресурсы формируются преимущественно за счет инфильтрации надмерзлотных вод через субаквальные и субаэральные талики, а разгрузка на поверхность земли происходит в основании округлых или вытянутых термосуффозионных понижений, врезанных в бестяхскую террасу р. Лена [17, 19, 20].

Воды одного из таких локально распространенных водоносных комплексов формируют круглогодично действующий групповой источник Ерюю [19, 21–23]. Он расположен на левом берегу р. Тамма в 12 км от ее устья. По данным многолетних режимных наблюдений, его средний суммарный дебит в осенний период составляет 3400–3700 м³/сут. Химический состав воды гидрокарбонатный смешанный по катионам, ее минерализация 150–300 мг/л.

Границы области распространения водоносного надмерзлотно-межмерзлотного талика очерчены по результатам комплексных исследований, выполненных в 1974–1976 и 2007–2015 гг. [21,

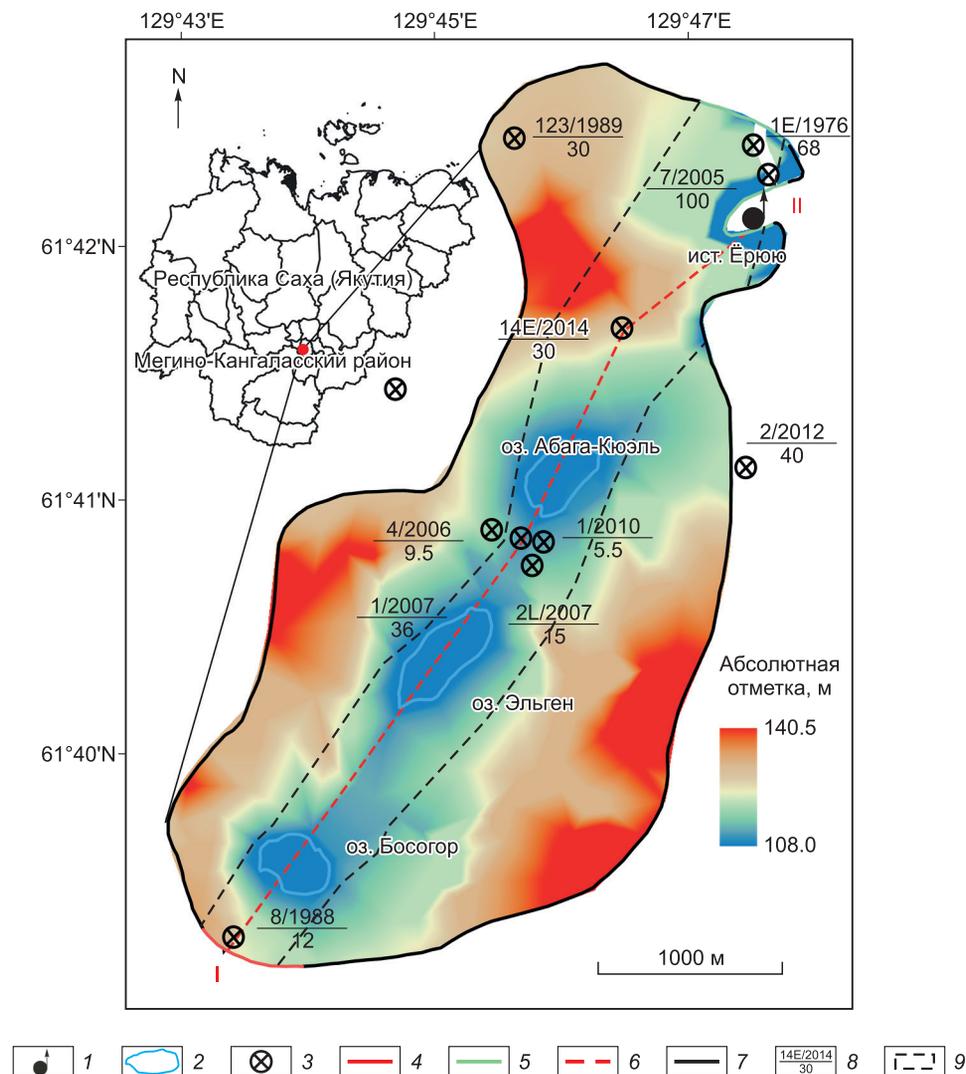


Рис. 1. Пространственное расположение межмерзлотного водоносного комплекса и источника подземных вод Ерюю
 1 – источник; 2 – озеро; 3 – гидрогеологическая наблюдательная скважина; 4 – граница притока; 5 – граница оттока; 6 – геофизический разрез; 7 – непроницаемая граница; 8 – числитель – номер скважины / год бурения, знаменатель – глубина выработки; 9 – межмерзлотный локальноводоносный комплекс

Fig. 1. Schematic diagram of the intrapermafrost aquifer system and the Eruu groundwater source
 1 – spring; 2 – lake; 3 – hydrogeological observation well; 4 – recharge boundary; 5 – discharge boundary; 6 – geophysical profile; 7 – impermeable boundary; 8 – numerator: well number / year of drilling, denominator: depth of the borehole; and 9 – local intrapermafrost

23, 24]. Установлено, что талик имеет вытянутую форму, ширина его от 500 до 900 м. Сверху он перекрыт криогенным водоупором мощностью от 13 до 53 м, а подошва залегает на глубине 55 м и более. В пределах площади распространения талика имеются озера Эльген, Абага-Кюэль и Босогор. Предполагается их гидравлическая связь через подозерные талики с межмерзлотными водами, что и дает основание называть изучаемый водоносный комплекс надмерзлотно-межмерзлотным (рис. 1, 2).

Сезонную и многолетнюю динамику подземных вод талика регулирует их водообмен с озерами [23]. С наступлением отрицательных температур воздуха при отсутствии атмосферного питания объем воды в озерах постепенно уменьшается за счет как формирования ледового покрова, так и инфильтрации ее в межмерзлотный водоносный горизонт. В результате в течение зимнего периода расход водных ресурсов озера постепенно начинает превышать их пополнение. Частичное промерзание донных отложений

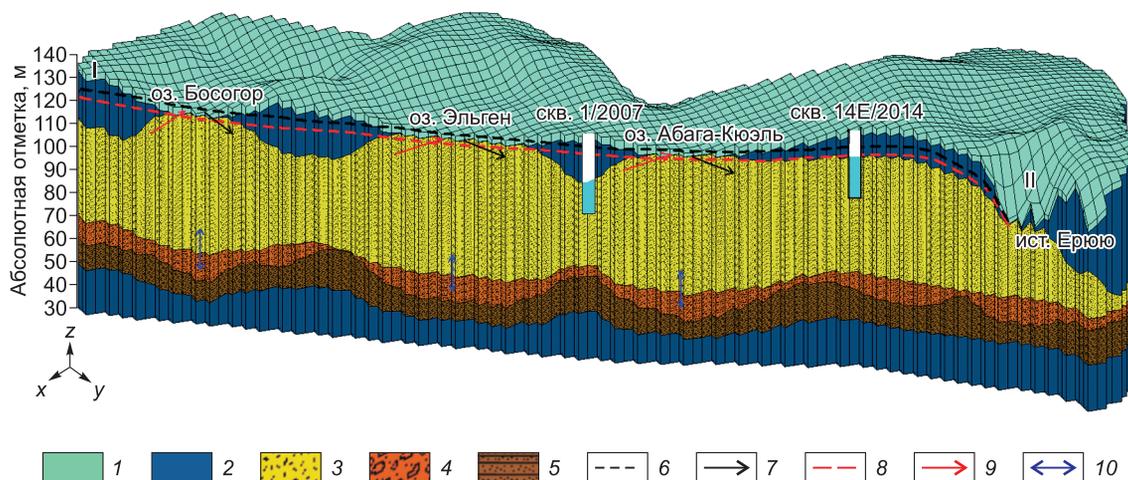


Рис. 2. Схематический гидрогеологический разрез моделируемой области по линии I–II на рис. 1.

1 – сезонно-талый (слой 1); 2 – многолетнемерзлые породы (слои 2 и 6); 3–5 – водоносный горизонт, сложенный: 3 – аллювиальными песками кварц-полевошпатовыми мелко- и среднезернистыми (слой 3), 4 – аллювиальными гравийно-галечниковыми отложениями изверженных и осадочных пород (слой 4), 5 – песчаниками мелко- и крупнозернистыми с прослоями алевролита (слой 5); 6 – максимальный уровень подземных вод; 7 – разгрузка подземных вод в озеро; 8 – минимальный уровень подземных вод; 9 – инфильтрация воды из озера в межмерзлотный водоносный горизонт; 10 – двухсторонний поток подземных вод

Fig. 2. Schematic hydrogeological cross-section of the modeled area along line I–II in Fig. 1

1 – seasonally thawed layer (Layer 1); 2 – perennially frozen ground (Layers 2 and 6); 3–5 – aquifer composed of: 3 – alluvial fine- and medium-grained quartz-feldspar sands (Layer 3), 4 – alluvial gravel-pebble deposits of igneous and sedimentary origin (Layer 4), 5 – fine- and coarse-grained sandstones with interlayers of siltstone (Layer 5); 6 – maximum groundwater level; 7 – groundwater discharge into the lake; 8 – minimum groundwater level; 9 – infiltration of lake water into the intrapermafrost aquifer; 10 – bidirectional groundwater flow

в прибрежной мелководной части озера придает краевой части подошренных таликов характеристики многолетнемерзлых пород. Летом следующего года надмерзлотные воды сезонно-талого слоя, мощность которого достигает в песчаных отложениях 4,0 м, поступают в озера, восполняя их водные ресурсы.

Информация, полученная при анализе природных условий территории, легла в основу гидрогеологической стратификации разреза и представлений об условиях формирования подземных вод.

Перед построением численной геофильтрационной модели были получены высотные отметки поверхности земли из данных ArcticDEM [25]. С учетом широты, долготы и высоты местности, с сайта Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации [http://meteo.ru] были взяты сведения о температуре воздуха и количестве атмосферных осадках на трех гидрометеорологических станциях, наиболее близко расположенных к изучаемой территории, – Покровск, Якутск и Тегюльтя. Данные с этих станций не могут напрямую отражать климатические параметры

исследуемой области, несмотря на небольшие различия отметок высот поверхности земли, поэтому полученные метеорологические параметры предварительно были скорректированы. Для этого использован метод обратного взвешенного расстояния, а в качестве весов для взвешенного среднего – точки интерполяции и расстояние между точками выборки. Формула для расчета температуры воздуха или количества атмосферных осадков следующая [26]:

$$X = \left(\sum_{i=1}^n \frac{X_i}{D_i^p} \right) / \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{D_i^p} \right), \quad (1)$$

где X – температура воздуха или количество атмосферных осадков в исследуемой области (°C или мм); D_i – горизонтальное расстояние между интерполированной гидрометеорологической станцией и исследуемой областью (м); X_i – температура воздуха или количество атмосферных осадков на интерполированной гидрометеорологической станции (°C или мм); n – количество интерполированных точек выборки; p – степенной показатель, используемый для учета расстояния.

Построение модели

Геофильтрационная схематизация. Размер исследуемой территории составил 9,21 км². При составлении ее модели использована сетка с размерами ячеек 15 м × 15 м в направлениях X и Y. Расчетная область модели была обработана как активные ячейки (в их пределах возможна фильтрация). Вне расчетной области неактивные ячейки сетки игнорировались программой и не учитывались в расчете.

В концептуальной фильтрационной модели приняты следующие граничные условия. Плановая граница (направление X) на юго-западе изучаемой территории задана как входная граница, от нее происходит приток межмерзлотных вод (см. рис. 1). Северо-восточная часть района, в пределах которой абсолютные отметки рельефа понижаются, является дренажной (выходная граница). Здесь часть подземных вод выводится на поверхность в виде источников и далее удаляется из модели, не участвуя в дальнейшем движении внутри системы. С северо-запада и юго-востока

исследуемую область окружают многолетнемерзлые породы, поэтому с этих сторон задана непроницаемая граница.

В направлении Z (профильные границы) каждый столбец разделен на шесть слоев в соответствии с гидрогеологической стратификацией (рис. 3). Верхний слой (слой 1) – активный. Он включает зону аэрации и воды деятельного слоя. Этот слой по-разному взаимодействует с внешней средой через вертикальный водообмен (инфильтрация дождевой воды, таяние снега, испарение, обмен с водой озер и т. д.). Свободная поверхность подземных вод активного слоя рассматривается как верхняя граница системы. Из-за сезонного промерзания и протаивания активного слоя его свойства и толщина изменчивы в течение года (рис. 4). Для учета этого непостоянства использован пакет «Временных изменений параметров» (MODFLOW-USG), что позволяет моделировать переменные свойства активного слоя, при этом сохраняя пространственную дискретизацию. Влияние испарения на вертикальный во-

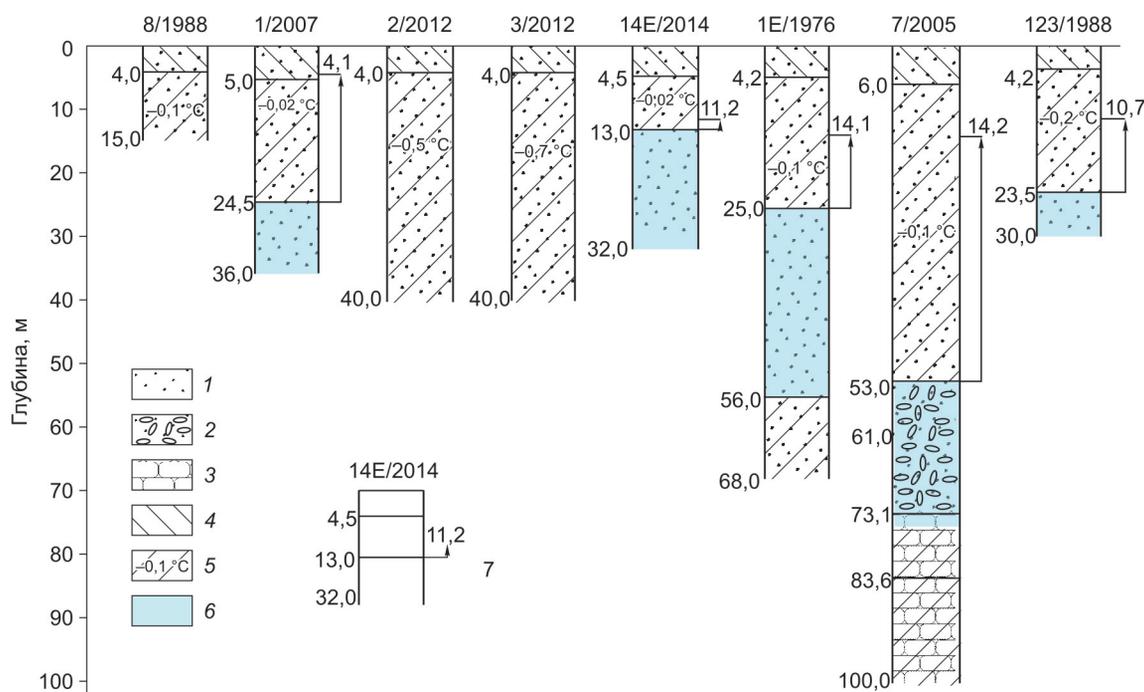


Рис. 3. Литологические колонки скважин. 1 – мелко- и среднезернистые пески; 2 – гравийно-галечные отложения с песчаным заполнителем; 3 – песчаники, алевролиты; 4 – сезонно-талые породы; 5 – многолетнемерзлые породы и их температура; 6 – водоносный горизонт; 7 – скважина, цифры: вверху – номер скважины/год бурения, слева – глубина, м; справа у стрелки – глубина залегания пьезометрического уровня межмерзлотных вод

Fig. 3. Lithological columns of boreholes. 1 – fine- and medium-grained sands; 2 – gravel-pebble deposits with a sandy matrix; 3 – sandstones, siltstones; 4 – seasonally thawed deposits; 5 – permafrost deposits and their temperature; 6 – aquifer; 7 – borehole. Numbers: at the top – borehole number/year of drilling; on the left – depth (m); on the right next to the arrow – depth of the piezometric level of intrapermafrost groundwater.

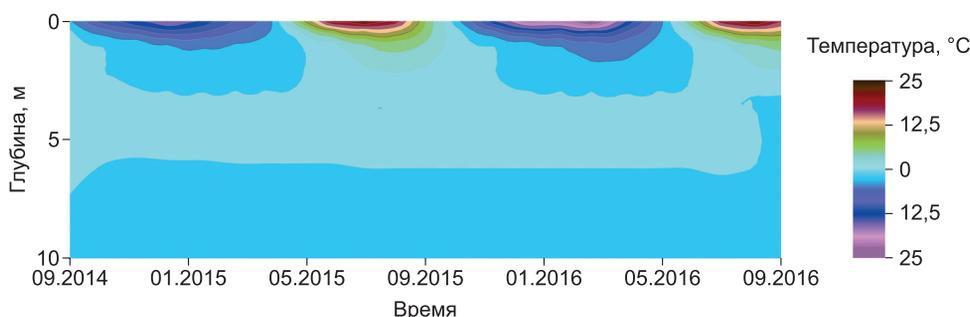


Рис. 4. Изменение температуры пород по скважине 1/2007 в 2014–2016 гг.

Fig. 4. Temperature profile in borehole 1/2007 from 2014 to 2016

дообмен в выполненном моделировании игнорируется.

Слой 2 и 6 соответствуют непроницаемым многолетнемерзлым породам с температурой от $-0,7$ до $-0,02$ °C (см. рис. 2). Высотные отметки кровли и подошвы каждого слоя рассчитаны исходя из данных цифровой модели рельефа (ArcticDEM) и результатов бурения скважин.

Вычислительный алгоритм. Основываясь на законе сохранения массы, основном законе фильтрации А. Дарси и других принципах движения подземных вод, а также анализе гидрогеологических условий изучаемой территории, исследуемая область фильтрации подземных вод концептуализирована с использованием следующей системы дифференциальных уравнений и граничных условий:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + w = \mu_s \frac{\partial h}{\partial t},$$

$$(x, y, z) \in \Omega, h = z; \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t},$$

$$(x, y, z) \in \Omega; \quad (3)$$

$$H(x, y, z, 0) = H_0(x, y, z), \quad (x, y, z) \in \omega, \quad (4)$$

$$q(x, y, z)|_{\Gamma_3} = k' \frac{h - h_0}{B'}, \quad h \geq h_0, \quad (x, y, z) \in \Gamma_3, \quad (5)$$

где Ω – область моделирования; h – уровень подземных вод (м); w – вертикальный водообмен ($\text{м}^3/(\text{сут} \cdot \text{м}^2)$); H_0 – начальный напор (абсолютная отметка уровня) воды (м); x, y и z – пространственные координаты (м); K_x, K_y и K_z – коэффициенты фильтрации в направлениях x, y и z (м/сут); μ_s – удельная водоотдача; S_s – упругая емкость (1/м); t – время (сут); q – проводимость дрены (удельный расход потока на границе третьего

рода) ($\text{м}^3/\text{сут}$); k' – коэффициент фильтрации границы (м/сут); h_0 – абсолютная отметка уровня подземных вод на границе (м); B' – длина границы (м), Γ_3 – граница дренажа исследуемой области.

Уравнение (2) – уравнение неразрывности потока подземных вод (уравнение гидравлического баланса); (3) – уравнение Буссинеска, которое описывает трехмерную фильтрацию; (4) – уровень воды в момент, когда начальный напор равен 0; (5) – уравнение, описывающее граничное условие третьего рода (на границе родниковой разгрузки).

Калибровка модели. Для калибровки численной модели использованы результаты натуральных наблюдений за уровнем подземных вод в скважине 14Е/2014, расположенной между оз. Абага-Кюель и источником Ерюю. Скважина была пробурена в 2014 г. В ней установлен датчик, записывающий уровень воды в автоматическом режиме с периодичностью 1 раз в сутки. Тестирование цифровой модели проводилось для временных интервалов с 1 сентября 2014 г. по 31 августа 2016 г. и с 1 сентября 2018 г. по 31 августа 2019 г. Коэффициент фильтрации межмерзлотного водоносного пласта и удельный расход потока были неоднократно скорректированы, чтобы обеспечить высокую степень соответствия между результатами моделирования и фактическими данными (рис. 5, табл. 1).

Калибровка и тестирование модели проводились до тех пор, пока в 90 % случаев не была достигнута разница между моделируемыми и реальными средними суточными значениями уровня грунтовых вод менее 0,1 м. Хорошая сходимость расчетных и натуральных данных послужила основанием для расчета положения уровня воды в скважине 14Е за период с 2007 по 2022 гг.

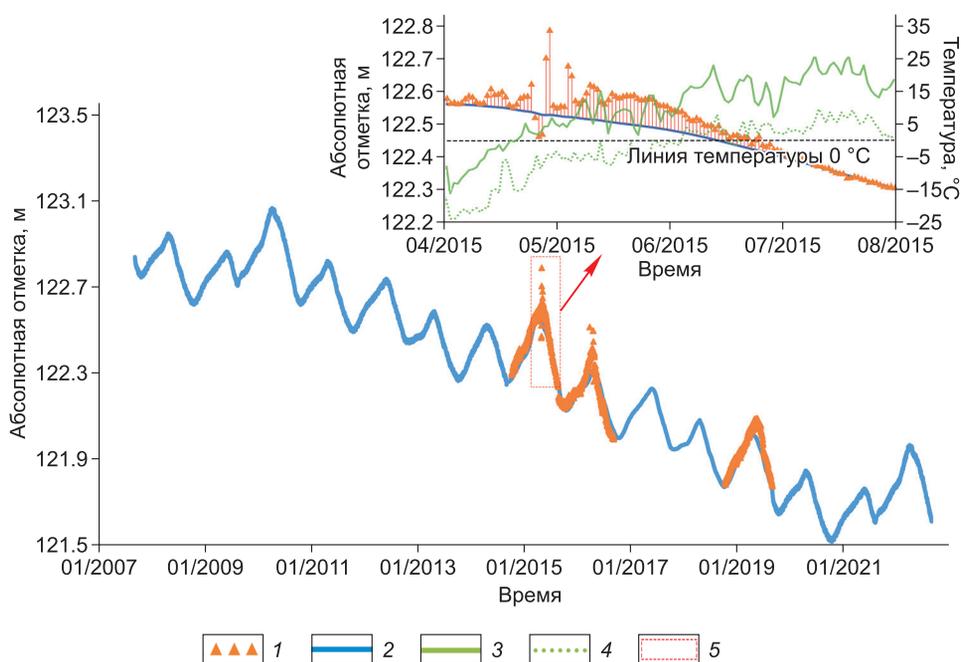


Рис. 5. Динамика уровня подземных вод в скважине 14E/2014 с 1 сентября 2007 г. по 31 августа 2022 г. с детализацией периода с 1 апреля 2015 г. по 1 августа 2015 г.
 1 – измеренные значения; 2 – расчетные значения; 3 – суточная максимальная температура воздуха; 4 – суточная минимальная температура воздуха; 5 – превышение фактического уровня над расчетным

Fig. 5. Groundwater level dynamics in borehole 14E/2014 from September 1, 2007, to August 31, 2022, with a detailed representation of the period from April 1 to August 1, 2015.
 1 – measured values; 2 – simulated values; 3 – daily maximum air temperature; 4 – daily minimum air temperature; 5 – excess of the observed level over the simulated level

Результаты и обсуждение

Изменение уровня межмерзлотных вод на участке их транзита. В многолетнем цикле с 2008–2010 по 2021 гг. наблюдалось устойчивое понижение уровня межмерзлотных вод. Следует отметить, что период с 2006 по 2007 г. в Центральной Якутии отличался высокой увлажненностью территории. В результате обильных атмосферных осадков площадь многих озер на

бестяхской террасе к 2008 г. увеличилась на 48 % [27]. В скважинах уровень надмерзлотных грунтовых вод относительно его положения в 2005 г. повысился на 1,6–3,7 м. Межмерзлотный водоносный горизонт также среагировал на увеличение количества выпадающих атмосферных осадков. Причем максимальные отметки уровня воды на участке скважины 14E по модельным расчетам должны были наблюдаться

Таблица 1
Откалиброванные геофильтрационные параметры водоносных пластов

Calibrated hydrogeological parameters of aquifer layers

Table 1

| Слой | Коэффициент фильтрации по горизонтали, м/с | Коэффициент фильтрации по вертикали, м/с | Удельная водоотдача |
|-------|--|--|-------------------------------|
| 1 | $5,0 \times 10^{-7} \sim 0,5 \times 10^{-4}$ | $1,2 \times 10^{-8} \sim 0,5 \times 10^{-4}$ | $0,5 \times 10^{-2} \sim 0,1$ |
| 2 и 6 | $5,0 \times 10^{-7}$ | $1,2 \times 10^{-8}$ | $0,5 \times 10^{-2}$ |
| 3 | $1,0 \times 10^{-4} \sim 1,0 \times 10^{-3}$ | $1,0 \times 10^{-5} \sim 1,0 \times 10^{-4}$ | $0,2 \sim 0,3$ |
| 4 | $5,0 \times 10^{-3} \sim 1,0 \times 10^{-1}$ | $1,0 \times 10^{-3} \sim 3,0 \times 10^{-2}$ | $0,2 \sim 0,35$ |
| 5 | $1,0 \times 10^{-6} \sim 1,0 \times 10^{-5}$ | $1,0 \times 10^{-7} \sim 1,0 \times 10^{-6}$ | $1,0 \times 10^{-2} \sim 0,1$ |

Фактическое (1) и расчетное (2) положение уровня межмерзлотных вод в наблюдательной скважине 14E/2014 в 2014–2019 гг.

Table 2

Observed (1) and simulated (2) positions of the intrapermafrost groundwater level in observation borehole 14E/2014 from 2014 to 2019

| Максимальный уровень, м дата | | Минимальный уровень, м дата | | Средний годовой, м | | Диапазон изменений уровня, м | |
|---------------------------------|------------------------|--------------------------------|------------------------|--------------------|--------|---------------------------------|------|
| 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| 01.09.2014–31.08.2015 | | | | | | | |
| <u>122,79</u> 29.04 | <u>122,56</u> 11.04 | <u>122,17</u> 31.08 | <u>122,20</u> 31.08 | 122,44 | 122,41 | 0,82 | 0,36 |
| 01.09.2015–31.08.2016 | | | | | | | |
| <u>122,51</u> 23.03 | <u>122,32</u> 18.04 | <u>122,00</u> 27.08 | <u>122,04</u> 31.08 | 122,20 | 122,19 | 0,51 | 0,28 |
| 01.09.2018–31.08.2019 | | | | | | | |
| <u>122,09</u> 16.05 | <u>122,01</u> 16.04 | <u>121,77</u> 31.08 | <u>121,75</u> 31.08 | 121,90 | 121,89 | 0,32 | 0,26 |

в 2010 г., т. е. с временной сдвижкой в 3–4 года после периода высокой увлажненности. В дальнейшем средний годовой уровень межмерзлотных вод в районе исследования медленно понижался со скоростью 0,07 м/год.

В годовом цикле максимальное расхождение времени наступления экстремальных уровней межмерзлотных вод по фактическим и расчетным данным отмечено для наивысшего положения уровня и составило 26–30 дней, а разница между сроками, когда фиксировались минимальные уровни воды, не превысила 4 дней. В целом диапазон колебаний уровня воды за год по данным натурных измерений составил от 0,32 до 0,82 м, а по модельным – от 0,21 до 0,36 м (табл. 2). Временной сдвиг наступления экстремальных уровней и разница между реальными и расчетными их величинами в зимний период, вероятно, связаны с такими событиями, как кратковременное замерзание отдельных очагов разгрузки подземных вод, приводящее к росту гидростатического давления в водоносном горизонте, взрывы наледных бугров, учесть которые в модели затруднительно.

Изменение дебита источника Ерюю. Для изучения влияния процессов промерзания-протаивания пород в области разгрузки подземных вод на динамику дебита источника Ерюю и оценки его сезонной изменчивости был выбран период с 1 сентября 2014 г. по 31 августа 2015 г. В соответствии с особенностями сезонного изменения температуры пород воздуха, этот год был услов-

но разделен на три периода: 1 – период промерзания пород и образования наледи (температура воздуха ниже 0 °С); 2 – переходный период (от начала, когда появляются дневные температуры выше 0 °С, до полного таяния наледи); 3 – период протаивания пород деятельного слоя и отсутствия наледи.

Среднее значение расхода воды за период моделирования составило 3888 м³/сут, что соответствует результатам предыдущих натурных наблюдений (осенние расходы воды в 2013, 2014 и 2015 гг. были 3629, 4147 и 3715 м³/сут соответственно), а его сезонные изменения показаны на рис. 6.

С началом периода отрицательных температур воздуха (период промерзания) отдельные выходы подземных вод промерзают, в результате объем разгрузки подземного потока сокращается. По данным моделирования, уменьшение дебита ист. Ерюю (до 3755 м³/сут) происходит до марта. Одновременно с этим в водоносном пласте увеличивается давление, о чем свидетельствует повышение пьезометрического уровня подземных вод в скважине. В марте при продолжающемся росте гидростатического давления в межмерзлотном талике, на ослабленных участках подземные воды под напором прорывают промерзший грунт и устремляются наружу, увеличивая объем их разгрузки.

В переходный период в зоне разгрузки происходит частое чередование замерзания воды, изливающейся на поверхность, таяние наледи и про-

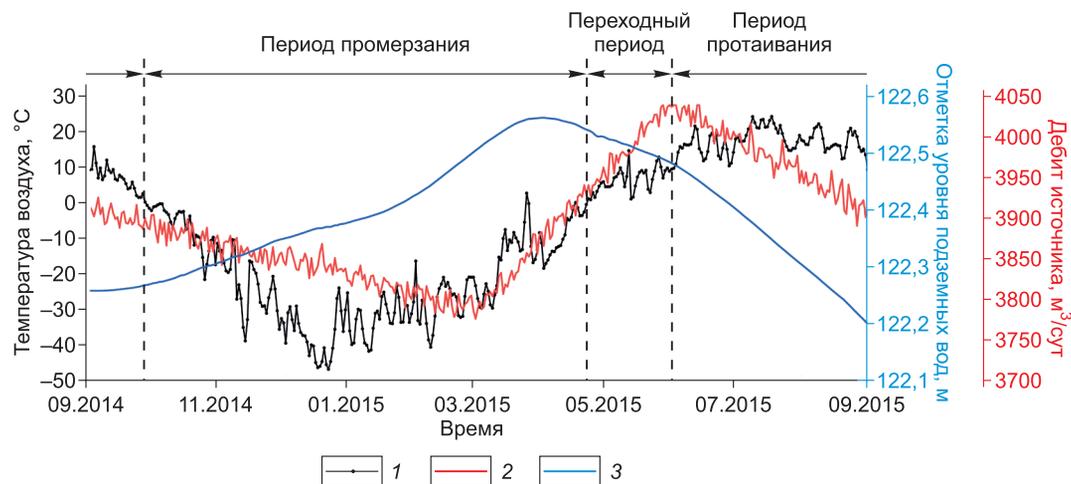


Рис. 6. Среднесуточный расход родников и кривая температуры с 1 сентября 2014 года по 1 сентября 2015 года. 1 – температура воздуха; 2 – дебит родника; 3 – отметка уровня подземных вод в скважине 14Е

Fig. 6. Average daily spring discharge and air temperature curve from September 1, 2014, to September 1, 2015. 1 – air temperature; 2 – spring discharge rate; 3 – groundwater level in borehole 14E

таивание песков на склонах распадка источника Ерюю. Освобождение выходов подземных вод от наледи и интенсивное протаивание пород на склонах способствует уменьшению напора межмерзлотных вод в талике. В это же время разрушается снежный покров. Из-за выровненного рельефа бестяхской террасы, а также низкой влажности песков зоны аэрации большая часть талых снеговых вод подвергается инфильтрации и стекает по кровле промерзших за зиму пород к ближайшим дренам. Часть подземных вод надмерзлотного стока смешивается с межмерзлотными водами в очагах разгрузки, что отражается в продолжающемся возрастании дебита источника Ерюю. По расчетным данным, его расход достиг максимального значения ($4037 \text{ м}^3/\text{сут}$) к началу июня 2015 г. и кратковременно стабилизировался.

В последующем до конца сентября (третий период) происходят синхронное понижение уровня межмерзлотных вод и уменьшение дебита источника. Атмосферные осадки и надмерзлотные воды деятельного слоя, по всей видимости, в этот период в питании межмерзлотных вод участвуют опосредованно, восполняя запасы воды в озерах.

Заклучение

Результаты моделирования показали возможность применения трехмерной стандартной модели фильтрации грунтовых вод MODFLOW-USG, учитывающей изменения характеристик надмерзлотно-межмерзлотного водоносного комплекса

в разные сезоны года в районе Ерюю, что подтверждается сходимостью моделированных уровня подземных вод и расходов этого родника с наблюдаемыми данными. Согласно анализу данных измерений уровня воды в скважине 14Е/2014, расхождение между моделируемым и фактическим положением уровня подземных вод составило менее $0,1 \text{ м}$ для более чем 90 % измерений.

В период 2007–2022 гг. наблюдалось уменьшение водобильности таликов на бестяхской террасе р. Лена. Понижение среднего годового уровня межмерзлотных вод со скоростью $0,07 \text{ м/год}$ отражает долговременные изменения гидрогеологических условий на исследуемой территории, связанные с динамикой увлаженности территории.

Комплексный анализ изменения температуры воздуха, уровня воды в скважине 14Е и дебита источника Ерюю позволил оценить влияние различных природных факторов на формирование режима межмерзлотных подземных вод и внутригодовую изменчивость величины их разгрузки.

Измерение зимних дебитов наледобразующих источников – процесс трудоемкий и экономически затратный из-за труднодоступности территории, технических сложностей оборудования наледных полигонов для мониторинговых наблюдений, невозможности систематических измерений объемов формирующейся наледи и т. п. Созданная и верифицированная геофильтрационная модель позволяет получить представление об особенностях сезонной динамики разгрузки

подземных вод и может быть использована для решения дальнейших прогнозных задач.

Список литературы / References

1. Пигузова В.М., Шепелев В.В. *Методика изучения наледей*. Якутск: Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН; 1975. 62 с.
2. Piguzova V.M., Shepelev V.V. *Methodology for the study of aufeis*. Yakutsk: Melnikov Permafrost Institute SB RAS; 1975. 62 p. (In Russ.)
3. Романовский Н.Н. *Подземные воды криолитозоны*. М.: Изд-во МГУ; 1983. 231 с.
4. Romanovsky N.N. *Groundwater in the cryolithozone*. Moscow: Moscow University Press; 1983. 231 p. (In Russ.)
5. Hornum M.T., Hodson A.J., Jessen S., et al. Numerical modelling of permafrost spring discharge and open-system pingo formation induced by basal permafrost aggradation. *The Cryosphere*. 2020;14(12):4627–4651. <https://doi.org/10.5194/tc-14-4627-2020>.
6. Liao C., Zhuang Q. Quantifying the role of permafrost distribution in groundwater and surface water interactions using a three-dimensional hydrological model. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 2017;49(1):81–100. <https://doi.org/10.1657/aaar0016-022>.
7. Liu W., Fortier R., Molson J., Lemieux J.M. Three-dimensional numerical modeling of cryo-hydrogeological processes in a river-talik system in a continuous permafrost environment. *Water Resources Research*. 2022;58(3):e2021WR031630. <https://doi.org/10.1029/2021wr031630>.
8. Riseborough D., Shiklomanov N., Etzelmüller B., et al. Recent advances in permafrost modelling. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2008;19:137–156. <https://doi.org/10.1002/ppp.615>.
9. Гриневский С.О. *Гидрогеодинамическое моделирование взаимодействия подземных и поверхностных вод*. М.: ИНФРА-М; 2012. 152 с.
10. Grinevsky S.O. *Hydrogeodynamic modeling of the interaction between underground and surface waters*. Moscow: INFRA-M; 2012. 152 p. (In Russ.)
11. Frampton A., Painter S.L., Destouni G. Permafrost degradation and subsurface-flow changes caused by surface warming trends. *Hydrogeology Journal*. 2013;21(1):271–280. <https://doi.org/10.1007/s10040-012-0938-z>.
12. Woo M.K., Kane D.L., Carey S.K., et al. Progress in permafrost hydrology in the new millennium. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2008;19(2):237–254. <https://doi.org/10.1002/ppp.613>.
13. Штенгелов Р.С. *Гидрогеодинамические расчеты на ЭВМ: учебное пособие*. М.: Изд-во МГУ; 1994. 335 с.
14. Shtengelov R.S. *Hydrogeodynamic calculations on a computer: A textbook*. Moscow: Moscow University Press; 1994. 335 p. (In Russ.)
15. Koch J.C., McKnight D.M., Neupauer R.M. Simulating unsteady flow, anabranching, and hyporheic dynamics in a glacial meltwater stream using a coupled surface water routing and groundwater flow model. *Water Resources Research*. 2011;47(5):W05530. <https://doi.org/10.1029/2010wr009508>.
16. Ge S., McKenzie J., Voss C., et al. Exchange of groundwater and surface-water mediated by permafrost response to seasonal and long-term air temperature variation. *Geophysical Research Letters*. 2011;38(14):L14402. <https://doi.org/10.1029/2011gl047911>.
17. Gaiolini M., Colombani N., Busico G., et al. Impact of boundary conditions dynamics on groundwater budget in the Campania region (Italy). *Water*. 2022;14(16):2462. <https://doi.org/10.3390/w14162462>.
18. Iwata Y., Hayashi M., Hirota T. Comparison of snow-melt infiltration under different soil-freezing conditions influenced by snow cover. *Vadose Zone Journal*. 2008;7(1):79–86. <https://doi.org/10.2136/vzj2007.0089>.
19. Zhang T. Influence of the seasonal snow cover on the ground thermal regime: An overview. *Reviews of Geophysics*. 2005;43(4):RG4002. <https://doi.org/10.1029/2004rg000157>.
20. Павлова Н.А., Шепелев В.В., Галанин А.А. и др. Гидрохимия подземных вод надмерзлотно-межмерзлотного стока на участках их разгрузки (Центральная Якутия). *Водные ресурсы*. 2020;47(4):391–401. <https://doi.org/10.31857/S0321059620040124>.
21. Pavlova N.A., Shepelev V.V., Galanin A.A., et al. Groundwater hydrochemistry of suprapermafrost–intrapermafrost flow in their discharge areas in Central Yakutia. *Water Resources*. 2020;47(4):581–590. <https://doi.org/10.1134/S0097807820040119>.
22. Ефимов А.И. Незамерзающий пресный источник Улахан-Тарын в Центральной Якутии. В кн.: *Исследования вечной мерзлоты в Якутской республике*. М.: Изд-во АН СССР; 1952. Вып. 3. С. 60–105.
23. Efimov A.I. The Ulakhan-Taryn Unfreezing Freshwater Source in Central Yakutia. In: *Research on permafrost in Yakutia*. Moscow: USSR Academy of Sciences; 1952. Issue 3, pp. 60–105. (In Russ.)
24. Толстихин О.Н., Шепелев В.В., Никитина Н.М. и др. *Мерзлотно-гидрогеологические условия Восточной Сибири*. Новосибирск: Наука; 1984. 191 с.
25. Tolstikhin O.N., Shepelev V.V., Nikitina N.M., et al. *Permafrost hydrogeological conditions of Eastern Siberia*. Novosibirsk: Nauka; 1984. 191 p. (In Russ.)
26. Анисимова Н.П. *Криогидрогеохимические особенности мерзлой зоны*. Новосибирск: Наука; 1981. 153 с.
27. Anisimova N.P. *Cryohydrogeochemical features of the permafrost zone*. Novosibirsk: Nauka; 1981. 153 p. (In Russ.)
28. Павлова Н.А., Колесников А.Б., Ефремов В.С. и др. Химический состав подземных вод межмерзлотных таликов в Центральной Якутии. *Водные ресурсы*. 2016;43(2):353–363. <https://doi.org/10.7868/S0321059616020139>.
29. Pavlova N.A., Kolesnikov A.B., Efremov V.S., et al. Groundwater chemistry in intrapermafrost taliks in Central Yakutia. *Water Resources*. 2016;43(2):353–363. <https://doi.org/10.1134/S0097807816020135>.
30. Шепелев В.В., Ломовцева Н.С. Озера криолитозоны бестяхской террасы р. Лены и их взаимосвязь с подземными водами. В кн.: *Тематические и региональные исследования мерзлых толщ северной Евразии*. Якутск: Институт мерзлотоведения СО АН СССР; 1981. С. 106–115.
31. Shepelev V.V., Lomovtseva N.S. Lakes in the cryolithozone of the Bestyakhskaya Terrace along the Lena River and their interaction with groundwater. In: *Thematic and regional studies of permafrost in Northern Eurasia*. Yakutsk: Institute of Permafrost of the USSR Academy of Sciences; 1981, pp. 106–115. (In Russ.)
32. Шепелев В.В. *Родниковые воды Якутии*. Якутск: Якутское книжное изд-во; 1987. 127 с.

Shepelev V.V. *Spring waters in Yakutia*. Yakutsk: Yakutskoe knizhnoe izdatel'stvo Publ.; 1987. 127 p. (In Russ.).

23. Шепелев В.В. *Надмерзлотные воды криолитозоны*. Новосибирск: Гео; 2011. 167 с.

Shepelev V.V. *Suprapermafrost waters in the cryolithozone*. Novosibirsk: Geo; 2011. 167 p. (In Russ.)

24. Семерня А.А., Гагарин Л.А., Бажин К.И. Мерзлотно-гидрогеологические особенности участка распространения межмерзлотного водоносного комплекса в районе источника Ерюю (Центральная Якутия). *Криосфера Земли*. 2018;22(2): 29–38. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-2\(29-38\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-2(29-38))

Semernya A.A., Gagarin L.A., Bazhin K.I. Cryohydrogeological features of the site of intrapermafrost aquifer distribution in the Eruu spring area (Central Yakutia). *Earth's Cryo-*

sphere. 2018;22(2):26–34. (In Russ.) [https://doi.org/10.21782/EC2541-9994-2018-2\(26-34\)](https://doi.org/10.21782/EC2541-9994-2018-2(26-34))

25. Porter C., Howat I., Noh M.-J., et al. “ArcticDEM – Strips, Version 4.1”. *Version 1*. 2022: Harvard Dataverse. <https://doi.org/10.7910/DVN/C98DVS>.

26. Price D.T., McKenney D.W., Nalder I.A., et al. A comparison of two statistical methods for spatial interpolation of Canadian monthly mean climate data. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2000;101(2-3):81–94. [https://doi.org/10.1016/s0168-1923\(99\)00169-0](https://doi.org/10.1016/s0168-1923(99)00169-0).

27. Nitze I., Grosse G., Jones B.M., et al. Landsat-based trend analysis of lake dynamics across northern permafrost regions. *Remote Sensing*. 2017;9(7):640. <https://doi.org/10.3390/rs9070640>.

Об авторах

Юй Мяо, аспирант, <https://orcid.org/0000-0003-3150-9152>, ResearcherID: ABB-3746-2021, Scopus Author ID: 57210574365, e-mail: hss_yumiao@126.com

ПАВЛОВА Надежда Анатольевна, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-5473-7778>, ResearcherID: W-2163-2018, Scopus Author ID: 57188696296, SPIN: 8046-4220, e-mail: napavlova@mpi.ysn.ru

Вклад авторов

Юй М. – разработка концепции, методология, верификация данных, проведение статистического анализа, создание черновика рукописи, визуализация; **Павлова Н.А.** – ресурсное обеспечение исследования, редактирование рукописи, руководство исследованием, получение финансирования

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

YU, Miao, Post-graduate Student, <https://orcid.org/0000-0003-3150-9152>, ResearcherID: ABB-3746-2021, Scopus Author ID: 57210574365, e-mail: hss_yumiao@126.com

PAVLOVA, Nadezhda Anatolievna, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-5473-7778>, Researcher ID: W-2163-2018, Scopus Author ID: 57188696296, SPIN: 8046-4220, e-mail: napavlova@mpi.ysn.ru

Authors' contribution

YU M. – conceptualization, methodology, validation, formal analysis, writing – original draft, visualization; **Pavlova N.A.** – resources, writing - review & editing, supervision, funding acquisition

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 23.06.2025

Поступила после рецензирования / Revised 24.07.2025

Принята к публикации / Accepted 04.08.2025



Оригинальная статья

Экономическая эффективность использования новых теплоизоляционных материалов в холодных регионах

А. Ф. Галкин¹, М. Н. Железняк¹, А. Ф. Жирков^{✉,1}, В. Ю. Панков², В. И. Балута³

¹Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

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

³Институт прикладной математики им. В.М. Келдыша РАН, г. Москва, Российская Федерация

✉zhirkov_af@mail.ru

Аннотация

Тепловая защита инженерных сооружений является важной проблемой для современного строительства в криолитозоне. Целью работы являлось получение критерия экономической целесообразности использования новых теплоизоляционных материалов вместо традиционно используемых материалов для тепловой защиты инженерных объектов. Рассмотрено два случая: полной замены одного материала другим и комбинированного использования традиционного и нового теплоизоляционного материалов. В качестве критерия использовано отношение затрат на материалы для достижения нормативного термического сопротивления всей теплоизоляционной конструкции. Получены новые показатели связи между экономическими и теплофизическими характеристиками материалов, в частности, между удельной стоимостью теплоизоляционных материалов (стоимость единицы объема) и их коэффициентом теплопроводности. Для общности анализа введены новые показатели: ценовой симплекс; тепловой симплекс; симплекс термического сопротивления. Установлено, что, с экономической точки зрения, использование новых материалов вместо традиционных будет оправдано в том случае, когда отношение стоимостей нового и традиционного материала не будет превышать обратной величины отношения их коэффициентов теплопроводности (т. е. при условии, что ценовой симплекс будет ниже обратной величины теплового симплекса). Приведены конкретные примеры применения разработанной методики при оценке целесообразности использования тонкоплочных теплоизоляционных материалов вместо минеральной ваты для достижения равного теплозащитного эффекта. Показано, что при существующей стоимости тонкоплочных материалов их использование обойдется в десятки раз дороже традиционной тепловой защиты с помощью минеральной ваты даже при существенном снижении ее термического сопротивления за счет увлажнения в период эксплуатации. Результаты вариантных расчетов позволяют наглядно убедиться в установленной новой закономерности связи экономических и теплофизических характеристик теплоизоляционных материалов.

Ключевые слова: теплоизоляция, новые материалы, термическое сопротивление, экономическая эффективность, критерий, симплекс, коэффициент теплопроводности

Финансирование. Работы выполнены в рамках бюджетного проекта НИОКТР № 122011800062-5 «Тепловое поле и криогенная толща Северо-Востока России. Особенности формирования и динамика»; расширение подходов и верификация данных осуществлены за счет гранта Российского научного фонда № 23-61-10032 «Разработка методов гибридного интеллекта для решения задач диагностики состояния объектов инфраструктуры в районах Крайнего Севера на базе высокопроизводительных вычислительных систем».

Для цитирования: Галкин А.Ф., Железняк М.Н., Жирков А.Ф., Панков В.Ю., Балута В.И. Экономическая эффективность использования новых теплоизоляционных материалов в холодных регионах. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(3):404–415. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-404-415>

The economic efficiency of using new thermal insulation materials in cold climate

Aleksandr F. Galkin¹, Mikhail N. Zheleznyak¹, Aleksandr F. Zhirkov^{✉,1}, Vladimir Y. Pankov², Viktor I. Baluta³

¹Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

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

³Keldysh Institute of Applied Mathematics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

✉zhirkov_af@mail.ru

Abstract

The aim of this study was to establish criteria for the economic feasibility of using new thermal insulation materials in place of traditionally used materials for the thermal protection of engineering structures. Two scenarios were considered: the complete replacement of one material with another and the combined use of traditional and new thermal insulation materials. The criterion used was the ratio of the cost of materials required to achieve the standard thermal resistance of the entire insulation system. New indicators describing the relationship between the economic and thermophysical properties of materials were developed, particularly relating the specific cost of thermal insulation materials (cost per unit volume) to their thermal conductivity coefficient. To generalize the analysis, novel indicators were introduced: price simplex, thermal simplex, and thermal resistance simplex. We concluded, from an economic perspective, the use of new materials instead of traditional ones is justified if the ratio of the costs of the new and traditional materials does not exceed the reciprocal of the ratio of their thermal conductivity coefficients—that is, if the price simplex is lower than the reciprocal of the thermal simplex. Specific examples demonstrate the application of this methodology in evaluating the feasibility of using thin-film thermal insulation materials instead of mineral wool to achieve equivalent thermal protection. The analysis shows that, at current prices, thin-film materials are tens of times more expensive than traditional mineral wool insulation, even when accounting for a significant reduction in mineral wool's thermal resistance due to moisture during operation. The results of these calculations clearly illustrate the newly established relationship between the economic and thermophysical characteristics of thermal insulation materials.

Keywords: thermal insulation, new materials, thermal resistance, economic efficiency, criterion, simplex, thermal conductivity coefficient

Funding. This study was conducted within the framework of the budgeted project No. 122011800062-5, titled “Thermal field and cryogenic layer of the North-East of Russia: Features of formation and dynamics”. The development of methodologies and data validation were supported by the Russian Science Foundation (grant No. 23-61-10032), titled “Development of hybrid intelligence methods for solving problems of infrastructure assessment in the Far North based on high-performance computing systems”.

For citation: Galkin A.F., Zheleznyak M.N., Zhirkov A.F., Pankov V.Yu., Baluta V.I. The economic efficiency of using new thermal insulation materials in cold climate. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(3):404–415. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-404-415>

Введение

Тепловая защита инженерных объектов в криолитозоне, занимающей почти 70 % территории нашей страны (включая зону островной мерзлоты), является перманентной проблемой, на решение которой уже многие десятилетия направлены усилия научного и инженерного сообщества. Это вызвано как требованиями экономии энергетических ресурсов и их высокой стоимостью, так и необходимостью обеспечения нормативных

температурных условий эксплуатации технических объектов в различных областях хозяйственной деятельности человека. Например, в горной промышленности теплоизоляционные материалы используются для предотвращения как глубокого промерзания пород при открытой разработке месторождений полезных ископаемых, так и оттаивания пород вокруг выработок при ведении подземных горных работ [1–6]. В транспортной индустрии теплоизоляция используется для обес-

печения надежной и безопасной эксплуатации линейных инженерных сооружений, например, железных и автомобильных дорог, кабелей связи [7–11]. В жилищном и гражданском строительстве теплоизоляция играет важную роль в обеспечении нормативных параметров микроклимата в зданиях и сооружениях, а также снижении затрат на доставку теплоносителей к объектам с помощью наземных и подземных теплопроводов (теплотрасс) [12–14]. Для обеспечения надежной тепловой защиты применяют как природные, так и специально созданные теплоизоляционные материалы, отличительными чертами которых являются низкий коэффициент теплопроводности и небольшая плотность, что позволяет при их использовании добиться нормативного термического сопротивления при минимуме материальных затрат [15–21]. При этом многие традиционно используемые материалы обладают существенным недостатком – изменением своих теплофизических свойств в период эксплуатации, в частности, значительным снижением коэффициента теплопроводности при увлажнении [22–24]. Это требует устройства специальных дополнительных гидроизоляционных покрытий, что приводит иногда к кратному удорожанию теплозащитных конструкций, хотя сами теплоизоляционные материалы, как правило, стоят недорого. В последние десятилетия в нашей стране и за рубежом получили распространение новые теплоизоляционные материалы – тонкопленочные теплоизоляционные покрытия (ТПП), к которым среди научного и инженерного сообщества нет однозначного отношения. Одни исследователи активно их пропагандируют [25–28], другие считают это прямым обманом потребителей [29, 30]. Анализ показывает, что в основном это связано с агрессивной, а зачастую просто с недобросовестной рекламной кампанией «эффективных» рекламных менеджеров. Пресловутый рекламный слоган «Один миллиметр нашей теплоизоляции заменяет пять сантиметров стекловаты» ничего, кроме улыбки у специалистов вызвать не может. К сожалению, хозяйственные работники и управляющий персонал многих строительных и теплоснабжающих организаций не обладают достаточными компетенциями в области теплотехники и строительной теплофизики и принимают необоснованные решения о замене традиционно используемых теплоизоляционных материалов «новыми, перспективными, созданными на основе космических нанотехнологий»

материалами (рекламная цитата одного из многих сайтов производителей «теплоизоляционной краски»). В данной работе мы не будем опираться на рекламные трюки, а основываться на результатах конкретных научных исследований по изучению теплофизических свойств ТПП, которые в реальности мало чем отличаются от традиционных теплоизоляционных материалов [31, 32]. В основном, спор вокруг использования новых теплоизоляционных материалов между производителями и специалистами сводится к теплофизическим характеристикам ТПП и возможности обеспечить с их помощью нормативное термическое сопротивление объекта или заданную степень снижения теплового потока. Экономическая оценка использования новых материалов взамен традиционных не приводится. Хотя известно, что внедрение всего нового (если это не связано с безопасностью жизнедеятельности человека) должно быть экономически целесообразно на данном этапе развития общества. Основной задачей настоящей работы являлась разработка доступного и понятного широкому кругу хозяйственных работников и управленческого персонала, принимающих решения, укрупненного метода оценки экономической целесообразности использования новых теплоизоляционных материалов вообще и ТПП в частности вместо традиционных теплоизоляционных материалов, в том числе в случаях комбинированного использования традиционных и новых материалов в одной теплозащитной конструкции.

Учитывая вышесказанное, целью настоящих исследований являлась разработка простого инженерного критерия укрупненной оценки экономической целесообразности замены традиционных теплоизоляционных материалов новыми теплоизоляционными материалами.

Методы

В первом приближении будем считать, что экономическая целесообразность определяется по денежным затратам на материалы для достижения заданного нормативного термического сопротивления. То есть все остальные затраты, как то: доставка, нанесение, эксплуатационные расходы и т. п., для базового (традиционного) материала и нового материала идентичны. И оцениваются дополнительно в том случае, если затраты на материалы в обоих случаях приблизительно равны. Для общности рассуждений и выводов будем использовать в качестве крите-

рия следующую безразмерную (относительную) величину: отношение удельной стоимости нового материала (на 1 м² поверхности) к удельной стоимости базового материала. Термическое сопротивление покрытия должно быть одинаково в обоих случаях. (Необходимо также учесть снижение термического сопротивления базового материала при увлажнении.) В работах [33, 34] нами было показано, что при оценке вариантов удобно использовать удельную величину термического сопротивления $R_T = 1 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$. Затраты на материал на 1 м² поверхности (S_M) с термическим сопротивлением $R_M = \delta_M / \lambda_M$ равны

$$Z_M = C_M \cdot S_M \cdot \delta_M = C_M \cdot \delta_M. \quad (1)$$

Здесь Z_M – удельные затраты на материалы на единицу площади теплоизолируемой поверхности, руб.; C_M – стоимость 1 м³ материала, руб./м³; λ_M – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К).

Эксплуатационные затраты и затраты на нанесение материала не учитываем. Параметр δ_M находим из условия $R_M \geq R_0$. Здесь R_0 – нормативное термическое сопротивление, м²·К/Вт. Если ввести условную единицу термического сопротивления $R_T = 1 = \delta / \lambda$, то

$$\delta = R_T \lambda. \quad (2)$$

Тогда из (1) получим

$$Z_M(1) = C_M \cdot S_M = C_M \cdot R_T \cdot \delta, \quad (3)$$

где $Z_M(1)$ – стоимость материала, которая обеспечивает достижение одной условной единицы термического сопротивления на единицу площади теплоизолируемого объекта, руб./м³.

Такой показатель удобен при сравнении различных материалов для достижения одинакового термического сопротивления на единице площади объекта. Если известно нормативное термическое сопротивление на конкретном объекте, то удельный объем затрат надо умножить на величину термического сопротивления:

$$Z_0 = Z_M(1) R_0. \quad (4)$$

Рассмотрим пример. Стоимость материала составляет 100 рублей на кубический метр. Теплопроводность равна 0,05 Вт/(м·К). Нормативное термическое сопротивление

$$R_0 = \frac{\delta}{\lambda} = \frac{0,2}{0,05} = 4,0 \text{ (м}^2 \cdot \text{К/Вт)}.$$

Подсчитаем удельные затраты на 1 м² площади с использованием базового материала: $Z_0 = 100 \cdot 1 \cdot 0,2 = 20,0$ руб. Теперь выполним

аналогичные расчеты с использованием понятия «единица термического сопротивления»:

$$\begin{aligned} Z_M(1) &= C_M \cdot \lambda \cdot \{R = 1; S = 1\} = \\ &= 100 \cdot 0,05 = 5,0 \text{ руб./}(\text{м}^2 \cdot \text{К/Вт}) \text{ на } 1 \text{ м}^2. \end{aligned}$$

Затраты на достижение нормативного термического сопротивления будут равны $Z_0 = Z_M(1) \cdot R_0 = 5 \cdot 4,0 = 20,0$ рублей на 1 м² площади теплоизолируемой поверхности. То есть получим идентичные цифры.

Для удобства сравнения двух материалов по экономическому критерию (показателю) введем безразмерный показатель эффективности

$$\beta = \frac{C_M \lambda_M}{C_\delta \lambda_\delta} = \widetilde{C}_M \widetilde{\lambda}_M; \quad \widetilde{\lambda}_M = \frac{\lambda_M}{\lambda_\delta}; \quad \widetilde{C}_M = \frac{C_M}{C_\delta}. \quad (5)$$

Здесь использованы два новых параметра (более правильно, «параметрических критерия»), которые называются симплексами: $\widetilde{\lambda}_M$ и \widetilde{C}_M . Первый представляет собой отношение коэффициентов теплопроводности нового и базового материалов, а второй отношение их удельных стоимостей. Далее симплекс $\widetilde{\lambda}_M$ будем называть «тепловой симплекс», а симплекс \widetilde{C}_M – «ценовой симплекс».

Критерий экономической эффективности представляет собой произведение двух параметрических критериев (симплексов). Если $\beta < 1$, то применение нового материала вместо традиционного (базового) материала экономически целесообразно. И можно проводить детальную экономическую оценку внедрения нового материала, с учетом всех остальных статей затрат.

Рассмотрим вариант, когда новый материал используется совместно с базовым материалом. В этом случае расчетные формулы преобразуются к виду

$$Z_M = Z_1 + Z_2 = C_1 \lambda_1 + C_2 \lambda_2, \quad (6)$$

$$Z_0 = C_1 \lambda_1 R_1 + C_2 \lambda_2 R_2, \quad (7)$$

$$R_0 = R_1 + R_2, \quad (8)$$

$$\beta = \frac{Z_1 + Z_2}{Z_0} = 1 + \frac{Z_2}{Z_1} = 1 + \widetilde{C}_M \widetilde{\lambda}_M. \quad (9)$$

То есть всегда получаем $\beta > 1$. Подходя формально, из выражения (9) можно сделать неправильный вывод, что комплексное использование нового и базового материала всегда экономически не эффективно. В действительности это не так. Формула (9) означает, что при использовании слоистой структуры тепловой защиты из разных материалов, экономическую эффективность использования всей теплозащитной конструкции

необходимо оценивать по каждому слою отдельно. То есть формула (9) преобразуется в формулу (5) для нового материала с термическим сопротивлением, определенным по следующей формуле:

$$R_m = \Sigma R_0 - R_1 = \Sigma R_0 - (\delta_1/\lambda_1), \quad (10)$$

где ΣR_0 – расчетное нормативное термическое сопротивление всей конструкции, $m^2 \cdot K/Вт$.

При выводе формулы (9) мы считали, что затраты на базовый материал при использовании в комплексе с новым материалом остаются постоянными. Это придает определенную надежность результатам расчетов по формуле (9). В действительности, поскольку нормативное термическое сопротивление остается неизменным, затраты на базовый материал должны уменьшаться, так как часть базового материала заменяется новым материалом. В этом случае более корректным будет следующая запись исходных формул:

$$\beta = \frac{3_1(R_1) + 3_2(R_2)}{3_1(R_0)} = (C_1\lambda_1R_1 + C_2\lambda_2R_2)/(C_1\lambda_1R_0). \quad (11)$$

Толщины отдельных слоев определяются из выражений

$$\delta_1 = (R_1\lambda_1); \quad \delta_2 = (R_2\lambda_2); \quad \delta_0 = (R_0\lambda_1). \quad (12)$$

Подставляя (12) в (11), с учетом выражения (8) получим следующее выражение для определения критерия эффективности при комплексном использовании нового и базового материалов в конструктивном теплоизоляционном слое:

$$\beta = 1 + \tilde{R}(\tilde{f} - 1), \quad (13)$$

где $\tilde{R} = R_2/R_0$; $\tilde{f} = \tilde{\lambda}\tilde{C}$; $\tilde{C} = C_2/C_1$; $\tilde{\lambda} = \lambda_2/\lambda_1$.

При выводе формулы (13) появился новый параметрический критерий – симплекс «термического сопротивления», который характеризует доленое участие нового материала в общем термическом сопротивлении комбинированной теплозащитной конструкции.

Анализ выражений (13) показывает, что параметр будет меньше единицы только в том случае, если выполняется условие $\tilde{f} < 1,0$. То есть между стоимостными и теплофизическими характеристиками материалов должно существовать отношение, определяющее эффективность комплексного использования материалов:

$$(C_2/C_1) < (\lambda_1/\lambda_2) \text{ или } C_2 < C_1 \cdot (\lambda_1/\lambda_2). \quad (14)$$

Если условие (14) выполняется, то использовать комплексную теплоизоляционную конструкцию экономически целесообразно. В про-

тивном случае нет. Формула (13) является более общим случаем формулы (5). Действительно, если у нас однослойная конструкция, то $\tilde{R} = 1$. Соответственно из (13) получим $\beta = f = \tilde{\lambda}\tilde{C}$. Данное выражение эквивалентно формуле (5). В общем случае, основываясь на выражениях (5) и (14), можно сформулировать следующую количественную закономерность целесообразности использования новых теплоизоляционных материалов (как в комплексе, так и отдельно): «Использование нового материала экономически целесообразно, если значение ценового симплекса меньше обратной величины теплового симплекса».

Допустим, что в процессе эксплуатации базовый материал, в отличие от нового, может увлажняться и изменять свое термическое сопротивление. В расчетах необходимо учитывать и этот вариант. В сухом состоянии материал состоит из основы (связующего) и пор, заполненных воздухом. При заполнении части порового пространства водой, теплопроводность которой в 25 раз больше воздуха, коэффициент теплопроводности материала существенно увеличивается. Если теплоизоляционный материал эксплуатируется не только при положительной, но и отрицательной температуре наружного воздуха (например, поверхностные теплотрассы на Севере), то изменение коэффициента теплопроводности при увлажнении будет еще больше (теплопроводность льда почти в 4 раза больше воды и почти в 100 раз больше воздуха). То есть при увлажнении термическое сопротивление является функцией влажности (льдиности) материала. В этом случае $R_0 = f(w)$, где w – влажность (льдиность) материала, которая изменяется в пределах от $0 \leq w \leq m$. Показатель m характеризует открытую пористость материала. По физическому смыслу увлажнение происходит путем заполнения пор влагой. Нижний предел соответствует «абсолютно сухому» материалу, а верхний предел – полностью увлажненному, когда все поры заполнены водой (льдом). В дальнейших расчетах принято, что усадки материала при увлажнении не происходит. Для расчета коэффициента теплопроводности увлажненного теплоизоляционного материала используем формулу К. Лихтенеккера [35, 36] для трехкомпонентной среды

$$\lambda(w) = (\lambda_w^w)(\lambda_w^{1-m})(\lambda_a^{m-w}). \quad (15)$$

Для полностью насыщенного влагой материала ($w = m$) формула (15) преобразуется к виду

$$\lambda(w) = (\lambda_w^m)(\lambda_s^{1-m}). \quad (16)$$

Для полностью сухого материала ($w = 0$) формула (15) примет вид

$$\lambda(w) = (\lambda_a^m)(\lambda_s^{1-m}). \quad (17)$$

Представляет практический интерес степень изменения коэффициента теплопроводности материала при увлажнении, которую можно определить по формуле

$$q = (\lambda_w^w)(\lambda_s^{1-m})(\lambda_a^{m-w})/(\lambda_a^m)(\lambda_s^{1-m}) = (\lambda_w/\lambda_a)^w. \quad (18)$$

Соответственно, параметр $\tilde{\lambda}$ в формулах (5) и (13) будет определяться по формуле

$$\tilde{\lambda} = \lambda_2/(\lambda_1 q). \quad (19)$$

Результаты и обсуждение

По полученным формулам были приведены варианты расчеты, которые представлены в виде графиков на рисунках 1–5. На рис. 1 представлены графики, отражающие рост коэффициента теплопроводности материала с определенной пористостью в зависимости от степени заполнения пор влагой.

Наглядно прослеживается следующая очевидная закономерность: чем больше влажность, тем больше коэффициент теплопроводности материала. Не совсем очевидной закономерностью является факт увеличения коэффициента тепло-

проводности материала при постоянной влажности при уменьшении пористости. Причем, чем ниже пористость материала, тем зависимость (рост) коэффициента теплопроводности от влажности сильнее выражена. (Сравним, например, кривые 1 и 3 при влажности 0,3 и 0,6.)

На рис. 2 представлены результаты расчета степени изменения коэффициента теплопроводности пористого материала в зависимости от влажности в летний и зимний периоды года.

Характер графиков наглядно показывает, что агрегатное состояние влаги в порах существенно влияет на степень изменения коэффициента теплопроводности теплоизоляционного материала. При этом в зимний период года, когда влага превращается в лед, степень изменения коэффициента теплопроводности резко увеличивается (соответственно, увеличивается и степень уменьшения термического сопротивления материала) при росте начальной влажности. Соответствующие области (при изменении начальной влажности с 0,2–0,3 до 0,5–0,6) выделены зеленым и голубым цветом. Видно, что площадь фигуры голубого цвета намного больше площади фигуры зеленого цвета. На рис. 3 представлены обобщающие 3D графики, подтверждающие необходимость не только учета степени увлажнения теплоизоляционного материала при эксплуата-

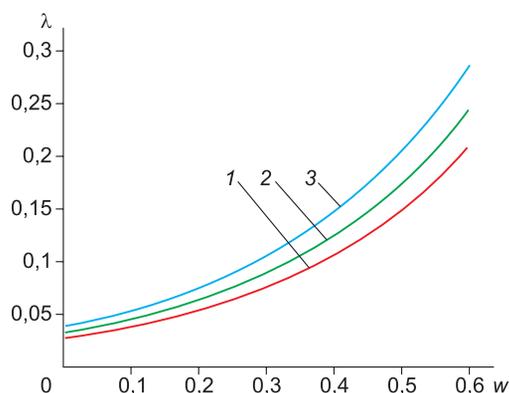


Рис. 1. Изменение коэффициента теплопроводности λ теплоизоляционного пористого материала при увлажнении (w – доля заполнения пор водой): 1 – пористость 0,8; 2 – пористость 0,7; 3 – пористость 0,6

Fig. 1. Variation in the thermal conductivity coefficient λ of a porous thermal insulation material when moistened (w – proportion of pores filled with water): 1 – porosity 0.8; 2 – porosity 0.7; 3 – porosity 0.6

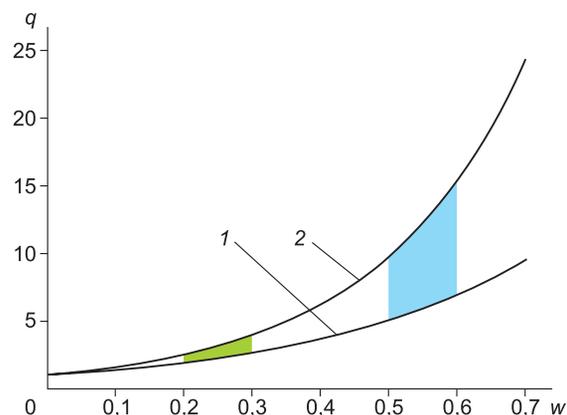


Рис. 2. Степень изменения коэффициента теплопроводности теплоизоляционного пористого материала при увлажнении (w – доля заполнения пор водой или льдом): 1 – в летний период (при положительной температуре воздуха $T > 0$ °C); 2 – в зимний период (при отрицательной температуре воздуха $T \leq 0$ °C)

Fig. 2. Degree of variation in the thermal conductivity coefficient of porous thermal insulation material when moistened (w – proportion of pores filled with water or ice): 1 – in summer (at positive air temperatures $T > 0$ °C); 2 – in winter (at negative air temperatures $T \leq 0$ °C)

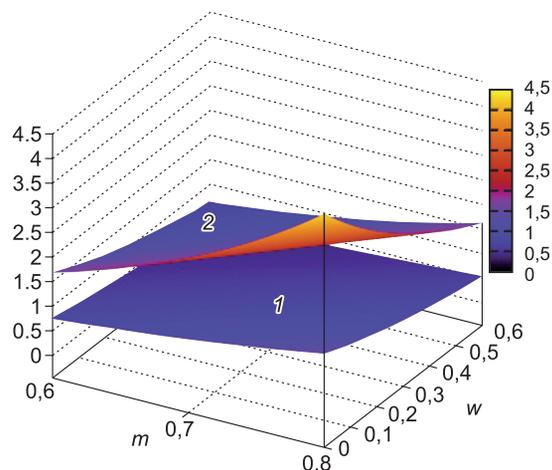


Рис. 3. Изменение коэффициента теплопроводности теплоизоляционного пористого материала при увлажнении (w – доля заполнения пор водой) в зависимости от пористости: 1 – в летний период; 2 – в зимний период

Fig. 3. Variation in the thermal conductivity coefficient of porous thermal insulation material when moistened (w – proportion of pores filled with water) depending on porosity: 1 – summer; 2 – winter

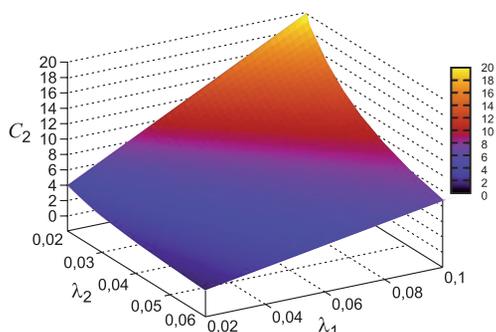


Рис. 5. Допустимая стоимость одного кубического метра (тыс. рублей) нового теплоизоляционного материала при стоимости базового материала 4,0 тыс. рублей в зависимости от значения их коэффициентов теплопроводности

Fig. 5. Acceptable cost per cubic metre (thousand roubles) of new thermal insulation material at a base material cost of 4.0 thousand roubles, depending on their thermal conductivity coefficients

ции, но и отдельной оценки влияния теплового симплекса на эффективность использования новых материалов в зимний и летний периоды.

Причем, если при оценке критерия эффективности β в летний период значение его близко к единице, то необходимо дополнительно провести оценку при зимнем тепловом симплексе. На рис. 4 представлен 3D график изменения показателя эффективности β в зависимости от стоимостного критерия f при различной степени

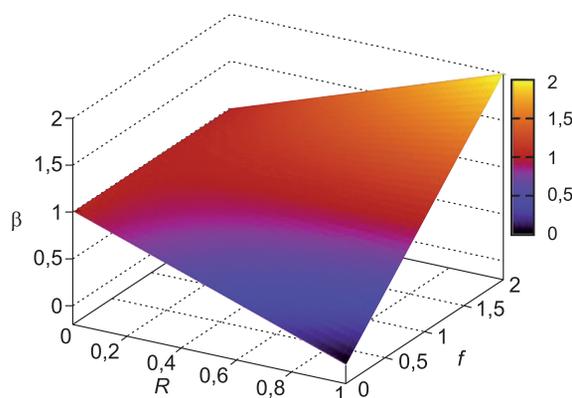


Рис. 4. Изменение показателя эффективности β в зависимости от стоимостного критерия f при различной степени замены (R) традиционного материала новым в комбинированной конструкции тепловой защиты

Fig. 4. Variation in the efficiency indicator β depending on the cost criterion f at different degrees of replacement (R) of traditional material with new material in a combined thermal protection structure

замены (R) традиционного материала новым в комбинированной конструкции тепловой защиты

Анализ цветовой дифференциации плоскости на рисунке показывает, что размер области, где значения коэффициента эффективности меньше единицы, зависит, главным образом, от значения параметра f , что, собственно, и было установлено нами ранее при анализе формулы (13). Данный график наглядно подтверждает сделанный вывод о том, что для экономической целесообразности комплексного использования двух материалов в одной конструкции достаточным условием является выполнения неравенства $f \leq 1$. Причем степень замены (долевое участие нового материала в общем термическом сопротивлении теплозащитной конструкции) никакой роли не играет.

На рис. 5 представлены результаты вариантных расчетов по формуле (14), которая связывает тепловые и ценовые характеристики двух материалов. В данном случае по оси Z представлены значения удельной стоимости нового материала, при которой его использование вместо традиционного теплоизоляционного материала (принята усредненная стоимость теплоизоляционных материалов, равная 4,0 тыс. руб. за 1 м^3) будет экономически целесообразно.

Как видно из графика, допустимая стоимость нового материала, в большинстве случаев, не

должна превышать 10–12-кратного значения стоимости базового материала. С одной стороны, эти цифры обнадеживают и открывают перспективу для внедрения новых материалов с низким коэффициентом теплопроводности. Но, с другой стороны, сложившиеся на рынке цены, например для материалов ТТП (200–500 тыс. руб. за 1 м^3), показывают, что в реальном диапазоне изменения коэффициента теплопроводности (минус второй порядок) они неконкурентоспособные. Видимо поэтому им производители «назначают» нереальные (минус третий порядок) значения коэффициента теплопроводности. На рис. 6 представлен 3D график, характеризующий изменение допустимой стоимости (C_2) одного кубического метра (тыс. рублей) нового теплоизоляционного материала в зависимости от стоимости (C_1) базового материала (тыс. рублей) и отношения их коэффициентов теплопроводности (теплого симплекса).

Как видно из графика, экономически обоснованная цена нового материала при реальном диапазоне изменений теплового симплекса не должна превышать 16-кратного значения цены базового материала. Это в несколько раз меньше существующих рыночных значений ценового симплекса, который, например, для ТТП изменяется в диапазоне 50–100 и выше.

На рис. 7 представлен график для определения допустимого значения коэффициента теплопроводности нового теплоизоляционного материала в зависимости от значения ценового симплекса при различных значениях коэффициента теплопроводности базового материала.

Данный график позволяет разработчикам теплоизоляционных материалов сформировать теплофизические требования к конкретным новым материалам для замены существующих, исходя из ожидаемых значений ценового симплекса. А также, наоборот, определить предельную цену нового материала с ожидаемым коэффициентом теплопроводности, при которой использование нового материала будет экономически оправдано. Например, если мы создаем новый материал с коэффициентом теплопроводности, равным $0,12 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ (первая красная линия на рисунке), то его конкурентоспособная удельная стоимость должна быть в 2 раза ниже цены базового материала, с коэффициентом теплопроводности, равным $0,06 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Если создается материал с улучшенным, по отношению к базовому мате-

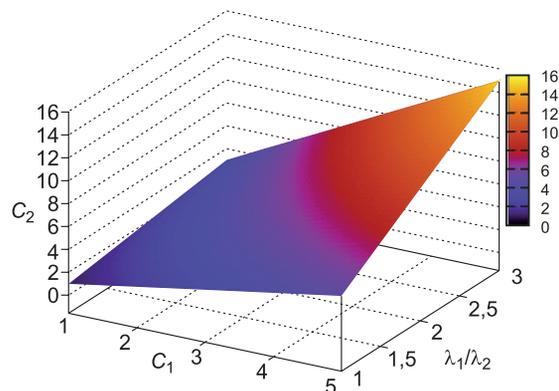


Рис. 6. Допустимая стоимость (C_2) одного кубического метра (тыс. рублей) нового теплоизоляционного материала в зависимости от стоимости (C_1) базового материала (тыс. рублей) и отношения их коэффициентов теплопроводности

Fig. 6. Acceptable cost (C_2) per cubic metre (thousand roubles) of new thermal insulation material depending on the cost (C_1) of the base material (thousand roubles) and the ratio of their thermal conductivity coefficients

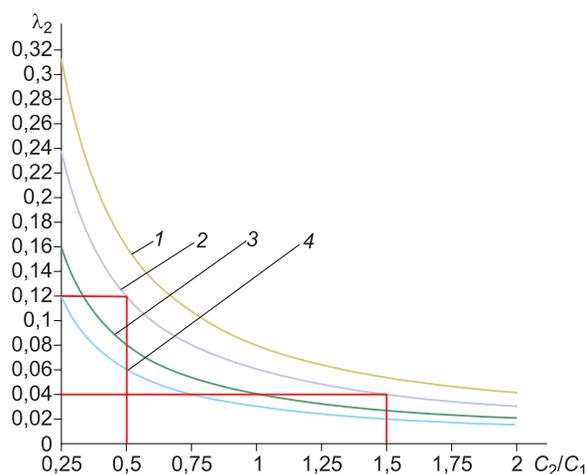


Рис. 7. Допустимое значение коэффициента теплопроводности нового теплоизоляционного материала в зависимости от значения ценового симплекса (C_2/C_1) при различных значениях коэффициента теплопроводности базового материала: 1 – $0,08 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; 2 – $0,06 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; 3 – $0,04 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; 4 – $0,03 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$

Fig. 7. Acceptable value of the thermal conductivity coefficient of the new thermal insulation material depending on the price simplex value (C_2/C_1) at different values of the thermal conductivity coefficient of the base material: 1 – $0.08 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; 2 – $0.06 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; 3 – $0.04 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; 4 – $0.03 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

риалу, значением коэффициента теплопроводности, например, $0,04 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ (вторая красная линия на рисунке), то его стоимость может быть увеличена в 1,5 раза. В целом же график наглядно подтверждает выведенную ранее закономерность для экономически эффективного нового

материала: «Ценовой симплекс нового материала должен быть ниже обратной величины его теплового симплекса».

Заключение

Разработана инженерная методика оценки экономической эффективности использования новых теплоизоляционных материалов в промышленности для тепловой защиты объектов различного назначения. Отличительной чертой методики является учет изменения коэффициента теплопроводности материала при увлажнении, а также совместное использование базового и нового материалов в одной теплозащитной конструкции. Основным выводом проделанной работы можно считать получение новой закономерности, определяющей экономическую эффективность использования новых теплоизоляционных материалов в строительной индустрии: стоимость нового материала должна быть не больше стоимости базового материала во столько раз, во сколько раз коэффициент теплопроводности нового материала меньше коэффициента теплопроводности базового материала. Закономерность является общей, как при полной замене одного материала другим, так и при комбинированном использовании базового и нового материалов. Это позволяет как разработать требования к созданию новых теплоизоляционных материалов, так и рационально выбирать теплоизоляционные материалы при проектировании и строительстве конкретных инженерных объектов. Дальнейшие исследования в данной области целесообразно направить на расширение расчетной модели путем учета затрат на нанесение и доставку материалов, а также учет эксплуатационных затрат. Статья имеет научное, практическое и методическое значение и может быть полезна специалистам в области разработки и использования новых теплоизоляционных материалов, студентам и аспирантам, обучающимся по направлению «Строительная физика».

Список литературы / References

1. Ковлеков И.И., Дмитриев А.А. Обоснование и расчет теплоизоляции для подготовки вскрышных пород к выемке при разработке россыпного месторождения золота. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2013;(8):368–372.
Kovlekov I.I., Dmitriev A.A. Choice and estimation the heat-insulation's parameters for mining of overburden on the placer gold deposit. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2013;(8):368–372. (In Russ.)

2. Дугарцыренов А.В., Бельченко Е.Л. Параметры теплоизоляции при промерзании грунтов на допустимую глубину. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2009;(6):44–47.

Dugartsyrenov A.V., Belchenko E.L. The heat insulation parameters during the soil freezing till permissible depth. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2009;(6):44–47. (In Russ.)

3. Дугарцыренов А.В., Бельченко Е.Л. О теплоизоляции складов-отвалов при разработке россыпных месторождений. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2009;(2):129–133.

Dugartsyrenov A.V., Belchenko E.L. The heat-insulation of waste disposals during mining placer deposits. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2009;(2):129–133. (In Russ.)

4. Galkin A.F. Calculation of parameters of cryolithic zone mine openings thermal protection coating. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015;(8):64–69.

5. Галкин А.Ф., Наумов А.А. Исследование области эффективного использования легких бетонов в подземных рудниках Севера в криолитозоне. *Горный журнал*. 2014;(4):99–101.

Galkin A.F., Naumov A.A. Analysis of the effective use range of light concrete in underground mines in permafrost zone of the North. *Gornyi Zhurnal*. 2014;(4):99–101. (In Russ.)

6. Галкин А.Ф. Эффективность применения теплоизоляции в подземных сооружениях криолитозоны. *Энергобезопасность и энергосбережение*. 2021;(4):18–21. <https://doi.org/10.18635/2071-2219-2021-4-18-21>

Galkin A.F. Thermal insulation efficiency for underground structures in permafrost. *Energy Safety and Energy Economy*. 2021;(4):18–21. (In Russ.) <https://doi.org/10.18635/2071-2219-2021-4-18-21>

7. Бессонов И.В., Жуков А.Д., Боброва Е.Ю. и др. Анализ конструктивных решений в зависимости от типа изоляционных материалов в дорожных покрытиях в многолетнемерзлых грунтах. *Транспортное строительство*. 2022;(1):14–17.

Bessonov I.V., Zhukov A.D., Bobrova E.Yu., et al. Analysis of design solutions depending on the type of insulating materials in road pavements in permafrost soils. *Transport Construction*. 2022;(1):14–17. (In Russ.)

8. Бессонов И.В., Боброва Е.Ю., Агафонова Н.З. и др. Проектные решения и моделирование температурных полей в системах теплоизоляции в основаниях автомобильных дорог в многолетнемерзлых грунтах. *Транспортное строительство*. 2022;(3):32–34.

Bessonov I.V., Bobrova E.Yu., Agafonova N.Z., et al. Design and modelling of temperature fields in thermal insulation systems in road foundations in permafrost soils. *Transport Construction*. 2022;(3):32–34. (In Russ.)

9. Ильичев В.А., Никифорова Н.С., Коннов А.В. Перспективы использования изделий из пеностекла в основании зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах. *Жилищное строительство*. 2024;(9):36–41. <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2024-9-36-41>

Ilyichev V.A., Nikiforova N.S., Konnov A.V. Prospects for the use of foam glass products in the foundation of buildings and structures on long term frozen soils. *Housing Construction*. 2024;9:36–41. (In Russ.) <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2024-9-36-41>

10. Ярцев В.П., Иванов Д.В., Андрианов К.А. Прогнозирование долговечности экструзионного пенополистиро-

ла в дорожных конструкциях. *Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура*. 2010;19(3):99–104.

Yartsev V.P., Ivanov D.V., Andrianov K.A. Forecasting durability of extruded foam polystyrene in road structures. *Nauchnyi zhurnal stroitel'stva i arkhitektury*. 2010;19(3):99–104. (In Russ.)

11. Галкин А.Ф., Курта И.В., Панков В.Ю. Использование горелых пород при подземной прокладке кабельных линий связи в криолитозоне. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2020;331(12):131–137. <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/12/2946>

Galkin A.F., Kurta I.V., Pankov V.Yu. Use of burned rocks in underground laying of cable lines in the cryolitzone. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2020;331(12):131–137. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/12/2946>

12. Данилова Н.И. Современные методы утепления фасадов зданий и влияние теплоизоляции наружных стен на энергосбережение зданий. *Вестник науки*. 2023;4(12):1441–1447. Режим доступа: <https://www.vestnik-nauki.rf/article/12044> (дата обращения: 31.07.2025 г.)

Danilova N.I. Modern methods of insulation of building facades and the influence of thermal insulation of external walls on the energy saving of a building. *Vestnik nauki*. 2023;4(12):1441–1447. Available at: <https://www.vestnik-nauki.rf/article/12044> (accessed: 07/31/2025)

13. Андреев М.К., Гамаюнова О.С. Утепление фасадов при реновации жилых зданий типовых серий. *Инженерные исследования*. 2023;12(2):19–26.

Andreev M.K., Gamayunova O.S. Facade insulation during renovation of residential buildings of standard series. *Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]*. 2023;12(2):19–26. (In Russ.)

14. Логинова Н.А., Прищепов А.Ф. Характеристики применяемых и перспективных теплоизоляционных материалов и покрытий для систем теплоснабжения. *Энергосбережение и водоподготовка*. 2012;80(6):20–21.

Loginova N.A., Prishchepov A.F. Characteristics of applied and prospective thermal insulation materials and coatings for heat supply systems. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*. 2012;80(6):20–21. (In Russ.)

15. Буланович В.Ф. Новая технология энергосберегающей гидро теплоизоляции трубопроводов. *Практика противокоррозионной защиты*. 2021;26(4):42–44. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2021.102.4-4>

Bulanovic V.F. New technology of energy-saving hydrothermal insulation of pipelines. *Theory and Practice of Corrosion Protection*. 2021;26(4):42–44. (In Russ.) <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2021.102.4-4>

16. Макачук Г.В., Саркисов С.В., Мележик А.О. К вопросу о выборе современных теплоизоляционных материалов. В кн.: Коновалов В.Б. (ред.) *Актуальные научные проблемы военных исследований: Сборник научных трудов*. СПб.: Изд-во Политехнического университета; 2019. С. 336–343.

Makarchuk G.V., Sarkisov S.V., Melezhiuk A.O. On the choice of modern thermal insulation materials. In: Konovalov V.B. (ed.) *Actual scientific problems of military research: Collection of scientific papers*. St. Petersburg: Polytechnic University Publishing House; 2019, pp. 336–343. (In Russ.)

17. Бегич Я.Э., Турнаев Е.Е., Еникеев А.И. Эксплуатационные свойства штукатурных фасадов с теплоизоляционным слоем из минеральной ваты и экструзионного пенополистирола. В кн.: Беязев Н.Д. (ред.) *Неделя науки*

инженерно-строительного института – 2025: Сборник материалов Всероссийской конференции, г. Санкт-Петербург, 1–4 апреля 2025 г. Ч. 2. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС; 2025. С. 418–420.

Begich Ya.E., Turnaev E.E., Enikeev A.I. Operational properties of plaster facades with a thermal insulation layer of mineral wool and extruded polystyrene foam. In: Belyaev N.D. (ed.) *Science Week of the Civil Engineering Institute – 2025: Collection of materials of the All-Russian Conference, St. Petersburg, April 1–4, 2025. Part 2*. St. Petersburg: POLITEKH-PRESS; 2025, pp. 418–420. (In Russ.)

18. Агапитова А.А., Ахмерова Г.М. Особенности выбора и расчета теплоизоляции воздуховодов. *Строительные конструкции, здания и сооружения*. 2022;1(1):22–32.

Agapitova A.A., Akhmerova G.M. Features of selection and calculation of thermal insulation of air ducts. *Construction, Buildings and Structures*. 2022;1(1):22–32. (In Russ.)

19. Галкин А.Ф., Железняк М.Н., Жирков А.Ф. Повышение тепловой устойчивости дорожных одежд в криолитозоне. *Строительные материалы*. 2021;(7):26–31. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-793-7-26-31>

Galkin A.F., Zheleznyak M.N., Zhirkov A.F. Increasing the thermal stability of the embankment in Permafrost Regions. *Stroitel'nye materialy*. 2021;(7):26–31. (In Russ.) <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-793-7-26-31>

20. Панченко Ю.Ф., Зимакова Г.А., Панченко Д.А. Энергоэффективность использования нового теплозащитного материала для снижения теплопотребления зданий и сооружений. *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2011;33(4):97–105.

Panchenko Yu.F., Zimakova G.A., Panchenko D.A. Energy efficiency of the use of the new heat-protective material for reducing the heat consumption of buildings. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2011;33(4):97–105. (In Russ.)

21. Исанова А.В., Кретова Е.Д., Драпалюк Д.А., Драпалюк Н.А. Анализ использования современной теплоизоляции на основе аэрогеля при проектировании энергоэффективных зданий. *Инженерно-строительный вестник Прикаспия*. 2023;44(2):5–11. <https://doi.org/10.52684/2312-3702-2023-44-2-5-11>

Isanova A.V., Kretova E.D., Drapalyuk D.A., Drapalyuk N.A. Analysis of the use of modern thermal insulation based on aerogel in the design of energy-efficient buildings. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region*. 2023;44(2):5–11. (In Russ.) <https://doi.org/10.52684/2312-3702-2023-44-2-5-11>

22. Ярцев В.П., Мамонтов А.А., Мамонтов С.А. Эксплуатационные свойства и долговечность теплоизоляционных материалов (минеральной ваты и пенополистирола). *Кровельные и изоляционные материалы*. 2013;(1):8–11.

Yartsev V.P., Mamontov A.A., Mamontov S.A. Operating properties and durability of heat-insulating materials (mineral wool and expanded polystyrene). *Roofing and Insulation Materials*. 2013;(1):8–11. (In Russ.)

23. Гусев Б.В., Езерский В.А., Монастырёв П.В. Теплопроводность минераловатных плит в условиях эксплуатационных воздействий. *Промышленное и гражданское строительство*, 2005;(1):48–49.

Gusev B.V., Yezerky V.A., Monastyr'ev P.V. Thermal conductivity of mineral wool slabs under operating conditions. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering*, 2005;(1):48–49. (In Russ.)

24. Гусев Б.В., Езерский В.А., Монастырёв П.В. Потеря массы минераловатных плит в условиях эксплуатационных воздействий. *Кровельные и изоляционные материалы*, 2005;(2):48–49.
- Gusev B.V., Yezersky V.A., Monastyr'ev P.V. Weight loss of mineral wool slabs under operating conditions. *Roofing and Insulation Materials*. 2005;(2):48–49. (In Russ.)
25. Рыженков В.А., Прищепов А.Ф., Логинова Н.А., Кондратьев А.П. О влиянии структурированного тонкопленочного теплоизоляционного покрытия на термическое сопротивление теплопроводов. *Энергосбережение и водоподготовка*. 2010;(5):58–59.
- Ryzhenkov V.A., Prishchepov A.F., Loginova N.A., Kondratiev A.P. On the effect of a structured thin-film thermal insulation coating on the thermal resistance of heat pipelines. *Energoberezhenie i vodopodgotovka = Energy Saving and Water Treatment*. 2010;(5):58–59. (In Russ.)
26. Бухмиров В.В., Гаськов А.К. Исследование энергетической эффективности покрытий для утепления зданий. *Вестник Череповецкого государственного университета*. 2015;69(8):7–11.
- Bukhmirov V.V., Gaskov A.K. Research of energy efficiency of coatings for thermal insulation of buildings. *Cherapovets State University Bulletin*. 2015;69(8):7–11. (In Russ.)
27. Бухмиров В.В., Гаськов А.К. Экспериментальное исследование тонкопленочных энергосберегающих покрытий на основе полых микросфер. В кн.: *Современные научные достижения металлургической теплотехники и их реализация в промышленности: сборник докладов II Международной научно-практической конференции, г. Екатеринбург, 18–21 сентября 2017 г.* Екатеринбург: Изд-во УрФУ; 2018. С. 37–40.
- Bukhmirov V.V., Gaskov A.K. Experimental study of thin-film energy-saving coatings based on hollow microspheres. In: *Modern scientific achievements of metallurgical heat engineering and their implementation in industry: collection of reports of the 2nd International Scientific and Practical Conference, Yekaterinburg, September 18–21, 2017*. Yekaterinburg: Ural University Press; 2018, pp. 37–40. (In Russ.)
28. Панченко Ю.Ф., Зимакова Г.А., Степанов О.А., Панченко Д.А. Теплоизолирующее покрытие на основе жидкой фольги и полых микросфер. *Строительные материалы*. 2012;(8):83–85.
- Panchenko Yu.F., Zimakova G.A., Stepanov O.A., Panchenko D.A. Heat-insulating coating based on liquid foil and hollow microspheres. *Stroitel'nye materialy [Construction Materials]*. 2012;(8):83–85 (In Russ.)
29. Георгияди В.Г., Агапов А.А., Поверенный Ю.С. и др. Применение сверхтонкой теплоизоляции при обустройстве месторождений в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. *Нефтяное хозяйство*. 2023;(1):52–57. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2023-1-52-57>
- Georgiyadi V.G., Agapov A.A., Poverennyu Yu.S., et al. The use of ultrafine thermal insulation in the development of deposits in permafrost distribution. *Neftyanoe khozyaystvo – Oil Industry*. 2023;(1):52–57. (In Russ.) <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2023-1-52-57>
30. Ширинян В.Т. Поход жидко-керамического «супер-теплоизоляционного» покрытия по тепловым сетям России. *Новости теплоснабжения*. 2007;(9):46–51. Режим доступа: https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=1953 (дата обращения 14.06.2025)
- Shirinyan V.T. The campaign of liquid ceramic “super thermal insulation” coating on the heating networks of Russia. *Novosti teplosnabzheniya*. 2007;(9):46–51. Available at: https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=1953 (accessed: 14.06.2025)
31. Матвиевский А.А., Абызова Т.Ю., Александрия М.Г. Жидкокерамические теплоизоляционные покрытия. Сказка о голом короле. *Стройпрофиль*. 2010;(3):28–30. Режим доступа: <https://stroyprofile.com/archive/3983> (дата обращения 14.06.2025)
- Matviyevsky A.A., Abyzova T.Yu., Alexandria M.G. Liquid ceramic thermal insulation coatings. The tale of the naked King. *Stroyprofil*. 2010;(3):28–30. Available at: <https://stroyprofile.com/archive/3983> (accessed: 14.06.2025)
32. Половников В.Ю. Кондуктивный теплоперенос в слое тонкопленочной тепловой изоляции. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2019;330(5):189–197. <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/5/279>
- Polovnikov V.Yu. Conductive heat transfer in layer of thin-film thermal insulation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2019;330(5):189–197. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/5/279>
33. Эффективность теплоизоляционных красок. Режим доступа: https://fibroblok.ru/info/info/effektivnost_teploizolatsionnyh_krasok#!/back (дата обращения 14.06.2025)
- Efficiency of thermal insulation paints. Available at: https://fibroblok.ru/info/info/effektivnost_teploizolatsionnyh_krasok#!/back (accessed: 14.06.2025)
34. Галкин А.Ф., Железняк М.Н., Жирков А.Ф. Критерий выбора строительных материалов для теплоизоляционных слоев дорожных одежд и оснований. *Успехи современного естествознания*. 2022;(8):108–113. <https://doi.org/10.17513/use.37875>
- Galkin A.F., Zheleznyak M.N., Zhirkov A.F. Criterion of choice of building materials for thermal insulation layers of road clothes and bases. *Advances in Current Natural Sciences*. 2022;(8):108–113. (In Russ.) <https://doi.org/10.17513/use.37875>
35. Галкин А.Ф., Железняк М.Н., Жирков А.Ф. Increasing thermal stability of the roads in cryolithic zone. *Transportation Research Procedia*. 2022;63:412–419. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.029>
36. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. *Теплопроводность смесей и композиционных материалов*. Л.: Энергия; 1974. 264 с.
- Dulnev G.N., Zarichnyak Yu.P. *Thermal conductivity of mixtures and composite materials*. Leningrad: Energiya Publ.; 1974. 264 p. (In Russ.)
37. Lichteneker K. Zur Widerstands berechnung misch kristall freier Legierungen. *Physikalische Zeitschrift*. Bd.30. 1929;22:805–810.

Об авторах

ГАЛКИН Александр Федорович, доктор технических наук, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-5924-876X>, Scopus Author ID: 56559565600, SPIN: 9647-2678, e-mail: afgalkin@mail.ru

ЖЕЛЕЗНЯК Михаил Николаевич, доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент РАН, <https://orcid.org/0000-0003-4124-6579>, ResearcherID: J-2544-2018, Scopus Author ID: 22959266400, SPIN: 2349-4867, e-mail: fe1956@mail.ru

ЖИРКОВ Александр Федотович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-6721-5338>, ResearcherID: J-1225-2018, Scopus Author ID: 56226280600, SPIN: 3281-5147, e-mail: zhirkov_af@mail.ru

ПАНКОВ Владимир Юрьевич, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0003-4933-0265>, ResearcherID: 4487803; Scopus Author ID: 1325803806, SPIN: 1423-9990, e-mail: pankov1956@inbox.ru

БАЛУТА Виктор Иванович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-4399-0943>, SPIN: 1843-3885, e-mail: vbaluta@keldysh.ru; vbaluta@yandex.ru

Вклад авторов

Галкин А.Ф. – разработка концепции, методология, проведение исследования, администрирование данных, создание черновика рукописи, визуализация; **Железняк М.Н.** – редактирование рукописи, руководство исследованием, администрирование проекта, получение финансирования; **Жирков А.Ф.** – редактирование рукописи, визуализация, верификация данных; **Панков В.Ю.** – редактирование рукописи, проведение статистического анализа; **Балута В.И.** – проведение исследования, редактирование рукописи, получение финансирования

Конфликт интересов

Один из авторов – доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент РАН Железняк Михаил Николаевич является членом редакционного совета журнала «Природные ресурсы Арктики и Субарктики». Авторам неизвестно о каком-либо другом потенциальном конфликте интересов, связанном с этой рукописью.

About the authors

GALKIN, Aleksandr Fedorovich, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5924-876X>, Scopus Author ID: 56559565600, SPIN: 9647-2678, e-mail: afgalkin@mail.ru

ZHELEZNYAK, Mikhail Nikolaevich, Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, <https://orcid.org/0000-0003-4124-6579>, ResearcherID: J-2544-2018, Scopus Author ID: 22959266400, SPIN: 2349-4867, e-mail: fe1956@mail.ru

ZHIRKOV, Aleksandr Fedotovich, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-6721-5338>, ResearcherID: J-1225-2018, Scopus Author ID: 56226280600, SPIN: 3281-5147, e-mail: zhirkov_af@mail.ru

PANKOV, Vladimir Yuryevich, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Assistant Professor, <https://orcid.org/0000-0003-4933-0265>, ResearcherID: 4487803, Scopus Author ID: 1325803806, SPIN: 1423-9990, e-mail: pankov1956@inbox.ru

BALUTA, Victor Ivanovich, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-4399-0943>, SPIN: 1843-3885, e-mail: vbaluta@keldysh.ru; vbaluta@yandex.ru

Authors' contribution

Galkin A.F. – conceptualization, methodology, investigation, data curation, writing – original draft, visualization; **Zheleznyak M.N.** – writing – review & editing, supervision, project administration, funding acquisition; **Zhirkov A.F.** – writing, review & editing, visualization, validation; **Pankov V.Y.** – writing – review & editing, formal analysis; **Baluta V.I.** – investigation, writing – review & editing, funding acquisition

Conflict of interest

One of the authors – Mikhail N. Zheleznyak, Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences 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 31.07.2025

Поступила после рецензирования / Revised 18.08.2025

Принята к публикации / Accepted 21.08.2025

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Экология

УДК 631.445.57(571.56-191.2)

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-416-426>



Оригинальная статья

Почвы тукуланов Лено-Вилуйского междуречья

Р. В. Десяткин¹, А. З. Иванова^{✉,1}, М. В. Оконешникова¹, А. Р. Десяткин^{1,2},
Н. В. Филиппов¹

¹Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

²Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

✉ madalexia@mail.ru

Аннотация

Исследованы не изученные ранее почвы широко распространенных в Центральной Якутии песчаных массивов – тукуланов. Почвообразующими породами на больших площадях региона выступают древнеаллювиальные легкие по гранулометрическому составу почвообразующие породы дочетвертичного возраста. В голоцене на этих породах начала формироваться светлехвойная тайга, но большие площади вдоль долин рек оставались без растительного покрова и были заняты крупными массивами перевеваемых песков. В настоящее время в условиях происходящих естественных (динамика климата) и антропогенных воздействий (лесные пожары, вырубki и промышленное освоение) происходит заметное расширение безлесных пространств и наблюдается формирование молодых массивов перевеваемых песков. При этом, с одной стороны, наблюдается погребение естественного почвенного покрова, а с другой – эоловая деградация почв на лишенных растительного покрова площадях. Целью данной работы стало исследование свойств основных типов почв, сформированных как на динамичных, так и на закрепленных растительностью участках тукуланов Лено-Вилуйского междуречья. Во время маршрутных исследований применялись сравнительно-географический и профилльно-генетический методы, определение основных физико-химических параметров почвы выполнялось с помощью общепринятых в почвоведении методик. Исследования показали, что на территории распространения легких по гранулометрическому составу пород эолово-древнеаллювиального генезиса распространены мерзлотные боровые песчаные почвы с простым слабодифференцированным и сложным полициклическим профилями. Последние характеризуются признаками погребения. На относительно более увлажненных послепожарных участках строение почвы и ее свойства могут быть осложнены также криотурбационными процессами. Все почвы преимущественно слабокислые, малопродуктивные, характеризуются небольшой суммой обменных оснований и очень низким содержанием гумуса. Криотурбированная почва среднекислая, отличается более выраженными признаками иллювиирования железа и равномерным распределением органического вещества в трансформированной части профиля. Замещение типичных таяжных ландшафтов «пустынными» поверхностными образованиями полностью трансформирует растительно-почвенный покров территории, отрицательно влияя на продуктивность экосистемы.

Ключевые слова: тукулан, почва, Центральная Якутия, пески, эоловый процесс, криолитозона

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 0297-2021-0026, ЕГИСУ НИОКТР № АААА-А21-121012190036-6).

Благодарности. Авторы благодарят коллегу Кырбасову Татьяну Викторовну, принимавшую участие в выполнении лабораторных работ.

Для цитирования: Десяткин Р.В., Иванова А.З., Оконешникова М.В., Десяткин А.Р., Филиппов Н.В. Почвы тукуланов Лено-Вилуйского междуречья. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(3):416–426. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-416-426>

Soils of the Tukulans on the Lena-Vilyui interfluve

Roman V. Desyatkin¹, Alexandra Z. Ivanova^{✉,1}, Matrena V. Okoneshnikova¹,
Alexey R. Desyatkin^{1,2}, Nikolai V. Filippov¹

¹*Institute for Biological Problems of Cryolithozone,*

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

²*Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation*

✉ madalexia@mail.ru

Abstract

This study investigates previously unexamined soils of the widespread sand massifs, known as tukulans, in Central Yakutia. The parent materials across large areas of the region consist of ancient alluvial deposits with light granulometric composition, dating back to the Quaternary period. During the Holocene, light-coniferous taiga began to form on these deposits; however, extensive areas along river valleys remained devoid of vegetation and were occupied by vast mass of wind-blown sands. Currently, under the influence of natural factors (climate dynamics) and anthropogenic impacts (forest fires, logging, and industrial development), there is a noticeable expansion of treeless areas, accompanied by the formation of young sand massifs. Simultaneously, the natural soil cover undergoes burial, whereas in areas devoid of vegetation, soils experience Aeolian degradation. The aim of this study was to analyze the composition and properties of the main soil types formed in both dynamic and those stabilized by vegetation within the Lena-Vilyui interfluve tukulans. The study employed comparative-geographical and profile-genetic methods, with the determination of key physicochemical soil parameters conducted using standard soil science methods. Results indicate that in areas dominated by light granulometric aeolian-ancient alluvial deposits, permafrost pine forest sandy soils with simple, weakly differentiated, complex polycyclic profiles are widespread. These profiles exhibit signs of burial. In relatively more humid post-fire areas, soil structure and properties are further influenced by cryoturbation processes. All soils are predominantly slightly acidic, characterized by low exchangeable base content and low humus levels. Cryoturbated soils are moderately acidic and display more pronounced iron illuviation and a uniform distribution of organic matter in the transformed soil profile. The replacement of typical taiga landscapes with “desert”-like surface formations drastically alters the vegetation and soil cover of the area, negatively affecting the ecosystem’s productivity.

Keywords: tukulans, soil, Central Yakutia, sands, aeolian process, cryolithozone

Funding. This study was conducted as part of the state assignment from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 0297-2021-0026, reg. No. AAAA-A21-121012190036-6).

Acknowledgements. The authors thank their colleague, Tatyana Viktorovna Kyrbasova, for her participation in laboratory work.

For citation: Desyatkin R.V., Ivanova A.Z., Okoneshnikova M.V., Desyatkin A.R., Filippov N.V. Soils of the Tukulans on the Lena-Vilyui interfluve. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(3):416–426. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-416-426>

Введение

Центрально-Якутская равнина сложена преимущественно кембрийскими породами, перекрытыми мощным чехлом из континентальных и морских песков, песчаников и глин среднего и верхнего мезозоя. Почвообразующими породами рассматриваемой территории в настоящее время выступают неогеновые и четвертичные легкосуглинистые и песчаные отложения в пределах долин Лены и Вилюя, а также лёссовидные карбонатные покровные суглинки – на междуречных плато [1]. В современном рельефе Центральной Якутии особняком выделяется зо-

ловая морфоскульптура [2]. В засушливых районах низовьев рек Вилюй, Линде и среднего течения Лены активно развеваемые пески формируют необыкновенный феномен криолитозоны – тукуланы, которые представляют собой комплексное образование, сочетающее разнообразные формы эолового рельефа различного возраста [3–5]. Наличие обширных северных «пустынь» (площадь тукуланов может превышать несколько сот квадратных километров) в зоне бореальной тайги свидетельствует о возможности замещения таежных экосистем малопродуктивными ландшафтами. Образование Вилюйской группы тукуланов



Рис. 1. Типичный ландшафт тукулана в низовьях р. Вилуй в окрестностях с. Кысыл-Сыр

Fig. 1. Typical landscape of a tukulan in the lower reaches of the Vilyuy River near the village of Kysyl-Syr

некоторые авторы [6] связывают с обширными пожарами, произошедшими около 4,5–5 тыс. лет назад, ставшими своеобразным активатором очередной, современной фазы эоловых процессов. Тогда полностью лишенные растительности эмбриональные дюнные массивы не успели закрепиться и быстро разрослись. Деградация почвенно-растительного покрова происходила из-за погребения леса дюнами и выдувания песка из-под корневой системы растений.

В криолитозоне последние десятилетия наблюдаются выраженные климатические изменения в сторону роста среднегодовых температур [7]. Изменения климата вызывают удлинение теплого периода года, уменьшение количества атмосферных осадков при существенном повышении температур, что негативно отражается на функционировании квазиравновесных мерзлотных экосистем. Также под влиянием естественных и антропогенных факторов на территории Центральной Якутии ежегодно происходит много лесных пожаров, которые уничтожают десятки и сотни тысяч гектаров леса. Как правило, на большей части площади гарей, особенно расположенных на легких породах, лесовосстановление протекает крайне замедленно [8]. На таких территориях в условиях сухого климата и в связи с хорошей отмытостью песка русловой фации древнего аллювия от песчаной пыли [9] снова увеличивается интенсивность эоловых процессов с последующим проявлением признаков образования новых и увеличением динамической активности уже существующих тукуланов (увеличение площади, изменение рельефа дюн и барханов и т. д.).

Почвенный покров современных тукуланов изучен очень слабо. Сведения о почвах на более старых эоловых образованиях Центральной Якутии, закрепленных растительностью, встречаются чаще [10–13].

Целью данного исследования является изучение разнообразия почв тукуланов, их состава и свойств, а также направленности динамики почвенного покрова слабоустойчивых к воздействию лесных экосистем бореальной зоны под влиянием естественных и антропогенных факторов.

Материалы и методы

Лено-Вилуйский район представлен равнинной территорией в пределах криолитозоны с резко континентальным засушливым климатом. Количество осадков около 200–250 мм. По данным метеостанции в с. Кысыл-Сыр Вилуйского улуса, расположенном недалеко от района исследования, среднемесячная температура января колеблется от –32,6 до –46,3 °С, июля – от +16,0 до +21,4 °С. Продолжительность безморозного периода составляет около 80–90 дней [14]. Преобладают западно-направленные ветра.

По флористическому районированию территория относится к Центрально-Якутскому флористическому району, по лесорастительному – к Центральноякутской провинции сосново-лиственничных лесов. Во флоре тукуланов насчитывается около 70 видов сосудистых растений, среди которых преобладают специфические эндемичные виды [15]. Объектом исследования стали почвы двух крупных массивов развеваемых песков, сформированных в междуречье Лено-Вилуйского междуречья (рис. 1, 2).

Первый тукулан (участок 1, рис. 2, а) расположен на правом берегу р. Вилуй, в 30 км на восток от с. Кысыл-Сыр, 63°54' с.ш., 123°16'–123°20' в.д., на высоте 97–111 м н.у.м. в пределах нижней границы нижнего уровня аллювиальной равнины Вилуйского бассейна [9], которая относится к межлассному типу местности Вилуйской аласной провинции группы среднетаежных провинций сплошного распространения многолетнемерзлых пород [16]. В районе данного тукулана распространены сосняки толокнянково-лишайниковые преимущественно на сухих местопроизрастаниях или послепожарные мертвопокровные сосняки [17]. Здесь было вскрыто и описано два почвенных разреза: на окраине (разрез 2) и в центре тукулана (разрез 3).

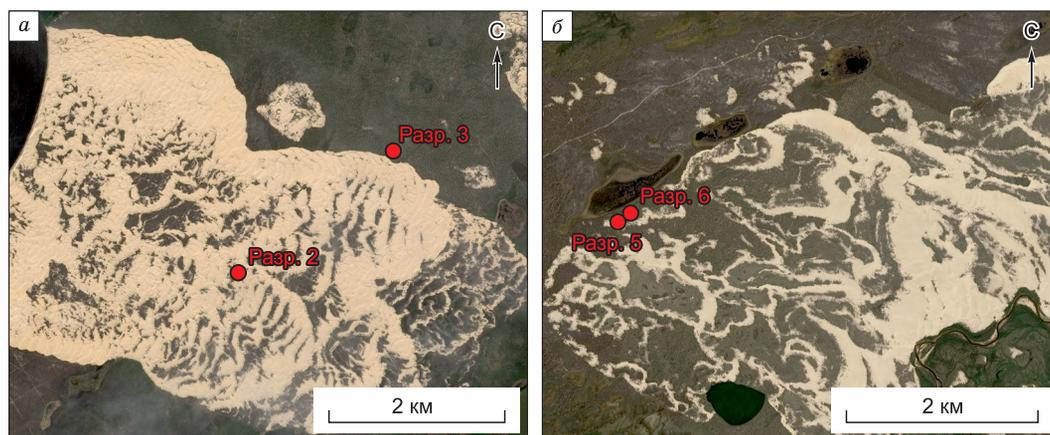


Рис. 2. Места заложения разрезов на тукуланах Лено-Вилуйского междуречья (*a* – участок 1; *б* – участок 2)
Fig. 2. Locations of soil profiles on the tukulans of the Lena-Vilyui Interfluve (*a* – site 1; *б* – site 2)

Второй тукулан (участок 2, рис. 2, *б*) находится в 100 км к югу от первого, $63^{\circ}18'–63^{\circ}19'$ с.ш., $123^{\circ}42'–123^{\circ}44'$ в.д., на высоте 178–200 м н.у.м. на верхнем уровне древней аллювиальной равнины Вилуйского бассейна, которая относится к средневысотному террасовому типу местности Вилуйской аласной провинции. Основным типом растительного сообщества является сосняк бруснично-багульниково-лишайниковый на средне-влажных местах произрастания [17]. Здесь было вскрыто и описано два почвенных разреза с признаками погребения в деятельной части профиля почвы (разрезы 5 и 6).

Район сложен мощной толщей древнего аллювия с широким распространением грунтовых льдов на нерасчлененных участках. Литогенная основа межлассного типа местности представлена ледовым комплексом [18]. Мощность повторно-жильных льдов (ПЖЛ) колеблется от 10–15 до 60–70 м, преобладающими криогенными текстурами супесчано-суглинистых пород являются слоистые, линзовидные и сетчатые, песчаных – массивные. Объемная льдистость пород с учетом ПЖЛ 45–85 %. Температура мерзлых пород от -2 до -4 °C [18–22]. Мощность сезонно-талого слоя изменяется от 1,0–1,3 м в районе первого тукулана до 1,8–2,5 м во втором [16].

Во время экспедиционных маршрутов производились почвенно-географические, морфогенетические исследования по общепринятым методикам. При проведении почвенных исследований использовались сравнительно-географический, сравнительно-аналитический [23] и профильно-генетический [24] методы, а при выполнении химико-аналитических работ – об-

щепринятые в почвоведении химические и физико-химические методы [25, 26]. Несиликатная форма железа была определена с помощью дитионитовой вытяжки по методу Мера–Джексона. Коэффициент корреляции был подсчитан в программе Excel. Разделение ландшафтов на типы производилось на основе известных принципов [27]. Названия почв даны согласно списку, приведенному в Едином государственном реестре почвенных ресурсов России [28, 29], а также в соответствии с классификацией почв в Международной реферативной базе по почвенным ресурсам [30]. С учетом специфики развития почв Якутии в зоне многолетнемерзлых пород все типы почв, в том числе боровые, были названы «мерзлотными» [31].

Результаты и обсуждение

Установлено, что на территории распространения легких по гранулометрическому составу пород золово-древнеаллювиального генезиса под естественными светлохвойными разреженными лесами широко развиты мерзлотные боровые песчаные почвы с простым, слабодифференцированным и сложным полициклическим профилями. Все разновидности почв в разной степени подвержены периодическому влиянию низовых лесных пожаров, активизирующему проявление золовых процессов.

Разрез 2 ($63^{\circ}54'07,05''$ с.ш., $123^{\circ}16'56,28''$ в.д., 111 м н.у.м.) вскрыт в постепенно погребаемом толкнянково-лишайниковом сосняке с подветренной стороны песчаной дюны (участок 1, рис. 3). Деревья на участке здоровые, но на засыпанной песком части много засыхающих деревьев, древостой среднесомкнутый, возраст



Рис. 3. Исследованные профили песчаных почв тукуланов

Fig. 3. Investigated profiles of tukulan sandy soils

около 80 лет. Проективное покрытие исходного сосняка около 30 %, господствует толокнянка (*Arctos taphylos uva-ursi*). В мохово-лишайниковом покрове распространены *Cladonia rangiferina*, *C. stellaris*. На слабозакрепленном песчаном склоне встречаются овсяница ленская (*Festuca lenensis*), шавель злаколистный (*Acetosella graminifolia*) [17]. Приближающиеся песчаные дюны достигают высоты 2–4 м. Почва сформирована на чуть более древних эолово-аллювиальных отложениях, чем движущиеся на нее пески тукулана. Почва: мерзлотная боровая песчаная, переходная в сторону подбура (в системе WRB Protic Arenosols (Ochric)). Строение профиля O_{ao},p_{ir}(0–2 см) – AB_f(2–5 см) – BC(5–15/20 см) – C(15/20–45/52 см) – C'(45/52–130 см) – C''(130–180 см). Морфологический профиль почвы генетически слабо дифференцирован: подстильно-грубогумусовый маломощный слой имеет признаки горения, сменяется небольшим буровато-охристым переходным гумусово-минеральным горизонтом, ниже залегают пески светло-серовато-бурой окраски, немного светлеющие с глубиной, со слабовыраженной слоистостью. Охристый оттенок грунта под органомным слоем, скорее всего, связан с окислением до трехвалент-

ного железа в песчаной почве под действием высоких температур во время пожаров [8, 32], а также воздействием экзогенных факторов (воздуха и влаги).

Гранулометрический состав почвы в разрезе 2 рыхлопесчаный (см. таблицу). Содержание органического углерода во всех минеральных горизонтах очень низкое, реакция среды колеблется от кислой до близкой к нейтральной, рН почв увеличивается с глубиной.

Разрез 3 (63°54'51,99" с.ш., 123°19'12,13" в.д., 100 м н.у.м.) был описан под лишайниковым сосняком в центре частично закрепленного растительностью тукулана (см. участок 1, рис. 3), поверхность ровная, со всех сторон окружена песками. Островки с сосновым лесом посреди тукулана локализуются в понижениях мезорельефа и на участках с наибольшим количеством деревьев. На не закрепленных растительностью частях тукулана изредка встречается из злаков *Elytrigia villosa* [17]. Почва: мерзлотная боровая песчаная слабоподзоленная (Erialbic Arenosols в системе WRB). Строение профиля: O(0–3 см) – A(3–8/10 см) – E(8/10–13/20 см) – B_f(13/20–25/26 см) – BC(25/26–76 см) – C(76–180 см) – C'(180–200 см). Морфологический профиль такой

Физико-химические свойства почв

Physical and chemical properties of soils

| Горизонт | Глубина отбора, см | pH (H ₂ O) | C _{орг} , %* | Обменные катионы, ммоль/100 г | | Гидролитическая кислотность | Насыщенность, % | Fe (несиликатное), % | Сумма частиц (мм), % | |
|--------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------------|------------------|-----------------------------|-----------------|----------------------|----------------------|-------|
| | | | | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | | | | <0,001 | <0,01 |
| Разрез 2 | | | | | | | | | | |
| ABf | 2-5 | 4,88 | 0,71 | 0,38 | 0,20 | 6,53 | 8,2 | —** | 0,5 | 1,1 |
| BC | 5-15(20) | 5,28 | 0,11 | 0,31 | 0,15 | 0,23 | 66,7 | — | 0,3 | 0,9 |
| C | 15(20)-45(52) | 5,42 | 0,05 | 0,16 | 0,19 | — | — | — | 0,1 | 0,7 |
| C' | 45(52)-130 | 6,04 | 0,01 | 0,36 | 0,20 | — | — | — | 0,3 | 0,7 |
| C'' | 130-180 | 6,17 | 0,01 | 0,38 | 0,20 | — | — | — | 3,9 | 4,3 |
| Разрез 3 | | | | | | | | | | |
| A | 3-8(10) | 5,26 | 6,28 | 2,60 | 0,95 | 1,98 | 64,2 | — | 1,3 | 4,8 |
| E | 8(10)-13(20) | 5,33 | 0,75 | 0,40 | 0,20 | 0,53 | 53,1 | — | 0,7 | 3,5 |
| Bf | 13(20)-25(26) | 5,11 | 0,56 | 0,25 | 0,15 | 0,64 | 38,5 | — | 3,9 | 6,3 |
| BC | 25(26)-76 | 5,49 | 0,03 | 0,10 | 0,05 | — | — | — | 3,9 | 4,7 |
| C | 76-180 | 5,57 | 0,02 | 0,18 | 0,08 | — | — | — | 3,9 | 4,3 |
| C' | 180-200 | 5,83 | 0,02 | 0,28 | 0,16 | — | — | — | 3,9 | 4,5 |
| Разрез 5 | | | | | | | | | | |
| CA | 33(37)-40(43) | 5,34 | 0,14 | 0,06 | 0,03 | — | — | 0,054 | 3,5 | 3,9 |
| [AE] | 40(43)-48(50) | 5,32 | 0,30 | 0,06 | 0,03 | 0,29 | 23,7 | 0,053 | 3,9 | 4,9 |
| [BF] | 48(50)-65(68) | 5,23 | 0,16 | 0,08 | 0,02 | — | — | 0,259 | 3,5 | 4,3 |
| [BC] | 65(68)-140 | 5,35 | 0,03 | 0,08 | 0,03 | — | — | 0,031 | 3,7 | 4,7 |
| [C] | 140-160 | 5,84 | 0,02 | 0,17 | 0,04 | — | — | 0,029 | 3,9 | 4,5 |
| [C'] | 160-180 | 5,87 | 0,02 | 0,17 | 0,06 | — | — | 0,073 | 0,1 | 0,5 |
| Разрез 6 | | | | | | | | | | |
| Oao,pir | 0-2 | 4,95 | 19,9* | 0,38 | 0,25 | 6,81 | 8,5 | 0,557 | — | — |
| A | 2-5(15) | 3,83 | 2,09 | 0,20 | 0,23 | 4,42 | 8,9 | 0,150 | 0,1 | 2,3 |
| [E, EB, Bf]@ | 5(15)-10(17) | 4,20 | 0,30 | 0,08 | 0,07 | 0,87 | 14,7 | 0,037 | 0,3 | 1,1 |
| | 10(17)-30(40) | 4,59 | 0,17 | 0,06 | 0,05 | 0,52 | 17,5 | 0,126 | 0,1 | 0,5 |
| | 30(40)-70(100) | 4,71 | 0,29 | 0,06 | 0,05 | 0,81 | 12,0 | 0,173 | 3,9 | 4,3 |
| [AOpir] | 70(100)-72(110) | 4,60 | 17,5* | 0,15 | 0,13 | 5,03 | 5,3 | 0,767 | 7,0 | 13,5 |
| [C] | 72(110)-135 | 5,11 | 0,04 | 0,05 | 0,02 | — | — | 0,059 | 3,7 | 4,1 |

* Потеря при прокаливании, % / loss on ignition, %.

** Не определялось в данном образце / not determined in this sample .

почвы близок по строению к подзолам и относительно ясно дифференцирован на генетические горизонты: под небольшим гумусовым горизонтом залегает оподзоленный слой с белесыми и бурыми пятнами, сменяющийся буровато-охристым иллювиальным горизонтом. Гранулометрический состав песчаный с незначительным повышением содержания илистых частиц в нижней части профиля. Реакция среды вниз по профилю меняется от среднекислой до близкой к нейтральной,

в связи с чем гидролитическая кислотность в незначительных количествах проявляется только в верхней половине профиля. В нижележащих слоях на светло-сером фоне присутствуют многочисленные ржавые пятна и полосы, свидетельствующие об окислительной обстановке и накоплении в них окисных форм железа.

В пределах активно развивающейся части второго тукулана (участок 2) под наносом однородного песка различной мощности обнаруживаются

ся погребенные мерзлотные боровые слабоподзоленные песчаные почвы (в системе WRB EpiAlbic Arenosols (Aeolic)). Разрез 5 (63°19'24,72" с.ш., 123°42'15,44" в.д., 178 м н.у.м.) был заложен в чаше выдувания на западной стороне тукулана (см. рис. 3). Растительность практически отсутствует. Встречается *Acetosella graminifolia* в вегетирующем состоянии, а также имеются островки сосняков на повышенных местах [17]. Строение профиля: C(0–33/37 см) – CA(33/37–40/43 см) – [AE](40/43–48/50 см) – [BF](48/50–65/68 см) – [BC](65/68–140 см) – [C](140–160 см) – [C'](160–180 см). Профиль почвы характеризуется наличием сверху мощного (около 40 см) песчаного наноса, под которым четко выделяются погребенные гумусово-элювиальный и иллювиально-железистый горизонты с многочисленными включениями углей. В погребенной мерзлотной боровой песчаной слабоподзоленной почве передвижения мелких частиц физической глины, в том числе ила, не наблюдается, только в иллювиальном горизонте обнаружено относительное повышение фракции крупной и мелкой пыли. Следует отметить разорванность и слоенность погребенного гумусово-элювиального горизонта. Реакция среды слабокислая и в нижней части профиля близкая к нейтральной. Содержание органического вещества и обменных катионов очень низкое.

На чуть более низинных участках современных тукуланов, закрепленных растительностью, под мертвопокровными сосняками были описаны мерзлотные боровые оподзоленные криотурбированные постпирогенные песчаные почвы с полициклическим профилем, содержащие под иллювиальным горизонтом погребенный грубогумусовый горизонт (Albic Arenosols (Gelic, Protosodic, Turbic) в системе WRB) – разрез 6 (63°19'25,01" с.ш., 123°42'11,07" в.д., 177 м н.у.м.). Исходный тип леса – сосняк бруснично-багульниковый (возраст около 100 лет), образованный после беглого низового пожара средней интенсивности (нагар на деревьях на высоте до 2 м), который уничтожил подстилку, живой напочвенный покров. Напочвенное проективное покрытие достигает 10 %, отмечается рассеянное произрастание *Ledum palustre*, *Vaccinium vitis-idaea* [17]. Строение почвенного профиля: Oao,pir(0–2 см) – A(2–5/15 см) – [E,EB,BF]@(5/15–70/100 см) – [AOpir](70/100–72/110) – [C](72/110–135 см). Отличительными особенностями профиля данного разреза являются, во-первых, его криотур-

бированность, которая проявилась в виде вихревого рисунка минеральной массы и погребенных фрагментов органогенного горизонта, а также в насыщении минеральной массы растительными углистыми остатками, во-вторых, высокая переувлажненность нижней части профиля – горизонт C мокрый, по стенкам сочится вода. Погребенный грубогумусовый слой с угольками (ППП 17,5 %) и высоким содержанием илистых частиц (7 %) расположен на глубине 70–72 см, над ним выделяется заметно выраженный по окраске ярко-охристый иллювиальный горизонт, который в свою очередь сыграл своеобразную экранирующую роль для нисходящего потока веществ и поспособствовал аккумуляции органо-железистых соединений и ила. Несмотря на преимущественно рыхлопесчаный гранулометрический состав, отмечается значительная дифференциация илистых частиц – обеднение ими оподзоленных горизонтов и накопление их в иллювиальном горизонте. Реакция среды сильно-кислая и кислая, т. е. по сравнению с вышеописанными почвами данная почва самая кислая, насыщенность почвенно-поглощающего комплекса основаниями очень низкая.

В почвах с заметно дифференцированным профилем (разрезы 5 и 6) наблюдается распределение несиликатного (свободного) железа с минимумами содержания в оподзоленных горизонтах и высокими скачкообразными максимумами – в иллювиально-железистых, что указывает на активность процесса подзолообразования. Также показатель содержания несиликатного (свободного) железа может говорить о степени выветрелости и, соответственно, «зрелости» почв. В разрезе 5 были выявлены наиболее низкие значения, что вполне закономерно, так как почва находится в пределах самой динамичной части тукулана. Разрез 6 был сформирован на частично закрепленном участке тукулана. Здесь процессы гумусонакопления и преобразования почвенной массы выражены сильнее, и верхняя часть почвы (от поверхности до погребенного органогенного слоя) по морфологии относится к стволу постлитогенного почвообразования, на что указывают и более высокие значения содержания свободного железа (судя по окраске преобладают сильно кристаллизованные формы). Накопление железа в поверхностных и погребенных органогенных горизонтах с высоким содержанием органики (потеря при прокаливании более 17 %) выше, чем в других слоях. Коэф-

фициент корреляции содержания несиликатного железа с содержанием органического вещества в горизонтах с показателем гумуса менее 2 % характеризуется низким значением. Но при этом в почве динамичной части тукулана зависимость от данного показателя чуть ниже, чем в почве закрепленного участка ($r = 0,23$ и $r = 0,42$ соответственно). Возможно, это связано с относительно более выраженным в данном разрезе процессом железистого иллювиирования, при котором в составе ила начинают преобладать подвижные железогумусовые формы [33]. На это указывает также высокая корреляционная связь между содержанием свободного железа и долей физической глины ($r = 0,82$).

Заключение

Натурные наблюдения показали, что отмечаемое в настоящее время увеличение площадей тукуланов, в целом, во многом носит постпирогенную природу, как и раньше. На изученной территории практически не осталось не пройденных пожаром участков. Ввиду обширных площадей гарей, отсутствия или малой обеспеченности семенными деревьями, встреченные нами гари имеют недостаточное возобновление. Уничтожение подстилки приводит к развеванию обнажившихся песков, а самоизреживание леса приводит к интенсификации площадного роста тукуланов. Современная пожарная обстановка, сухие погодные условия вследствие глобальных изменений климата усиливают процесс «опустынивания» в регионе и способствуют трансформации лесных экосистем и фрагментации растительно-почвенного покрова.

Почвы закрепленных растительностью частей тукуланов представлены преимущественно мерзлотными боровыми оподзоленными песчаными почвами с достаточно простым строением профиля и слабым проявлением признаков элювиально-иллювиальных процессов. Почвы слабокислые (за исключением криотурбированной), малогумусные, слабо насыщенные основаниями. На активных в настоящее время участках тукуланов встречаются профили, осложненные криотурбационными процессами, где под мощным наносом песка вскрываются погребенные почвы. При этом цикличность исследованных песчаных почв не слишком высока – в пределах деятельного слоя почвы вскрывается только один погребенный гумусовый горизонт, что говорит о том, что в процессе формирования этих профилей была

продолжительная фаза сухой эоловой седиментации и более редкие относительно влажные периоды закрепления растительностью. Криотурбации были отмечены только в одном профиле почвы (разрез б), которая по описанию была наиболее увлажнена, располагалась в небольшой депрессии и постоянно подвергалась воздействию пожаров. Таким образом, на примере почвы разреза б следует вывод о том, что, несмотря на очень глубокое залегание многолетнемерзлых пород, криогенные процессы могут сильно влиять на трансформацию строения и свойств верхней половины профиля почв тукуланов в зависимости от динамики гидротермических условий. Криотурбированная почва среднекислая, отличается более выраженными признаками иллювиирования железа и равномерным распределением органического вещества в трансформированной части профиля.

Почвы тукуланов в силу их эолового происхождения считаются интразональными. Это относительно молодые некарбонатные почвы, которые достаточно сильно отличаются по гранулометрическому составу, реакции среды и видам преобладающих почвенных процессов от мерзлотных палевых почв, являющихся зональным типом для террас и водоразделов Центральной Якутии. Для нейтральных и слабощелочных суглинистых палевых почв характерно метаморфическое изменение срединных горизонтов, для кислых песчаных почв тукуланов – альфегумусовое подзолообразование. Все различия обусловлены разницей в составе почвообразующей породы. Тукуланы характеризуются развитием бедных по составу почв с низким плодородием, и их продолжающееся обширное распространение в Лено-Вилуйском междуречье, замещение ими типичных таежных ландшафтов приводит не только к изменению растительно-почвенного покрова, но и к снижению общей биологической продуктивности территории.

Список литературы / References

1. Гвоздецкий Н.А., Михайлов Н.И. Физическая география СССР. *Азиатская часть*. М.: Мысль; 1978. 512 с.
2. Gvozdetzky N.A., Mikhailov N.I. *Physical geography of the USSR: The Asian region*. Moscow: Mysl' Publ.; 1978. 512 p. (In Russ.)
3. Якутия. Отв. ред. С.С. Коржуев. М.: Наука; 1965. 467 с.
4. Yakutia. Korzhuev S.S. (ed.) Moscow: Nauka; 1965. 467 p. (In Russ.)
5. Галанин А.А., Павлова М.Р., Шапошников Г.И., Лыткин В.М. Тукуланы: песчаные пустыни Якутии. *Природа*. 2016;1215(11):44–55.

- Galanin A.A., Pavlova M.R., Shaposhnikov G.I., Lytkin V.M. Tukulans: sandy deserts of Yakutia. *Priroda*. 2016;1215(11):44–55. (In Russ.)
4. Данилов Ю.Г., Федоров А.Н., Дегтева Ж.Ф. и др. *Ландшафты Якутии*. Якутск: Издательский дом СВФУ; 2016. 76 с.
- Danilov Yu.G., Fedorov A.N., Degteva Zh.F., et al. *Landscapes of Yakutia*. Yakutsk: NEFU Publishing House; 2016. 76 p. (In Russ.)
5. Лукин В.В. Тукуланы – типичные ландшафты Центральной Якутии: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Якутск. 2023.23 с.
- Lukin V.V. Tukulans as typical landscapes in Central Yakutia: Abstr. ... Diss. Cand. Sci., Yakutsk. 2023. 23 p. (In Russ.)
6. Павлова М.Р., Галанин А.А., Рудая Н.А. Палинологические и радиоуглеродные данные о верхнечетвертичных отложениях дюнного массива – тукулан Кысыл-Сырский (Центральная Якутия). *Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата*. 2016;7(1):100–107.
- Pavlova M.R., Galanin A.A., Rudaya N.A. Palynological and radiocarbon data from Late Quaternary sediments of the dune massif – Tukulans Kysyl-Syrskiy (Central Yakutia). *Environmental Dynamics and Global Climate Change*. 2016;7(1):100–107. (In Russ.)
7. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. М.: Росгидромет; 2021. 104 с.
- A report on climate features on the territory of the Russian Federation in 2020*. Moscow: Roshydromet Publ.; 2021. 104 p. (In Russ.)
8. Десяткин Р.В., Николаева М.Х., Иванова А.З. и др. Влияние крупных лесных пожаров 2021 года на растительность и почвы на территории распространения легких почвообразующих пород Центральной Якутии. *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева*. 2024;(118):231–275. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-118-231-275>
- Desyatkin R.V., Nikolaeva M.Ch., Ivanova A.Z., et al. The impact of 2021 large forest fires on vegetation and soils, on the territory of distribution of light soil-forming rocks in Central Yakutia. *Dokuchaev Soil Bulletin*. 2024;(118):231–275. (In Russ.) <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-118-231-275>
9. Зольников В.Г., Еловская Л.Г., Тетерина Л.В., Черняк Е.И. *Почвы Вилуйского бассейна и их использование*. М.: Издательство АН СССР; 1962. 204 с.
- Zol'nikov V.G., Elovskaya L.G., Teterina L.V., Chernyak E.I. *Soils of the Vilyui River's basin and their use*. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1962. 204 p. (In Russ.)
10. Оконешникова М.В., Иванова А.З., Десяткин А.Р. и др. Почвы тукуланов бассейна реки Кенкеме (Центральная Якутия). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2020;25(4):111–120. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-4-9>
- Okoneshnikova M.V., Ivanova A.Z., Desyatkin A.R., et al. Soils of tukulans in the Kenkeme river basin (Central Yakutia). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2020;25(4):111–120. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-4-9>
11. Оконешникова М.В. Почвенный покров на участке перехода магистрального газопровода через р. Тюнг Вилуйского бассейна (Якутия). *Вестник КрасГАУ*. 2011;(12(63)):82–86.
- Okoneshnikova M.V. Soil cover on the site where the cross-country gas pipe-line crosses the Tung River of the Vilyui basin (Yakutia). *Bulletin of KSAU*. 2011;(12(63)):82–86. (In Russ.)
12. Павлов Б.А., Вариончик С.В., Павлова М.Р. Подзолы на песках центральной Якутии. В кн.: *Отражение био-, гео-, антропоферных взаимодействий в почвах и почвенном покрове: Сборник материалов V Международной научной конференции, г. Томск, 7–11 сентября 2015 г.* Томск: Издательский дом Томского государственного университета; 2015. С. 73–75.
- Pavlov B.A., Varionchik S.V., Pavlova M.R. Podzols on the sands of Central Yakutia. In: *Reflection of bio-, geo-, anthropospheric interactions in soils and soil cover: Collection of materials of the 5th International Scientific Conference, Tomsk, September 7–11, 2015*. Tomsk: Publishing House of Tomsk State University; 2015, pp. 73–75. (In Russ.)
13. Скрыбыкина В.П. Подзолы Центральной Якутии. *Наука и образование*. 2017;86(2):83–90.
- Skrubykina V.P. Podzols of Central Yakutia. *Nauka i Obrazovanie*. 2017; 86(2):83–90. (In Russ.)
14. *Климат Якутской АССР*. Изюменко С.А. (ред.). Л.: Гидрометеониздат; 1968. 32 с.
- Climate of the Yakut ASSR*. Izyumenko S.A. (ed.). Leningrad: Hydrometeorological Publishing House; 1968. 32 p. (In Russ.)
15. Захарова В.И., Кузнецова Л.В., Иванова Е.И. и др. *Разнообразие растительного мира Якутии*. Новосибирск: Издательство СО РАН; 2005. 328 с.
- Zakharova V.I., Kuznetsova L.V., Ivanova E.I. et al. *Diversity of the flora in Yakutia*. Novosibirsk: SB RAS Publishing House; 2005. 328 p. (In Russ.)
16. Федоров А.Н., Торговкин Я.И., Шестакова А.А. и др. *Мерзлотно-ландшафтная карта Республики Саха (Якутия). Масштаб 1:1 500 000*. Железняк М.Н. (ред.). Якутск: ИМЗ СО РАН; 2018.
- Fedorov A.N., Torgovkin Ya.I., Shestakova A.A., et al. *Permafrost Landscape Map of the Republic of Sakha (Yakutia). Scale 1:1 500 000*. Zheleznyak M.N. (ed.). Yakutsk: Permafrost Institute SB RAS; 2018. (In Russ.)
17. Габышева Л.П. Характеристика сосновых лесов тукуланов Лено-Вилуйского междуречья. *Успехи современного естествознания*. 2020;(10):7–13. <https://doi.org/10.17513/use.37483>
- Gabyshva L.P. Characteristics of pine forests on aeolian sandy landscapes (tukulans) of the Lena-Vilyui interfluvium. *Advances in Current Natural Sciences*. 2020;(10):7–13. (In Russ.) <https://doi.org/10.17513/use.37483>
18. Соловьев П.А. *Криолитозона северной части Лено-Амгинского междуречья*. М.: Изд-во АН СССР; 1959. 144 с.
- Soloviev P.A. *Cryolithozone of the northern part of the Lena-Amga interfluvium*. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1959. 144 p. (In Russ.)
19. Катасонова Е.Г., Толстов А.Н. Геокриологические особенности развеваемых песков (тукуланов) правобережья р. Вилуй. В кн.: *Многолетнемерзлые горные породы различных районов СССР*. М.: Изд-во АН СССР; 1963. С. 166–178.
- Katasonova E.G., Tolstov A.N. Geocryological features of blown sands (tukulans) of the right bank of the Vilyui river. In: *Permafrost rocks in various regions of the USSR*. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1963, pp. 166–178. (In Russ.)
20. Бойцов А.В., Шепелев В.В. Мерзлотно-геологические условия массива развеваемых песков Махатта (Центральная Якутия). В кн.: *Пигузов В.М. (ред.) Гидрогеологические исследования криолитозоны*. Якутск; 1976. С. 25–34.

Boitsov A.V., Shepelev V.V. Permafrost-hydrogeological conditions of the massif of blown sands Mahatta (Central Yakutia). In: Piguzov V.M. (ed.) *Hydrogeological studies of permafrost*. Yakutsk; 1976, pp. 25–34. (In Russ.)

21. *Строение и абсолютная геохронология аласных отложений Центральной Якутии*. Катасонов Е.И. (ред.). Новосибирск: Наука; 1979. 95 с.

Structure and absolute geochronology of alas deposits of Central Yakutia. Katasonov E.I. (ed.). Novosibirsk: Nauka; 1979. 95 p. (In Russ.)

22. Иванов М.С. *Криогенное строение четвертичных отложений Лено-Алданской впадины*. Новосибирск: Наука; 1984. 125 с.

Ivanov M.S. *Cryogenic Composition of Quaternary Deposits of Lena-Aldan Depression*. Novosibirsk: Nauka; 1984. 125 p. (In Russ.)

23. Роде А.А. *Система методов исследования в почвоведении*. Новосибирск: Наука; 1971. 93 с.

Rode A.A. *System of research methods in soil science*. Novosibirsk: Nauka; 1971. 93 p. (In Russ.)

24. Розанов Б.Г. *Морфология почв*. М.: Академический Проект; 2004. 432 с.

Rozanov B.G. *Soil morphology*. Moscow: Academic Project; 2004. 432 p. (In Russ.)

25. Аринушкина Е.В. *Руководство по химическому анализу почв*. М.: Издательство Московского университета; 1970. 487 с.

Arinushkina E.V. *Handbook for the Chemical Analysis of Soils*. Moscow: Moscow University Press; 1970. 487 p. (In Russ.)

26. Воробьева Л.А. *Химический анализ почв*. М.: Изд-во МГУ; 1998. 272 с.

Vorobieva L.A. *Chemical analysis of soils*. Moscow: Moscow University Press; 1998. 272 p. (In Russ.)

27. Глазовская М.А. *Геохимические основы типологии и методики исследований природных ландшафтов*. Смоленск: Ойкумена; 2002. 288 с.

Glazovskaya M.A. *Geochemical foundations of typology and research methods in natural landscapes*. Smolensk: Oikumena; 2002. 288 p. (In Russ.)

28. *Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0*. Иванов А.Л., Шоба С.А. (ред.). М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева; 2014. 768 с.

Unified State Register of Soil Resources of Russia. Version 1.0. Ivanov A.L., Shoba S.A. (eds). Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute; 2014. 768 p. (In Russ.)

29. Егоров В.В., Фридланд В.М., Иванова Е.Н. и др. *Классификация и диагностика почв СССР*. М.: Колос; 1977. 223 с.

Egorov V.V., Fridland V.M., Ivanova E.N., et al. *Classification and diagnostics of soils of the USSR*. Moscow: Kolos Publ.; 1977. 223 p. (In Russ.)

30. *IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. update 2015. World Soil Resources Reports No. 106*. Rome: FAO; 2015. 194 p.

31. Еловская Л.Г. *Классификация и диагностика мерзлотных почв Якутии*. Якутск: ЯФ СО АН СССР; 1987. 172 с.

Elovskaya L.G. *Classification and diagnostics of permafrost soils in Yakutia*. Yakutsk: YAF SB Academy of Sciences of the USSR; 1987. 172 p. (In Russ.)

32. Пискарева В.М., Кошовский Т.С., Бисикалова Е.А. и др. Влияние пожаров на свойства почв Национального Парка «Земля Леопарда» (Приморский край). *Вестник Московского университета*. Сер. 5: География. 2019;(3):11–24.

Piskareva V.M., Koshovskiy T.S., Bisikalova E.A., et al. Impact of wildfires on soil properties in the “Leopard’s Land” national park (Primorsky kray). *Moscow University Bulletin. Series 5, Geography*. 2019;(3):11–24. (In Russ.)

33. Зонн С.В. *Железо в почвах (генетические и географические аспекты)*. М.: Наука; 1982. 207 с.

Zonn S.V. *Iron in soils (genetic and geographical aspects)*. Moscow: Nauka; 1982. 207 p. (In Russ.)

Об авторах

ДЕСЯТКИН Роман Васильевич, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-1289-5433>, ResearcherID: K-5281-2018, Scopus ID: 6507832825, SPIN: 7430-6386, e-mail: rvdes@ibpc.ysn.ru

ИВАНОВА Александра Зуевна, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-8501-6807>, ResearcherID: J-6741-2018, Scopus ID: 57216969934, SPIN: 5813-5880, e-mail: madalexia@mail.ru

ОКОНЕШНИКОВА Матрена Васильевна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-9841-2112>, ResearcherID: J-4337-2018, Scopus ID: 54411075900, SPIN: 8496-8867, e-mail: mvok@yandex.ru

ДЕСЯТКИН Алексей Романович, PhD, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-9597-999X>, ResearcherID: G-1918-2016, Scopus ID: 160215-000377, SPIN: 3785-1391, e-mail: desyatkinar@rambler.ru

ФИЛИПPOB Николай Васильевич, инженер-исследователь, <https://orcid.org/0000-0003-0463-3123>, ResearcherID: J-6803-2018, Scopus ID: 57202088215 SPIN: 6514-0955, e-mail: finiva88@mail.ru

Вклад авторов

Десяткин Р.В. – руководство исследованием, разработка концепции, администрирование проекта, верификация данных, редактирование рукописи; **Иванова А.З.** – проведение исследования, администрирование и верификация данных, создание черновика рукописи; **Оконешникова М.В.** – проведение исследования, редактирование рукописи; **Десяткин А.Р.** – проведение исследования, редактирование рукописи; **Филиппов Н.В.** – проведение исследования, редактирование рукописи

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

DESYATKIN, Roman Vasilievich, Chief Researcher, Dr. Sci. (Biol.), <https://orcid.org/0000-0002-1289-5433>, ResearcherID: K-5281-2018, Scopus ID: 6507832825, SPIN: 7430-6386, e-mail: rvdes@ibpc.ysn.ru

IVANOVA, Alexandra Zuevna, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-8501-6807>, ResearcherID: J-6741-2018, Scopus ID: 57216969934, SPIN: 5813-5880, e-mail: madalexia@mail.ru

OKONESHNIKOVA, Matrena Vasilievna, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-9841-2112>, ResearcherID: J-4337-2018, Scopus ID: 54411075900, SPIN: 8496-8867, e-mail: mvok@yandex.ru

DESYATKIN, Alexey Romanovich, Senior Researcher, PhD, <https://orcid.org/0000-0002-9597-999X>, ResearcherID: G-1918-2016, Scopus ID: 160215-000377, SPIN: 3785-1391, e-mail: desyatkinar@rambler.ru

FILIPPOV, Nikolai Vasilievich, Research Engineer, <https://orcid.org/0000-0003-0463-3123>, ResearcherID: J-6803-2018, Scopus ID: 57202088215, SPIN: 6514-0955, e-mail: finiva88@mail.ru

Authors' contribution

Desyatkin R.V. – supervision, conceptualization, project administration, validation, writing – review & editing; **Ivanova A.Z.** – investigation, data curation, validation, writing – original draft; **Okoneshnikova M.V.** – investigation, writing – review&editing; **Desyatkin A.R.** – investigation, writing – review & editing; **Filippov N.V.** – investigation, writing – review & editing

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 03.03.2025

Поступила после рецензирования / Revised 15.08.2025

Принята к публикации / Accepted 20.08.2025



Оригинальная статья

Трансформация растительности экотонных участков лесов юго-запада Якутии под влиянием строительства линейных сооружений

И. И. Чикидов[✉], Л. Г. Михалева

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация
[✉]chikidov@rambler.ru

Аннотация

Интенсивное освоение углеводородных месторождений на юго-западе Республики Саха (Якутия) приводит к фрагментации ранее единых лесных массивов. До середины 70-х г. XX в. антропогенная нарушенность региона была минимальной. С середины 1980-х годов начали появляться большие площади с нарушенной естественной растительностью, представляющие единую сеть, связанную между собой на большие расстояния. Площади лесов, находящихся под воздействием «опушечного эффекта», возросли более чем в 3 раза. Лесолуговые экотонные комплексы развиваются как на границе естественных растительных комплексов, так и на возникающих в результате антропогенного воздействия экотопах. В работе использовался маршрутный метод исследований, лесоводственно-геоботанические описания проводились по классической методике. Картографический материал подготовлен на основе общедоступных спутниковых снимков и топографической карты масштаба 1:200000. Анализ видового состава растительности показывает незначительную разницу состава видов в глубине лесов и на опушках, но изменяется обилие видов. Наименьшую реакцию на воздействие «опушечного эффекта» проявляют виды деревьев. У типично лесных видов травяно-кустарничкового яруса наблюдается снижение обилия на всю глубину воздействия «опушечного эффекта», происходит проникновение луговых видов из прилегающих нелесных растительных сообществ. Изменение флористического состава воздействует на все компоненты биоценоза, связанные с ним трофическими связями.

Ключевые слова: антропогенное воздействие, линейные сооружения, опушечный эффект, экотонный эффект, растительность, изменение обилия видов

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по проекту «Растительный покров криолитозоны таежной Якутии: биоразнообразие, средообразующие функции, охрана и рациональное использование» (код научной темы: FWRS-2021-0023, ЕГИСУ НИОКТР № АААА-А21-121012190038-0), с применением оборудования ЦКП ФИЦ «ЯНЦ СО РАН».

Для цитирования: Чикидов И.И., Михалева Л.Г. Трансформация растительности экотонных участков лесов юго-запада Якутии под влиянием строительства линейных сооружений. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(3):427–439. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-427-439>

Original article

Vegetation transformation in ecotone forest areas of Southwestern Yakutia in response to linear infrastructure development

Ivan I. Chikidov[✉], Liudmila G. Mikhaleva

*Institute for Biological Problems of Cryolithozone,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation*
[✉]chikidov@rambler.ru

Abstract

The intensive development of oil and gas fields in the southwestern region of the Republic of Sakha (Yakutia) has resulted in the fragmentation of previously contiguous forested areas. Prior to the mid-1970s, anthropogenic disturbances in this region were minimal. However, since the mid-1980s, extensive areas of disturbed natural vegetation have emerged, forming a continuous interconnected network over large distances. The extent of forests affected by the

“fringe effect” has more than tripled. Forest-meadow ecotone complexes develop both at the boundaries of natural plant communities and on ecotopes changed by anthropogenic activities. This study used the route method of research, with forestry and geobotanical descriptions conducted in accordance with established classical methodologies. Cartographic materials were derived from publicly available satellite imagery and a 1:200,000 scale topographic map. Analysis of the species composition of vegetation indicates only minor differences between species located deep within forests and those at forest edges, although species abundance varies. Tree species demonstrate the least sensitivity to the “fringe effect.” In contrast, the abundance of typical forest species within the grass and shrub layers declines throughout the extent of the “fringe effect,” while meadow species from adjacent non-forest plant communities infiltrate these areas. Changes in floral composition affect all components of the biocenosis through trophic interactions.

Keywords: anthropogenic impact, linear infrastructures, fringe effect, ecotone effect, vegetation, changes in the abundance of species

Funding. This study was conducted within the state assignment from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the project titled “Vegetation of the permafrost zone of the taiga in Yakutia: Biodiversity, environmental functions, protection, and sustainable use” (theme No. FWRS-2021-0023, reg. No. AAAA-A21-121012190038-0), using equipment from 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: Chikidov I.I., Mikhaleva L.G. Vegetation transformation in ecotone forest areas of Southwestern Yakutia in response to linear infrastructure development. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(3):427–439. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-427-439>

Введение

В последнее время на территории Республики Саха (Якутия) идет интенсивное освоение углеводородных месторождений. Особенно этот процесс затрагивает юго-западную Якутию, где расположены крупные нефтегазовые месторождения, такие как Чаяндинское, Талаканское, введены в эксплуатацию нефтепровод Восточная Сибирь–Тихий океан, газопровод «Сила Сибири» и ряд трубопроводов локального значения. В связи с промышленным освоением территории увеличивается плотность населения. Строительство линейных объектов – трубопроводов и технологических дорог в их пределах; ЛЭП; расширение сети автомобильных дорог общего пользования, – все это приводит к фрагментации ранее единых лесных массивов с возникновением новых границ растительных сообществ. Кроме того, вместе с увеличением доступности лесных массивов увеличивается количество лесных пожаров разной степени интенсивности, что, в комплексе с вырубками, приводит к появлению кустарниковых сообществ и сукцессионных молодняковых насаждений, а также увеличивает долю менее распространенных ранее растительных сообществ.

Целью работы в рамках данной статьи является изучение увеличения доли лесов с выраженным «опушечным эффектом» и степени изменения флористического состава в связи с фрагментацией лесных массивов.

Опушечный (экотонный) эффект – явление, возникающее на границе растительных сообществ,

приводящее к возникновению пограничного, отличающегося от обоих, биоценоза, с измененным видовым составом и с иными характеристиками обилия растительных компонентов [1, 2]. Более половины мировых лесов в той или иной степени находятся под воздействием «экотонного эффекта», которое наблюдается не только в отношении растительности, но и всех других компонентов биоценоза, связанных с ним трофическими связями [3–5]. Лесолуговые экотонные комплексы, характерные для юго-западной Якутии, развиваются как на границе естественных растительных комплексов, так и на возникающих в результате антропогенного воздействия экотопах.

Материалы и методы

Использовался маршрутный метод исследований, лесоводственно-геоботанические описания проводились с закладкой пробных площадей на лесных участках, по методике В.Н. Сукачева, С.В. Зонна [6], на пробных площадях размером от 100 до 400 м². При описании подлеска, травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов были использованы методы глазомерного определения проективного покрытия в %, оценки обилия по Друде. Для описаний выбраны участки леса, которые отражают современное состояние растительного покрова района исследований. Изучение лесовосстановительного процесса на гарях проведено по методике Побединского.

В определении растений использованы «Определитель высших растений Якутии» [7], номенклатура высших сосудистых растений дана по С.К. Черепанову [8].

Картографический материал подготовлен на основе общедоступных спутниковых снимков и топографической карты масштаба 1:200000. Визуализация данных проведена с использованием программ ГИС-картографирования, растровое изображение (топографическая карта) было привязано к сетке географических координат (проекция Гаусса–Крюгера, «Пулково 1942», зона 19), в десятичных градусах. Выделение площадных объектов карты-схемы проведено с учетом фондовых материалов проведенных ранее в данном районе полевых исследований и пространственного распределения объектов по рельефу.

Результаты и обсуждение

Ленский район РС(Я) относится к южно-якутской подпровинции Олекмо-Якутской провинции области бореальных лесов [9], Восточно-Сибирской подобласти светлохвойных лесов Евразийской хвойно-лесной области [10], входит в Юго-Западный Приленский лесорастительный округ [11].

Лесорастительные условия региона сформированы в условиях большего количества годовых осадков при более высоких среднегодовых температурах и при сравнительно низкой, по сравнению с Центральной Якутской подпровинцией, континентальности климата [12, 13]. Лесной покров характеризуется преобладанием лиственничников из лиственниц Гмелина и сибирской, относящихся к подгруппе типов сыроватых (переходных к сырым) группы типов средневлажных местопроизрастаний. Кроме лиственниц, в формировании древостоев лиственничных лесов активное участие принимают ель сибирская, сосна обыкновенная, сосна сибирская, пихта. Менее распространены сосновые леса, занимающие более сухие вершины увалов, относящиеся преимущественно к подгруппе типов сыроватых местопроизрастаний группы типов средневлажных местопроизрастаний. Здесь, кроме сосны обыкновенной, характерно участие в древостое осины, березы плосколистной, ели сибирской [14].

Сосна сибирская, встречаясь, как правило, в составе лиственничных и сосновых лесов, на хорошо дренируемых почвах может образовывать насаждения со своим преобладанием – могут

встречаться незначительные по площади леса из сосны сибирской с лиственницей чернично-зеленомошные [11, 15].

Районом исследований выбран участок в 100 км² в Ленском районе Республики Саха (Якутия), на территории интенсивно развивающегося нефтегазового месторождения, в южной его части. Выбор данного района исследований обусловлен как разнообразием типов растительного покрова, так и распространенностью участков с нарушенной растительностью. Рельеф района исследований слабовсхолмленный, больше равнинный, без резких перепадов. На участке встречаются небольшие ручьи, представляющие собой ответвления (притоки) одного ручья, текущего с севера на юг. В центральной части участка расположен комплекс из сфагновых болот, марей, небольших озер и разреженных лесов. Большую часть выбранного участка занимают хвойные леса – лиственничные леса преобладают по всему району исследования, сосновые леса встречаются на возвышенных участках. По долинам небольших ручьев встречаются небольшие по площади безлесные участки – луга и кустарниковые заросли. В целом, естественные границы растительных выделов соответствуют рельефу местности и достаточно постоянны – по понижениям рельефа встречаются нелесные, заболоченные участки сфагновых марей, по мелким долинам произрастают небольшие по площади луга и кустарниковые сообщества, основную часть участка занимают хвойные лиственничные и сосновые леса (рис. 1, а). Границы естественных выделов растительности в целом соответствуют границам, изображенным на топографической карте, датированной периодом допромышленного освоения района, что позволяет нам принять состояние растительного покрова, которое они отображают, за состояние такового до начала промышленного освоения границы выделов, без учета антропогенно-нарушенных площадей.

Выделены следующие растительные сообщества:

- сосново-лиственничные леса;
- мари, ерники и сфагновые болота;
- луга и кустарниковые заросли долины ручьев.

Схема современного распределения растительности, подготовленная на основе актуального спутникового снимка высокого разрешения (дата съемки 2022 г.), показывает появление локальных и линейных антропогенных объектов (рис. 1, б).

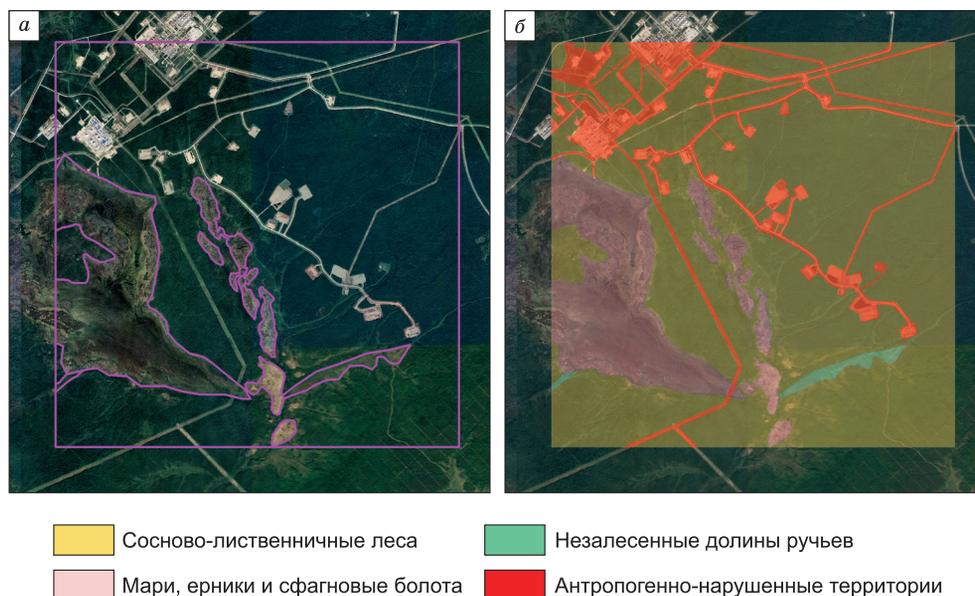


Рис. 1. Изменение границ лесов в районе исследований. *а* – растительные выделения на спутниковом снимке; *б* – антропогенно-нарушенные территории и распределение по растительным сообществам

Fig. 1. Changes in forest boundaries within the research area. *a* – Plant secretions visible on the satellite image; *b* – Anthropogenically disturbed territories and their distribution by plant communities.

Преобладающим типом растительности в районе исследований являются хвойные леса, на участке встречаются достаточно большие массивы заболоченных территорий, площади лугов и иных незалесенных территорий невелики (табл. 1).

До середины 70-х гг. XX в. антропогенная нарушенность региона была минимальной, слабо развитая дорожная сеть не позволяла проводить промышленные рубки леса, плотность населения была невелика. Изменения в ситуации начали происходить с началом геологоразведочных работ. К середине 1980-х г. на данной территории начали появляться большие площади с нарушенной естественной растительностью.

В настоящее время леса района исследований фрагментированы развитой сетью линейных объектов – нефтепроводов, дорог, линий электропередач. В целом нарушения больше коснулись залесенных участков, мари и долины ручьев остались практически нетронутыми. Участки с нарушенной лесной растительностью фактически представляют собой единую сеть, связанную между собой на больших расстояниях.

Анализ площадей и периметров нарушенных участков показал, что наибольшее изменение по сравнению с 1960-ми гг. произошло в показателях периметра (см. табл. 1). Это объясняется тем, что основная часть объектов – это линейные объ-

екты, имеющие относительно небольшие площади при большой протяженности. В целом прямому нарушению подверглось более 10 % площади района исследований.

Площади лесов снизились на 14 %, степень нарушенности, судя по спутниковым снимкам, высокая и долговременная, часть площадей занимают крупные капитальные объекты, которые будут существовать весь период эксплуатации месторождения, на большей части линейных объектов зарастание лесом искусственно замедляется санитарными рубками.

В большей степени изменения коснулись периметров, границ лесных насаждений – опушек лесов. В естественном положении, когда распределение типов растительности по местности в основном соответствует рельефу, их протяженность постоянна, соответствует границам между биоценозами – в районе исследований в основном это границы хвойный лес–мари, ерники и сфагновые болота либо хвойный лес–долины ручьев. С появлением антропогенно-нарушенных территорий, особенно протяженных линейных объектов, ситуация резко меняется. Протяженность опушек (периметр) хвойных лесов возросла более чем на 380 %.

Здесь уже можно говорить о росте влияния фактора «опушечного эффекта». Опушечный эф-

Изменение площадей и периметров растительных сообществ за годы промышленного освоения района исследований (1960–2022 гг.)

Table 1

Changes in the area and perimeter of plant communities during the industrial development period of the research area (1960–2022)

| Тип растительности | Площадь, км ² | | | Периметр, км* | | |
|------------------------------------|--------------------------|--------|------------|---------------|--------|------------|
| | 1960-е | 2020-е | Разница, % | 1960-е | 2020-е | Разница, % |
| Сосново-лиственничные леса | 83,8 | 72,6 | –14 | 54,5 | 210,7 | +387 |
| Мари, ерники и сфагновые болота | 15,3 | 15,2 | –0,7 | 41,6 | 42,6 | – |
| Незалесенные долины ручьев | 0,9 | 0,9 | – | 9,3 | 9,3 | – |
| Антропогенно-нарушенные территории | – | 11,2 | 100 | – | 161,7 | 100 |

* Периметр без учета внешних границ выдела / Perimeter excluding external borders.

фekt (эффект опушки, краевой эффект) – это возрастание органической жизни и увеличение числа видов в пограничных или смежных зонах экосистем. Лучшие условия освещенности, возможность проникновения новых видов могут сильно менять облик лесов, как в отношении растительного, так и животного мира [16–18]. Отмечается повышенная концентрация населения птиц, связанная с оптимальностью мест гнездования в гетерогенных местообитаниях, связанная с опушечным эффектом [19, 20].

Считается, что опушечный эффект может проявляться на глубину леса до 40 м [21, 22], здесь мы можем говорить о резком росте доли лесов,

подверженных этому фактору, – если до активного освоения территорий площадь лесов с воздействием опушечного эффекта составляла около 2 км², то с активным промышленным освоением их доля возросла более чем в 3 раза (рис. 2).

Можно проследить постепенное изменение ситуации с антропогенно-нарушенными площадями за годы освоения района исследований. Если до освоения площади нарушенных территорий были невелики, имели в целом естественный характер (гари), процессы восстановления лесов шли своим ходом, то с началом освоения изменился как характер нарушений, так и их размеры.

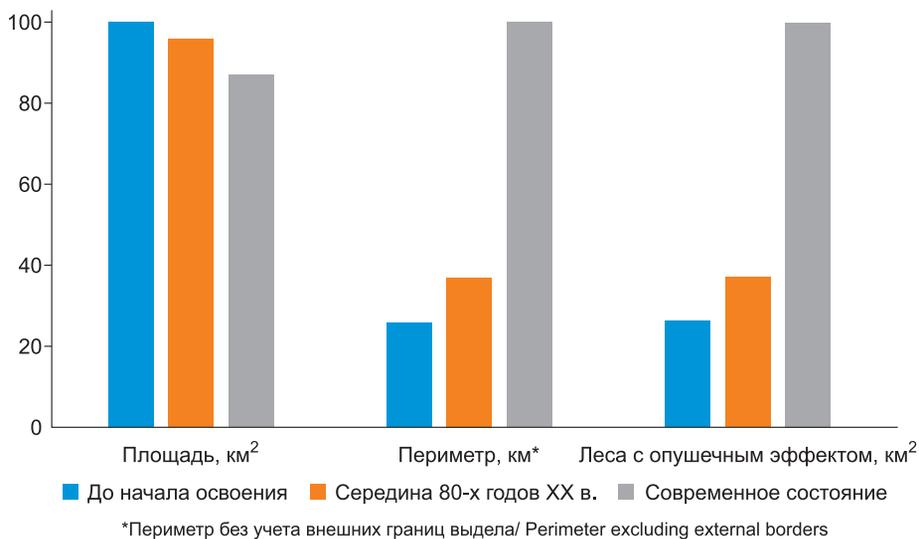


Рис. 2. Изменение площадей и периметров сосново-лиственничных лесов за годы промышленного освоения, изменение площадей лесов с опушечным эффектом

Fig. 2. Changes in the area and perimeter of pine and larch forests over the years of industrial development, including changes in forest areas influenced by the fringe effect (in %)

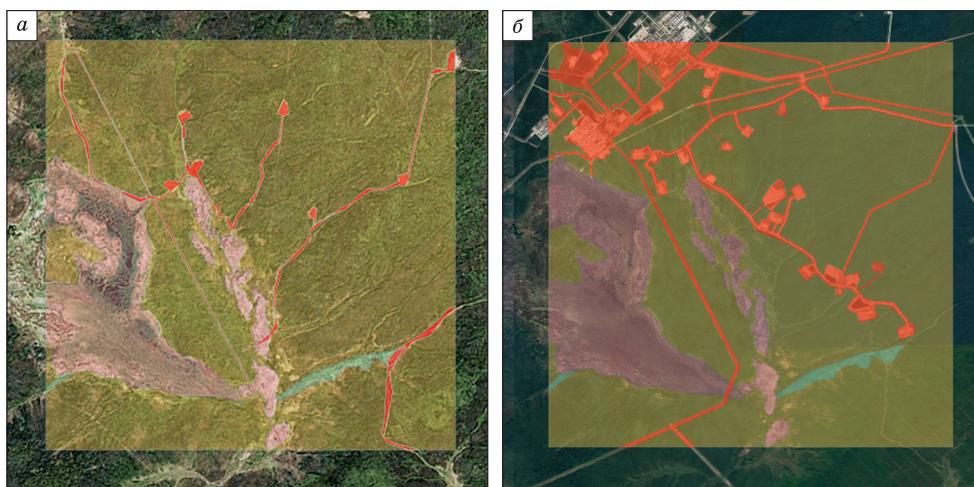


Рис. 3. Рост площади антропогенно-нарушенных территорий за годы освоения района исследований: *а* – лето 1984 г.; *б* – лето 2022 г.

Fig. 3. Growth of the area of anthropogenically disturbed territories over the years of development in the research area: *a* – for the summer 1984; *b* – for the summer 2022

Во время геологоразведочных работ площади нарушенных земель были незначительны, нарушения могли иметь временный характер – сравнивая спутниковые снимки 1984 и 2022 гг., мы видим, что часть нарушенных территорий месторождения к 2022 г. не обнаруживается, после проведения работ участки были, видимо, оставлены и заросли лесной растительностью (см. рис. 2). Если в годы разведки месторождения дороги имели, как правило, временный сезонный характер, следовали по руслам ручьев, то в последующие годы были проложены постоянно действующие дороги и другие линейные объекты. В 2022 г. участки нарушенных территорий имеют постоянный характер и будут отчуждены на весь период эксплуатации месторождения.

В лесном покрове района исследований господствуют лиственничные леса из *Larix gmelinii*, реже *Larix sibirica*, наиболее распространены бруснично-зеленомошные лиственничники и их различные варианты, образующие в районе исследований обширные массивы. Типичные лиственничные бруснично-зеленомошные леса имеют следующие характеристики:

- древостой из *Larix gmelinii*, чистый или смешанный с примесью *Picea obovata* и *Pinus sylvestris*, реже *Pinus sibirica*, высотой 20–25 м при сомкнутости крон 0,5–0,7;

- подрост лиственницы чаще единичен либо встречается биогруппами не более 10 % от общей площади, молодые деревья всех высотных групп, густота стояния не более 1 тыс. экз./га;

- подлесок выражен хорошо, часто более 50 % проективного покрытия, наиболее часто представлены *Duschekia fruticosa*, *Juniperus sibirica*, *Rosa acicularis*, *Spiraea media*;

- травяно-кустарничковый покров развит, проективное покрытие в ненарушенных лесах более 90 %, в покрове господствуют лесные кустарнички – *Vaccinium vitis-idaea*, *Vaccinium uliginosum*, *Ledum palustre*, обилие других видов невысоко;

- моховой покров, как правило, развит, составлен из *Pleurozium schreberi*, *Aulacomnium palustre*, *Hylocomium splendens*, проективное покрытие близко к 100 %.

Второй по значимости в лесном покрове района исследований формацией, занимая относительно небольшие по площади участки на возвышениях рельефа, являются сосновые леса. Типичные для данного района сосновые леса брусничные, имеют следующие характеристики:

- древостой из *Pinus sylvestris*, чистый или смешанный с примесью *Picea obovata*, *Larix gmelinii*, *Betula pubescens*, реже *Pinus sibirica*, высотой 18–22 м при сомкнутости крон 0,5–0,6;

- подрост сосны единичен либо встречается биогруппами не более 10 % от общей площади, молодые деревья представлены всеми высотными группами, густота стояния не более 1 тыс. экз./га;

- подлесок выражен слабо, имеет проективное покрытие не более 30 %, обычны *Duschekia fruticosa*, *Juniperus sibirica*, *Rosa acicularis*, *Spiraea media*;

– травяно-кустарничковый покров развит, господствуют лесные кустарнички – *Vaccinium vitis-idaea*, *V. uliginosum*, *Ledum palustre*;

– моховой покров развит, преобладают *Pleurozium schreberi*, *Hylocomium splendens*, *Dicranum polysetum*, проективное покрытие достигает 50 %.

Нелесная растительность в районе исследования представлена ленточными пойменными разнотравно-злаковыми лугами вдоль ручьев с незначительной площадью и более значительными участками сфагновых марей.

Небольшие участки луговой растительности встречаются на поймах и вдоль водотоков, характеризуются высоким видовым разнообразием травянистой растительности. При проективном покрытии травяного покрова до 90 % встречаются *Calamagrostis langsdorffii*, *Hordeum brevisubulatum*, *Alopecurus arundinaceus*, *Carex acuta*, *Cacalia hastata*, *Cnidium* sp., *Galium verum*, *Filipendula ulmaria*, *Thalictrum minus*, *Bromopsis irkutensis*, *Elytrigia repens*, *Veronica longifolia*, *Aster sibiricus*, *Archangelica* sp., *Parnassia palustris*, *Sanguisorba officinalis*, *Poa pratensis*, *Trifolium lupinaster*, *Urtica dioica*, *Senecio nemorensis*, *Anemoidium dichotomum*, *Crepis* sp., *Chenopodium album*, *Phlomis tuberosa*, *Tanacetum vulgare*, *Galium davuricum*, *Lactuca sibirica*, *Geranium pseudosibiricum*, *Artemisia vulgaris*, *Trollius sibiricus*, *Thalictrum simplex* и др. Другие ярусы растительности здесь не выражены.

Болотная растительность на территории района исследований приурочена к понижениям рельефа по долинам и водоразделам рек, на понижениях водоразделов может занимать обширные площади, представлена в основном сфагновыми болотами с сосновыми или лиственничными рединами, реже травяными, кустарничковыми и моховыми болотами. Типичные для данного района участки болотной растительности, имеют следующие характеристики:

– древостой разрежен, расстояние между деревьями 20–30 м, представлен *Pinus sylvestris*, реже *Larix gmelinii*, средней высотой до 10 м при диаметре стволов до 10 см;

– подрост единичен, чаще торчкового типа;

– кустарничковый ярус выражен хорошо, от 50 % проективного покрытия и выше, господствует *Betula exilis*, с низким обилием представлены *Duschekia fruticosa*, *Salix* sp., *Dasiphora fruticosa*;

– травяно-кустарничковый покров выражен слабо, проективное покрытие не более 20 %, в покрове с высоким обилием встречаются *Oxycoc-*

cus microcarpus, *Rubus chamaemorus*, *Andromeda polifolia*, менее обильны *Menyanthes trifoliata*, *Eriophorum vaginatum*, *Ledum palustre* и др.;

– моховой покров развит хорошо, проективное покрытие близко к 100 %, господствуют виды рода *Sphagnum* sp., с меньшим обилием встречаются *Polytrichum* sp., *Aulacomnium palustre*;

Лишайниковый покров занимает до 10 % проективной площади, составлен из *Cladina rangifirina*, *Cladina stellaris*, *Cladina arbuscula*, *Cetraria laevigata*.

Антропогенно-нарушенные участки в районе исследования в основном относятся к лесной растительности, и широкий спектр растительных сообществ, возникающих на их месте, имеет смысл рассматривать в свете восстановительной динамики лесов, предшествовавших нарушению. В целом, при сохранении почвенного покрова и сохранности части травяно-кустарничкового покрова, направление и этапы восстановительного процесса соответствуют формированию лесной растительности на вырубках и гарях, с той разницей, что, как правило, процессы восстановления леса здесь прерываются на ранних стадиях.

Как уже упоминалось выше, опушечный эффект как постоянно действующий фактор формирует в глубину леса [23, 24] измененное лесное растительное сообщество, характеризующееся не столько различным видовым составом растений, сколько показателями обилия имеющихся видов. Сравнительный анализ видового состава растительности, в отличие от лесов, подвергшихся рубкам или воздействию лесных пожаров и развивающихся как открытое растительное сообщество, показывает незначительную разницу состава видов в опушечных и глубинных лесах (табл. 2, 3). Воздействие опушечного эффекта наиболее существенно для нижних подчиненных ярусов лесной растительности, в целом не вызывает резкой перестройки структуры и пространственного распределения охваченных биогеоценозов [25]. В силу этого имеет смысл рассматривать участки лесов, находящиеся под воздействием опушечного эффекта, как новые, недавно сформированные в результате фрагментации лесов, так и давно существующие как единый, схожий по характеристикам лесной комплекс, имеющий устойчивые группы растений по распределению в зоне воздействия опушечного эффекта, – распространенные по всему участку либо приуроченные к опушечной части [26].

Встречаемость древесных и кустарниковых растений в лесах и на опушках

The occurrence of woody and shrubby plants in forests and on the edges

| Вид | Типы леса | | | |
|--|---|--|----------------------|--------------------------------|
| | Лиственничник бруснично- зеленомошный | Лиственничник бруснично-зеленомошный опушечный | Сосняк брусничный | Сосняк брусничный опушечный |
| Виды, слабо реагирующие на воздействие опушечного эффекта | | | | |
| <i>Larix gmelinii</i> (Rupr.) Rupr. | ++* | ++ | + | + |
| <i>Pinus sylvestris</i> L. | + | + | ++ | ++ |
| <i>Betula divaricata</i> Ledeb. | + | + | | + |
| <i>Salix bebbiana</i> Sarg. | + | + | + | + |
| Виды с повышенным обилием на участках с воздействием опушечного эффекта | | | | |
| <i>Betula pubescens</i> Ehrh. | + | + | + | + |
| <i>Larix gmelinii</i> (Rupr.) Rupr. (подрост) | + | ++ | + | + |
| <i>Pinus sylvestris</i> L. (подрост) | + | + | + | ++ |
| <i>Pinus sibirica</i> (подрост) | + | + | + | + |
| <i>Abies sibirica</i> (подрост) | | + | | |
| <i>Picea obovata</i> (подрост) | + | + | | |
| <i>Duschekia fruticosa</i> (Rupr.) Pouzar | + | ++ | + | + |
| <i>Juniperus sibirica</i> Burgsd. | + | ++ | + | ++ |
| <i>Ribes triste</i> Pall. | + | ++ | + | + |
| <i>Rosa acicularis</i> Lindl. | + | ++ | + | ++ |
| <i>Salix pyrolifolia</i> Ledeb. | | + | | + |
| <i>Rhododendron dauricum</i> L. | | + | | + |
| <i>Lonicera altaica</i> Pall. | + | + | | + |
| <i>Spiraea media</i> Schmidt | | | + | + |
| <i>Rubus matsumuranus</i> H. Lev. & Vaniot | | + | | + |

* + – sol; ++ – sp-cop₃.

При сравнении обилия видов растений опушечных и внутренних участков можно выделить три группы растений:

- виды, слабо реагирующие на воздействие опушечного эффекта;
- виды со сниженным обилием на участках с воздействием опушечного эффекта;
- виды со повышенным обилием на участках с воздействием опушечного эффекта.

В первую очередь к растениям, слабо реагирующим на воздействие опушечного эффекта, относятся виды, формирующие древостой, – *Larix gmelinii* или *Larix sibirica*, *Pinus sylvestris*, *Pinus sibirica* (см. табл. 2). Фактор освещенности для роста и развития взрослых деревьев уже не является решающим – сформированная крона на верхней трети стволов получает достаточно света. Исследования хода роста взрослых сосен за

последние 15 лет (по приростам годовичных колец) не показали существенной разницы годового прироста между деревьями опушки, сформированной у линии просеки ВСТО, и внутренними участками. Однако подрост древесных растений – лиственница, ель, сосна, сосна сибирская реагирует на осветление леса более заметно – в целом молодые деревья опушечных участков имеют лучшие показатели роста, чем подрост с внутренних участков, часто имеющих нулевые годовичные приросты, и потому стоит относить подрост к другой, чем материнские растения, группе (см. табл. 3). Однако среди древесных растений нет видов, снижающих свое обилие на участках с воздействием опушечного эффекта.

Кроме хвойных древесных видов, на воздействие опушечного эффекта слабо реагируют виды, не восприимчивые к изменению условий освеще-

Встречаемость видов травяно-кустарничкового яруса под пологом леса и на опушках

The occurrence of grass species beneath the forest canopy and along its edges

| Вид | Типы леса | | | |
|---|---|--|-------------------|--------------------------------|
| | Лиственничник бруснично- зеленомошный | Лиственничник бруснично-зеленомошный опушечный | Сосняк брусничный | Сосняк брусничный опушечный |
| Виды, слабо реагирующие на воздействие опушечного эффекта | | | | |
| <i>Limnas stelleri</i> Trin. | + | + | + | + |
| <i>Carex</i> sp. | + | + | + | + |
| <i>Atragene sibirica</i> L. | + | + | + | + |
| <i>Lycopodium clavatum</i> L. | + | + | + | + |
| Виды со сниженным обилием на участках с воздействием опушечного эффекта | | | | |
| <i>Vaccinium vitis-idaea</i> L. | ++ | + | ++ | + |
| <i>Vaccinium uliginosum</i> L. | ++ | + | + | + |
| <i>Ledum palustre</i> L. | ++ | + | + | + |
| <i>Pyrola incarnata</i> (DC.) Freyn | ++ | + | | |
| <i>Mitella nuda</i> L. | + | | | |
| <i>Linnaea borealis</i> L. | ++ | + | + | |
| <i>Orthilia secunda</i> (L.) House | + | + | | |
| <i>Empetrum nigrum</i> L. | + | + | + | + |
| <i>Equisetum scirpoides</i> Michx. | + | | | |
| Виды со повышенным обилием на участках с воздействием опушечного эффекта | | | | |
| <i>Equisetum pratense</i> Ehrh. | + | ++ | + | ++ |
| <i>Viola mauritii</i> Tepl. | + | ++ | + | ++ |
| <i>Viola uniflora</i> L. | + | + | | + |
| <i>Lilium martagon</i> L. | + | ++ | + | ++ |
| <i>Chamaenerion angustifolium</i> (L.) Scop. | + | ++ | + | ++ |
| <i>Calamagrostis langsдорфii</i> (Link) Trin. | + | ++ | + | ++ |
| <i>Rubus saxatilis</i> L. | + | ++ | + | ++ |
| <i>Festuca ovina</i> L. | + | ++ | | + |
| <i>Thalictrum minus</i> L. | | + | | + |
| <i>Geranium pratense</i> L. | | + | | + |
| <i>Artemisia tanacetifolia</i> L. | | + | | + |
| <i>Rubus arcticus</i> L. | | + | | ++ |

* + – sol; ++ – sp-cop₃

ния. С одинаковыми показателями обилия в опушечных и на глубинных участках встречаются такие виды как *Limnas stelleri*, *Carex* sp., *Atragene sibirica*, *Salix bebbiana* и др.

Увеличение уровня освещенности на опушечных участках на часть видов растительного по-

крова воздействует угнетающе. Надо учитывать, что здесь, возможно, стоит говорить не столько о прямом воздействии фактора освещенности, сколько об опосредованном воздействии других факторов, таких как иссушение почвы, возрастание корневой конкуренции со стороны видов,

более приспособленных к возникающим условиям и др. Кроме того, к искажению воздействия опушечного эффекта может приводить широкое распространение тропиной сети, часто приуроченной к лесным опушкам [26]. Сниженные показатели обилия наблюдаются на опушечных участках у лесных кустарничков – *Vaccinium vitis-idaea*, *Vaccinium uliginosum*, *Ledum palustre*, а также у таких типично лесных видов как *Linnæa borealis*, *Pyrola incarnata*, *Mitella nuda* (см. табл. 3). При резком изменении условий – возникновении опушечных участков при фрагментации лесов эти виды постепенно снижают обилие на всю глубину воздействия опушечного эффекта.

Сравнительно более высокий уровень освещенности на опушечных участках приводит к возникновению конкурентных преимуществ у растений, для которых освещенность является лимитирующим фактором. Часть таких растений можно отнести к устойчивому комплексу опушечных растений, сформированному в условиях лесов на стыке различных растительных сообществ. К ним можно отнести *Thalictrum minus*, *Rubus arcticus*, *Lilium martagon*, *Viola mauritii*, виды рода *Aconitum*, *Trollius sibiricus*, *Vicia cracca*, *Vicia amoena*, из кустарников – *Rosa acicularis*, *Ribes triste*, *Salix pyrolifolia*, *Rubus matsumuranus*, *Lonicera altaica*, *Spiraea salicifolia* и др. *Calamagrostis langsdorffii*, индикатор нарушенности лесных сообществ, на опушках может резко увеличивать свое обилие, часто доминируя в травяно-кустарничковом ярусе (см. табл. 3). В некоторых случаях, при избыточном увлажнении, на опушечных участках с высоким обилием в покрове могут доминировать виды *Equisetum* (кроме *Equisetum scirpoides*, почти всегда выпадающего из состава на опушках). В целом, указанные виды могут встречаться и в глубинных участках лесов, но с более низким обилием.

Для опушечных участков характерно проникновение растений из прилегающих нелесных растительных сообществ, здесь они встречаются с относительно высоким обилием у приграничного края участка, постепенно снижая свое обилие в глубь леса и исчезая за пределами воздействия опушечного эффекта (см. табл. 3). Как правило, это виды злаков – *Festuca ovina*, виды рода *Poa*, и виды разнотравья – *Geranium pratense*, виды рода *Melilotus*, *Artemisia tanacetifolia*, виды семейства *Asteraceae* и др.

Основной облик опушечных участков формируют кустарники и подрост древесных видов растений. Хвойный подрост здесь имеет лучшие, чем в глубине леса, показатели роста. Среди кустарников, кроме видов, характерных для опушек, таких как *Salix pyrolifolia*, *Rubus matsumuranus*, *Salix pyrolifolia*, с более высоким, чем в глубине леса, обилием и большей высотой встречаются такие виды подлеска, как *Duschekia fruticosa*, *Juniperus sibirica*. Большую высоту и густоту имеют также *Rosa acicularis*, *Lonicera altaica*, обильны виды высокотравья. Таким образом формируется густой, но узкий опушечный пояс по периметру фрагментированных лесных массивов.

Для анализа общности растительных ассоциаций был использован коэффициент сходства (индекс Жаккара) [27, 28], показывающий степень общности видового состава лесных участков, «глубинных» и «опушечных», к растительным типам, находящимся по другую сторону экотона. Сравнение показало наличие трех близких по показателям индекса Жаккара групп:

1) 0,04–0,07 – типы естественной нелесной растительности, встречающиеся в районе исследования, – разнотравно-злаковый луг; сосновое редколесье на сфагновой мари;

2) 0,11–0,3 – растительные ассоциации, возникающие на месте лесных участков в результате полного сведения лесной растительности, – разнотравно-злаковый луг на нарушенной территории; сосново-березовый молодняк хвощево-травяной;

3) 0,6–0,8 – попарное сравнение исследованных лесных участков – лиственничника бруснично-зеленомошного; лиственничника бруснично-зеленомошного опушечного; сосняка брусничного; сосняка брусничного опушечного.

Таким образом, естественные, не нарушенные типы лесов (лиственничник бруснично-зеленомошный, сосняк брусничный) показывают большой коэффициент сходства с типами лесов с выраженным опушечным эффектом (лиственничник бруснично-зеленомошный опушечный, сосняк брусничный опушечный), что объясняется большой долей общих видов, сохраняющейся в составе растительности после нарастания воздействия опушечного эффекта. Это не противоречит выводам других исследователей о флористическом единстве экотонных участков [28]. В свою очередь, типы растительности, являющиеся

ся сукцессионными стадиями восстановления лесов (разнотравно-злаковый луг на нарушенной территории, сосново-березовый молодняк хвошево-травяной), за счет сохранения типичных лесных растений и проникновения видов луговых трав, имеют среднее сходство с исходным типом растительности. Низкое сходство с типами естественной нелесной растительности (разнотравно-злаковый луг, сосновое редколесье на сфагновой мари) объясняется различием флористического состава у растительных ассоциаций, сложившихся в сильно различающихся экологических условиях.

Заключение

В районе исследований, начиная с 80-х гг. XX в., площади лесов, находящихся под воздействием опушечного эффекта, возросли более чем в 3 раза. В целом нарушения больше коснулись залесенных участков, мари и долины ручьев остались практически нетронутыми. Участки с нарушенной лесной растительностью фактически представляют собой единую сеть, связанную между собой на большие расстояния.

Анализ площадей и периметров нарушенных участков показал, что наибольшее изменение произошло в показателях периметра. Это объясняется тем, что основная часть промышленных объектов – это линейные сооружения, имеющие относительно небольшие площади при большой протяженности. В целом прямому нарушению подверглось более 10 % площади района исследований, площади лесов снизились на 14 %.

В большей степени изменения коснулись периметров, границ лесных насаждений – опушек лесов. В естественном положении, когда распределение типов растительности по местности в основном соответствует рельефу, их протяженность постоянна, соответствует границам между биоценозами – в районе исследований в основном это границы хвойный лес – мари, ерники и сфагновые болота, либо хвойный лес – долины ручьев. С появлением антропогенно-нарушенных территорий, особенно протяженных линейных объектов, ситуация резко меняется. Протяженность опушек (периметр) хвойных лесов возросла более чем на 380 %.

Возникшие опушечные лесные сообщества имеют долговременный характер, их период существования зависит от времени эксплуатации построенных объектов. Анализ видового состава растительности показывает незначительную

разницу состава видов в опушечных и глубинных лесах, измененное лесное растительное сообщество характеризуется другими показателями обилия. Основным фактором, влияющим на изменение обилия, является освещенность, выделяются три группы по реакции на воздействие опушечного эффекта. Наименьшую реакцию на воздействие опушечного эффекта проявляют виды, составляющие древостой, и, напротив, молодые деревья имеет лучшие, чем в глубине леса, показатели роста. Сниженные показатели обилия наблюдаются на опушечных участках у лесных кустарничков и у типично лесных видов травяно-кустарничкового яруса. При возникновении опушечных участков в результате фрагментации лесов эти виды постепенно снижают обилие на всю глубину воздействия опушечного эффекта. Для опушечных участков характерно проникновение растений из прилегающих нелесных растительных сообществ, здесь они встречаются с относительно высоким обилием у приграничного края участка, постепенно снижая свое обилие в глубь леса и исчезая за пределами воздействия опушечного эффекта. Как правило, это виды злаков и разнотравья. Основной облик опушечных участков формируют кустарники и подрост древесных видов, имеющие здесь лучшие, чем в глубинных лесах, показатели обилия и хода роста.

Опушечный эффект обуславливает значительную экологическую роль переходных зон между двумя разными экосистемами — лесом и открытым пространством. На опушках, кроме повышения освещенности, изменяется гидротермический режим, также более открытые пространства способствуют распространению семян растений.

Густой опушечный пояс по периметру фрагментированных лесных массивов образует новые условия обитания для животных и птиц, связанные с оптимальностью мест гнездования в гетерогенных местообитаниях.

Список литературы / References

1. Миркин Б.М., Розенберг Г.С. *Толковый словарь современной фитоценологии*. М.: Наука; 1983. 184 с.
Mirkin B.M., Rozenberg G.S. *Explanatory dictionary of modern phytocenology*. Moscow: Nauka; 1983. 184 p. (In Russ.)
2. Радкевич В.А. *Экология*. М.: Высшая школа; 1998. 159 с.
Radkevich V.A. *Ecology*. Moscow: Vysshaya Shkola Publ.; 1998. 159 p. (In Russ.)
3. Pfeifer M., Lefebvre V., Peres C.A., et al. Creation of forest edges has a global impact on forest vertebrates. *Nature*. 2017;551(7679):187–191. <https://doi.org/10.1038/nature24457>
4. Русаков А.В., Калиева Г.У., Христина К.А. Влияние Бузулукского бора на структуру населения герпетобионтных

жесткокрылых (Insecta, Coleoptera) прилегающих территорий. *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2008;(182):254–260.

Rusakov A.V., Kalieva G.U., Christina K.A. The influence of Buzulukskiy bor on biological variety and structure of herpetobiont beetles' population of adjacent territories. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotehniceskoy akademii*. 2008;(182):254–260. (In Russ.)

5. Леонтьев Д.Ф. К использованию зон интерперсии для отслеживания состояния численности охотничье-промысловых животных. *Биосферное хозяйство: теория и практика*. 2023;64(11):73–76.

Leontyev D.F. To the use of interspersed zones to track the status of the number of hunting animals. *Biosphere Economy: Theory and Practice*. 2023;64(11):73–76. (In Russ.)

6. Сукачев В.Н., Зонн С.В. *Методические указания к изучению типов леса*. М.: Изд-во АН СССР; 1961. 144 с.

Sukachev V.N., Zonn S.V. *Methodological guidelines for the study of forest types*. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1961. 144 p. (In Russ.)

7. *Определитель высших растений Якутии*. Николин Е.Г. (ред.) 2-е изд. М.: КМК; Новосибирск: Наука; 2020. 895 с.

Key to higher plants of Yakutia: identification key. Nikol'in E.G. (ed.). 2nd edition. Moscow: KMK; Novosibirsk: Nauka; 2020. 895 p. (In Russ.)

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

Cherepanov S.K. *Vascular plants of Russia and adjacent states within the former USSR*. St. Petersburg; 1995. 992 p. (In Russ.)

9. Андреев В.Н., Галактионова Т.Ф., Перфильева В.И., Щербаков И.П. *Основные особенности растительного покрова Якутской АССР*. Якутск: ЯФ СО АН СССР; 1987. 156 с.

Andreev V.N., Galaktionova T.F., Perfileva V.I., Sherbakov I.P. *The principal characteristics of the vegetation cover in the Yakut Autonomous Soviet Socialist Republic*. Yakutsk: YaF SB Academy of Sciences of the USSR; 1987. 156 p. (In Russ.)

10. Васильев Я.Я., Лавренко Е.М., Лесков А.И. и др. *Геоботаническое районирование СССР*. М.; Л.: Изд-во АН СССР; 1947. 152 с.

Vasilev Ya.Ya., Lavrenko E.M., Leskov A.I., et al. *Geobotanical zoning of the USSR*. Moscow, Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1947. 152 p. (In Russ.)

11. Щербаков И.П. *Лесной покров Северо-Востока СССР*. Новосибирск: Наука; 1975. 344 с.

Sherbakov I.P. *Forest cover of the North-East of the USSR*. Novosibirsk: Nauka; 1975. 344 p. (In Russ.)

12. Витвицкий Г.Н. Климат. В кн.: Коржуев С.С. (ред.) *Якутия*. М.: Наука; 1965. С. 115–143.

Vitvitskiy G.N. Climate. In: Korzhuev S.S. (ed.) *Yakutia*. Moscow: Nauka; 1965, pp. 115–143. (In Russ.)

13. Гаврилова М.К. Изменения климата в районах «вечной мерзлоты» на протяжении XX века в России. В кн.: Иванов Б.И., Максимов Т.Х. (ред.) *Влияние климатических и экологических изменений на мерзлотные экосистемы: труды Третьей международной конференции «Роль мерзлотных экосистем в глобальном изменении климата», г. Якутск, 27–31 августа 2006 г.* Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН; 2007. С. 9–15.

Gavrilova M.K. Climate change in permafrost regions of Russia in the 20th century. In: Ivanov B.I., Maximov T.H.

(eds.) *The impact of climate and environmental changes on permafrost ecosystems: Proceedings of the 3rd International Conference "The role of permafrost ecosystems in global climate change"*. Yakutsk: Publishing House of YaSC SB RAS 2007, pp. 9–15. (In Russ.)

14. Чикидов И.И. Характеристика лесного покрова западной части Ленского района Республики Саха (Якутия). *Наука и образование*. 2016;83(3):101–107.

Chikidov I.I. Characteristic of forest cover of Western part of the Lensky Rayon of the Republic of Sakha. *Nauka i Obrazovanie*. 2016;83(3):101–107. (In Russ.)

15. Тимофеев П.А. *Леса Якутии: состав, ресурсы, использование и охрана*. Новосибирск: Издательство СО РАН; 2003. 193 с.

Timofeev P.A. *Forests of Yakutia: Composition, resources, use and protection*. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2003. 193 p.

16. Коровин В.А. Опушечный эффект и его роль в формировании пространственной структуры населения птиц агроландшафта. *Сибирский экологический журнал*. 2007;(4):577–586.

Korovin V.A. Forest border effect and its role in the formation of the spatial structure of bird communities of an agricultural landscape. *Contemporary Problems of Ecology*. 2007;(4):577–586. (In Russ.)

17. Володькин А.А., Володькина О.А. Роль опушечных экотонных для сохранения биологического разнообразия. *Сурский вестник*. 2021;16(4):3–7. http://doi.org/10.36461/2619-1202_2021_04_001

Volodkin A.A., Volodkina O.A. The role of edge ecotones for conservation biological diversity. *Surskiy vestnik*. 2021;16(4):3–7. http://doi.org/10.36461/2619-1202_2021_04_001

18. Романов А.А. Ландшафтно-экологическая дифференциация населения птиц в горно-таежном поясе плато Путорана. *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2021;(3):97–108.

Romanov A.A. Landscapeecological differentiation of bird population in the mountain-taiga belt of the Putorana plateau. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya*. 2021;(3):97–108. (In Russ.)

19. Гермогенов Н.И., Брунов В.В., Поздняков В.И. О смешанных гнездовых группировках лесных птиц в придельтовой части долины Лены. *Сибирский экологический журнал*. 1997;(6):635–639.

Germogenov N.I., Brunov V.V., Pozdnyakov V.I. On mixed breeding groups of forest birds in the lower part of the Lena Valley. *Contemporary Problems of Ecology*. 1997;(6):635–639. (In Russ.)

20. Гермогенов Н.И. Особенности гнездования птиц и их населения в таежной зоне Якутии: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. Новосибирск; 2005. 46 с.

Germogenov N.I. Peculiarities of nesting of birds and their population in the taiga zone of Yakutia. Abstr. ... Diss. Doct. Sci. Novosibirsk; 2005. 46 p. (In Russ.)

21. Фекистов П.А., Филиппов Б.Ю., Болотов И.Н. и др. Экотонные зоны в лесных экосистемах северной тайги. *Вестник Поморского университета. Серия: Естественные науки*. 2011;(4):102–105.

Feklistov P.A., Filippov B.Yu., Bolotov I.N., et al. Transitive zones in wood ecosystems of northern. *Vestnik Pomorsko-go universiteta. Series: Natural Sciences*. 2011;(4):102–105. (In Russ.)

22. Колесников В.В., Скуматов Д.В., Экономов А.В., Кетова Н.С. Опушечный эффект в распределении лесных

охотничьих животных. *Вестник охотоведения*. 2019;16(4): 240–247.

Kolesnikov V.V., Skumatov D.V., Ekonomov A.V., Ketova N.S. Edge effect in the distribution of forest game animals. *Vestnik ohotovedeniya*. 2019;16(4):240–247. (In Russ.)

23. Судник А.В., Вознячук И.П., Голушко Р.М., Ефимова О.Е. Состояние и трансформация лесной растительности в зоне воздействия ЛЭП и продуктопроводов. *Ботаника. Исследования*. 2020;(49):134–144.

Sudnik A.V., Voznyachuk I.P., Golushko R.M., Efimova O.E. State and transformation of forest vegetation in area of impact of power line and product pipelines. *Botany (research)*. 2020;(49): 134–144. (In Russ.)

24. Русаков А.В., Сафонов М.А., Чердинцева Т.М. Биотические показатели опушечного эффекта в предгорьях Южного Предуралья. *Вестник Оренбургского государственного университета*. 2013;155(6):115–121.

Rusakov A.V., Safonov M.A., Cherdinceva T.M. Biotic indicators of ecotone effect in the foothills of the Southern Preurala. *Vestnik of the Orenburg State University*. 2013;155(6): 115–121. (In Russ.)

25. Валиева А.К., Казанцева М.Н. Влияние рекреации на опушечный экотон. *Актуальные проблемы лесного комплекса*. 2020;(56):171–174.

Valieva A.K., Kazanceva M.N. Influence of recreation on the ecotone of forest margin. *Actual Problems of the Forestry Complex*. 2020;(56):171–174. (In Russ.)

26. Алёхин В.В. Фитосоциология (учение о растительных сообществах) и ее последние успехи у нас и на Западе. *Методика геоботанических исследований*. Л.; М.: Пучина; 1925. С. 7–95.

Alyohin V.V. Phytosociology (the study of plant communities) and its recent successes in our country and in the West. *Methodology of geobotanical research*. Leningrad; Moscow: Puchina; 1925, pp. 7–95. (In Russ.)

27. Сёмкин Б.И., Горшков М.В. Об оценке сходства и различия в серии флористических и фитоценологических описаний. *Комаровские чтения*. Владивосток: Дальнаука; 2010;(LVII):203–220.

Semkin B.I., Gorshkov M.V. On the analysis of sets of different sizes in the comparative floristics. About estimation of similarity and dissimilarity in series of floristic and phytocenotic lists. *V.L. Komarov Memorial Lectures*. Vladivostok: Dalnauka; 2010;(LVII):203–220. (In Russ.)

28. Миляева Е.В., Миронычева-Токарева Н.П. Мониторинг биоразнообразия лесостепных экотонов. В кн.: *Интерэкспо Гео-Сибирь 2022: Материалы XVIII Международного научного конгресса, г. Новосибирск, 18–20 мая 2022 г.* Новосибирск: СГУГиТ; 2022. С. 291–297.

Milyaeva E. V., Mironycheva-Tokareva N.P. Monitoring the biodiversity of forest-steppe ecotones. In: *Interexpo Geo-Siberia 2022: Proceedings of the 18th International Scientific Congress, Novosibirsk, May 18–20, 2022*. Novosibirsk: SGU-GiT; 2022, pp. 291–297. (In Russ.)

Об авторах

ЧИКИДОВ Иван Иванович, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-8945-4505>, ResearcherID: AGZ-1498-2022, Scopus Author ID: 57290962800, SPIN: 2121-2053, e-mail: chikidov@rambler.ru

МИХАЛЕВА Людмила Гаевна, инженер-исследователь, <https://orcid.org/0000-0002-9042-7483>, Scopus Author ID: 56246547800, SPIN: 6345-9936, e-mail: lgmikhailova@rambler.ru

Вклад авторов

Чикидов И.И. – разработка концепции, верификация данных, проведение статистического анализа, проведение исследования, администрирование данных, создание черновика рукописи, редактирование рукописи, картографическая визуализация; **Михалева Л.Г.** – верификация данных, методология, проведение исследования, создание черновика рукописи, редактирование рукописи, администрирование проекта

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

CHIKIDOV, Ivan Ivanovich, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-8945-4505>, ResearcherID: AGZ-1498-2022, Scopus Author ID: 57290962800, SPIN: 2121-2053, e-mail: chikidov@rambler.ru

MIKHALEVA, Liudmila Gaevna, Research Engineer, <https://orcid.org/0000-0002-9042-7483>, Scopus Author ID: 56246547800, SPIN: 6345-9936, e-mail: lgmikhailova@rambler.ru

Authors' contribution

Chikidov I.I. – conceptualization, validation, formal analysis, investigation, resources, writing – original draft, writing – review & editing, visualization; **Mikhaleva L.M.** – validation, methodology, investigation, writing – original draft, writing – review & editing, project administration

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 05.02.2025

Поступила после рецензирования / Revised 14.08.2025

Принята к публикации / Accepted 19.08.2025



Оригинальная статья

Полиморфизм пыльцы *Picea obovata* Ledeb. в условиях промышленного загрязнения арктического города

Н. В. Василевская[✉], Д. В. Миронюк

Мурманский арктический университет, г. Мурманск, Российская Федерация
[✉]n.v.vasilevskaya@gmail.com

Аннотация

Мурманская область является одной из наиболее урбанизированных и промышленно развитых территорий российского сектора Арктики. В регионе представлены горнодобывающая, металлургическая, энергетическая, пищевая промышленность. Исследования проведены в г. Мурманск – крупнейшем незамерзающем морском порту России, расположенном за Полярным кругом. Среди портов Северо-Запада России он занимает лидирующее место по объему перерабатываемых сухих грузов. Основными загрязнителями окружающей среды города являются полициклические ароматические углеводороды и летучие вещества (SO₂ и NO₂), тяжелые металлы, нефть. Биоиндикация качества окружающей среды города проведена с использованием новых методов экологической палинологии. Цель работы – изучение полиморфизма пыльцы *Picea obovata* Ledeb. в условиях промышленного загрязнения г. Мурманск. В импактной зоне предприятий города (городские ТЭЦ, мусоросжигательный и судоремонтный заводы) проведены палинологические исследования ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.). На каждой пробной площади маркировались по 5–6 деревьев, мужские шишки собирались во время пыления *P. obovata* в конце июня 2024 г. Исследования пыльцы проводились ацетокарминовым методом. Выявлен высокий уровень полиморфизма пыльцы, содержание в образцах пыльцевых зерен с аномалиями развития варьирует от 62,2 до 87,6 %, в контроле 25,8 %. Максимальное содержание тератоморф выявлено в образцах из окрестностей энергетических предприятий, работающих на угле и мазуте: Росляково Южное (87,6 %), Южная котельная (81,6 %), Мурманская ТЭЦ (76,4 %). Выделены три размерные группы тератоморфной пыльцы *P. obovata*: нормальная, карликовая и гипертрофированная с различными патологиями воздушных мешков и экзины. Образование большого количества генетически аномальных форм пыльцы *P. obovata* и особенности их тератологии свидетельствуют о высоком уровне загрязнения окружающей среды и воздействии мутагенов различной природы. Для экологической безопасности населения и снижения уровня загрязнения г. Мурманск необходимо использование экологически безопасных технологий производства и перевод городских котельных на природный газ.

Ключевые слова: биомониторинг, промышленное загрязнение, Арктика, *Picea obovata*, тератоморфизм пыльцы
Финансирование. Работа выполнена без внешнего финансирования.

Для цитирования: Василевская Н.В., Миронюк Д.В. Полиморфизм пыльцы *Picea obovata* Ledeb. в условиях промышленного загрязнения арктического города. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(3):440–451. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-440-451>

Original article

Polymorphism of *Picea obovata* Ledeb. pollen under industrial pollution of the Arctic city

Natalia V. Vasilevskaya[✉], Diana V. Mironyuk

Murmansk Arctic University, Murmansk, Russian Federation
[✉]n.v.vasilevskaya@gmail.com

Abstract

The Murmansk region is one of the most urbanized and industrially developed areas within the Russian Arctic sector, characterized by established mining, metallurgical, energy, and food industries. This study was conducted in Murmansk, Russia's largest ice-free seaport located beyond the Arctic Circle. Among the ports of Northwestern Russia,

Murmansk holds a leading position in terms of dry cargo throughput. The primary environmental pollutants in the city include polycyclic aromatic hydrocarbons, volatile substances such as SO₂ and NO₂, heavy metals, and oil. Bioindication of the city's environmental quality was performed using novel ecological palynology methods. The purpose of the work is to study the polymorphism of pollen of *Picea obovata* Ledeb. under conditions of industrial pollution in the city of Murmansk. Palynological studies of Siberian spruce (*Picea obovata* Ledeb.) were conducted within the impact zones of industrial enterprises, including combined heat and power (CHP) plants, waste incineration facilities, and ship repair plants. In each sampling plot, 5–6 trees were selected, and male cones were collected during the *P. obovata* pollination period at the end of June 2024. Pollen was examined using the acetocarmine staining method. A high degree of pollen polymorphism was observed, with the proportion of pollen grains exhibiting developmental anomalies ranging from 62.2% to 87.6% at impacted sites, compared to 25.8% in the control samples. The highest incidence of teratomorphic pollen was recorded in samples collected near energy enterprises: Roslyakovo Yuzhnoye (87.6%), South CHP Plant (81.6%), and Murmansk CHP Plant (76.4%). Three size categories of teratomorphic *P. obovata* pollen were identified – normal, dwarf, and hypertrophied – each displaying various pathologies of the sacchi and exine. Emissions from Murmansk thermal power plants, which operate on fuel oil and coal, contain elevated concentrations of heavy metals and exhibit high toxicity, resulting in disruptions of microsporogenesis and the formation of teratomorphic pollen in *P. obovata*. Consequently, to improve environmental safety for the local population and reduce pollution levels in Murmansk, it is necessary to adopt new environmentally sustainable technologies and transition the city's boiler houses to natural gas.

Keywords: biomonitoring, industrial pollution, Arctic, *Picea obovata*, teratomorphism of pollen

Funding. This research received no external funding.

For citation: Vasilevskaya N.V., Mironyuk D.V. Polymorphism of *Picea obovata* Ledeb. pollen under industrial pollution of the Arctic city. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(3):440–451. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-440-451>

Введение

Арктика занимает около 10 % поверхности Земли и принадлежит к регионам планеты с наиболее экстремальными природными условиями [1]. В последние годы во всех арктических районах России наблюдается увеличение объемов производства, что приводит к усилению техногенной нагрузки на окружающую среду, которая будет усугубляться с развитием добычи углеводородов, геологоразведочных работ и оказывать негативное влияние на сохранение природно-ресурсного потенциала и экологическую безопасность населения [2]. Мурманская область является наиболее урбанизированной и промышленно развитой территорией российского сектора Арктики. В регионе представлены горнодобывающая, металлургическая, энергетическая, пищевая промышленности, которые являются основными поставщиками токсических веществ в окружающую среду. В городах Мурманской области осуществляется мониторинг загрязнения атмосферного воздуха, воды, почвы, но этих данных недостаточно для составления полной картины экологической обстановки.

Экологическая палинология – одно из новых направлений мониторинга окружающей среды. Известно, что чем выше уровень загрязнения, тем большее количество аномальной пыльцы формируется в процессе микроспорогенеза [3, 4]. Цитологические аномалии растений могут ис-

пользоваться для мониторинга и распознавания химических веществ, присутствующих в окружающей среде, которые представляют собой генетическую угрозу [5]. Исследуя особенности морфологии пыльцевых зерен, можно не только выявить наличие в атмосферном воздухе гамеопатогенных веществ, но и оценить общий уровень загрязнения среды [3]. Многие экологи считают цитогенетические методы в мониторинге наиболее эффективными [4]. Пыльца различных видов растений используется для биоиндикации качества атмосферного воздуха на урбанизированных территориях с высокой транспортной нагрузкой [6, 7] и в зонах промышленного воздействия [4, 8, 9]. Эколого-палинологические исследования активно проводятся в городах Европейского Севера [3, 9], в том числе и арктической зоны [7]. В Мурманской области проведен мониторинг загрязнения атмосферного воздуха с использованием пыльцы древесных видов растений (*Pinus sylvestris*, *Sorbus gorodkovii*, *Syringa josikaea*) в городах Североморск, Мурманск, Апатиты, Мончегорск, Заполярный [10–12].

В условиях промышленного загрязнения среды у хвойных видов образуется большое число аномальной пыльцы [3, 4]. Для мониторинга окружающей среды в качестве тест-объекта наиболее часто используют *Pinus sylvestris* как вид, наиболее чувствительный к загрязнению. Представители родов *Picea*, *Abies* и *Larix* менее изуче-

ны в плане биоиндикации окружающей среды урбанизированных и промышленных территорий.

Цель работы – изучение полиморфизма пыльцы *Picea obovata* Ledeb. в условиях промышленного загрязнения г. Мурманск.

Материалы и методы исследования

Исследования проведены в г. Мурманск – крупнейшем незамерзающем морском порту России, расположенном за Полярным кругом (68° 58' 45" с. ш. 33° 05' 33" в. д.). Город находится на берегу Кольского залива Баренцева моря и является базовым по обеспечению перевозок грузов в районы Крайнего Севера, Арктики и дальнего зарубежья. Среди портов Северо-Запада России он занимает лидирующее место по объему перерабатываемых сухих грузов [13]. Качество окружающей среды в г. Мурманск в последние годы снижается за счет пылевого загрязнения от перегрузки угля, апатита, марганцевых и железных руд Мурманским морским торговым портом и выбросов ТЭЦ, использующих мазут низкого качества. Основными загрязнителями окружающей среды города являются полициклические ароматические углеводороды и летучие вещества (SO₂ и NO₂), тяжелые металлы, нефть [14], почвы содержат высокие концентрации тяжелых металлов, превышающие ПДК (Cu, Zn, Ni, V) [15].



Рис. 1. Пробные площадки: а – «Южная Котельная» (редкостойная тайга), б – «Мурманская ТЭЦ» (заболоченная редкостойная тайга). Фото Д. В. Миронюк

Fig. 1. Test plots at the South CHP Plant (sparse taiga (a)) and the Murmansk CHP Plant (swampy sparse taiga (b)). (Photo by D. V. Mironyuk)

В качестве вида-биоиндикатора выбрана ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.), имеющая широкий ареал от Сибири до Европейского Севера. В России произрастает на Урале, в Сибири (кроме Крайнего Севера), на севере европейской части РФ. На Северо-Востоке Европы *Picea obovata* образует гибриды с *Picea abies*, формируя ряд переходных форм, известных под общим названием ель финская (*Picea × fennica*). В пределах Фенноскандии *P. obovata* встречается в лесотундре в виде отдельных деревьев, уступая при распространении на север другим видам [16]. На Кольском полуострове *P. obovata* образует северную границу леса с лесотундрой. В г. Мурманск произрастает в составе редкостойных лесов. У всех представителей рода *Picea* пыльцевые зерна имеют общий тип строения: одиночные, гетерополярные, эллипсоидальные, билатерально-симметричные, дистально-однолептомные, в норме с двумя большими воздушными мешками [17]. Известно, что загрязнители воздуха (особенно SO₂, O₃, C₂H₂, HF и тяжелые металлы) отрицательно влияют на развитие и качество пыльцы хвойных [4, 18]. В экстремальных условиях у представителей рода *Picea* могут формироваться аномальные пыльцевые зерна с тремя, четырьмя и даже шестью воздушными мешками, а в отдельных случаях – со сплошным полусферическим воздушным мешком [17].

В июне 2024 г. на территории г. Мурманск было заложено пять пробных площадей в окрестностях экологически опасных предприятий:

«Южная котельная» – ул. Прибрежная, в 800 м от Южной котельной, самой мощной в Мурманской области, относящейся ко II классу экологической опасности. Основным видом топлива является мазут. Участок редкостойной северной тайги (рис. 1). В составе фитоценоза: *Picea obovata*, *Populus tremula*, *Betula czerepanovii*, *B. nana*, *Salix* sp., *Ledum palustre*, *Vaccinium myrtillus*, *Cornus suecica*, *Chamaenerion angustifolium*, *Equisetum* sp., *Rubus chamaemorus*, *Sphagnum* sp.

«Мурманская ТЭЦ» – ул. Шмидта, в 1500 м от Мурманской ТЭЦ и 200–300 м и более от автомобильных дорог. Технологической особенностью ПАО «Мурманская ТЭЦ» является ее работа на мазуте, относится ко II классу экологической опасности. В выбросах котельных АО «Мурманская ТЭЦ» содержатся загрязняющие вещества, относящиеся к I и II классам опасности: бенз(а)пирен, формальдегид, гидрохлорид, сероводород, пентаоксид диванадия (V₂O₅), марганец и его

соединения (в пересчете на марганец (IV) оксид) и другие. Ванадий, бенз(а)пирен, марганец и его соединения обладают высокой мутагенностью [10]. Участок заболоченной редкостойной северной тайги (рис.1). В составе фитоценоза: *Betula czerepanovii*, *Picea obovata*, *Pinus sylvestris*, *Betula nana*, *Salix* sp., *Empetrum germaphroditum*, *Vaccinium vitis-idaea*, *Juniperus sibirica*, *Ledum palustre*, *Vaccinium myrtillus*, *Andromeda polifolia*, *Arctous alpina*, *Eriophorum vaginatum*, *Cornus suecica*, *Rubus chamaemorus*, *Trientalis europaea*, *Festuca ovina*, *Equisetum* sp., *Sphagnum* sp.

«Завод ТО ТБО» – ул. Домостроительная, в 500 м от мусоросжигательного завода и в 300–400 м от автодорог (рис. 2). АО «Завод ТО ТБО» относится к I категории негативного воздействия на окружающую среду. В выбросах содержатся загрязняющие вещества, относящиеся к I и II классам опасности: свинец и его неорганические соединения (в пересчете на свинец), оксид кадмия, гидрохлорид, оксид меди, оксид никеля, бенз(а)пирен, хром, пентоксид диванадия, мазутная зола, триоксид диалюминия, марганец и его соединения и другие [10]. Специфическими выбросами мусоросжигательных заводов также являются супертоксиканты: диоксины и фураны.

Верховое болото возле озера Среднее (см. рис. 2). В составе фитоценоза: *Picea obovata*, *Pinus sylvestris*, *Betula czerepanovii*, *Sorbus aucuparia*, *Populus tremula*, *Betula nana*, *Salix* sp., *Empetrum germaphroditum*, *Ledum palustre*, *Vaccinium vitis-idaea*, *V. myrtillus*, *Rubus chamaemorus*, *Cornus suecica*, *Trientalis europaea*, *Eriophorum vaginatum*, *Equisetum* sp. Встречается *Corallorhiza trifida* – редкий вид орхидей, внесенный в Красную книгу Мурманской области со статусом 3 (редкий вид). Среди мхов преобладает *Sphagnum* sp., встречаются лишайники.

«Судоремонтный завод № 35 «Звездочка» – ул. Адмирала флота Лобова, в 800 м от завода и более 300–400 м от автомобильных дорог. Выбросы завода содержат: сероводород, мазутную золу, газообразные соединения фтора, хром, оксид никеля, марганец и его соединения, оксид меди и другие. Участок редкостойной северной тайги (см. рис. 2). В составе фитоценоза: *Picea obovata*, *Pinus sylvestris*, *Betula czerepanovii*, *Populus tremula*, *Empetrum germaphroditum*, *Ledum palustre*, *Vaccinium myrtillus*, *Rubus chamaemorus*, *Cornus suecica*, *Eriophorum vaginatum*, *Equisetum* sp. Моховый покров сформирован *Sphagnum* sp., встречаются лишайники.

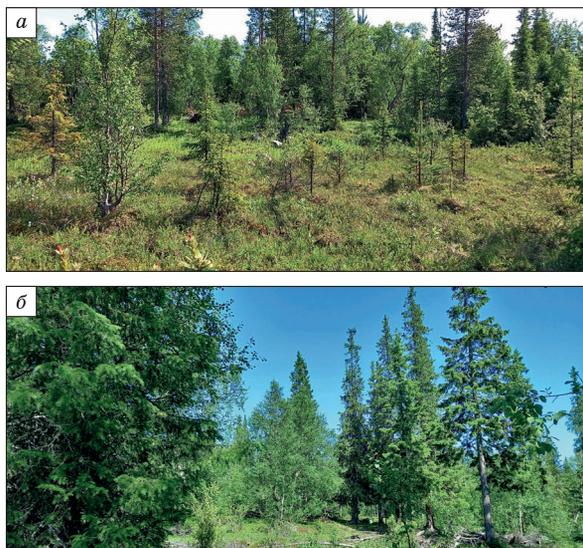


Рис. 2. Пробные площадки: а – «Завод ТО ТБО» (верховое болото), б – «Судоремонтный завод «Звездочка» (редкостойная северная тайга). Фото Д. В. Миронюк

Fig. 2. Test sites: Incineration Plant (raised bog) (a) and Zvezdochka Ship Repair Plant (sparse northern taiga)(б). (Photo by D. V. Mironyuk)

«Росляково Южное» – ул. Молодежная, в 300 м от котельной и более 500 м от автомобильных дорог. Котельная Росляково Южное работает на угле, не оборудована фильтрами очистки выбросов. Уголь складировается открытым способом. Редкостойная северная тайга (рис. 3). В составе фитоценоза: *Picea obovata*, *Pinus sylvestris*, *Betula czerepanovii*, *B. nana*, *Salix* sp., *Empetrum germaphroditum*, *Vaccinium vitis-idaea*, *V. myrtillus*, *V. uliginosum*, *Cornus suecica*, *Chamaenerion angustifolium*, *Rubus chamaemorus*, *Equisetum* sp., *Sphagnum* sp.

Контрольная площадка находится в 30 км к северо-востоку от города Мурманск по Серебрянскому шоссе, в более 1,5 км от автомобильных дорог. Редкостойная северная тайга (см. рис. 3). В составе фитоценоза: *Picea obovata*, *Pinus sylvestris*, *Betula czerepanovii*, *B. nana*, *Salix* sp., *Empetrum germaphroditum*, *Juniperus sibirica*, *Ledum palustre*, *Vaccinium myrtillus*, *Andromeda polifolia*, *Chamaenerion angustifolium*, *Cornus suecica*, *Trientalis europaea*, *Equisetum* sp. Мохово-лишайниковый ярус сформирован *Sphagnum* sp., встречаются различные виды лишайников.

На каждой пробной площадке маркировались по 5–6 деревьев ели сибирской. Выполнено геоботаническое описание пробных площадей. Сбор мужских шишек во время пыления *P. obovata*

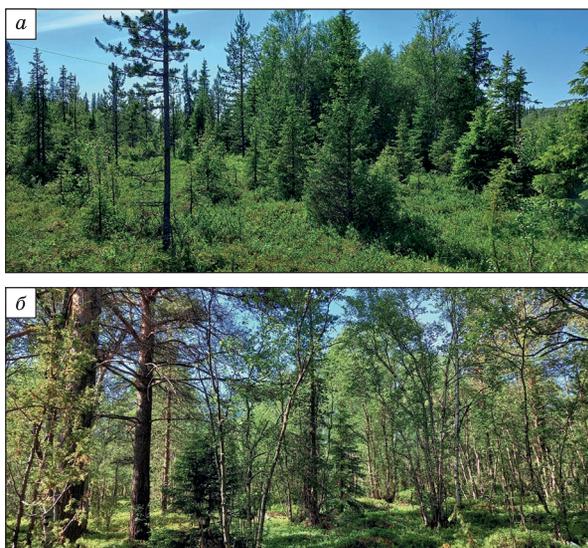


Рис. 3. Пробные площадки: *a* – «Росляково Южное» (редкостойная тайга), *б* – «Контроль» (редкостойная тайга). Фото Д. В. Миронюк

Fig. 3. Test sites: Roslyakovo Yuzhnoye (sparse taiga)(*a*) and Control (sparse taiga)(*b*). (Photo by D. V. Mironyuk)

проводился 20–24 июня 2024 г. С каждого из маркированных деревьев были случайным образом отобраны по пять мужских шишек и сформирована общая проба, которую фиксировали в 40° этиловом спирте. Исследования пыльцы проводились ацетокарминовым методом. Цитологический анализ проводили на временных препаратах с помощью светового микроскопа «Микромед Р-1 (LED) при увеличении в 160 раз. В каждой пробе анализировали по 500 пыльцевых зерен с микрофотографий, выполненных через тубус окуляра 13-мегапиксельной камерой

Samsung. Подсчитывалось количество нормальных и тератоморфных пыльцевых зерен, их процентное содержание в пробах. Все аномальные пыльцевые зерна описывали и заносили в электронный журнал. Выделены тератоморфы пыльцы нормальных, карликовых и гипертрофированных размеров с различными аномалиями развития. Карликовой считалась пыльца в 1,5–2 раза меньше типичной, гипертрофированной – в 1,5–2 раза больше.

Полученные результаты были обработаны однофакторным дисперсионным анализом с использованием критерия Фишера. Результаты считались достоверными при $p \leq 0,05$.

Результаты и обсуждение

В результате палинологического анализа *Picea obovata* получено, что все протестированные пробы содержат нормальные и тератоморфные пыльцевые зерна. В образцах контрольной площадки, расположенной в 30 км на северо-восток от Мурманска, доля типичной пыльцы составляет 74,2 %. В пробах из окрестностей промышленных предприятий содержание нормальной пыльцы очень низкое (12,4–37,8 %), особенно в окрестностях мурманских котельных: Росляково Южное (12,4 %), Южная котельная (18,4 %), Мурманская ТЭЦ (23,6 %) (см. таблицу, рис. 4). Тератоморфные пыльцевые зерна *P. obovata* отличаются формой, размерами, аномальным строением воздушных мешков или экзины. В г. Мурманск выявлен высокий полиморфизм пыльцы ели сибирской, который скорее является тератоморфизмом. Содержание пыльцы с пороками развития составляет 62,2–87,6 %, в контроле

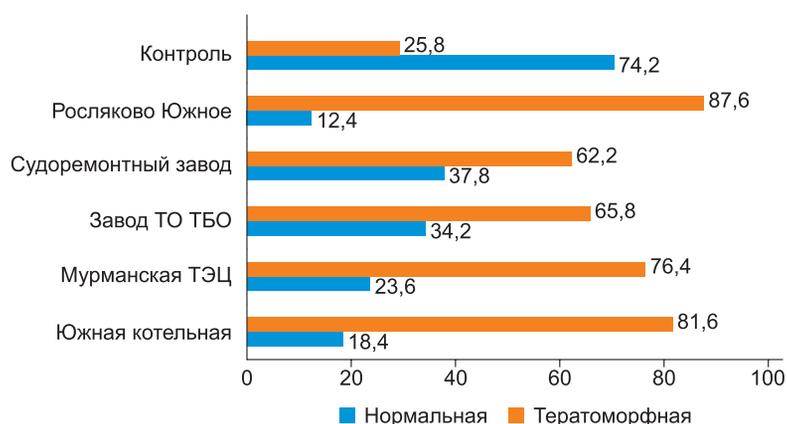


Рис. 4. Соотношение нормальной и тератоморфной пыльцы *Picea obovata* в г. Мурманск (%)

Fig. 4. The ratio of normal to teratomorphic pollen in *Picea obovata* from the city of Murmansk (%)

Количество нормальной и тератоморфной пыльцы *Picea obovata* в окрестностях промышленных объектов г. Мурманск

The quantity of normal and teratomorphic pollen of *Picea obovata* in the vicinity of industrial facilities in the city of Murmansk

| Показатель | Южная котельная | Мурманская ТЭЦ | Завод ТО ТБО | Судорем. Завод № 35 | Росляково | Контроль |
|--------------------------------------|-----------------|----------------|--------------|---------------------|-----------|----------|
| Количество изученных пыльцевых зерен | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 |
| Количество нормальной пыльцы | 92 | 118 | 171 | 189 | 62 | 371 |
| Количество тератоморфной пыльцы | 408 | 382 | 329 | 311 | 438 | 129 |
| Из них: | | | | | | |
| Количество тератоморф норм. размеров | 173 | 155 | 134 | 116 | 167 | 74 |
| Количество карликовых тератоморф | 113 | 115 | 101 | 94 | 98 | 25 |
| Количество гипертроф. тератоморф | 122 | 112 | 94 | 101 | 173 | 30 |

25,8 % (см. таблицу, рис. 4). Максимальное количество тератоморфных пыльцевых зерен выявлено в пробах из окрестностей энергетических предприятий: Росляково Южное (87,6 %), Южная котельная (81,6 %), Мурманская ТЭЦ (76,4 %). В зоне воздействия мусоросжигательного (65,8 %) и 35-го судоремонтного завода «Звездочка» (62,2 %) доля тератоморфной пыльцы *P. obovata* ниже (см. рис. 4).

Однофакторный дисперсионный анализ показал, что загрязнение окружающей среды в г. Мурманск влияет на количество нормальной и тератоморфной пыльцы ели сибирской. Данные по содержанию нормальной ($F = 5,5307$; $p \leq 0,05$) и тератоморфной ($F = 14,2595$; $p \leq 0,05$) пыльцы между площадками статистически значимо различаются.

Среди аномальной пыльцы *P. obovata* выделены три группы: нормальная, карликовая и гипертрофированная. Чаще всего в окрестностях промышленных предприятий г. Мурманск встречается тератоморфная пыльца нормальных размеров (23,2–34,6 %) (см. таблицу). Во всех образцах выявлено высокое содержание карликовой пыльцы (18,8–22,6 %) с различными патологиями воздушных мешков и экзины, особенно в окрестностях Южной котельной и Мурманской ТЭЦ. Карликовые пыльцевые зерна являются общей тенденцией тератоморфоза при геоботанических стрессах [19]. Содержание в пробах гипертрофированной (гигантской), нередуцированной диплоидной пыльцы, с различными морфологическими отклонениями в развитии варьирует в диапазоне 18,8–34,6 %. Появление гигантских пыльцевых зерен связано с нарушениями мейо-

за в результате воздействия мутагенов различной природы [19].

По данным Н. А. Калашник [20], в условиях геохимического загрязнения гипертрофированная и карликовая пыльца *P. obovata* встречаются наиболее часто. В Челябинской области и Башкортостане выявлено, что мелкие пыльцевые зерна *P. obovata* образуются в условиях сильного и умеренного промышленного загрязнения среды [4]. Аналогичные данные получены в окрестностях Красноярска [18]. В Сибири, в экологических условиях, близких к оптимальным, уменьшение размера пыльцевых зерен *P. obovata* являлось единственной аномалией развития [21].

Полиморфизм пыльцевых зерен *P. obovata* нормальных размеров в г. Мурманск наиболее вариативен, выявлено 13 тератоморф, среди них: одномешковые, с асимметрией воздушных мешков, безмешковые, с редукцией воздушных мешков, разномешковые, с линзовидным или воротничковым воздушным мешком, с попарным срастанием четырех пыльцевых мешков, с наростами на экзине, с плазмолизом протопласта, деградировавшая пыльца, с трехлучевой трещиной в экзине, сросшиеся пыльцевые зерна (рис. 5).

Выявлено 12 карликовых тератоморф пыльцы *P. obovata*: двухмешковые, одномешковые, с асимметрией воздушных мешков, безмешковые, с редукцией воздушных мешков, разномешковые, с воротничковым воздушным мешком, с наростами на экзине, с плазмолизом протопласта, деградировавшая пыльца, с редукцией тела и воздушных мешков, с редукцией тела и трещиной воздушных мешков (см. рис. 5).

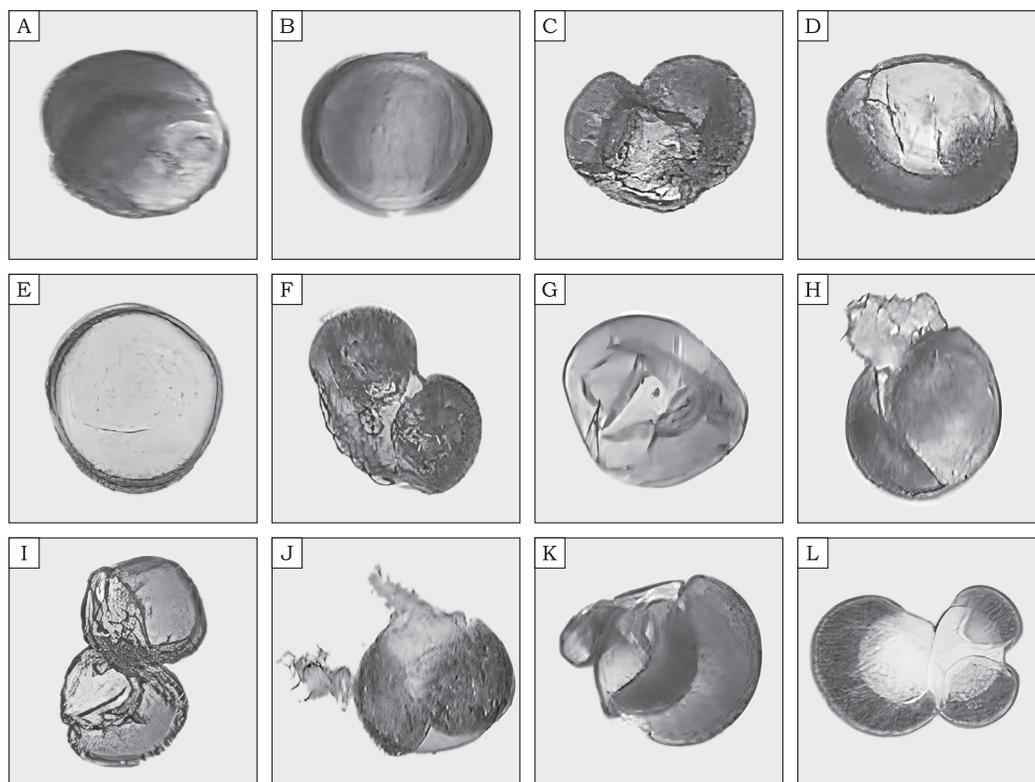


Рис. 5. Микрофотографии тератоморфной пыльцы *Picea obovata* в г. Мурманск. А – одномешковая, В – гипертрофированная с редукцией воздушных мешков, С – разномешковая, D – с воротничковым воздушным мешком, Е – стерильная безмешковая, F – с петлевидными наростами на экзине, G – карликовая с трехлучевой щелью в экзине, H – безмешковая с трещиной в экзине, I – карликовая с редукцией тела и трещинами воздушных мешков, J – гипертрофированная с наростами на экзине, K – сросшиеся воротничковые пыльцевые зерна L – сросшиеся воротничковое и нормальное пыльцевые зерна

Fig. 5. Microphotographs illustrating teratomorphic pollen of *Picea obovata* collected in Murmansk. A – with a single saccus, B – hypertrophied with a reduction of sacci, C – with two dissimilar sacci, D – collar saccus, E – sterile without sacci, F – with loop-like growths on the exine, G – dwarf with a three-beam slit in the exine, H – without sacci, with crack in the exine, I – dwarf with a reduced body and cracks in the saccus, J – hypertrophied with growths on the exine, K – fused collar pollen grains, L – fused collar and normal pollen grains

В протестированных образцах идентифицировано 10 гипертрофированных тератоморф пыльцы ели сибирской: двухмешковые, одномешковые, безмешковые, с редукцией воздушных мешков, с воротничковым воздушным мешком, с наростами на экзине, с повреждением экзины, с плазмоллизом протопласта, с воротничковым воздушным мешком и плазмоллизом протопласта, с тремя воздушными мешками (см. рис. 5).

Общая тенденция тератоморфоза пыльцы *P. obovata* в г. Мурманск – нарушение морфологического строения воздушных мешков. Воздушные мешки – это полые боковые расслоения экзины, благодаря которым пыльцевые зерна ели имеют очень высокие аэродинамические свойства [22], при этом они выполняют не только функцию летательного аппарата, но и гармомегата, функционируя в качестве балансира на

нуцеллусе семяпочки [17]. Наиболее распространенной патологией является редукция воздушных мешков, что характерно для хвойных [23]. Около всех промышленных предприятий г. Мурманск выявлено высокое содержание гипертрофированной пыльцы *P. obovata* (см. рис. 5, B) с редукцией воздушных мешков (7,8–17,4 %), особенно ее много в зоне воздействия угольной котельной «Росляково Южное» (рис. 6). Предположительно, это диплоидная пыльца, ее наличие свидетельствует о мутагенном эффекте выбросов мурманских ТЭЦ, мусоросжигательного и судоремонтного заводов. Гигантская пыльца, в том числе с огромным телом и карликовыми воздушными мешками описана при изучении природных геоботанических катастроф [19]. Содержание пыльцы *P. obovata* нормальных размеров с редукцией воздушных мешков 3,2–7,4 %,

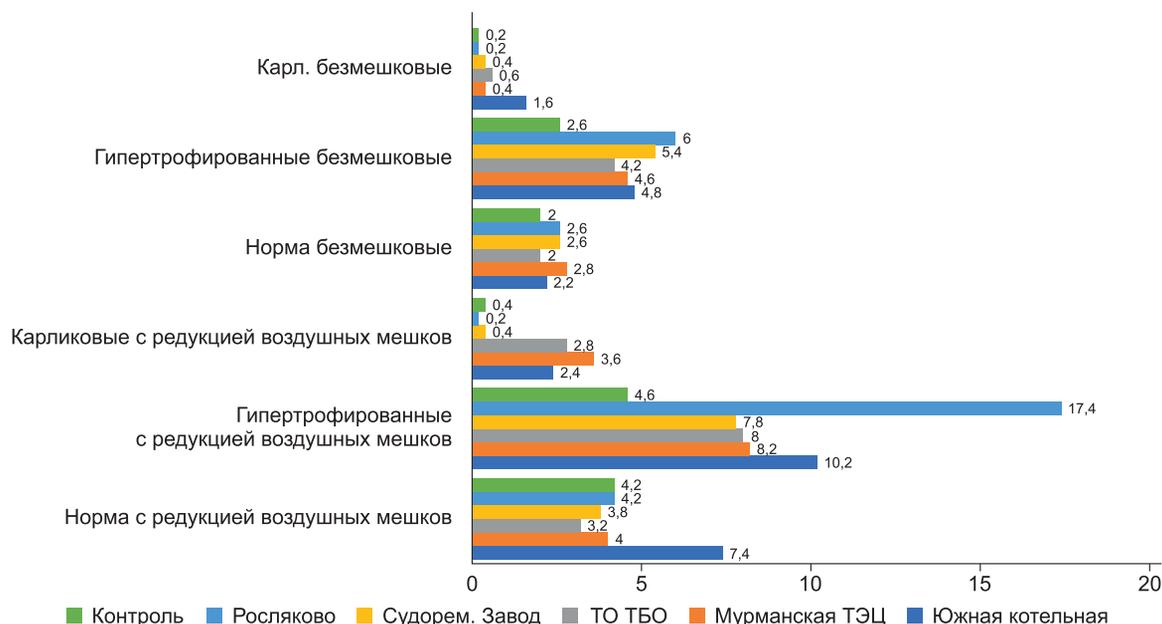


Рис. 6. Соотношение пыльцы *Picea obovata* с редукцией воздушных мешков и безмешковой разных размерных групп (%)

Fig. 6. Proportion of *Picea obovata* pollen with reduced sacci and without sacci across various size groups (%)

карликовых с такой аномалией намного меньше (см. рис. 6).

Безмешковая пыльца (см. рис. 5, E) чаще гипертрофирована (4,2–6,0 %). Отсутствие воздушных мешков встречается реже у нормальной и особенно карликовой пыльцы (см. рис. 6). В Челябинской области и Башкортостане в условиях сильного и умеренного промышленного загрязнения безмешковые пыльцевые зерна *P. obovata* являются часто встречающейся аномалией [4].

Во всех пробах в г. Мурманск выявлены пыльцевые зерна воротничковой формы (см. рис. 5, D), образующиеся в результате срастания двух пыльцевых мешков, в контроле данная тератоморфа отсутствует. Большая часть такой пыльцы имеет нормальные размеры, особенно высоко ее содержание в окрестностях Росляково Южное (7,6 %) и Южной котельной (5,8 %) (рис. 7). Доля карликовой и гипертрофированной пыльцы с воротничковым мешком повышена около всех мурманских ТЭЦ (см. рис. 7). Пыльца воротничковой формы со сросшимися воздушными мешками встречается у хвойных только в экстремальных условиях среды [17]. В окрестностях г. Красноярск в условиях промышленного загрязнения среды доля этой тератоморфы *P. obovata* значительно ниже (0,04 %), чем в Мурманске [18].

В окрестностях всех промышленных предприятий г. Мурманск выявлена пыльца *P. obovata* с линзовидным воздушным мешком (2,0–4,4 %), такие отклонения в развитии не обнаружены у карликовой и гигантской пыльцы.

В протестированных образцах часто встречаются разномешковые пыльцевые зерна (см. рис. 5, C) нормальных размеров (4,0–7,8 %), особенно около мурманских ТЭЦ. Доля карликовой разномешковой пыльцы ниже, у гипертрофированной эта аномалия не выявлена (см. рис. 7). Одномешковые пыльцевые зерна (см. рис. 5, A) имеют нормальные (2,8–4,6 %), гипертрофированные (1,2–2,8 %) и карликовые (1,0–4,4 %) размеры. В Башкортостане и Челябинской области доля пыльцевых зерен *P. obovata* с одним воздушным мешком составила 0,7–0,8 % [4].

Во всех образцах встречаются пыльцевые зерна нормальных размеров с асимметричным расположением воздушных мешков (2,0–7,4 %), карликовые с такой патологией встречаются реже (0,4–2,6 %), гипертрофированные отсутствуют.

Е. В. Бажина [24] выявила многочисленные патологии развития воздушных мешков пыльцы у современных видов хвойных под воздействием засухи и промышленного загрязнения воздуха в Сибири. По данным Н. А. Калашник [4], в условиях сильного и умеренного промышленного за-

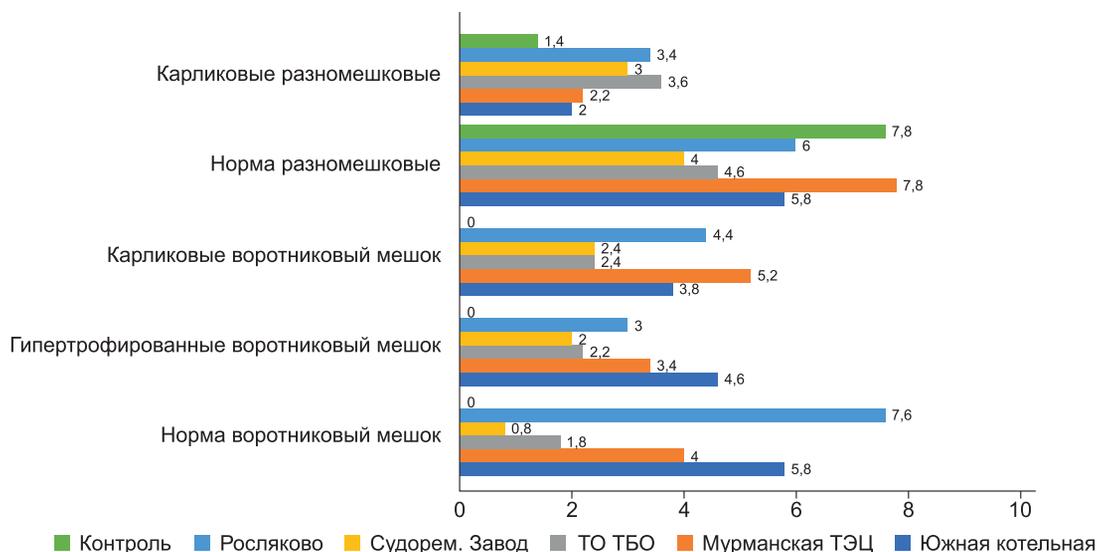


Рис. 7. Соотношение пыльцы *Picea obovata* с воротниковым пыльцевым мешком и разномешковых разных размерных групп (%)

Fig. 7. Proportion of *Picea obovata* pollen with a collar sacculus and pollen with various sacci across different size groups (%)

грязнения часто образуются пыльцевые зерна *P. obovata* с отклонениями в морфологии воздушных мешков: безмешковые, одномешковые, с тремя воздушными мешками. Под воздействием выбросов промышленных предприятий в окрестностях г. Красноярск большинство аномальной пыльцы *P. obovata* представлено патологиями воздушных мешков: с воротничковым мешком (0,04 %), с тремя мешками (0,036 %), четырьмя (0,073 %), одномешковая (0,073 %) или безмешковая (0,290 %) [18].

Особенностью палинотератного комплекса в г. Мурманск является присутствие в пробах тератоморф пыльцы *P. obovata* с наростами на экзине или трехлучевой щелью в экзине (см. рис. 5, F, G, H, J). Пыльца ели сибирской с петлевидным разрастанием экзины (см. рис. 5, F) выявлена во всех пробах (0,4–1,8 %), кроме контроля. Особенно часто она встречается около Мурманской ТЭЦ (1,8 %) и угольной котельной «Росляково Южное» (0,8 %). Такая тератоморфа пыльцы сосны (*Pinus sylvestris*) была обнаружена О. Ф. Дзюбой вблизи Ленинградской АЭС и в г. Сосновый Бор [3]. Во всех образцах, кроме контроля, выявлены гипертрофированные диплоидные пыльцевые зерна с разрастанием экзины в виде антенн (см. рис. 5, J) (0,2–1,4 %). Наиболее часто такая тератоморфа встречается в окрестностях угольной котельной «Росляково Южное» (1,4 %). Пыльцевые зерна с крупными

поперечными или продольными трещинами (открытыми или закрытыми) в центре тела (см. рис. 5, G, H) являются характерным признаком патоморфоза пыльцы *P. obovata* в окрестностях энергетических предприятий г. Мурманск (0,2–0,4 %). О. Ф. Дзюба [3] отмечает, что тератоморфы, имеющие тетрадные рубцы (напоминающие раскрытые или сомкнутые щели трехлучевых спор), указывают на высокий уровень загрязнения среды, а также повышенную радиационную активность.

В пробах встречаются редкие тератоморфы (см. рис. 5, K, L, I). В образцах из зоны воздействия угольной котельной «Росляково Южное» выявлены сросшиеся воротничковые пыльцевые зерна (0,2 %) (см. рис. 5, K), в окрестностях Южной котельной – сросшиеся воротничковое и нормальное двухмешковое пыльцевые зерна (0,2 %) (см. рис. 5, L). Карликовая пыльца с редукцией тела и трещинами воздушных мешков (см. рис. 5, I) обнаружена в образцах из окрестностей Мурманской ТЭЦ и мусоросжигательного завода (0,2 %). В образцах из окрестностей Судоремонтного завода № 35 и угольной котельной «Росляково Южное» выделены гипертрофированные пыльцевые зерна с воротничковыми воздушным мешком и плазмоллизом протопласта (0,2 и 0,4 % соответственно).

Результаты палинологических исследований свидетельствуют о высоком тератоморфизме пыль-

цы *Picea obovata* (62,2–87,6 %) в окрестностях экологически опасных промышленных предприятий г. Мурманск. Полученные данные подтверждают аналогичные исследования полиморфизма пыльцы *Pinus sylvestris*, проведенные ранее в разных районах города, при этом содержание в пробах аномальной пыльцы варьировало от 54 до 71 % [7].

С. Фостер и С. Афонин [25] предложили рассматривать в качестве критерия экологического стресса у представителей хвойных более 3 % пыльцы с патологиями развития. Другие исследователи [26] использовали показатель более 4,5 % деформированных пыльцевых зерен в общем пуле пыльцы современных голосеменных для вывода о стрессовых условиях произрастания. Недавние исследования Дж. Бенка [27] показали, что у различных видов хвойных в экологически чистых условиях двухмешковая пыльца с пороками развития составляет менее 3 %. Морфологический консерватизм двухмешковых пыльцевых зерен в естественных условиях предполагает, что всплески частоты их деформаций являются результатом экологических воздействий на микроспорогенез у голосеменных [27].

Микроспорогенез является одной из наиболее уязвимых фаз в жизненном цикле семенных растений по отношению к экологическому стрессу [28]. Высокий уровень аномалий пыльцы может быть обусловлен генетическими особенностями изучаемого вида или мутациями, так как мейоз находится под генетическим контролем [29]. Известно, что гетерогенность пыльцы по размеру и форме пыльцевых зерен может быть результатом мейотических нарушений [30]. Образование карликовой пыльцы связано с нарушениями мейоза, при которых теряется часть генетического материала в результате повреждения веретена деления или хромосомных мутаций [30]. У представителей рода *Picea* образование гипертрофированной пыльцы скорее всего происходит в результате нарушений на стадии формирования тетрад или вторичного слияния протопластов микроспор [21].

В семействе Pinaceae, роды *Picea* и *Pinus* производят особенно большое количество двухмешковой пыльцы, и поэтому она легко разносится ветром. Изменение морфологической структуры воздушных мешков не позволяет пыльцевым зернам выполнять летательную функцию, так же, как и функционировать при опылении на нуцел-

лусе семязпочки. Есть данные, что аномалии тела и структуры воздушных мешков пыльцы хвойных возникают в результате потери части генетического материала в ходе мейоза [31]. Пороки развития пыльцы хвойных с воздушными мешками возникают из-за отклонений в микроспорогенезе, которые происходят на стадиях материнской клетки и тетрады микроспоры [27]. У представителей рода *Picea* образование воздушных мешков начинается сразу после образования тетрад, когда микроспоры увеличиваются в размере [21], а заканчивается в конце стадии тетрады. Это означает, что аномальное развитие формы, размера, ориентации или количества мешков должны проходить пока пыльцевые зерна находятся на ранней стадии тетрады [27]. Неправильно сформированные воздушные мешки пыльцы, по-видимому, сигнализируют о сниженной репродуктивной приспособленности, т. е. о сниженной способности особей передавать свои гены последующим поколениям, а не о сигналах полиплоидного адаптивного преимущества, гибридных сбоев или расширения ареала [27].

Известно, что тяжелые металлы вызывают хромосомные нарушения в мужских гаметах у представителей хвойных, произрастающих в условиях хронического загрязнения предприятиями цветной металлургии, на разных стадиях мейоза [20]. Выбросы мурманских ТЭЦ, работающих на мазуте и угле, содержат высокие концентрации Cu, Ni, V, Cd и Zn и обладают высокой токсичностью [10], что вызывает нарушение процесса микроспорогенеза и формирование тератоморфной пыльцы *Picea obovata*.

Заключение

Исследования в окрестностях экологически опасных предприятий г. Мурманск показали, что образование большого количества генетически аномальных форм пыльцы *P. obovata* и особенности их тератологии свидетельствуют о высоком уровне загрязнения окружающей среды и воздействии мутагенов различной природы. Наиболее токсичное воздействие на процесс микроспорогенеза и образование пыльцы *P. obovata* оказывают выбросы мурманских ТЭЦ. Повышенное содержание тератоморфной пыльцы свидетельствует об экологическом стрессе и является индикатором низкого качества окружающей среды. Для экологической безопасности населения и снижения уровня загрязнения г. Мурманск

необходимо использование экологически безопасных технологий производства и перевод городских котельных на природный газ.

Список литературы / References

- Nowak M.D., Birkeland S., Mandakova K., et al. The genome of *Draba nivalis* shows signatures of adaptation to the extreme environmental stresses of the Arctic. *Molecular Ecology Resources*. 2021;21(3):661–676. <https://doi.org/10.1111/1755-0998.13280>
- Липина С.А., Зайков К.С., Липина А.В. Внедрение инновационных технологий как фактор экологической модернизации арктических регионов России. *Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз*. 2017;10(2):164–180. <https://doi.org/10.15838/esc.2017.2.50.9>
- Lipina S.A., Zaykov K.S., Lipina A.V. Introduction of innovative technology as a factor in environmental modernization in Russian Arctic. *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*. 2017;10(2):164–180. (In Russ.) <https://doi.org/10.15838/esc.2017.2.50.9>
- Дзюба О.Ф. Палиноиндикация качества окружающей среды. СПб.: Недра; 2006. 197 с.
- Dzyuba O. F. *Palynoidication of Environmental Quality*. St. Petersburg: Nedra; 2006. 197 p. (In Russ.)
- Калашник Н.А., Ясовиева С.М., Преснухина Л.П. Аномалии пыльцы хвойных видов деревьев при промышленном загрязнении на Южном Урале. *Лесоведение*. 2008;(2):33–40.
- Kalashnik N. A., Yasovieva S. M., Presnukhina L. P. Anomalies of pollen in coniferous trees caused by industrial pollution in the South Urals. *Russian Journal of Forest Science*. 2008;2:33–40. (In Russ.)
- Siddiqui S., Al-Rumman S. Clethodim induced pollen sterility and meiotic abnormalities in vegetable crop *Pisum sativum* L. *Caryologia*. 2020;73(1):37–44. <https://doi.org/10.13128/caryologia-269>
- Wang X., Gong S., Nakamura S., et al. Air pollutant deposition effect and morphological change of *Cryptomeria japonica* pollen during its transport in urban and mountainous areas of Japan. *WIT Transactions on Biomedicine and Health*. 2009;14:77–89. <https://doi.org/10.2495/EHR090081>
- Vasilevskaya N.V. Pollution of the environment and pollen: A review. *Stresses*. 2022;2(4):515–530. <https://doi.org/10.3390/stresses2040035>
- Носкова Н.Е., Третьякова И.Н. Влияние стресса на репродуктивные способности сосны обыкновенной. *Хвойные бореальной зоны*. 2006;3:54–64.
- Noskova N. E., Tretyakova I. N. Effect of stress on reproductive abilities of Scots pine. *Conifers of the Boreal Zone*. 2006;3:54–64. (In Russ.)
- Ерохина И.С., Елькина Н.А., Марковская Е.Ф. Палиноиндикация природной среды города Костомукша. *Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Серия естественные науки*. 2011;119(6):20–23.
- Erokhina I.S., El'kina N.A., Markovskaya E.F. Palynoidication of environment of the city of Kostomuksha. *Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural and Engineering Sciences*. 2011;119(6):20–23. (In Russ.)
- Василевская Н.В., Сикалюк А.И. Биомониторинг окружающей среды арктической урбанизированной территории с использованием пыльцы *Sorbus gorodkovii* Pojark. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(3):425–434. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-425-434>
- Vasilevskaya N.V., Sikalyuk A.I. Biomonitoring of the environment of the Arctic urbanized area using the pollen of *Sorbus gorodkovii* Pojark. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(3):425–434. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-425-434>
- Vasilevskaya N.V., Osechinskaya P.V. Teratomorphism of *Pinus sylvestris* L. pollen of the Subarctic industrial city. *BIO Web of Conferences*. 2024;145:02014. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202414502014>
- Vasilevskaya N.V., Morozova D.A. Morphological variability and fertility of *Syringa josikaea* pollen under industrial pollution of the arctic city. *BIO Web of Conferences*. 2024;130:01008. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202413001008>
- Большаков Я.А., Фридкин В.Н. Возможности и перспективы Мурманской области в развитии транспорта Арктического региона. *Вестник Мурманского государственного технического университета*. 2016;19(2):363–371. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2016-2-363-371>
- Bolshakov Ya.A., Fridkin V.N. Opportunities and prospects of the Murmansk region in the development of transport in the Arctic region. *Vestnik MGTU*. 2016;2:363–371. (In Russ.) <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2016-2-363-371>
- Guzeva A.V., Slukovskii Z.I., Myazin V.A. Geochemical features of lakes located in an urbanized area of the Russian Arctic (Murmansk region). *Limnology and Freshwater Biology*. 2020;(4):511–512. <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2020-A-4-511>
- Vasilevskaya N.V., Struzhko V.V. Ontogenetic reactions of mesophyll of leaves of *Betula nana* L. on the industrial pollution of the arctic urbanized territory. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020;421(5):052031. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/421/5/052031>
- Толмачев А.И. *Арктическая флора СССР: Вып. 1. Семейства Polypodiaceae — Butomaceae*. М.; Л.: Издательство Академии наук СССР; 1960. 103 с.
- Arctic Flora of the USSR: Issue 1. Families of Polypodiaceae — Butomaceae*. Moscow; Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1960. 103 p. (In Russ.)
- Токарев П. И. *Палинология древесных растений, произрастающих на территории России*. Автореф. дис. ... докт. биол. наук. М.; 2003. 56 с.
- Tokarev P.I. *Palynology of Woody Plants Growing in the Territory of Russia*: Abstr. ... Diss. Cand. Sci., Moscow. 2003. 56 p. (In Russ.)
- Vazhina E.V., Sedaeva M.I. Pollen viability of *Picea obovata* Ledeb. under technogenic stress conditions. *Contemporary Problems of Ecology*. 2023;5:657–664. <https://doi.org/10.1134/S1995425523050049>
- Левковская Г.М., Карцева Л.А., Коломиец О.Д. и др. Специфика палинотератного «ответа» генеративной сферы растений на Чернобыльскую катастрофу. В кн.: *XI Всероссийская палинологическая конференция «Палинология: Теория и Практика»: материалы конференции, г. Москва, 27 сентября – 1 октября 2005г.* М.: ПИН РАН, 2005. С. 134–136.
- Levkovskaya G.M., Kartseva L.A., Kolomiets O.D., et al. Specificity of the palynoterate “response” of the generative sphere of plants to the Chernobyl disaster. In: *Proceedings of XI All-Russian Palynological Conference: “Palynology: Theory & Applications”*. Moscow: PIN RAS; 2005, pp. 134–136. (In Russ.)
- Калашник Н.А. Аномалии пыльцы у ели сибирской в различных экологических условиях. *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки*. 2011;98(3):105–109.

Kalashnik N.A. Pollen anomalies in *Picea obovata* under different ecological conditions. *Belgorod State University Scientific Bulletin. Natural Sciences*. 2011;98(3):105–109. (In Russ.)

21. Bazhina E.V., Sedaeva M.I., Goryachkina O.V., Muratova E.N. Pollen development and morphology in different *Picea* A. Dietr. species at the V.N. Sukachev Institute of Forest Arboretum. *The International Journal of Plant Reproductive Biology*. 2017;9:1.0-0. <https://doi.org/10.14787/ijrb.2017.9.1.0-0>

22. Сурсо М.В. Пыльцевой режим в хвойных насаждениях Севера. *Лесной вестник*. 2009;66(3):33–38.

Surso M.V. Pollen cloud dynamics in the North European conifer stands. *Forestry Bulletin*. 2009;66(3):33–38. (In Russ.)

23. Сурсо М.В. *Репродуктивная биология и полиморфизм хвойных видов (семейства Pinaceae Lindl., Cupressaceae Rich. ex Bartl.) Европейского Севера России (Архангельская область)*. Автореф. дис. ... докт. с.-х. наук. Архангельск. 2013: 43 с.

Surso M.V. *Reproductive Biology and Polymorphism of Coniferous Species (Families Pinaceae Lindl., Cupressaceae Rich. ex Bartl.) of the European North of Russia (Arkhangelsk Region)*. Abstr. ... Diss. Cand. Sci., Arkhangelsk. 2013. 43 p. (In Russ.)

24. Bazhina E.V., Kvitko O.V., Muratova E.N. *Abies sibirica* Ledeb. meiosis during microsporogenesis in disturbed forest ecosystems. *Forest Science and Technology*. 2007;3(2):95–100. <https://doi.org/10.1080/21580103.2007.9656324>

25. Foster C.B., Afonin S.A. Abnormal pollen grains: an outcome of deteriorating atmospheric conditions around the Permian–Triassic boundary. *Journal of the Geological Society*. 2005;162:653–659. <https://doi.org/10.1144/0016-764904-047>

26. Lindström S., McLoughlin S. Synchronous palynofloristic extinction and recovery after the end-Permian event in the Prince Charles Mountains, Antarctica: Implications for palynofloristic turnover across Gondwana. *Review of Palaeobotany and Palynology*. 2007;145(1-2):89–122. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2006.09.002>

27. Benca J.P., Duijnste I.A.P., Looy C.V. Fossilized pollen malformations as indicators of past environmental stress and meiotic disruption: insights from modern conifers. *Paleobiology*. 2022;48:677–710. <https://doi.org/10.1017/pab.2022.3>

28. De Storme N., Geelen D. The impact of environmental stress on male reproductive development in plants: biological processes and molecular mechanisms. *Plant, Cell and Environment*. 2014;37(1):1–18. <https://doi.org/10.1111/pce.12142>

29. Bogdanov Yu.F. Variation and evolution of meiosis. *Russian Journal of Genetics*. 2003;39:363–381. <https://doi.org/10.1023/A:1023345311889>

30. Rana P.K., Kumar P., Singhal V.K. Spindle stickiness during male meiosis in *Aanemone tetrasepala* (Ranunculaceae). *Turkish Journal of Botany*. 2013;37(1):167–176. <https://doi.org/10.3906/bot-1108-23>

31. Носкова Н.Е., Третьякова И.Н., Муратова Е.Н. Микроспорогенез и формирование пыльцы у сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях современного климата Сибири. *Известия РАН. Серия биологическая*. 2009;36(3):317–322.

Noskova N.E., Tretyakova I.N., Muratova E.N. Microsporogenesis and pollen formation in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) under modern climate conditions of Siberia. *Biology Bulletin*. 2009;36:317–322. (In Russ.)

Об авторах

ВАСИЛЕВСКАЯ Наталья Владимировна, доктор биологических наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0002-6926-9353>, ResearcherID: AAY-7070-2021, Scopus Author ID: 15926526000, SPIN: 3224-9336, e-mail: n.v.vasilevskaya@gmail.com

МИРОНЮК Диана Владимировна, студентка магистратуры, <https://orcid.org/0000-0002-1065-4687>, e-mail: daian.mironyuk@yandex.ru

Вклад авторов

Василевская Н.В. – разработка концепции, методология, проведение исследования, руководство исследованием, редактирование рукописи; **Миронюк Д.В.** – проведение исследования, проведение статистического анализа, создание черновика рукописи

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

VASILEVSKAYA, Natalia Vladimirovna, Dr. Sci. (Biol.), Professor, <https://orcid.org/0000-0002-6926-9353>, ResearcherID: AAY-7070-2021, Scopus Author ID: 15926526000, SPIN: 3224-9336, e-mail: n.v.vasilevskaya@gmail.com

MIRONYUK, Diana Vladimirovna, Master's student, <https://orcid.org/0000-0002-1065-4687>, e-mail: daian.mironyuk@yandex.ru

Authors' contribution

Vasilevskaya N.V. – conceptualization, methodology, investigation, supervision, writing – review & editing; **Mironyuk D.V.** – investigation, formal analysis, visualization, writing – original draft

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 06.06.2025

Поступила после рецензирования / Revised 22.08.2025

Принята к публикации / Accepted 26.08.2025



Оригинальная статья

Весенние пожары в лесах Центральной Якутии: роль антропогенного воздействия и экономические последствия

В. В. Протопопова¹, А. В. Протопопов², И. В. Самсонова^{✉,2,3,4}

¹Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

²Академия наук Республики Саха (Якутия), г. Якутск, Российская Федерация

³Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация

⁴Арктический государственный агротехнологический университет, г. Якутск, Российская Федерация

✉ IrSam@list.ru

Аннотация

Весенние лесные пожары в Центральной Якутии остаются актуальной эколого-социально-экономической проблемой. Целью исследования является анализ роли сельскохозяйственных палов как ключевого антропогенного фактора весенних пожаров в лесах Центральной Якутии, а также оценка экономических последствий как самих пожаров, так и запрета на палы, введенного в 2015 г. постановлением Правительства РФ № 1213. Методология включает анализ данных за 25-летний период (2000–2024 гг.), предоставленных Якутской базой «Авиалесохраны» по центральным районам Якутии, полевые экспедиции 2023–2024 гг., ГИС-анализ, фенологический мониторинг и применение классических пирологических методик (Нестеров, Курбатский, Залесов). Результаты исследования показали, что 80–98 % весенних пожаров имеют антропогенное происхождение, причем 60–70 % из них связаны с вышедшими из-под контроля сельхозпалами. Несмотря на запрет, их практика сохраняется как традиционный способ подготовки пастбищ, способствующий раннему отрастанию травы и повышению кормовой базы. Анализ выявил, что запрет не привел к снижению пожарной активности, но наносит скрытый ущерб сельскому хозяйству. Практическая значимость работы заключается в выявлении «окна безопасности» для регулируемых палов – конец апреля–первая пятидневка мая, когда риск перехода огня в лес минимален. Предложена система адаптивного управления огнем, включающая легализацию контролируемых палов, лицензирование, обучение населения и создание регионального центра пирологического мониторинга. Переход от тотального запрета к научно обоснованному регулированию позволит снизить пожарную опасность, сохранить экосистемы и поддержать устойчивое развитие сельских территорий.

Ключевые слова: весенние пожары, сельхозпалы, антропогенное воздействие, Центральная Якутия, пожароопасный сезон, экономические последствия, адаптивное управление огнем

Финансирование. Работа выполнена частично в рамках государственного задания Министерства образования и науки Республики Саха (Якутия) 3.8. «Организационное и научно-методическое сопровождение научно-исследовательских работ в рамках общественного заказа» на 2025 год по теме «Комплексное исследование последствий сельскохозяйственного пала и обжига сельскохозяйственных угодий лесной зоны Якутии» и Проекта № 2 «Разработка механизма повышения качества жизни населения Арктической и Субарктической зон Республики Саха (Якутия)» Программы комплексных научных исследований в Республике Саха (Якутия), направленных на развитие производительных сил и социальной сферы (КНИ-2), и Гранта РФ № 24-27-20045.

Для цитирования: Протопопова В.В., Протопопов А.В., Самсонова И.В. Весенние пожары в лесах Центральной Якутии: роль антропогенного воздействия и экономические последствия. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(3):452–464. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-452-464>

Spring forest fires in Central Yakutia: The role of anthropogenic factors and their economic consequences

Victoria V. Protopopova¹, Albert V. Protopopov², Irina V. Samsonova^{✉,2,3,4}

¹*Institute for Biological Problems of Cryolithozone,*

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

²*Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, Russian Federation*

³*Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation*

⁴*Arctic State Agrotechnological University, Yakutsk, Russian Federation*

✉ IrSam@list.ru

Abstract

Spring forest fires in Central Yakutia continue to pose significant ecological and socio-economic challenges. This study examines the impact of agricultural field burning as a primary anthropogenic contributor to spring forest fires in the region. Furthermore, it assesses the economic consequences of these fires and the effects of the 2015 ban on burning, enacted under Decree No. 1213 by the Government of the Russian Federation. The research methodology includes an analysis of 25 years of data (2000–2024) provided by the Yakut Aerial Forest Fire Centre (Avialesookhrana) for the central districts of Yakutia. This is supplemented by field expeditions conducted during 2023–2024, GIS analysis, phenological monitoring, and the application of established pyrological methods (Nesterev, Kurbatsky, Zalesov). The findings reveal that 80–98% of spring fires are anthropogenic in origin, with 60–70% attributable to uncontrolled agricultural burning. Despite the legislative ban, this practice persists as a traditional method for pasture preparation, promoting early grass regrowth and improving forage availability. The analysis shows that the prohibition has not reduced fire incidence but has produced unintended adverse effects on agricultural productivity. The practical contribution of this research lies in identifying a “safety window” for regulated burns—from late April to the first five days of May—during which the risk of fire spreading to forested areas is minimal. An adaptive fire management framework is proposed, including the legalization of controlled burns, the implementation of licensing procedures, public education initiatives, and the establishment of a regional pyrological monitoring center. Consequently, shifting from a total ban to a scientifically grounded regulatory approach is expected to reduce fire hazards, preserve ecosystems, and promote sustainable rural development.

Keywords: spring fires, agricultural fires, anthropogenic impact, Central Yakutia, fire season, economic consequences, adaptive fire management

Funding. This study was partially conducted within the framework of the state assignment from the Ministry of Education and Science of the Republic of Sakha (Yakutia) No. 3.8, titled “Organizational, scientific and methodological support of research activities” under the Public Order for 2025, focusing on “Comprehensive study of the consequences of agricultural burning on agricultural lands in the forest zone of Yakutia”. Specifically, Project No. 2, “Development of a mechanism to improve the quality of life for the population of the Arctic and Subarctic Zones of the Republic of Sakha (Yakutia)”, was conducted as part of the Program for Comprehensive Scientific Research (KNI-2) in the Republic of Sakha (Yakutia), aimed to advance productive forces and the social sphere, and was also supported by the Russian Science Foundation (grant No. 24-27-20045).

For citation: Protopopova V.V., Protopopov A.V., Samsonova I.V. Spring forest fires in Central Yakutia: The role of anthropogenic factors and their economic consequences. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(3):452–464. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-452-464>

Введение

В 2015 г. постановлением Правительства Российской Федерации № 1213 от 10 ноября были внесены изменения в Правила противопожарного режима, направленные на запрет выжигания сухой травянистой растительности на землях

сельскохозяйственного назначения. Это решение было принято в целях минимизации рисков возникновения и распространения пожаров, а также обеспечения пожарной безопасности. Изменения коснулись и Республики Саха (Якутия), где традиционно практикуются сельскохозяйствен-

ные палы, являющиеся частью аграрной культуры региона на протяжении многих веков.

Несмотря на установленный запрет, руководство Республики Саха (Якутия) неоднократно предпринимало попытки инициировать проведение регулируемых сельскохозяйственных палов на территории региона. Аргументация в пользу таких мероприятий основывалась на уникальных природно-климатических условиях республики, характеризующихся высокой степенью засушливости и коротким вегетационным периодом. Однако федеральные органы власти не поддержали эти инициативы, ссылаясь на потенциальные риски перехода огня с сельскохозяйственных угодий на лесные массивы, что может представлять угрозу для населенных пунктов и экологическую обстановку и здоровье населения.

Дискуссия вокруг сельскохозяйственных палов вызвала поляризацию общественного мнения. Противники данной практики указывают на ее негативные последствия, включая деградацию почв, снижение содержания органического вещества, уничтожение почвенной фауны и микробиоты, а также выбросы парниковых газов. Кроме того, они подчеркивают высокий риск распространения огня с сельскохозяйственных территорий на лесные массивы и потенциальную угрозу для населенных пунктов.

Сторонники сельскохозяйственных палов, в свою очередь, ссылаются на многовековую историю использования пирогенного фактора в формировании агроценозов и указывают на их практическую пользу: ускорение роста сочной травы, подавление сорняков и вредителей, а также повышение кормовой базы для сельскохозяйственных животных.

Целью настоящей работы является всесторонний анализ весенних лесных пожаров, произошедших в Центральной Якутии, с акцентом на выявление причин их возникновения и сезонную динамику. Особое внимание уделено оценке роли сельскохозяйственных палов как антропогенного фактора, оказывающего влияние на лесные экосистемы региона; анализ экономических последствий как пожаров, так и запрета на проведение сельскохозяйственных палов.

Материалы и методы

В рамках работы был осуществлен сбор и анализ данных о количестве и площади лесных пожаров за двадцатипятилетний период (2000–2024 гг.) в Хангаласском, Мегино-Кангаласском и Верхне-

вилуйском районах, предоставленных Якутской авиабазой «Авиалесохрана». В 2023–2024 гг. были проведены полевые экспедиционные исследования в указанных районах. Анализ горимости выполнен в соответствии с общепринятыми методиками, что обеспечивает возможность дальнейшего изучения пожарной опасности лесов в весенний период [1–3].

Согласно данным пирологического районирования, Хангаласский и Мегино-Кангаласский районы относятся к Центрально-Якутскому среднетаежному лесопожарному округу, в то время как Верхневилуйский район принадлежит к Средне-Вилуйскому среднетаежному лесопожарному округу.

В соответствии с классификацией пирологических районов Российской Федерации, Хангаласский и Мегино-Кангаласский районы расположены в Центрально-Якутской равнинной лесопожарной области и относятся к Центрально-Якутскому среднетаежному пирологическому округу [4].

Для анализа были использованы данные из открытых литературных источников, посвященных лесным пожарам в Якутии [5, 6], а также дополнительная пирологическая литература [7–10]. Хронологический период весенних пожаров в Центральной Якутии практически совпадает с фенологическими фазами динамики растительности, что позволяет четко разграничить весенние и летние пожары в зависимости от наступления фенологического лета, когда прекращение вегетации свежей травы и листьев способствует снижению риска лесных пожаров.

Причины возникновения пожаров устанавливаются на основании отчетов Якутской авиабазы «Авиалесохрана». Однако существует сложность в разграничении пожаров, происходящих в лесных и нелесных зонах, поскольку не всегда данная информация четко фиксируется в отчетах [11–13].

Результаты и обсуждения

Сбор и анализ данных о фактической горимости лесных массивов Центральной Якутии за последние 25 лет (с 2000 по 2024 г.) были выполнены для территорий Хангаласского, Мегино-Кангаласского и Верхневилуйского административных районов. Исследование динамики количества и площади лесных пожаров позволило выявить долгосрочные тенденции и закономерности, характеризующие пожарную активность

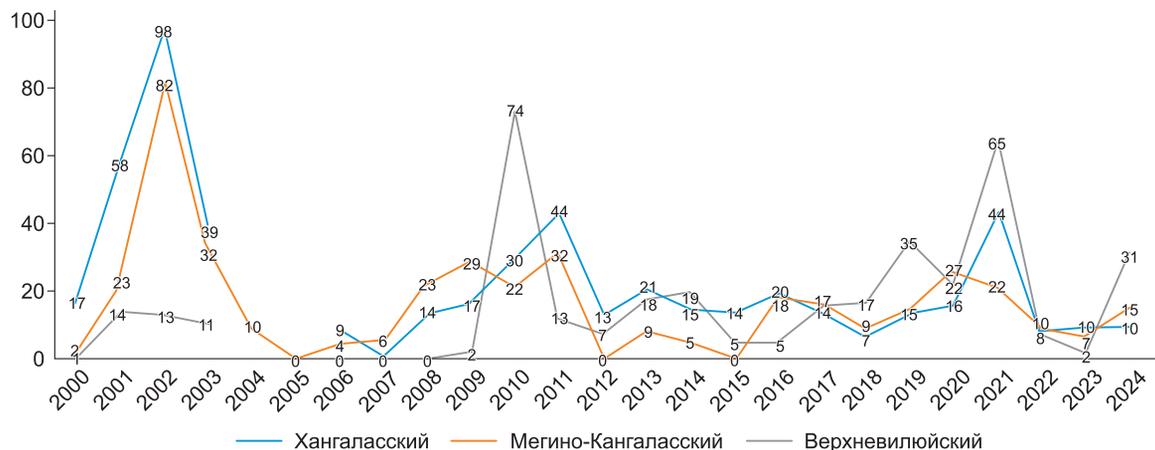


Рис. 1. Динамика частоты лесных пожаров в Хангаласском, Мегино-Кангаласском и Верхневилуйском районах за 2000–2024 гг.

Fig. 1. Dynamics of forest fire frequency in the Khangalassky, Megino-Kangalassky, and Verkhnevilyuysky districts from 2000 to 2024

в данном регионе. Эти данные представлены на рис. 1, который иллюстрирует многолетнюю динамику частоты лесных пожаров на указанных территориях.

Исследуемый регион расположен на Центрально-Якутской аккумулятивной низменной равнине, которая на юге переходит в невысокую пластовую равнину с высотами от 100 до 250 м. Климат характеризуется резко-континентальными и засушливыми условиями, с годовым уровнем осадков в пределах 190–220 мм. Лесистость территории составляет 72 %. Преобладающими лесными формациями являются среднетаежные леса, где лиственница Каяндера занимает около 90 % площади, сосна обыкновенная – 9,5 %, а ель сибирская и береза повислая встречаются в незначительных количествах (не более 1 %). Средний запас древесины составляет 113 м³/га. Наиболее распространенными типами лесов являются лиственничники сухих и среднеувлажненных местопроизрастаний, такие как разнотравно-брусничные, лимнасово-брусничные и брусничные, а также сосняки лишайниковые и толокнянковые, а также травяные березняки с элементами остепнения, известные как «чараны» [9, 14].

Центральная Якутия отличается высокой горимостью лесов по сравнению с другими регионами Республики Саха (Якутия). Это обусловлено аридностью климата и его резко-континентальными характеристиками. В лиственничной светлехвойной тайге пирогенный фактор играет важную роль в формировании и развитии экосистем [7].

Обнаружение лесных пожаров осуществляется с использованием авиационного мониторинга и космических технологий. Тушение пожаров проводится с применением как авиационных средств, так и наземных служб.

Среди типов лесных пожаров доминируют низовые пожары, составляющие около 80 % от общего числа зарегистрированных случаев. При беглых низовых пожарах огонь распространяется по поверхности, уничтожая прошлогоднюю растительность, хвою, мелкий валежник и верхний слой мха или лишайника, не затрагивая глубоко подстилку. Устойчивые низовые пожары характеризуются активным тлением органического слоя. Верховые пожары составляют 7–8 % от общего числа пожаров в обычные годы, однако их доля значительно возросла до почти 50 % в 2021 г. в условиях чрезвычайной пожарной обстановки. В этом же году были зафиксированы редкие для Якутии торфяные пожары, что свидетельствует о высокой интенсивности и глубине горения.

Крупные лесные пожары, площадь которых превышает 200 га, составляют 40 % от общего числа возгораний, но при этом на их долю приходится 89 % всей сгоревшей площади. Это подчеркивает важность раннего обнаружения и оперативного реагирования на крупные пожары. Пожароопасный сезон в данном регионе условно делится на весенний (май) и летний (июнь–сентябрь) периоды. В засушливые годы может наблюдаться также осенний пожарный сезон.

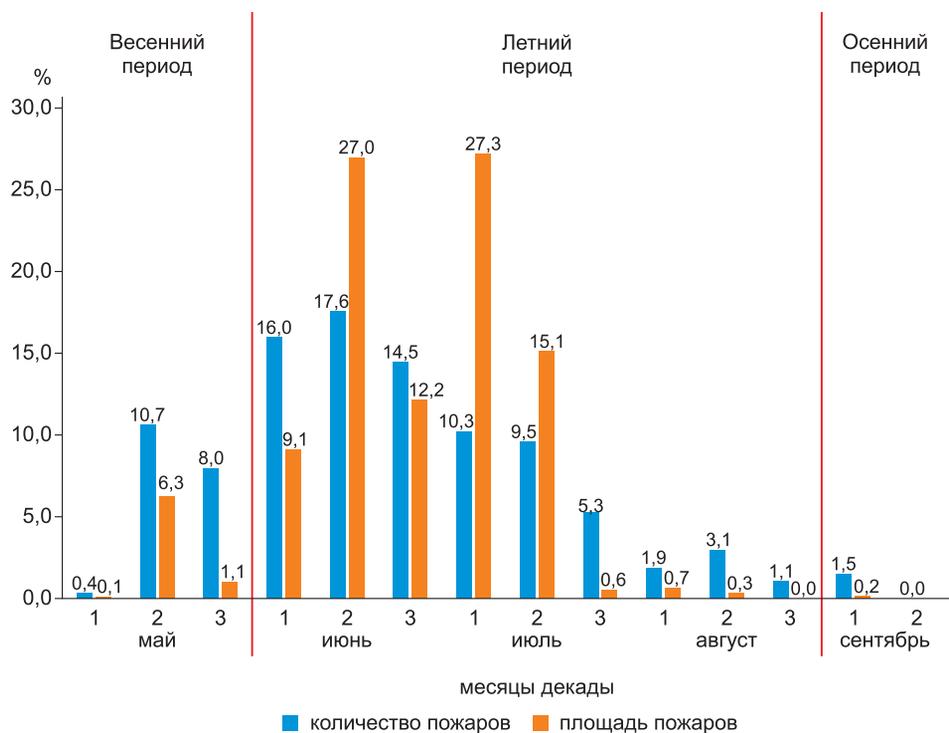


Рис. 2. Сезонное распределение лесных пожаров в Хангаласском районе

Fig. 2. Seasonal distribution of forest fires in the Khangalassky district, in %

Анализ многолетних данных показывает, что в Хангаласском районе в среднем регистрируется 22 лесных пожара в год, при средней площади одного пожара 4303 га. В Мегино-Кангаласском районе фиксируется в среднем 15 пожаров в год с средней площадью 1237 га. Возникновение пожаров носит циклический характер: периоды низкой горимости наблюдались в 2005, 2007 и 2018 г., что связано с увеличением осадков. Напротив, пики активности пожаров приходились на 2002, 2011 и 2021 г., когда засушливые условия способствовали распространению пожаров на значительные территории по всей Якутии. В эти годы крупные пожары составляли около 70 % от общей площади сгоревшего леса.

Верхневилуйский район, расположенный западнее и севернее Хангаласского и Мегино-Кангаласского, характеризуется более низкой пожарной активностью. В отдельные годы (2005–2008) пожары в этом районе не фиксировались, что связано с более низкими температурами весной и более влажными условиями, замедляющими начало пожароопасного сезона.

Распределение горимости лесов в течение пожароопасного сезона неравномерно, поэтому сезон условно делится на отдельные периоды (рис. 2).

На примере Хангаласского района можно выделить два основных периода: весенний (май), который охватывает время с начала месяца, с пиком возгораний в середине мая и снижением активности к началу июня, и летний, характеризующийся более продолжительной и высокой горимостью, который длится до первой пятнадцатки сентября.

Для выявления одной из ключевых причин весенних пожаров, а именно сельскохозяйственных палов, был проведен анализ суточных данных о пожарах в Хангаласском, Мегино-Кангаласском и Верхневилуйском районах за пятидневные периоды мая в среднем за 25 лет (см. таблицу).

В начале мая, с момента схода снежного покрова, обычно после достижения среднесуточной температуры 0 °С, возникают первые природные пожары. В Якутске этот переход происходит 1 мая, в Покровске – 2 мая. Однако в 2016 г. наблюдалась аномально теплая погода в конце апреля с температурой до +17 °С при полном отсутствием осадков. В результате уже 1 мая в Хангаласском районе был зарегистрирован один пожар, в Мегино-Кангаласском – четыре. Этот случай является исключительным за период наблюдений.

Распределение числа возгораний по пятидневкам мая за 25 лет (2000–2024 гг.)**Distribution of the number of fires over five days in May across 25 years (2000–2024)**

| Район | 1–5 мая | 6–10 мая | 11–15 мая | 16–20 мая | 21–25 мая | 26–31 мая |
|---------------------|---------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Хангаласский | 7 | 19 | 34 | 42 | 14 | 14 |
| Мегино-Кангаласский | 6 | 8 | 22 | 27 | 10 | 12 |
| Верхневиллоийский | 0 | 1 | 9 | 7 | 5 | 7 |

Весенний период пожароопасного сезона в Якутии является относительно коротким и совпадает с фенологической весной. В начале мая завершается таяние снежного покрова. Под воздействием возрастающей солнечной радиации происходит интенсивное испарение талых вод, которые с трудом проникают в мерзлую почву. Открытые участки, в основном не покрытые лесом, быстро высыхают, что увеличивает пожарную опасность. При наличии источников огня возникают возгорания. Основными проводниками горения в этот период являются сухие прошлогодние травы, известные как «травяная ветошь». Преобладающий тип весенних пожаров – беглые низовые пожары, которые оказывают минимальное воздействие на спелый древостой.

Рост положительных температур происходит в сжатые сроки. Vegetация растений начинается после перехода среднесуточной температуры через +5 °C и протекает чрезвычайно интенсивно. К началу июня в Центральной Якутии появляется сочная растительность, которая препятствует распространению огня. Это «затишье» знаменует окончание весеннего периода пожароопасного сезона.

Для анализа весенних пожаров был определен временной интервал с 1 по 31 мая, который был разбит на пятидневные периоды (см. таблицу). В первой пятидневке количество пожаров было незначительным: 7 в Хангаласском и 6 в Мегино-Кангаласском районах за 25 лет. Затем происходило увеличение числа возгораний, достигая пика в третьей и четвертой пятидневках (11–20 мая), после чего наблюдалось снижение с 21 мая. В Верхневиллоийском районе фенологическая весна наступает позднее, что отражается на меньшем количестве весенних пожаров: в первой пятидневке не зарегистрировано ни одного возгорания, во второй – один пожар (8 мая 2011 г.), а с третьей пятидневки (11–15 мая) начались возгорания – 9, 7, 5 и 7 случаев за исследуемый период.

Весенние лесные пожары, происходящие в мае, составляют 24 % от общего количества

пожаров в пожароопасный сезон в Хангаласском районе. В среднем за май фиксируется 5 пожаров, а в летний период – 17. Средние площади, охваченные весенними пожарами, составляют 928,3 га, что составляет 25 % от общей площади, уничтоженной огнем за сезон. Летние пожары охватывают в среднем 2842,1 га, что составляет 75 % от общей площади сгоревшего лесного фонда. На рис. 3 представлено соотношение весенних и летних пожаров в Хангаласском районе за период с 2000 по 2024 г.

В Мегино-Кангаласском районе динамика возгораний отличается от показателей Хангаласского района (рис. 4). Весенние пожары составляют 21 % от общего числа зарегистрированных случаев, что соответствует примерно четырем возгораниям в мае и четырнадцати в летний период. Площадь весенних пожаров в среднем 561,9 га, что составляет 31 % от общей площади всех пожаров, тогда как летние пожары охватывают в среднем 1237,9 га, составляя 69 % от общего объема.

Таким образом, несмотря на меньшее количество возгораний в мае в Мегино-Кангаласском районе по сравнению с Хангаласским, площадь территорий, подвергшихся пожарам, в первом случае оказывается выше. Вероятно, это различие связано с более высокой плотностью населения и лучшей доступностью территории для наземных методов тушения в Хангаласском районе [15].

В Верхневиллоийском районе наблюдается следующая статистика лесных пожаров: весной в среднем регистрируется один лесной пожар с площадью возгорания 79,25 га, в летний период фиксируется пятнадцать пожаров со средней площадью 62022,13 га. Таким образом, доля весенних пожаров составляет 8 %, а летних – 92 %.

Низкая горимость в мае в данном районе обусловлена относительно низкими средними температурами весеннего периода и более влажными климатическими условиями.

На рис. 5 представлено соотношение весенних и летних пожаров в Верхневиллоийском районе.

В отличие от лесных пожаров летнего периода, которые в Центральной Якутии преимущест-

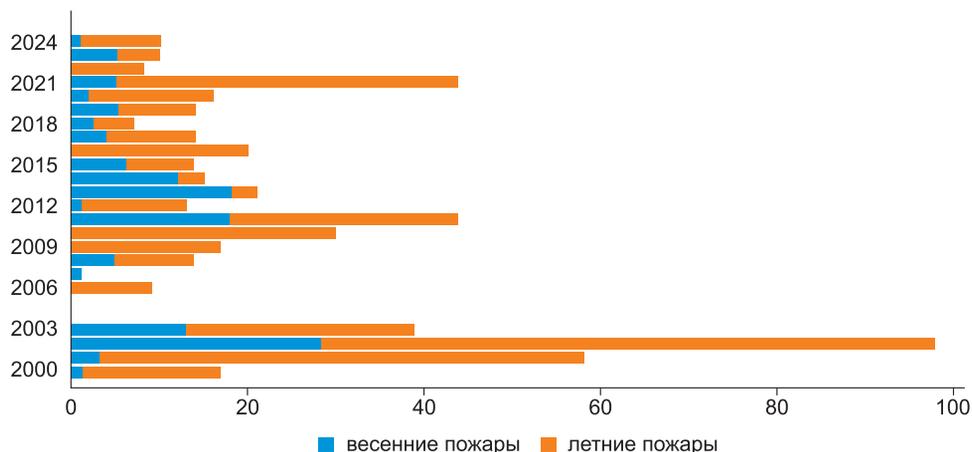


Рис. 3. Соотношение весенних (май) и летних лесных пожаров в Хангаласском районе за период с 2000 по 2024 г.

Fig. 3. The ratio of spring (May) to summer forest fires in the Khangalassky region for the period from 2000 to 2024

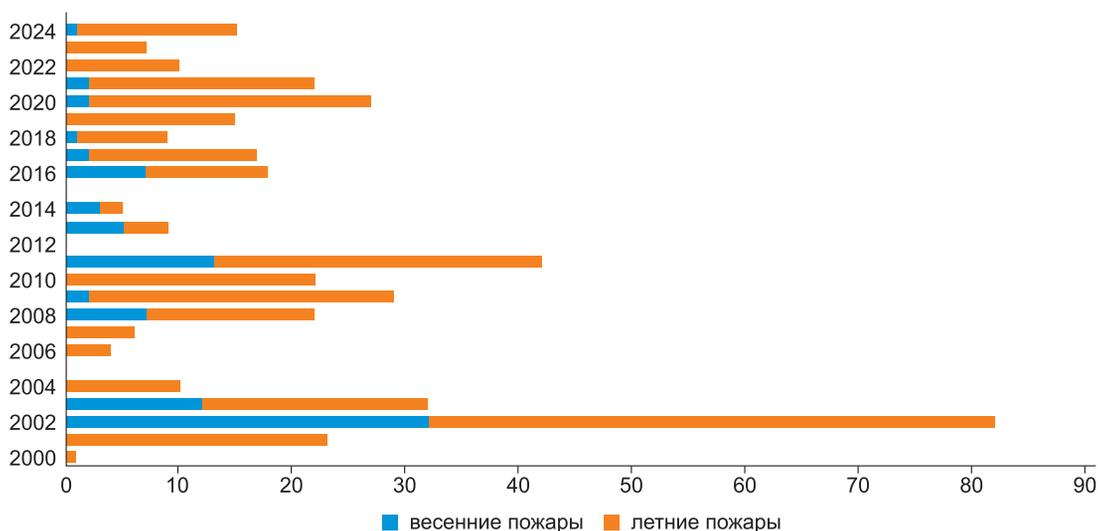


Рис. 4. Соотношение весенних (май) и летних лесных пожаров в Мегино-Кангаласском районе за период с 2000 по 2024 г.

Fig. 4. The ratio of spring (May) to summer forest fires in the Megino-Khangalassky district from 2000 to 2024

венно вызваны природными факторами, такими как сухие грозы [16], весенние пожары имеют преимущественно антропогенное происхождение. Анализ данных Якутской базы «Авиалесоохраны» за 25-летний период (2000–2024 гг.) демонстрирует, что в 80–98 % случаев весенние возгорания связаны с деятельностью человека. Это позволяет рассматривать весенние пожары как потенциально управляемое явление, в отличие от летних пожаров, где доминирующую роль играют погодные условия и грозовая активность.

Основными антропогенными факторами, способствующими возникновению весенних лесных пожаров, являются:

1. Несанкционированные выжигания сухой растительности на сельскохозяйственных угодьях (сельхозпалы). Несмотря на запрет, установленный постановлением Правительства Российской Федерации № 1213 от 2015 года, практика проведения сельхозпалов сохраняется в сельских районах, где они традиционно рассматриваются как метод подготовки пастбищ к весеннему периоду. Сельские жители утверждают, что палы способствуют более раннему и активному отрастанию сочной травы, улучшают кормовую базу для скота и подавляют сорняки. Однако при неблагоприятных погодных условиях, особенно при сильном ветре или высокой среднесуточной

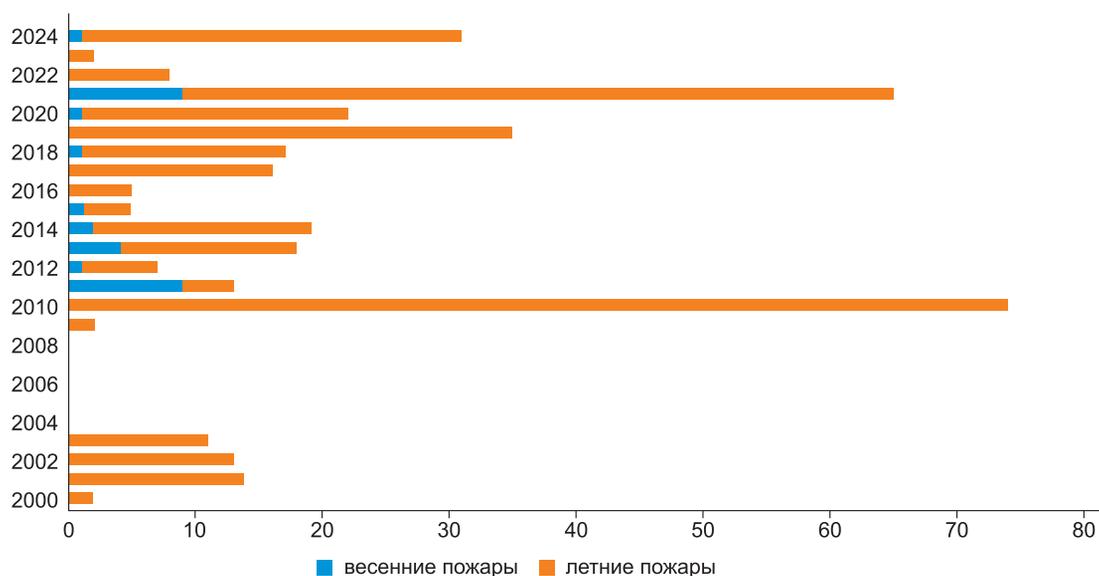


Рис. 5. Соотношение весенних и летних лесных пожаров в Верхневилуйском районе за период с 2000 по 2024 г.

Fig. 5. The ratio of spring to summer forest fires in the Verkhnevilyuysky district from 2000 to 2024

температуре, огонь быстро выходит за пределы сельхозугодий и переходит в леса. По оценкам специалистов, сельхозпалы являются причиной 60–70 % весенних лесных пожаров в Хангаласком и Мегино-Кангаласском районах Центральной Якутии. В Верхневилуйском районе, где плотность населения ниже, доля сельхозпалов также значительна, однако из-за более позднего наступления фенологической весны и более влажных условий их последствия менее масштабны.

2. *Непотушенные костры.* Весенний период совпадает с началом охотничьего сезона, а также активизацией туристических и рыболовных маршрутов. Охотники, рыбаки и туристы часто оставляют непотушенные костры, которые при сухой погоде и ветре могут перерасти в лесные пожары. Особую опасность представляют костры, разведенные на сухой подстилке, среди валежника или вблизи сухих кустарников. В некоторых случаях, особенно в труднодоступных лесных участках, костры могут тлеть в течение нескольких часов, а затем активизироваться при изменении погодных условий.

3. *Искры от техники и транспорта.* В районах с высокой транспортной нагрузкой значительную роль играют искры, возникающие от работающей сельскохозяйственной, дорожной и лесозаготовительной техники. Искры от глушителей, трущихся деталей или электропроводки могут воспламенить сухую траву или опад. Особенно опасны такие ситуации в засушливые

годы, когда даже небольшое возгорание может быстро перерасти в крупный пожар. Вблизи автодорог и железнодорожных путей наблюдается повышенная частота пожаров, что подтверждает связь с техногенными источниками огня.

4. *Умышленные поджоги.* В ряде случаев весенние пожары носят умышленный характер. Причины могут быть разными: недобросовестные действия лиц, желающих скрыть следы незаконных рубок, охоты или других нарушений; вандализм; или попытки привлечь внимание к проблемам в сельской местности. Хотя доля таких поджогов относительно невелика, они могут иметь катастрофические последствия, особенно если возгорание происходит в период высокой пожарной опасности.

Уровень антропогенной нагрузки и частота весенних пожаров в значительной степени зависят от плотности населения и транспортной доступности региона.

Хангалаский район находится в непосредственной близости к столице Республики Саха (Якутия) – г. Якутск, где плотность населения составляет 1,4 чел./км². Через район проходит автодорога регионального значения «Умнас», а также одна из крупнейших рек – Лена, что способствует высокой активности людей на природе. Близость крупного населенного пункта увеличивает количество выездов на природу, что напрямую коррелирует с ростом числа антропогенных пожаров.

Мегино-Кангаласский район является одним из наиболее населенных сельскохозяйственных районов республики, с плотностью населения 2,82 чел/км². Через территорию Мегино-Кангаласского района проходят федеральные автомобильные трассы «Лена» (Р-297) и «Колыма» (Р-504), региональная дорога «Амга», а также осуществляется судоходство по р. Лена. В районе ведется строительство автомобильного моста через Лену вблизи пос. Нижний Бестях, что способствует увеличению транспортной и антропогенной нагрузки. Все эти факторы создают благоприятные условия для возникновения пожаров от искр, непотушенных костров и сельхозпалов.

Верхневилуйский район, в отличие от двух предыдущих, характеризуется более низкой плотностью населения и меньшей транспортной доступностью. Однако и здесь 98 % весенних пожаров вызваны антропогенными причинами, в основном сельхозпалами и непотушенными кострами в период весенней охоты. Это свидетельствует о том, что даже при низкой плотности населения человеческий фактор остается доминирующим в весенний пожароопасный сезон.

Анализ сезонной динамики лесных пожаров в Центральной Якутии позволяет определить наиболее безопасное временное окно для проведения регулируемых сельскохозяйственных палов [11, 13]. Этот период охватывает конец апреля – первую пятидневку мая. Этот интервал представляет собой узкое, но стратегически важное «окно возможностей», когда гидротермические условия на открытых пространствах и в лесных массивах существенно различаются, что позволяет минимизировать риск перехода огня из нелесных в лесные земли.

В указанный период на открытых ландшафтах – сельскохозяйственных угодьях (пастбищах, сенокосах), как правило, уже завершается сход снежного покрова. Под действием интенсивной солнечной радиации и повышающихся температур происходит быстрое испарение талых вод, что приводит к высыханию прошлогодней травянистой растительности – так называемой травяной ветоши. Именно она становится основным горючим материалом весеннего периода. При этом в лесных массивах, особенно в более влажных и затененных участках, снежный покров еще сохраняется, почва остается мерзлой, а лесная подстилка – влажной. Это создает естественный барьер, препятствующий распространению огня в глубь леса [2, 3].

Таким образом, проведение контролируемых сельхозпалов в этот период позволяет эффективно использовать пирогенный фактор для омоложения травостоев, уничтожения сорняков и вредителей, а также стимулирования раннего отрастания сочной зеленой массы, при этом риск возникновения крупных лесных пожаров остается минимальным. Именно в этот короткий фенологический интервал возможно сочетание антропогенного воздействия с естественной пожарной безопасностью лесных экосистем.

Критической точкой, с которой начинается резкое возрастание пожарной опасности в лесах, является весенний переход среднесуточной температуры воздуха через 0 °С. В Центральной Якутии, в частности в районе г. Якутск, эта дата приходится на 1 мая. С этого момента начинается активное таяние снега и в лесах, влажность подстилки снижается, а горючие материалы постепенно становятся готовыми к возгоранию. Уже к середине мая, особенно при аномально теплой и сухой погоде, как это наблюдалось в 2016 г. (температура достигала +17 °С в конце апреля), пожарная опасность резко возрастает, и даже небольшое возгорание может перерасти в крупный лесной пожар.

Следовательно, для точного определения сроков проведения сельхозпалов необходимо опираться не на календарные даты, а на ежедневные метеорологические данные и фенологический мониторинг, включая наблюдения за сходом снега, состоянием растительности и температурным режимом. Как показывает практика, в отдельные годы возможны сдвиги на 1–2 недели, что требует гибкого и научно обоснованного подхода к регулированию этой деятельности.

Таким образом, научно обоснованный подход к сельхозпалам должен включать:

- строгое ограничение сроков проведения – конец апреля–первая пятидневка мая;
- обязательный учет метеорологических условий (температура, влажность, ветер);
- проведение палов только на сельхозугодьях, удаленных от лесных массивов или отделенных естественными противопожарными барьерами;
- контроль со стороны органов управления лесного и сельского хозяйства.

Только такой подход позволит снизить пожарную опасность, сохранить лесные ресурсы и одновременно поддержать традиционные формы ведения сельского хозяйства в условиях резко-континентального климата Центральной Якутии.

Анализ весенних лесных пожаров в Центральной Якутии невозможен без всестороннего рассмотрения их экономических последствий. Пожары оказывают многоуровневое воздействие на экономику региона, затрагивая лесное хозяйство, сельское хозяйство, инфраструктуру, здравоохранение и экосистемные услуги. В то же время запрет на сельхозпалы, введенный в 2015 г., не только не привел к ожидаемому снижению пожарной активности, но и, по косвенным признакам, наносит ущерб сельскохозяйственным производителям, что требует переоценки существующей политики с точки зрения экономической эффективности и устойчивости.

Несмотря на запрет, традиционные сельхозпалы сохраняют популярность среди сельских жителей, что свидетельствует об их практической и экономической целесообразности.

Проведенные в благоприятные сроки (конец апреля–первая пятидневка мая) беглые низовые палы способствуют более раннему (на 7–10 дней) отрастанию сочной зеленой массы. Это критически важно в условиях короткого вегетационного периода, так как позволяет сельхозтоваропроизводителям раньше выводить скот на пастбища и сокращать расходы на зимние корма.

По данным агрономических наблюдений, после палов продуктивность травостоя повышается на 20–30 % за счет уничтожения прошлогодней ветоши, активации семян и подавления сорных растений. Это напрямую влияет на прирост живой массы скота и доходы сельских хозяйств. В условиях, когда сельское хозяйство Якутии находится в стадии развития, такие приросты имеют стратегическое значение.

Контролируемые сельхозпалы могут выполнять функцию предварительного обезлесения горючих материалов на сельхозугодьях. Уменьшая объем сухой растительности, они снижают риск перехода случайных возгораний (от костров, искр и т. д.) в леса. Таким образом, регулируемые палы могут рассматриваться как элемент профилактического пожарного менеджмента, аналогично практикам, применяемым в Канаде, Австралии и США [1].

Запрет на сельхозпалы, введенный в 2015 г., не привел к снижению числа весенних пожаров, но, вероятно, наносит скрытый экономический ущерб сельским хозяйствам, особенно в условиях короткого вегетационного периода и высокой зависимости от пастбищного скотоводства. В то же время прямые и косвенные убытки от по-

жаров достигают миллиардов рублей ежегодно. Это указывает на необходимость перехода от тотального запрета к научно обоснованной системе регулируемых палов, которая позволит снизить пожарную опасность, сохранить экосистемы и поддержать устойчивое развитие сельских территорий.

Заключение

Проведенный анализ данных Якутской базы «Авиалесохраны» за 25-летний период (2000–2024 гг.) по Хангаласскому, Мегино-Кангаласскому и Верхневилуйскому районам подтверждает, что весенние лесные пожары в Центральной Якутии в подавляющем большинстве случаев (80–98 %) носят антропогенный характер. В отличие от летних пожаров, инициируемых сухими грозями, весенние возгорания напрямую связаны с деятельностью человека. Среди антропогенных факторов доминирующую роль играют несанкционированные или вышедшие из-под контроля сельхозпалы, которые, будучи направленными на улучшение кормовой базы, при неблагоприятных погодных условиях легко переходят в леса и приводят к крупным возгораниям.

Особую значимость приобретает тот факт, что федеральный запрет на сельхозпалы, введенный в 2015 году постановлением Правительства РФ № 1213, не привел к заметному снижению числа весенних пожаров. Анализ показывает, что пики пожарной активности в 2002, 2011 и 2021 г. не коррелируют с введением запрета, что свидетельствует о его низкой эффективности и отрыве от реалий традиционного природопользования в условиях резко-континентального климата и короткого вегетационного периода. Запрет не устранил причину, а лишь перевел практику палов в неформальную плоскость, лишив ее контроля, регулирования и безопасности.

Ключевой вывод заключается в том, что жесткая запретительная политика не работает в условиях, где пирогенный фактор исторически является частью экосистемных процессов и социально значимой практикой. Вместо тотального запрета необходим переход к адаптивному, научно обоснованному управлению огнем, основанному на фенологических, метеорологических и пирологических данных [17–19].

На основании проведенного исследования предлагается комплекс мер, направленных на снижение пожарной опасности и рационализацию взаимодействия общества с природной средой:

Легализация регулируемых сельхозпалов. Ввести разрешенные и контролируемые сельхозпалы на сельскохозяйственных угодьях в строго определенное безопасное окно – конец апреля–первая пятидневка мая, когда снег уже сошел с открытых пространств, но в лесах сохраняются снежный покров и высокая влажность. Этот период минимизирует риск перехода огня в лес.

Создание системы лицензирования и обучения. Разработать и внедрить систему обучения и сертификации сельчан по технике безопасного проведения палов. Ввести обязательное лицензирование для проведения палов с участием представителей органов лесного и сельского хозяйства.

Разработка регионального центра мониторинга пожарной опасности. Создать региональный центр пиронологического мониторинга, использующий данные спутникового наблюдения (например, MODIS, VIIRS), метеорологических станций и фенологических наблюдений. Это позволит оперативно определять благоприятные сроки для палов и своевременно объявлять запрет в периоды повышенной опасности.

Проведение экономического моделирования. Выполнить стоимостную оценку выгод и рисков от легализации контролируемых палов, включая анализ ущерба от пожаров, экономических потерь сельского хозяйства и затрат на тушение. Такие расчеты станут основой для обоснования новой политики на федеральном уровне.

Межведомственное взаимодействие и общественное участие. Обеспечить тесное взаимодействие между Министерством экологии, природопользования и лесного хозяйства, Министерством сельского хозяйства и продовольственной политики, Главным управлением МЧС Республики Саха (Якутия) и местными администрациями. Вовлечь сельхозтоваропроизводителей, представителей сельских обществ в процесс принятия решений, учитывая их традиционные знания и опыт.

Переход от тотального запрета к адаптивно-научно обоснованному управлению огнем позволит:

– снизить пожарную опасность за счет профилактического выжигания потенциально горючих материалов в виде травяной и кустарниковой ветоши;

– поддержать устойчивое развитие сельских территорий, обеспечивая животноводов качественной кормовой базой;

– минимизировать экономические и социальные издержки.

Только комплексный подход, учитывающий экологические закономерности, экономические реалии и культурные традиции местного населения, может стать основой эффективной и устойчивой политики в области пожарной безопасности в Якутии. Такой подход не только снизит риски, но и превратит традиционную практику в инструмент устойчивого природопользования.

Список литературы / References

1. Залесов С.В. *Лесная пиронология*. Екатеринбург; 2021. 397 с.
Zalesov S.V. *Forest pyrology*. Yekaterinburg; 2021. 397 p. (In Russ.)
2. Курбатский Н.П., Конев Э.В. *Вопросы лесной пирологии: сборник статей*. Красноярск: Институт леса и древесины СО РАН; 1972. 240 с.
Kurbatsky N.P., Konev E.V. *Issues in forest pyrology: collection of articles*. Krasnoyarsk: Institute of Forest SB RAS; 1972. 240 p. (In Russ.)
3. Нестерев В.Г. *Горимость леса и методы ее определения*. М.; Л.: Гослесбумиздат; 1949. 76 с.
Nesterev V.G. *Forest flammability and methods for its assessment*. Moscow; Leningrad: Goslesbumizdat; 1949. 76 p. (In Russ.)
4. Протопопова В.В., Габышева Л.П. Лесопожарное районирование лесного фонда Республики Саха (Якутия). *Успехи современного естествознания*. 2016;(8):120–125.
Protopopova V.V., Gabysheva L.P. Forest fire zoning of forest fund of the Republic of Sakha (Yakutia). *Advances in Current Natural Sciences*. 2016;(8):120–125. (In Russ.)
5. Годовой отчет о деятельности в 2023 году. ФБУ «Авиалесоохрана». Режим доступа: <https://aviales.ru> (дата обращения: 15 мая 2025).
Annual activities report in 2023 by the Aerial Forest Fire Centre (Avialesookhrana). Available at: <https://aviales.ru> (accessed 15.05.2025). (In Russ.)
6. Информационно-аналитический отчет о лесных пожарах в Российской Федерации в 2021 году. Рослесхоз. М.; 2021. 87 с.
Analytical report on forest fires in the Russian Federation in 2021 by the Federal Forestry Agency (Rosleshoz). Moscow; 2021. 87 p.
7. Протопопова В.В., Габышева Л.П. Пиронологическая характеристика растительности в лесах Центральной Якутии и ее динамика в постпожарный период. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2018;23(3):81–88. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2018-25-3-80-86>
8. Софронова Т.М. Фактическая горимость лесов Южного Прибайкалья и её динамика. В кн.: *Структурно-функциональная организация и динамика лесов: Материалы Всероссийской конференции, посвященной 60-летию Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН и 70-летию обра-*

зования Красноярского края, г. Красноярск, 01–03 сентября 2004 года. Красноярск; 2004. С. 359–361.

Sofronova T.M. The actual flammability of forests in the Southern Baikal region and its dynamics. In: *Structural and functional organization and dynamics of forests: Proceedings of the All-Russian conference dedicated to the 60th anniversary of the V.N. Sukachev Institute of Forestry SB RAS and the 70th anniversary of the formation of Krasnoyarsk Krai*, Krasnoyarsk, September 1–3, 2004. Krasnoyarsk; 2004, pp. 359–361. (In Russ.)

9. Тимофеев П.А. *Леса Якутии: состав, ресурсы, использование и охрана*. Новосибирск: Изд-во СО РАН; 2003. 194 с.

Timofeev P.A. *Forests of Yakutia: composition, resources, use and protection*. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2003. 194 p. (In Russ.)

10. Щербаков И.П., Забелин О.Ф., Карпель Б.А. и др. *Лесные пожары в Якутии и их влияние на природу леса*. Новосибирск: Наука; 1979. 224 с.

Shcherbakov I.P., Zabelin O.F., Karpel B.A., et al. *Forest fires in Yakutia and their impact on the forest ecosystem*. Novosibirsk: Nauka; 1979. 224 p. (In Russ.)

11. Отчет о ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций природного характера в 2021 году. Министерство по чрезвычайным ситуациям Республики Саха (Якутия). Якутск: 2021. 87 с.

Report on the elimination of the consequences of natural disasters in 2021 by the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Sakha (Yakutia). Yakutsk: 2021. 87 p. (In Russ.)

12. Отчет о состоянии лесов и деятельности в сфере лесопользования в 2022 году. Министерство лесного хозяйства Республики Саха (Якутия). Якутск; 2022. 148 с. (In Russ.)

Report on the forest status and forestry management in 2022 by the Ministry of Forestry of the Republic of Sakha (Yakutia). Yakutsk; 2022. 148 p.

13. Правительство Республики Саха (Якутия). Постановление № 1159 «Об утверждении актов оценки ущерба, причиненного имуществу в результате природных пожаров в 2021 году». 2021. Режим доступа: <https://sakha.gov.ru> (дата обращения: 15.05.2025)

Government of the Republic of Sakha (Yakutia). Resolution No. 1159 “On the approval of damage assessment reports for property affected by wildfires in 2021”. Available at: <https://sakha.gov.ru> (accessed 15.05.2025). (In Russ.)

14. Уткин А.И. *Леса Центральной Якутии*. М.: Наука; 1965. 207 с.

Utkin A.I. *Forests of Central Yakutia*. Moscow: Nauka; 1965. 207 p. (In Russ.)

15. Андреев Ю.А. Влияние антропогенных факторов на уровень пожарной опасности в Лесу. Лесохозяйственная информация. 1990;1:22–27.

Andreev Yu.A. The influence of anthropogenic factors on fire danger levels in forests. *Forestry information*. 1990;1:22–27. (In Russ.)

16. Соловьев В.С., Козлов В.И., Муллаяров В.А. *Дистанционный мониторинг лесных пожаров и гроз в Якутии*. Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН; 2009. 108 с.

Soloviev V.S., Kozlov V.I., Mullayarov V.A. Remote monitoring of forest fires and thunderstorms in Yakutia. Yakutsk: Publishing House of the YaSC SB RAS; 108 p. (In Russ.)

17. Аксенов С.Г., Морозова Д.П. Совершенствование мероприятий по профилактике и борьбе с лесными пожарами. *Столыпинский вестник* 2023;5(1): 243–252.

Aksenov S.G., Morozova D.P. Improving measures to prevent and fight against forest fires in Russia. *Stolypin's Bulletin*. 2023;5(1):243–252.

18. Габышев Е.А. Выбросы парниковых газов при лесных пожарах в Якутии. *Экология и жизнь*. 2021;(3):56–61.

Gabyshv E.A. Greenhouse gas emissions resulting from forest fires in Yakutia. *Ecology and Life*. 2021;(3):56–61. (In Russ.)

19. Смольников К.А., Черняк Р.С., Ноговицын Р.П. Анализ экономических последствий лесных пожаров в Республике Саха (Якутия). *Экономика и природопользование на Севере*. 2023;1(23):32–43. <https://doi.org/10.25587/SVFU.2023.11.10.004>.

Smolnikov K.A., Chernyak R.S., Nogovitsyn P.P. Analysis of economic consequences of forest fires in the Republic of Sakha (Yakutia). *Economy and Nature Management in the North*. 2023;1(23);32–43. (In Russ.) <https://doi.org/10.25587/SVFU.2023.11.10.004>.

Об авторах

ПРОТОПОПОВА Виктория Валерьевна, инженер-исследователь, <https://orcid.org/0000-0001-8612-5960>, SPIN: 3078-7963, e-mail: protopopova.vic@yandex.ru

ПРОТОПОПОВ Альберт Васильевич, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-6543-4596>, ResearcherID: AAV-1909-2021, SPIN: 7311-5540, e-mail: a.protopopov@mail.ru

САМСОНОВА Ирина Валентиновна, доктор экономических наук, доцент, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-9546-286X>, SPIN: 3214-9484, e-mail: IrSam@list.ru

Вклад авторов

Протопопова В.В. – разработка концепции, методология, проведение исследования, проведение статистического анализа, создание черновика рукописи, визуализация; **Протопопов А.В.** – разработка концепции, методология, проведение исследования, проведение статистического анализа, администрирование данных, руководство исследованием, редактирование рукописи; **Самсонова И.В.** – верификация данных, администрирование данных, проведение статистического анализа, разработка концепции, создание и редактирование рукописи, методология, руководство исследованием, администрирование проекта

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

PROTOPKOVA, Victoria Valerievna, Research Engineer, <https://orcid.org/0000-0001-8612-5960>, SPIN: 3078-7963, e-mail: protopopova.vic@yandex.ru

ПРОТОПОПОВ, Albert Vasilievich, Dr. Sci. (Biol.), Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-6543-4596> ResearcherID AAV-1909-2021, SPIN: 7311-5540, e-mail: protopopova.vic@yandex.ru

SAMSONOVA, Irina Valentinovna, Dr. Sci. (Econ.), Associate Professor, Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-9546-286X>, SPIN: 3214-9484, e-mail: IrSam@list.ru

Authors' contribution

Protopopova V.V. – conceptualization, methodology, investigation, formal analysis, writing – original draft, visualization;
Protopopov A.V. – conceptualization, methodology, investigation, formal analysis, data curation, supervision, writing – review & editing;
Samsonova I.V. – validation, data curation, formal analysis, conceptualization, writing – original draft, writing – review & editing, methodology, supervision, project administration

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 14.08.2025

Поступила после рецензирования / Revised 08.09.2025

Принята к публикации / Accepted 11.09.2025

Биологические ресурсы

УДК 639.1.053:639.1.021:574.34(571.56)
<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-465-479>



Оригинальная статья

Современное состояние ресурсов пушных зверей в Якутии

В. В. Степанова

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация
valstep@yandex.ru

Аннотация

Общая площадь охотничьих угодий Якутии составляет 241 млн га и предоставляет огромный потенциал для охотничьего промысла, который является неотъемлемой частью культуры и экономики Якутии. Основные виды пушных млекопитающих Якутии: соболь (*Martes zibellina*), лисица (*Vulpes vulpes*), бурый медведь (*Ursus arctos*), волк (*Canis lupus*), ондатра (*Ondatra zibethicus*), белка (*Sciurus vulgaris*), заяц-беляк (*Lepus timidus*), горностай (*Mustela erminea*), колонок (*Mustela sibiricus*), песец (*Vulpes lagopus*), россомаха (*Gulo gulo*), рысь (*Lynx lynx*) и американская норка (*Neogale vison*). В работе использованы статистические данные зимнего маршрутного учета (ЗМУ) численности животных, анкетно-опросные сведения охотпользователей и госинспекторов и сведения об объемах добычи охотничье-промысловых видов животных. Среди пушно-промысловых животных Якутии лидирующую позицию занимает соболь. Стабильный уровень заготовок соболя при одновременном росте его численности свидетельствует об эффективных мерах по охране этого ценного вида. Ондатра, занимающая второе место по объему заготовок, демонстрирует крайне низкую долю изъятия (1–2 %). Белка, несмотря на рост численности за последнее десятилетие в 62 %, остается экономически невыгодным объектом промысла из-за низких закупочных цен. По данным ЗМУ, в Якутии наблюдается постепенный рост численности всех пушных видов животных. Наряду с этим наблюдается усиленное повышение численности хищников, что вызывает серьезную обеспокоенность и требует принятия срочных мер по регулированию, включая разработку и реализацию программ по отстрелу или иным методам контроля численности, чтобы избежать потенциального ущерба для популяций других животных. В целом, неиспользованный ресурсный потенциал многих пушных охотничье-промысловых видов Якутии является следствием не только низких закупочных цен, но и уменьшения спроса населения на меховые изделия, недостаточного развития инфраструктуры переработки и сбыта, а также нехватки информации и обучения охотников. Для решения этой проблемы необходим комплексный подход государства, включающий финансовую поддержку охотничьего хозяйства, разработку и продвижение новых технологий переработки и маркетинга, проведение обучающих программ для охотников и популяризацию использования местной пушнины. Комплексный подход позволит эффективно использовать природные ресурсы Якутии и обеспечить устойчивое развитие охотничьего промысла.

Ключевые слова: пушные виды животных, охотничий промысел, динамика численности пушных животных, заготовка пушнины, традиционная охота коренных народов

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ по проекту «Популяции и сообщества животных водных и наземных экосистем криолитозоны восточного сектора российской Арктики и Субарктики: разнообразие, структура и устойчивость в условиях естественных и антропогенных воздействий» (тема № 0297-2021-0044, ЕГИСУ НИОКТР № 121020500194-9).

Для цитирования: Степанова В.В. Современное состояние ресурсов пушных зверей в Якутии. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(3):465–479. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-465-479>

The current status of fur-bearing animal resources in Yakutia

Valentina V. Stepanova

Institute for Biological Problems of Cryolithozone,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation
valstep@yandex.ru

Abstract

The total expanse of hunting territories in Yakutia covers approximately 241 million hectares, providing substantial potential for hunting activities, which are a vital component of both the region's cultural heritage and economic framework. The fur-bearing mammal fauna in Yakutia includes species such as sable (*Martes zibellina*), fox (*Vulpes vulpes*), brown bear (*Ursus arctos*), wolf (*Canis lupus*), muskrat (*Ondatra zibethicus*), squirrel (*Sciurus vulgaris*), white hare (*Lepus timidus*), ermine (*Mustela erminea*), Siberian weasel (*Mustela sibiricus*), arctic fox (*Vulpes lagopus*), wolverine (*Gulo gulo*), lynx (*Lynx lynx*), American mink (*Neogale vison*). This study used data derived from winter route surveys, questionnaires completed by hunting service providers and state inspectors, and records related to hunting and commercial animal production. Among the species studied, the sable holds particular significance. The consistent level of sable harvesting, alongside an observed increase in its population, suggests the effectiveness of conservation measures implemented to protect this valuable species. The muskrat ranks second in terms of harvest volume and exhibits a notably low seizure rate of 1–2%. Despite a 62% increase in squirrel populations over the past decade, squirrels remain economically unviable targets due to their low market prices. According to winter route surveys, populations of all fur-bearing animals in Yakutia are gradually increasing. However, this trend is accompanied by a rise in predator populations, raising ecological concerns and requiring prompt regulatory actions, including population control. The underexploited potential of fur-bearing animals in Yakutia stems from low market prices, limited consumer demand, underdeveloped processing and marketing infrastructure, and insufficient information and training for hunters. Addressing these challenges requires a comprehensive government strategy involving financial support for hunting, advancement of innovative processing and marketing technologies, hunter training programs, and initiatives promoting locally sourced fur products. This integrated approach would ensure the sustainable, efficient use of Yakutia's natural resources and the long-term viability of its hunting industry.

Keywords: fur-bearing animals, hunting, population dynamics in animal species, fur harvesting, traditional hunting of indigenous peoples

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 titled “Populations and communities of animals of aquatic and terrestrial ecosystems of the Cryolithozone in the Eastern Sector of the Russian Arctic and Subarctic: diversity, structure and sustainability under natural and anthropogenic influences” (theme No. 0297-2021-0044, reg. No. 121020500194-9).

For citation: Stepanova V.V. The current status of fur-bearing animal resources in Yakutia. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(3):465–479. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-465-479>

Введение

Республика Саха (Якутия), занимающая обширную территорию в 3,1 млн км², является одним из важнейших регионов России по добыче охотничьих ресурсов. Ее уникальное географическое положение, сочетающее в себе арктические пустыни, тайгу, тундру и горные системы, создает невероятно разнообразные условия обитания для множества видов животных. Общая площадь охотничьих угодий Якутии, составляющая колоссальные 241 млн га, предоставляет огромный потенциал для охотничьего промысла,

который исторически тесно связан с образом жизни коренных народов региона. Этот промысел, передаваемый из поколения в поколение, является неотъемлемой частью культуры и экономики Якутии.

Данная обширная территория республики является средой обитания 26 видов млекопитающих, отнесенных к объектам охоты. Из них в Якутии заготавливаются шкурки 12 видов млекопитающих, играющих важную роль в экосистеме и в традиционной охоте коренных народов. Видовой состав достаточно разнообразен, и численность

объектов охоты подвержена значительным колебаниям в зависимости от климатических условий и антропогенного воздействия.

Значительная часть охотничьих угодий, около 100 млн га, являются общедоступными, в то время как 12,3 млн га закреплены за 314 юридическими лицами и индивидуальными предпринимателями, ведущими охотничье хозяйство. В охотничьей отрасли республики занято приблизительно 1900 охотников-промысловиков, предоставляющих широкий спектр услуг, от организации охотничьих туров для туристов до заготовки пушнины. Охотпользователи обладают значительной самостоятельностью в распоряжении добычей, имея возможность участвовать в аукционах или продавать пушнину частным сбытчикам.

Фауна пушных млекопитающих Якутии представлена такими основными видами, как соболь (*Martes zibellina*), лисица (*Vulpes vulpes*), бурый медведь (*Ursus arctos*), волк (*Canis lupus*), ондатра (*Ondatra zibethicus*), белка (*Sciurus vulgaris*), заяц-беляк (*Lepus timidus*), горностай (*Mustela erminea*), колонок (*Mustela sibiricus*), песец (*Vulpes lagopus*), россомаха (*Gulo gulo*), рысь (*Lynx lynx*) и американская норка (*Neogale vison*).

В последние десятилетия отмечаются значительные колебания численности отдельных видов, что связано как с природными факторами, так и с хозяйственной деятельностью человека.

Цель работы — оценить современное состояние ресурсов пушных видов млекопитающих Якутии посредством анализа динамики численности и объемов добычи на основе статистических данных.

Материал и методы исследования

В настоящем исследовании были использованы статистические данные зимнего маршрутного учета (ЗМУ) численности животных за период с 2014 по 2024 г., а также сведения об объемах добычи охотничье-промысловых видов за тот же временной интервал. Данные предоставлены Департаментом охоты и сохранения охотничьих ресурсов Министерства экологии, природопользования и лесного хозяйства РС(Я) (далее — ДОСОР Минэкологии РС(Я)). Также использованы анкетно-опросные сведения по численности волка и бурого медведя в Якутии, полученные от охотпользователей и госинспекторов по охране природы в период с 2011 г. по настоящее время.

Результаты и обсуждение

К особо ценным и высокодоходным пушно-промысловым видам относится соболь (*Martes zibellina*). поголовье соболя в Якутии в настоящее время имеет тенденцию к увеличению численности (табл. 1), и уровень промыслового изъятия играет основную регулирующую роль численности данного вида в РС(Я) (табл. 2).

Таблица 1

Численность пушных животных в РС(Я) по данным ЗМУ, анкетно-опросного учета и экспертной оценки

Table 1

Population estimates of fur-bearing animals in the Republic of Sakha (Yakutia) based on winter route surveys, questionnaire data, and expert evaluations

| Вид | Численность, тысяч особей | | | | | | | | | | |
|---------------|---------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 |
| Соболь | 200 | 220 | 270 | 229 | 296 | 211 | 254 | 261 | 252 | 277 | 321 |
| Волк | 3,14 | 3,14 | 3,03 | 3,35 | 3,47 | 3,60 | 2,45 | 2,63 | 2,55 | 2,96 | 3,23 |
| Росомаха | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,48 | 5,45 | 4,70 | 4,24 | 3,54 | 4,34 | 6,30 | 3,9 |
| Рысь | 1,0 | 0,6 | 0,6 | 0,42 | 0,96 | 1,14 | 0,49 | 0,5 | 2,26 | 3,12 | 1,39 |
| Лисица | 15,0 | 17,0 | 19,0 | 17,9 | 22,1 | 21,8 | 20,4 | 19,8 | 25,5 | 27,6 | 25,7 |
| Горностай | 90,0 | 110 | 107 | 110 | 120 | 81 | 108 | 97 | 132 | 151 | 96 |
| Колонок | 2,0 | 3,0 | 1,5 | 2,2 | 2,3 | 1,1 | 2,1 | 2,2 | 2,2 | 3,5 | 3,8 |
| Белка | 400 | 500 | 640 | 634 | 678 | 479 | 534 | 497 | 711 | 652 | 565 |
| Заяц-беляк | 200 | 260 | 380 | 298 | 372 | 276 | 368 | 389 | 424 | 458 | 388 |
| Бурый медведь | 18,5 | 17,1 | 20,2 | 19,9 | 19,0 | 20,0 | 18,5 | 20,2 | 20,0 | 19,9 | 20,1 |
| Песец | – | 9,0 | 10,0 | 6,0 | 10,0 | 7,0 | 7,0 | 7,0 | 12 | 25 | 20 |
| Ондатра | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 350 | 350 |

Добыча пушных животных в РС(Я) по данным ДОСОР Минэкологии РС(Я)

**The harvesting of fur-bearing animals in the Republic of Sakha (Yakutia)
as documented by the Department of Hunting and Conservation of Hunting Resources
within the Ministry of Ecology, Nature Management, and Forestry of the Republic of Sakha (Yakutia)**

| Вид | Добыто, особей | | | | | | | | | | |
|---------------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 |
| Соболь | 47668 | 48700 | 48400 | 47427 | 47358 | 38768 | 42833 | 54200 | 42263 | 47280 | 45060 |
| Волк | 778 | 816 | 814 | 830 | 544 | 720 | 724 | 735 | 659 | 892 | 319 |
| Росомаха | - | 1 | - | - | - | 2 | 0 | 2 | 3 | 32 | 21 |
| Рысь | 0 | 0 | 3 | 1 | 2 | 3 | 2 | 4 | 0 | 0 | 4 |
| Лисица | 31 | 113 | 113 | 111 | 146 | 110 | 250 | 349 | 655 | 404 | 1005 |
| Горноста́й | 150 | 597 | - | 82 | 53 | 26 | 53 | 305 | 150 | 51 | 378 |
| Колонок | 13 | - | - | 13 | 10 | 0 | 4 | 19 | 5 | 0 | 765 |
| Белка | 601 | 548 | 91 | 95 | 1220 | 1141 | 922 | 660 | 2629 | 1179 | 3024 |
| Заяц-беляк | 350 | 360 | 1679 | 798 | 753 | 357 | 2284 | 1853 | 1334 | 1049 | 2572 |
| Бурый медведь | 204 | 210 | 210 | 313 | 214 | 426 | 413 | 466 | 527 | 252 | 602 |
| Песец | 100 | 15 | - | - | - | 12 | 59 | 76 | 25 | 24 | 14 |
| Ондатра | 5924 | 3293 | 3826 | 4855 | 4428 | 4598 | 33626 | 9552 | 55538 | 1290 | 4097 |

Соболь в последние годы составляет более 90 % стоимости «мягкого золота», заготавливаемого в Республике Саха (Якутия). На данный момент в среднем добывается около 17 % общего поголовья соболя. Тем не менее, реальная добыча, скорее всего, намного больше данной цифры, так как остается не учтенной часть шкурок, вывозимая за пределы республики и продаваемая на частном рынке. Официально добываемая продукция за 10 лет не изменилась, хотя численность вида возросла на 60 %. Как видим из рис. 1, плотность населения соболя за последнее десятилетие намного увеличилась. Особенно это отмечено в южных районах республики, а также в Жиганском и Абыйском улусах. Наибольший выход шкурок соболя наблюдается в южных и западных районах Якутии (рис. 2).

Начиная с начала 2000-х гг. соболь становится постоянным элементом тундровых экосистем арктической Якутии в пределах Анабарского, Булунского, Усть-Янского, Аллайховского и Нижнеколымского районов. С 2010 г. стала наблюдаться интенсивная экспансия вида не только в лесотундру, но и непосредственно в тундру, вплоть до побережья Северного Ледовитого океана. Соболей все чаще стали регистрировать фотоловушки, установленные у привады белых медведей. Следы этого хищника стали постоянно фиксироваться при проведении зимних маршрутных учетов, как в облесенной зоне вышеназванных

районов, а также непосредственно на открытых пространствах тундры. Также увеличилось заселение соболем малоснежных районов Центральной Якутии и Верхоянья, где ранее наблюдались разрывы видового ареала [1].

Второе место в балансе пушных заготовок республики занимает ондатра (*Ondatra zibethicus*). В результате искусственного и естественного расселения ареал ондатры в настоящее время охватывает всю пригодную для обитания территорию. Современные популяции ондатры в Якутии характеризуются целым рядом черт, свидетельствующих о приспособленности к субпессимальным условиям существования, адаптация чужеродного вида прошла успешно [2].

В начале 2000-х гг. ориентировочная численность ондатры оценивалась в 840 тыс. особей, однако добыча была в 2–3 раза ниже допустимых объемов [3]. В настоящее время примерная численность ондатры, по экспертной оценке, составляет около 350 тыс. особей. В рассматриваемые годы доля изъятия составляет 1–2 %, что является совсем мизерным показателем. Исключение – 2020 и 2022 гг., когда было зарегистрировано большое количество сданных шкурок ондатры в Среднеколымском районе (33 626 и 55 538 соответственно). За счет этого в этот год намного увеличилась общая добыча вида в республике. Она примерно составила около 15–20 % от общей численности ондатры. Для сравнения, в 1960–

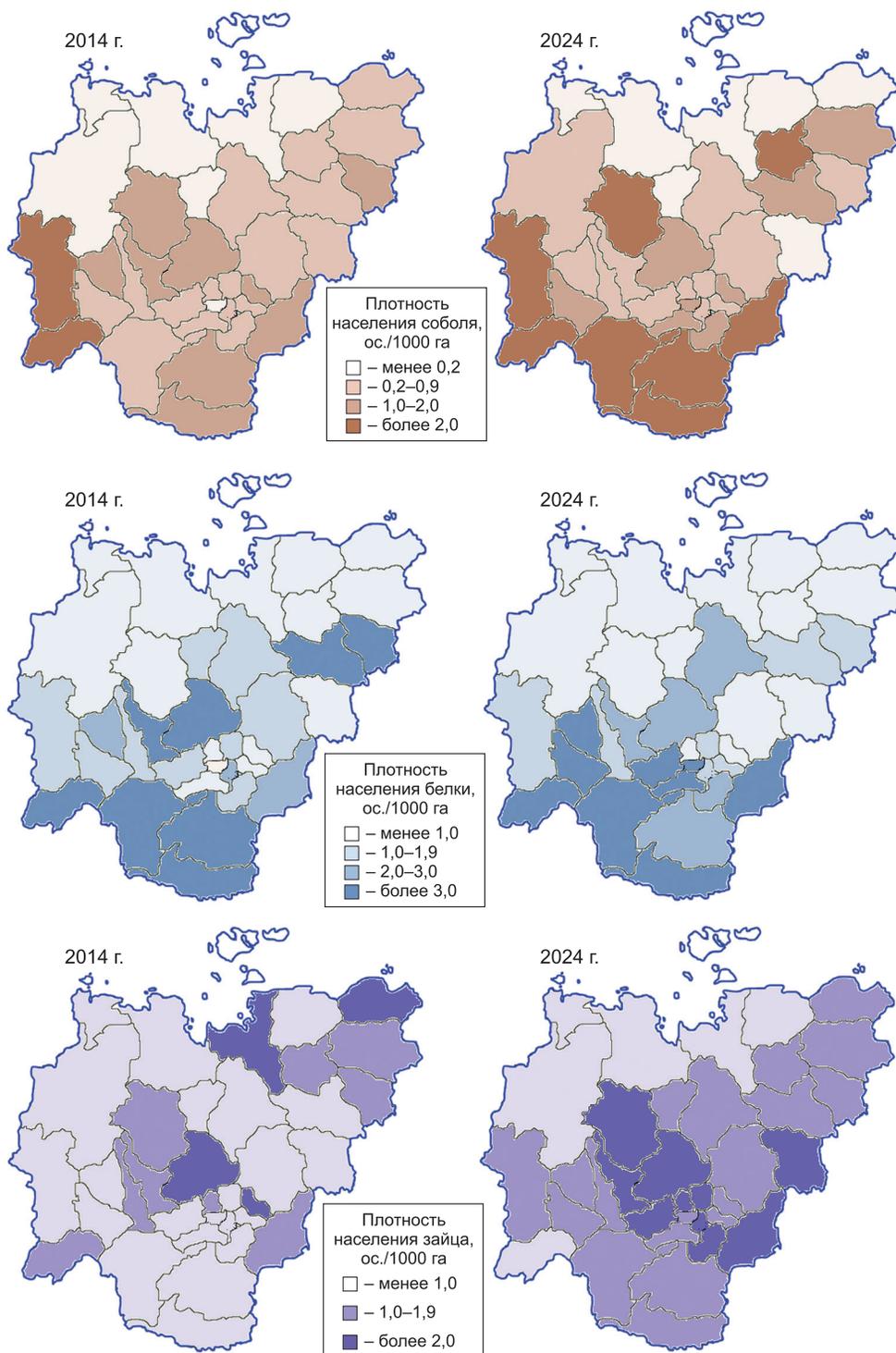


Рис. 1. Изменения плотности населения пушных видов животных в Якутии за 10 лет

Fig. 1. Changes in the population density of fur-bearing animal species in Yakutia over 10 years

1970-е годы с Колымской низменности заготавливали 250–280 тыс. ондатровых шкурок, что составляло 40–50 % общереспубликанских заготовок [4].

Динамика заготовок ондатры во многом зависит от уровня обводненности водоемов. В годы многоводья плотность населения ондатры увеличивается, в засушливые – снижается [5]. По

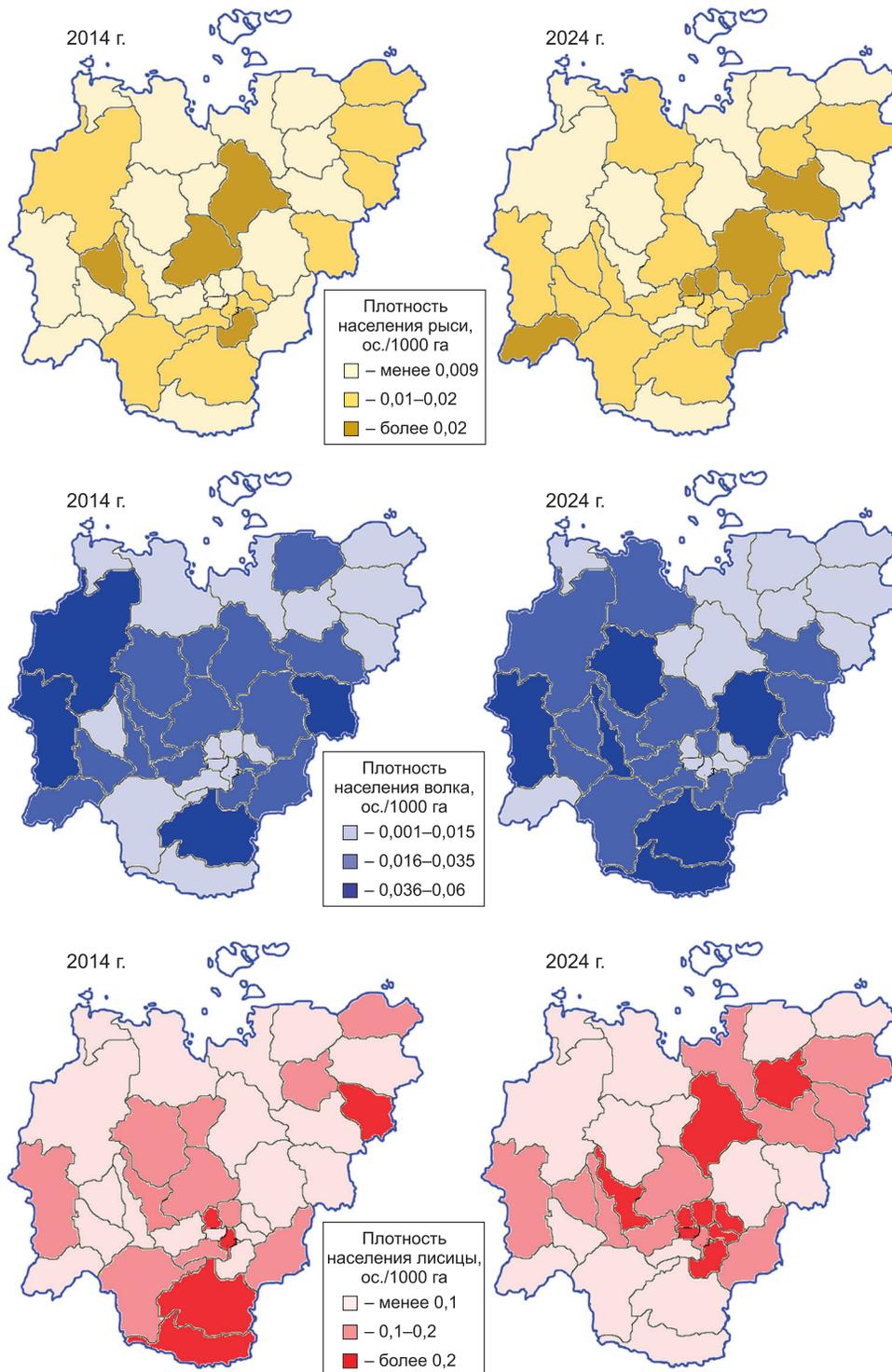


Рис. 1. Продолжение

Fig. 1. Continuation

данным Сафронова В.М. [1], озера Колымо-Индигирской низменности были сплошь заселены ондатрой и на 1 км береговой линии наблюда-

лось от 0,5 до 8–10 семейных колоний. Особенно была высока плотность населения вида в центральной части низменности.

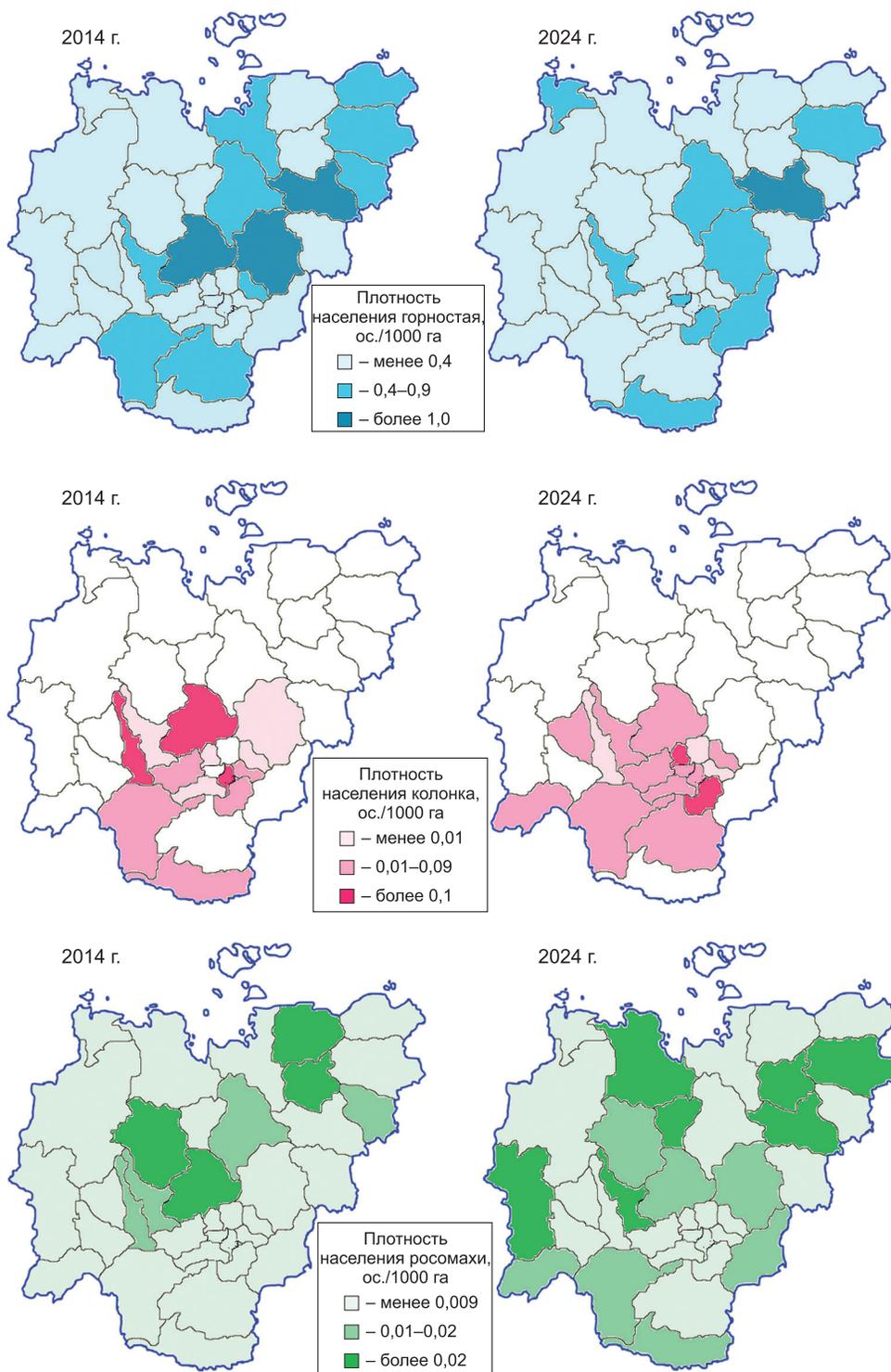


Рис. 1. Окончание

Fig. 1. Ending

На третьем месте в балансе заготовок пуш-
нины Якутии находится белка (*Sciurus vulgaris*).
В 2016–2017 гг. добыча ее была совсем низкая.

С 2018 г. она резко возросла, но и сейчас доля
изъятия ничтожно мала – от 0,1 до 0,3 % от об-
щей численности белки в регионе. Несмотря на

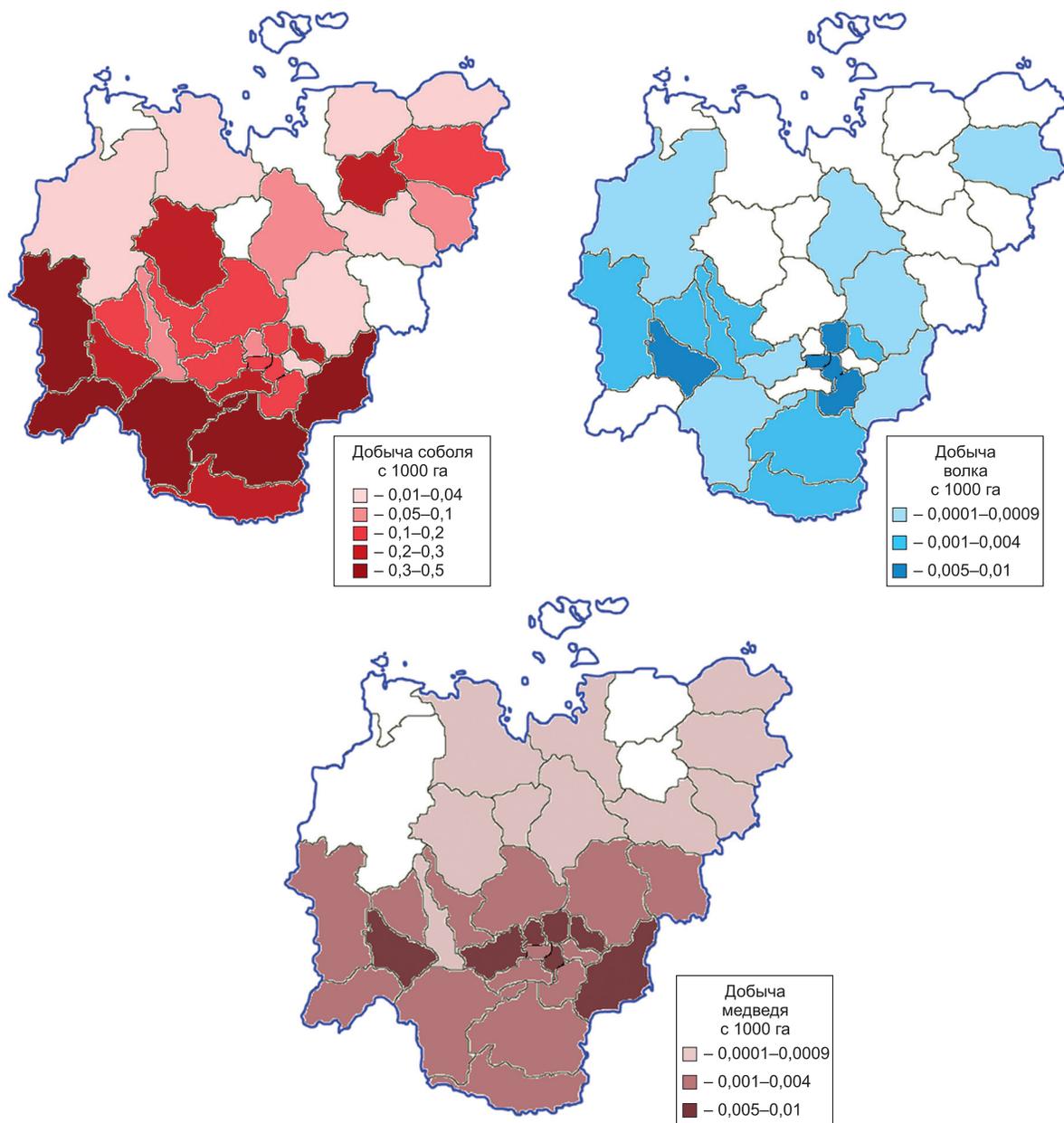


Рис. 2. Добыча соболя, волка и бурого медведя с 1000 га по районам РС(Я) в 2024 г.

Fig. 2. Harvesting of sable, wolf, and brown bear within a 1,000-hectare area in the districts of the Republic of Sakha (Yakutia) in 2024

то что численность белки за последнее десятилетие возросла на 41 %, в настоящее время промысел белки нерентабелен из-за ее низкой закупочной стоимости, поэтому ее добыча носит случайный характер. Например, сравнительно, если среднегодовые заготовки беличьих шкурок в середине прошлого века составляли 1135 тыс. шт., в начале 2000-х г. этот показатель был равен 71 тыс. шт. [6], то сейчас это всего лишь 1–2 тыс. шкурок.

Плотность населения белки за последнее десятилетие намного уменьшилась в восточных районах: Момском и Верхнеколымском, и незначительно в Кобяйском, Вилюйском и Алданском (см. рис. 1). Зато она повысилась в других районах: Нюрбинском, Сунтарском, Усть-Майском, Горном, Хангаласском, МО г. Якутск. Прослеживается зависимость концентрации белки в угодьях от плотности населения соболя, т. е., например, при увеличении плотности населения соболя в Алдан-



Рис. 3. Динамика численности волка (наверху) и бурого медведя (внизу) в РС(Я) по анкетно-опросным данным, тысяч особей

Fig. 3. Dynamics of the wolf (above) and brown bear (below) populations in the Republic of Sakha (Yakutia), based on questionnaire data, thousand individuals

ском улусе плотность населения белки там уменьшилась. Возможно, белка мигрировала в центральные районы, где ее численность за последние 10 лет намного увеличилась за счет малочисленности соболя.

Заготовки шкурок зайца-беляка (*Lepus timidus*) занимают четвертое место в общем объеме заготовок. С 2003 г. идет постепенное увеличение числа заготавливаемых заячьих шкурок, в среднем за год заготавливается около 5 % поголовья зайцев. Численность зайца-беляка в Якутии трудно поддается определению. В годы максимума в середине прошлого века она могла исчисляться миллионами [7]. С конца прошлого века наблюдалось резкое снижение численности вида по всей Сибири и Дальнему Востоку, после чего подъем численности происходил медленно и не в таком большом масштабе, как раньше. Соответственно, численность зайца в настоящее время гораздо ниже тех показателей, которые были в середине XX в. Тем не менее, за последнее десятилетие наблюдается постепенное увеличение численности зайца-беляка на 90 %. Добыча его также увеличилась за это время в три раза.

Из рис. 1 наблюдаем, как увеличилась плотность населения зайца-беляка за последние 10 лет. Повышение показателя отмечено почти по всей территории республики. Плотность населения зайца высока в центральных районах, также Жиганском, Кобяйском и Вилюйском, на западе – в Усть-Майском и Оймяконском районах.

Пятое место по заготовкам шкур занимает волк (*Canis lupus*). По результатам анкетно-опросного метода учета волков, численность волка в Якутии была наивысшей в 2011–2012 гг., в 2013 г. последовал спад численности (рис. 3). С 2014 по 2019 г. численность волков постепенно увеличивалась. Усиленная и планомерная борьба с волками в 2020 г. дала свои результаты – численность волков намного сократилась. Большое снижение наблюдалось в южной и северо-восточной Якутии. Некоторая концентрация хищников была отмечена в густонаселенных улусах Центральной Якутии и некоторых улусах Вилюйской группы, что говорит о синантропизации волков [8].

Но за последние 5 лет поголовье волков в регионе опять постепенно возрастает [9]. Как видим из рис. 1, за десятилетний промежуток времени плотность населения волков сильно изменилась:

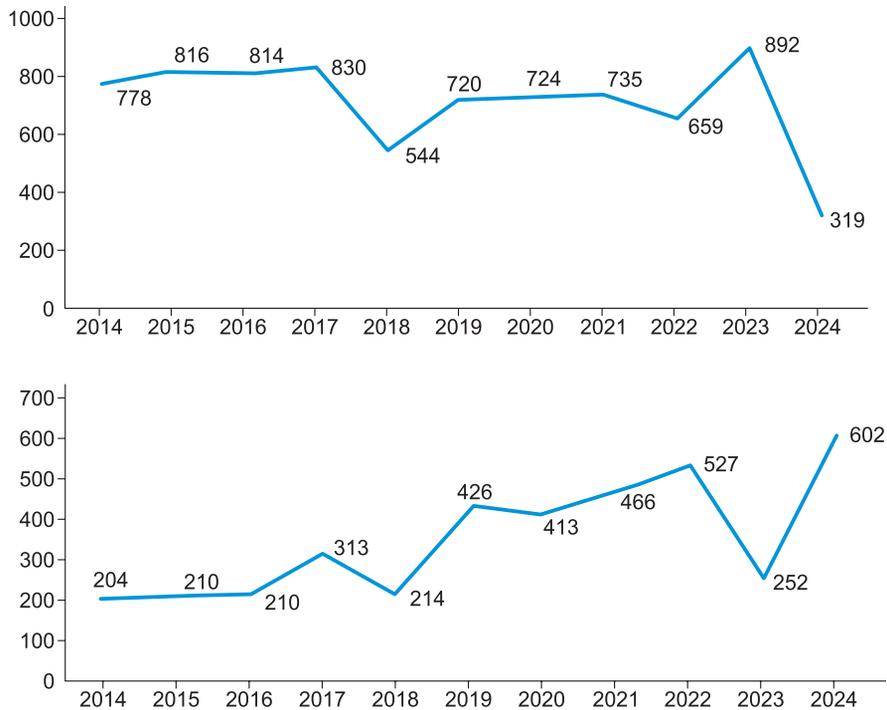


Рис. 4. Динамика добычи волка (наверху) и бурого медведя (внизу) в РС(Я) за последние 10 лет, в штуках

Fig. 4. The dynamics of wolf (above) and brown bear (below) populations in the Republic of Sakha (Yakutia) over the past 10 years, in pcs

концентрация волков с Оленекского района перешла на Жиганский и Верхневилуйский районы, что, возможно, связано с изменением миграцией тундровых оленей, а также увеличением в этих улусах количества зайца-беляка; концентрация волков с Оймяконского района перешла в Томпонский район; увеличение плотности населения волков наблюдается в южных районах; уменьшение – в северо-восточных районах республики.

В 2024 г. относительно низкая численность волков в Северо-Восточной зоне обусловлена высокой долей (64–75 %) взрослых особей, которые контролируют иерархическую структуру популяции [10], а также половым соотношением 2:1 в пользу самцов. Увеличение численности волков в Центральной и Вилуйской зонах обосновано высокой долей самок (41–43 %) и молодняка (42 %). В Северо-Западной зоне также доля самок достаточно большая (48,7 %), хотя количество молодых особей находится в уравновешенном состоянии [9].

В республике ежегодно добывается 26–27 % от общей численности волков [11]. Наибольшая добыча волков фиксируется в центральных районах Якутии, в Вилуйской группе улусов и в юж-

ной части республики (см. рис. 2). Из рис. 4 видим, что ежегодная добыча волков колеблется в основном в пределах 600–800 особей. При этом следует учитывать, что некоторая часть добычи остается не учтенной, и, скорее всего, в год добывается около 1000 волков.

В 2024 г. наблюдается раздробление стай: увеличилось количество стай, зато уменьшилось количество голов в стае (табл. 3). Рост в популяции численности за счет увеличения численности самок и молодняка позволяет прогнозировать в будущем резкое увеличение поголовья волка при отсутствии усиленного изъятия.

Лисица красная (*Vulpes vulpes*) занимает шестое место в заготовке добытых шкур. Численность лисицы красной за последние 5 лет возросла на 26 %: с 20,4 тыс. особей в 2020 г. до 25,7 тыс. особей в 2024 г. За этот же период возросли заготовки шкурок лисицы в 4 раза: с 250 штук в 2020 г. до 1005 штук в 2024 г. В среднем в год добывается около 1,5 % от общей численности лисицы. Для сравнения скажем, что в 1930-е годы только с Северо-Восточных и Колымских районов добывалось около 2,0 тыс. шкурок в год [12], в 1950–1960-е годы в среднем 5,1 тыс. шкурок заготавливалось со всей республики [7]. В настоя-

Динамика популяционной структуры волка в РС(Я)

Table 3

Dynamics of the wolf population structure in the Republic of Sakha (Yakutia)

| Год | Кол-во анкет, штук | Численность, особей | Плотность населения, ос. на 1000 га | Кол-во стай, штук | Голов в стае | Половое соотношение | Самцы, % | Самки, % | Молодняк, % | Волчат в логове | Одиночки, особей |
|-----------|--------------------|---------------------|-------------------------------------|-------------------|--------------|---------------------|----------|----------|-------------|-----------------|------------------|
| 2011 | 233 | 3770 | 0,02 | 600 | 5,6 | 1,8:1 | 63,8 | 36,2 | 31,2 | 5,7 | 250 |
| 2012 | 93 | 2700 | 0,03 | 200 | 5,7 | 1,6:1 | 61 | 39 | 39,2 | 3,2 | 100 |
| 2013 | 315 | 2800 | 0,01 | 400 | 4,9 | 1,6:1 | 61,5 | 38,5 | 29,4 | 4,1 | 300 |
| 2014 | 263 | 3145 | 0,012 | 650 | 4,8 | 1,6:1 | 61,3 | 38,7 | 34,2 | 4,3 | 122 |
| 2016 | 175 | 3030 | 0,012 | 600 | 5,1 | 1,1:1 | 53,2 | 46,8 | 34,5 | 5,6 | 151 |
| 2017Рис.7 | 202 | 3350 | 0,013 | 700 | 4,6 | 1,4:1 | 57,8 | 42,2 | 38,3 | 6,0 | 145 |
| 2018 | 173 | 3475 | 0,014 | 700 | 4,8 | 1,6:1 | 61,8 | 38,2 | 41,6 | 4,0 | 197 |
| 2019 | 155 | 3603 | 0,015 | 700 | 4,9 | 1,6:1 | 62,2 | 37,8 | 36,8 | 4,7 | 206 |
| 2020 | 397 | 2455 | 0,01 | 455 | 4,9 | 1,7:1 | 62,9 | 37,1 | 46,6 | 5,0 | 224 |
| 2021 | 248 | 2630 | 0,011 | 500 | 4,8 | 1,8:1 | 70,1 | 29,9 | 45,3 | 4,0 | 180 |
| 2022 | 362 | 2546 | 0,010 | 360 | 7,1 | 1,6:1 | 61,8 | 38,2 | 30,3 | 5,0 | 120 |
| 2023 | 339 | 2964 | 0,012 | 524 | 5,6 | 1,7:1 | 61,1 | 38,9 | 36,8 | 4,8 | 371 |
| 2024 | 278 | 3235 | 0,013 | 614 | 4,8 | 1,6:1 | 61,4 | 38,6 | 34,9 | 4,5 | 346 |

щее время большинство шкур лисицы оседает у населения. Стоит отметить, что в начале 1940-х годов увеличение численности лисицы связывали с повышением численности зайца-беляка [13], за последнее десятилетие наблюдается постепенное повышение численности зайца-беляка, что, возможно, способствовало увеличению численности лисицы красной.

Как показывает рис. 1, распределение плотности населения лисицы в районах за последнее десятилетие изменилось. Уменьшение данного показателя наблюдается в южных и юго-западных районах республики – Алданском, Нерюнгинском, Олекминском, Ленском, а также на юге Центральной Якутии – в Хангаласском районе. Кроме этого, снижение численности вида наблюдается в Жиганском и Эвено-Бытантайском улусах. Увеличение показателя отмечено в северо-восточных районах – Верхоянском, Абыйском, Момском и центральных улусах. Следует отметить, что концентрация лисиц меняется в зависимости от концентрации ее кормового конкурента – волка, в районах, где численность волков увеличилась, плотность населения лисиц уменьшилась, и наоборот, в местах, где экологическая пищевая ниша менее занята конкурентом, концентрация лисиц повысилась.

Седьмое место по добыче занимает бурый медведь (*Ursus arctos*). В 1960-х годах общие за-

пасы бурого медведя в Якутии исчислялись приблизительно в 15–20 тыс. экземпляров [7]. На основе авиаучетных работ в 1986 г. общая численность медведя в Якутии была определена в 8–10 тысяч голов [14]. Тогда связывали снижение численности бурого медведя с применением запрещенных методов промысла (петли) и существованием отстрела без ограничения сроков охоты [15]. Введение лицензионного отстрела, запрет на использование самоловов привело к постепенному нарастанию численности бурого медведя в республике, и не только. В настоящее время численность бурого медведя возросла до уровня 1960-х годов. По анкетно-опросным сведениям, если в 2011–2012-х гг. его численность примерно оценивалась в 12–14 тыс. особей, то с 2016 года она держится на высоком уровне [16] и в настоящее время приблизилась к 20 тыс. особям. Ежегодно добывается от 200 до 600 бурых медведей – 1–2 % от всей численности вида. Наибольшая добыча с 1000 га угодий приходится на полосу 62–64° с.ш. (см. рис. 2), возможно, это объясняется доступностью этих угодий. За Полярным кругом добыча вида значительно ниже. Из рис. 4 видно, что с ростом численности бурого медведя растет и его изъятие: за 10 лет оно увеличилось почти в 3 раза, хотя в 2023 г. добыча этого хищника была низкой, возможно, это связано с человеческим фактором.

Возможными причинами, обуславливающими увеличение численности бурых медведей, можно считать: недопромысел из-за нехватки кадровых охотников и дороговизны лицензии; миграции из соседних регионов; улучшение кормовой базы; пожары в соседних регионах; высокую рождаемость. С каждым годом специализированных охотников на бурых медведей становится все меньше. Ежегодно растет доля самок с двумя медвежатами, особенно в южных районах.

Горноста́й (*Mustela erminea*), в давнем прошлом занимавший первые места в заготовках [7], сейчас занимает лишь восьмое место. Этот вид в Якутии распространен очень широко: во всех природных зонах, за исключением высокогорных тундр. В середине прошлого века среднегодовая добыча горностая составляла в среднем около 126 тыс. шкурок [17]. Наибольшее количество шкурок поступало из северо-восточных и колымско-индигирских районов [12]. В настоящий период добыча горностая производится случайно, сдается около 150 шкурок в год. Почти повсеместно запасы горностая не используются. Значение горностая как объекта промысла в республике исчезло.

За десять последних лет поголовье горностая не изменилось. Рисунок 1 иллюстрирует изменения показателя плотности населения горностая за последнее десятилетие. Как видим, плотность населения вида уменьшилась во многих улусах. Вид сейчас многочислен в Момском улусе, также его численность высока в Колымской низменности и Верхоянском хребте.

Последние места в объеме заготовок пушники занимают колонок (*Mustela sibiricus*), песец (*Vulpes lagopus*), росомаха (*Gulo gulo*), рысь (*Lynx lynx*) и американская норка (*Neogale vison*).

Определенной цикличности в изменении численности колонка в республике не наблюдается [18]. До 2022 г. она была стабильной с некоторыми колебаниями в различные годы и держалась примерно на уровне 2000–2300 особей. По результатам ЗМУ, в последние два года численность колонка резко увеличилась на 89 %. Из рис. 1 видим, что плотность населения колонка снизилась в Кобяйском и Верхневилуйском улусах, но зато увеличилась в Нюрбинском и Вилуйском, а также во многих центральных районах.

Основную массу добытых шкурок колонка раньше давали районы Центральной Якутии. В 1970-х годах среднегодовая добыча колонка составляла 13,3 тыс. шкурок. В начале 2000-х до-

бывалось от 1,8 тыс. до 3,1 тыс. шкурок [18]. По сравнению с этим в настоящее время в заготовки поступают единичные экземпляры, заготовки колонка во все наблюдаемые года не превышали 20 шкурок. Снижение количества заготовок колонка в основном зависит от низкой закупочной стоимости его шкурки. Но в 2024 г. количество сданных шкурок резко повысилось и достигло 765 штук за счет Нюрбинского улуса.

Послепромысловая численность песца в Якутии в настоящее время по экспертным данным оценена в 20 тыс. особей. Большая часть песцовых шкурок добывается в тундровых районах. Для этих районов песец раньше являлся единственным видом, определяющим экономические показатели пушного промысла. Сейчас там появился соболь. Ресурсы песца в последние годы практически не промышляются, добывается лишь до 100 шкурок в год. По статистическим данным, в начале 2000-х гг. добывалось около 1000 песцов в год.

Как объект промысла россомаха находится в числе второстепенных видов, мало влияющих на баланс пушного промысла. Как крупный хищник россомаха наносит ощутимый вред охотничьему хозяйству, уничтожая ценных животных и похищая добычу охотников из самоловов. Поэтому представляются целесообразными меры по сокращению ее численности.

По материалам учетных работ, пик численности россомахи в Якутии наблюдался в 2000 г., когда численность вида увеличилась в 2,5–3,0 раза относительно уровня 1990-х г., затем шел постепенный спад, а в последнее десятилетие идет рост численности популяции. За 10 лет она возросла на 30 %. Как показывает рис. 1, плотность населения россомахи за последнее десятилетие увеличилась во многих районах республики, особенно в северных и южных районах.

Шкуры россомахи сдаются единично. Исключение составляет 2023 г., когда сдали 32 шкуры россомахи, за счет Олекминского, Сунтарского, Томпонского и Усть-Майского улусов.

Американская норка в Якутии имеет второстепенный статус промыслового пушного вида. С 1962 г. в течение 35 лет после акклиматизации вида идет постепенное увеличение ее численности до 8,5 тыс. особей. Далее с внедрением в жизнь рыночных отношений усиливается охота и браконьерство, и численность норки сокращается до 2,1 тыс. особей [19]. Затем наблюдается некоторое увеличение численности к 2005 г.,

которое также в последующем сменяется спадом. В последнее десятилетие численность американской норки в Якутии растет, вид начинает широко расселяться в разных направлениях, и, по экспертным оценкам, численность в среднем составляет около 5000 особей. Потепление зимних периодов, увеличение незамерзающих участков на быстринах рек и речек, улучшение кормовой базы создают условия для увеличения прироста норки за счет большей сохранности молодняка [20].

В настоящее время целенаправленной добычи норки не производится из-за трудоемкости охоты и невысокой ценности меха относительно соболя. Сейчас рынок пушнины завален мехом клеточной норки, который качественнее и ценнее, чем мех дикой норки. Промысел норки возможен лишь попутно при ловле соболя или ондатры.

Для рыси характерны сильные колебания численности по годам в зависимости от колебаний численности зайца-беляка, основного корма рыси. Продолжительное время с долговременным низким уровнем численности зайца численность рыси также находилась в упадке. Но в последние годы численность беляка растет, а вместе с ним растет и численность рыси – за 10 лет, по данным ЗМУ, на 39 %. Следы рыси чаще стали наблюдаться даже в густонаселенных людьми районах.

Хотя шкурки рыси считаются ценными, рысь в заготовках пушнины встречается в единичных случаях и является второстепенным объектом пушно-мехового промысла, что связано с трудностями и тонкостями в добыче, а также оседанием шкур у охотников. Для сравнения, в 1970-е гг. в среднем добывалось около 140 шкурок в год [7].

Плотность населения рыси в республике увеличилась, особенно в центральных улусах, Вилюйской группе улусов и в восточной части республики (см. рис. 1).

Заключение

Подводя итоги, можно сказать, что состояние основных пушных видов животных в республике опасения не вызывает, наблюдается постепенный рост численности всех перечисленных животных за исключением горноста. Радует, что после резкого колоссального снижения численности зайца-беляка намечается тенденция к росту его поголовья. Наряду с этим наблюдается увеличение численности крупных и средних хищников, что требует незамедлительных мер по регулированию их популяций, в частности, волков и бурых мед-

ведей. Нужно уменьшить общую численность волков, как минимум, на 1000 особей путем планомерного рационального отстрела, чтобы не было в дальнейшем резкого подъема численности волка. Целенаправленную организованную специализированную бригаду по отстрелу волков стоит отправлять в центральные улусы: Намский, Хангаласский и Усть-Алданский, где численность волков увеличилась в 2–3 раза благодаря увеличению численности копытных. Например, численность лося и косули увеличилась в Намском улусе, зато сократилась в соседствующем Кобьайском. Также усилить охоту на волков необходимо в Вилюйском и Нюрбинском улусах, где увеличилась их численность. Необходимо по мере возможности внедрять в жизнь планомерное научно обоснованное уничтожение волков, суть которого заключается в избирательности охоты. Система вознаграждения должна стимулировать промысел щенков, прибылых волчат и переяров [21]. Вознаграждение за семейных матерых, которые контролируют иерархическую (не дают размножаться молодым самкам) и территориальную (истребляют волков-бродяг) структуру популяции путем саморегуляции, должно быть минимальным, чтобы охотнику их было невыгодно добывать. Также необходимо пропагандировать и стимулировать изъятие молодняка на логовах с сохранением семейной пары. Следует отметить, что нетерриториальные волки, которые образуются при распаде стаи в случае гибели матерых, или отогнанные из стаи молодые в основном нападают на домашних животных [21]. Исходя из этого, лимитирование должно основываться на сохранении матерых семейных пар и уничтожении молодых и нетерриториальных волков.

Основной причиной снижения заготовок пушнины (кроме соболя) является недопромысел, обусловленный отсутствием спроса на меховые изделия из шкурок этих видов и низкими закупочными ценами, а также ввиду экодвижения и распространения идеологии отказа от натуральных мехов, создания различных искусственных материалов, по своим свойствам не уступающих натуральному меху и гораздо более доступных по цене. Рынок меховых изделий в России сократился за три последних года на четверть, количество производителей и продавцов сократилось почти на 30 %. Из-за нарастающего потепления климата у населения отпала необходимость в теплой меховой одежде. Немаловажное значение

в этом имеет также кадровая нехватка в охотничьем хозяйстве из-за отсутствия господдержки охотничьей отрасли. Ресурсные возможности значительного роста заготовок без ущерба для пушных зверей в настоящее время имеются и могут быть увеличены путем стимулирования их промысла охотниками-промысловиками.

Приведенные выше показатели составляют не более 30 % потенциала пушных ресурсов республики, которые имели место быть в недалеком прошлом и которые могли бы быть достигнуты при вложении определенных инвестиций в развитие охотничьего хозяйства.

Необходимо проводить более детальные исследования, учитывающие особенности ландшафта и кормовой базы в различных регионах Якутии для оптимизации стратегии управления популяцией соболя и предотвращения потенциальных угроз, таких как распространение болезней на фоне увеличения численности. Более того, необходимо анализировать не только объемы добычи, но и качество шкурок, что дает информацию о физическом состоянии популяции, а также напрямую влияет на конечную цену и прибыльность промысла. Кроме этого, следует исследовать факторы, способствующие высокому росту популяции соболя и некоторых других видов животных, для оценки потенциального негативного эффекта на экосистемы.

Для повышения эффективности использования ресурсного потенциала полуводных животных – ондатры и американской норки необходимы комплексное исследование ее популяции, разработка и внедрение современных методов учета и охоты, а также активное взаимодействие с охотниками для повышения их осведомленности. Также стоит рассмотреть альтернативные способы использования меха.

Список литературы / References

1. Сафронов В.М. Охотничье-промысловые млекопитающие Якутии и проблемы их использования. *Вестник охотоведения*. 2007;4(3):252–265.
2. Сафронов В.М. Commercial game mammals of Yakutia and problems of their hunting. *Herald of Game Management*. 2007;4(3):252–265. (In Russ.)
3. Шадрина Е.Г., Вольперт Я.Л., Охлопков И.М. Интродукция млекопитающих в Якутии: анализ результативности, перспектив и негативных последствий. *Российский журнал биологических инвазий*. 2021;14(4):134–156. <https://doi.org/10.35885/1996-1499-2021-14-4-134-156>
4. Шадрина Е.Г., Охлопков И.М., Вольперт Я.Л. Introduction of mammals in Yakutia: analysis of effectiveness, prospects and negative consequences. *Russian Journal of Biological Invasions*.

2021;(4):134–156. (In Russ.) <https://doi.org/10.35885/1996-1499-2021-14-4-134-156>

5. Захаров Е.С., Сметанин Н.Н., Сидоров И.А. и др. Распространение ондатры (*Ondatra zibethicus* L.) и американской норки (*Neovison vison* Schreber) в Якутии (Северо-Восточная Азия, Россия). *Российский журнал биологических инвазий*. 2023;16(2):77–86. <https://doi.org/10.35885/1996-1499-16-2-77-86>

Zakharov E.S., Smetanin N.N., Sidorov I.A., et al. Distribution of the muskrat (*Ondatra zibethicus* L.) and the American mink (*Neovison vison* Schreber) in Yakutia (Northeastern Asia, Russia). *Russian Journal of Biological Invasions*. 2023;16(2):77–86. (In Russ.) <https://doi.org/10.35885/1996-1499-16-2-77-86>

6. Аргунов А.В. Чужеродные виды териофауны Якутии. *Российский журнал биологических инвазий*. 2018;11(3):20–38.

Argunov A.V. Alien species of mammalian fauna in Yakutia. *Russian Journal of Biological Invasions*. 2018;11(3):20–38. (In Russ.)

7. Чибыев В.Ю., Никифоров Н.И., Луковцев Ю.С., Охлопков И.М. Акклиматизированная ондатра (*Ondatra zibethica*) Якутии. *Вестник Бурятского государственного университета. Биология, география*. 2013;(4):139–144.

Chibuyev V.Yu., Nikiforov N.I., Lukovtsev Yu.S., Okhlopkov I.M. The acclimatized (*Ondatra zibethica*) of Yakutia. *Bulletin of the Buryat State University. Biology, Geography*. 2013;(4):139–144. (In Russ.)

8. Седалищев В.Т. К экологии обыкновенной белки (*Sciurus vulgaris* Linnaeus, 1758) Западной Якутии. *Труды Мордовского государственного природного заповедника имени П.Г. Сидовича*. 2012;(10):282–289.

Sedalishchev V.T. On the ecology of the common squirrel (*Sciurus vulgaris* Linnaeus, 1758) in Western Yakutia. *Proceedings of the Mordovia State Nature Reserve*. 2012;(10):282–289. (In Russ.)

9. Тавровский В.А., Егоров О.В., Кривошеев В.Г. и др. *Млекопитающие Якутии*. Отв. ред. В.А. Тавровский. М.: Наука; 1971. 660 с.

Tavrovsky V.A., Egorov O.V., Krivosheev V.G., et al. *Mammals of Yakutia*. Tavrovsky V.A. (ed). Moscow: Nauka; 1971. 660 p. (In Russ.)

10. Степанова В.В., Охлопков И.М. Современное состояние численности и плотности населения волка (*Canis lupus* Linnaeus, 1758) в Якутии. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2020;25(4):121–131. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-4-10>

Stepanova V.V., Okhlopkov I.M. The current state of the wolf (*Canis lupus* Linnaeus, 1758) population size and density in Yakutia. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2020;25(4):121–131. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-4-10>

11. Обработка материалов анкетного опроса о численности и территориальном распределении волка на территории охотничьих угодий Республики Саха (Якутия) в 2024 году. *Отчет Института биологических проблем криолитозоны СО РАН. (Отв. исп. к.б.н. Степанова В.В.)*. Якутск; 2024. 25 с.

An analysis of data collected from a questionnaire survey regarding the population size and geographic distribution of wolves within the hunting territories of the Republic of Sakha (Yakutia) in 2024. *Report prepared by the Institute for Biological Problems of Cryolithozone, SB RAS. (Stepanova V.V., PI)*. Yakutsk; 2024. 25 p. (In Russ.)

10. Mech L.D. Alpha status, dominance, and division of labor in wolf packs. *Canadian Journal of Zoology*. 1999; (77): 1196–1203.
11. Республика Саха (Якутия) и ее охотничье хозяйство. *Режим доступа*: <https://ulus.media/2023/07/08/respublika-saha-yakutiya-i-eyo-ohotniche-hozyajstvo>. (дата обращения: 19.05.2025).
- The Republic of Sakha (Yakutia) and its hunting industry. Available at: <https://ulus.media/2023/07/08/respublika-saha-yakutiya-i-eyo-ohotniche-hozyajstvo> (accessed: 19.05.2025). (In Russ.)
12. Зубов А.И. Горностай и лисица Средне-Колымского района. *Отчет ВНИИОЗ им. проф. Б.М. Житкова*. Якутск; 1940. 68 с.
- Zubov A.I. Ermine and fox of the Sredne-Kolyma district. *Report prepared by Zhitkov All-Russian Scientific Research Institute of Game Management and Animal Farming (VNIIOZ)*. Yakutsk; 1940. 68 p. (In Russ.)
13. Тавровский В.А. Распространение и некоторые особенности динамики численности пушно-промысловых млекопитающих в Якутии. В кн.: *Исследования по экологии, динамике численности и болезням млекопитающих Якутии*. М.: Наука; 1964. 287 с.
- Tavrovsky V.A. Distribution and some features of the dynamics of the number of fur-bearing mammals in Yakutia. In: *Research on ecology, population dynamics and diseases of mammals in Yakutia*. Moscow: Nauka; 1964. 287 p. (In Russ.)
14. Винокуров В.Н., Мордосов И.И. Распространение и численность бурого медведя в Якутии. В кн.: *Экология медведей*. Юдин Б.С. (ред.) Новосибирск: Наука; 1987. С. 41–45.
- Vinokurov V.N., Mordosov I.I. Distribution and population density of the brown bear in Yakutia. In: *Bear Ecology*. Yudin B.S. (ed.). Novosibirsk: Nauka; 1987. pp. 41–45. (In Russ.)
15. Мордосов И.И. Бурый медведь (*Ursus arctos* L.) Якутии. *Вестник Якутского государственного университета*. 2006;3(4):21–31.
- Mordosov I.I. *Ursus arctos* L. in Yakutia. *Bulletin of the Yakut State University*. 2006;3(4):21–31. (In Russ.)
16. Обработка материалов анкетного опроса о численности и территориальном распределении бурого медведя на территории охотничьих угодий Республики Саха (Якутия) в 2024 году. *Отчет Института биологических проблем криолитозоны СО РАН. (Отв. исп. м.н.с. Мамаев Н.В.)*. Якутск; 2024. 20 с.
- An analysis of data collected from a questionnaire survey regarding the population size and geographical distribution of brown bears in the hunting territories of the Republic of Sakha (Yakutia) in 2024. *Report prepared by the Institute for Biological Problems of Cryolithozone, SB RAS. (Mamaev N.V., PI)*. Yakutsk; 2024. 20 p. (In Russ.)
17. Седалищев В.Т. Состояние пушно-промысловых животных в Якутии и их использование. *Альманах современной науки и образования*. 2009;11-1(30):177–181.
- Sedalishchev V.T. The state of fur-bearing animals in Yakutia and their use. *Almanac of Modern Science and Education*. 2009;11-1:177–181. (In Russ.)
18. Седалищев В.Т., Охлопков И.М., Однокурцев В.А. К экологии колонка (*Mustela sibiricus* Pall., 1773) Якутии. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2015;17(4-5):867–873.
- Sedalishchev V.T., Okhlopov I.M., Odnokurtsev V.A. Ecology Siberian weasel (*Mustela sibiricus* Pallas., 1773) Yakutia. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2015;17(4): 867–873. (In Russ.)
19. Степанова В.В., Мамаев Н.В., Сидоров М.М., Охлопков И.М. Американская норка (*Neogale vison*) в Якутии: морфология, распространение, численность. *Российский журнал биологических инвазий*. 2023;16(3):184–195. <https://doi.org/10.35885/1996-1499-16-3-184-195>
- Stepanova V.V., Mamaev N.V., Sidorov M.M., Okhlopov I.M. American mink (*Neogale vison*) in Yakutia: morphology, distribution, abundance. *Russian Journal of Biological Invasions*. 2023;16(3):184–195. (In Russ.) <https://doi.org/10.35885/1996-1499-16-3-184-195>
20. Сафронов В.М. Изменение климата и млекопитающие Якутии. *Зоологический журнал*. 2016;95(12):1459–1474. <https://doi.org/10.7868/S004451341612014X>
- Safronov V.M. Climate change and mammals of Yakutia. *Zoological Journal*. 2016;95(12):1459–1474. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S004451341612014X>
21. Суворов А.П., Александрова Т.А. Особенности регулирования численности волка в регионах Сибири. *Режим доступа*: <https://ihunter.pro/posts/strategiya-upravleniya-i-normirovanie-dobyichi/203>. (дата обращения: 11.09.2025).
- Suvorov A.P., Alexandrova T.A. Peculiarities of wolf population regulation in Siberian regions. Available at: <https://ihunter.pro/posts/strategiya-upravleniya-i-normirovanie-dobyichi/203> (accessed: 11.09.2025). (In Russ.)

Об авторе

СТЕПАНОВА Валентина Валерьяновна, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-3630-0091>, ResearcherID: K-3068-2018, Scopus Author ID: 57197334628, SPIN: 9052-7549, e-mail: valstep@yandex.ru

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

About the author

STEPANOVA, Valentina Valerianovna, Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-3630-0091>, ResearcherID: K-3068-2018, Scopus Author ID: 57197334628, SPIN: 9052-7549, e-mail: valstep@yandex.ru

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 26.05.2025
Поступила после рецензирования / Revised 04.09.2025
Принята к публикации / Accepted 09.09.2025



Оригинальная статья

Система автоматизированного мониторинга фенотипических характеристик северных оленей (*Rangifer tarandus*) на основе технологий AutoML

В. А. Соболевский, К. А. Лайшев 

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
 layshev@mail.ru

Аннотация

Современные системы автоматизированного мониторинга, применяемые в животноводстве и природоохранной деятельности, требуют эффективных методов компьютерного зрения для отслеживания характеристик животных. Настоящее исследование представляет систему автоматизированного мониторинга состояния животных на базе сверточной нейронной сети YOLOv11. Оценка проводилась на специализированных наборах данных, содержащих изображения оленей и соответствующие им заранее измеренные характеристики. С использованием программной платформы AutoGenNet автоматизированы процессы оптимизации гиперпараметров и конфигураций архитектур, что позволяет упростить и ускорить адаптацию предложенной модели для мониторинга разных видов животных. Результаты демонстрируют эффективность использования YOLOv11 для решения рассмотренной задачи. Исследование подтверждает эффективность AutoGenNet в автоматизации создания моделей мониторинга фенотипических характеристик северных оленей (*Rangifer tarandus*), позволяя упростить и ускорить внедрение систем искусственного интеллекта в современное животноводство. Полученные биометрические данные позволяют рассчитывать производно-оценочные показатели (живая масса, мышечная масса, репродуктивный потенциал), формируя основу для управленческих решений. Важнейшим достижением является реализация принципа бесконтактного мониторинга, исключающего стресс-факторы фиксации животных и обеспечивающего соответствие стандартам биоэтики. Успешная апробация на северных оленях, представляющих собой комплексный биологический эталон из-за экстремальной изменчивости признаков, гарантирует переносимость метода на другие виды сельскохозяйственных животных (свиньи, овцы и т. д.) в менее требовательных условиях. Реализованная система автоматизированного мониторинга фенотипических характеристик северных оленей, основанная на архитектуре YOLOv11 и платформе AutoGenNet, подтвердила свою технологическую состоятельность и практическую значимость.

Ключевые слова: северный олень, фенотипические показатели, моделирование, глубокое обучение, распознавание объектов, AutoML, YOLOv11

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №24-16-20017, <https://rscf.ru/project/24-16-20017/>, и Санкт-Петербургского научного фонда.

Благодарности. Организации за финансовую поддержку; рецензенту за рекомендации, коллегам за оказанную помощь.

Для цитирования: Соболевский В.А., Лайшев К.А. Система автоматизированного мониторинга фенотипических характеристик северных оленей (*Rangifer tarandus*) на основе технологий AutoML. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(3):480–485. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-480-485>

An automated monitoring system for phenotypic characteristics of Reindeer (*Rangifer tarandus*) using AutoML technologies

Vladislav A. Sobolevsky, Kasim A. Laishev✉

Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences,
Saint Petersburg, Russian Federation
✉layshev@mail.ru

Abstract

Contemporary automated monitoring systems in animal husbandry and environmental protection rely on advanced computer vision methods to evaluate animal traits. This research introduces an automated animal condition monitoring system using the YOLOv11 convolutional neural network. The system was tested on specialized datasets featuring images of deer alongside their pre-measured attributes. Through the AutoGenNet software platform, processes such as hyperparameter tuning and architecture configuration were automated, streamlining and accelerating the adaptation of the model for monitoring various animal species. The findings highlight the effectiveness of YOLOv11 for this application. Additionally, the study validates AutoGenNet's role in automating the development of models for monitoring reindeer phenotypic characteristics, supporting the integration of AI systems in modern animal husbandry. The biometric data obtained allow for the calculation of derivative metrics—like live weight, muscle mass, and reproductive potential—that inform management decisions. A significant accomplishment is the deployment of contactless monitoring, which removes stress linked to animal handling and adheres to bioethical standards. Successful trials on reindeer, which pose a complex biological challenge due to high variability in characteristics, ensure the method's applicability to other livestock (such as pigs and sheep) under less stringent conditions. The developed automated monitoring system for reindeer phenotypic characteristics, based on YOLOv11 and AutoGenNet, has proven both technologically feasible and practically valuable.

Keywords: reindeer, phenotypic metrics, modeling, deep learning, object recognition, AutoML, YOLOv11

Funding. This study was supported by the Russian Science Foundation (grant No. 24-16-20017, <https://rscf.ru/project/24-16-20017/>), and the St. Petersburg Science Foundation.

Acknowledgements. We thank the organizations for their financial support, the reviewer for valuable recommendations, and our colleagues for their assistance.

For citation: Sobolevsky V.A., Laishev K.A. An automated monitoring system for phenotypic characteristics of Reindeer (*Rangifer tarandus*) using AutoML technologies. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(3):480–485. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-480-485>

Введение

Внедрение автоматизированных систем мониторинга физиологических и продуктивных характеристик животных представляет собой критически важное направление цифровизации современного агропромышленного комплекса. Традиционные методы визуальной оценки поголовья становятся экономически и технологически несостоятельными в условиях крупных фермерских хозяйств [14], где численность стад превышает тысячи голов, а требования к точности управленческих решений экстраполируются на уровень отдельных особей. Ручной сбор данных о динамике веса, двигательной активности,

состоянии кожных покровов или репродуктивных признаках сопряжен с существенными трудозатратами, субъективизмом оценок и рисками пропуска патологий на ранних стадиях. Автоматизация этих процессов посредством компьютерного зрения решает фундаментальную проблему оперативного получения объективных метрик в непрерывном режиме, что недостижимо при использовании периодических выборочных замеров [2, 3, 7].

Экономическая целесообразность таких систем обусловлена их прямым влиянием на ключевые производственные показатели. Точное определение индивидуальных норм кормления на

основе автоматической оценки упитанности по фото или видеоданным позволяет сократить перерасход кормов, минимизируя себестоимость продукции.

Биологическая значимость автоматизации проявляется в минимизации стресс-факторов при контроле состояния животных. Бесконтактные технологии исключают необходимость фиксации особей для взвешивания или осмотра. Экологический аспект связан с возможностью мониторинга выбросов метана через корреляцию с характеристиками пищеварения, оцениваемыми по визуальным признакам. Переход к прецизионному животноводству на основе объективных данных позволяет повысить уровень продовольственной безопасности, экономической устойчивости и соблюдения стандартов ответственного животноводства в глобальном масштабе.

Материалы и методы

Алгоритмическое и программное обеспечение. Основой для предлагаемой системы автоматизированного мониторинга характеристик животных предложена архитектура сверточной нейронной сети YOLOv11 [9]. Она представляет собой современную эволюцию архитектур семейства You Only Look Once, демонстрирующую значительные улучшения в задачах компьютерного зрения, особенно в области распознавания характеристик объектов [5, 6, 8]. Модель сочетает усовершенствованную архитектуру с оптимизированными процессами обучения, обеспечивая высокую точность локализации и классификации при сохранении вычислительной эффективности. Ключевым достижением YOLOv11 является внедрение усовершенствованного блока Cross Stage Partial, который оптимизирует скорость обработки данных и улучшает извлечение пространственных признаков. Этот архитектурный элемент критически важен для детального анализа характеристик объектов, к примеру, таких как форма и текстура коров, что подтверждается тестированием модели YOLO11 на наборе данных COw Localization (COLO) [4].

Многозадачность архитектуры YOLOv11 расширяет ее применимость для комплексного анализа характеристик. Поддержка режимов сегментации экземпляров (YOLO11-seg), оценки позы (YOLO11-pose) и ориентированного детектирования (YOLO11-obb) позволяет решать взаимосвязанные задачи одновременно. Например, при мониторинге животных модель может одновре-

менно детектировать особей, сегментировать их контуры для оценки морфометрии и анализировать позу для выявления поведенческих паттернов.

Несмотря на преимущества, эффективность YOLOv11 варьируется в зависимости от типа решаемой задачи. Модели на базе двухэтапных архитектур (например, Faster R-CNN [10] или VGG19 [11]) превосходят YOLOv11 в сценариях, требующих экстремально детального анализа текстур или семантической сегментации высокого разрешения, что обусловлено их способностью к итеративному уточнению признаков. Однако для большинства прикладных задач, где баланс между скоростью и точностью критичен, YOLOv11 остается оптимальным выбором. Исходя из описанных причин, именно архитектура YOLOv11 была выбрана для решения поставленной задачи.

Эффективность модели в условиях ограниченных наборов обучающих данных обеспечивается за счет интеграции методов автоматизированного машинного обучения (AutoML). Платформа AutoGenNet [12] реализует модифицированный генетический алгоритм для оптимизации гиперпараметров и конфигураций архитектуры. Это позволяет быстро адаптировать YOLOv11 к распознаванию характеристик разных животных. Также использование этой платформы позволяет реализовывать полнофункциональное программное обеспечение на базе обученной модели YOLOv11 без привлечения специалистов в машинном обучении. Все это позволяет снизить затраты и ускорить развертывание систем искусственного интеллекта в животноводстве [1, 13].

Обучающие данные. Северные олени представляют собой уникальный и высокорелевантный объект для валидации систем автоматизированного распознавания характеристик животных в силу комплекса биологических, экологических и технологических факторов. Их морфофизиологические адаптации к экстремальным условиям Арктики формируют широкий спектр визуально детектируемых признаков, создающих идеальные условия для стресс-тестирования алгоритмов компьютерного зрения. Сезонная динамика мехового покрова, варьирующаяся от густого белого зимнего до темного летнего окраса, предоставляет естественную модель для оценки устойчивости систем к изменениям текстуры и цвета. Полиморфизм роговой системы, проявляющийся в половых, возрастных и сезонных различиях, формирует сложный объект для распознавания морфометрических параметров.

Практическая значимость создания системы автоматизированного распознавания характеристик северных оленей определяется экономическими и экологическими особенностями северных регионов. Мониторинг упитанности через анализ объемов мышечной массы позволяет точно прогнозировать продуктивность стад, что критично для управления кормовой базой в условиях лимитированных пастбищных ресурсов. Автоматизация определения половозрастной структуры популяций решает проблему неинвазивной оценки репродуктивного потенциала, заменяя травматичные методы отлова. Компьютерное выявление патологий по текстуре кожных покровов обеспечивает раннюю диагностику, сокращая потери от падежа.

На основании приведенных причин для тестирования системы был выбран массив из 60 снимков северных оленей, полученных в ямальском опытном стаде (см. рисунок).

Результаты и обсуждение

Имеющийся обучающий набор был разбит на две подвыборки – обучающую (40 снимков) и тестовую (20 снимков). При этом в тестовой выборке присутствовали олени, которых не было в обучающей выборке. Это позволило повысить шанс выявления переобучения модели. В качестве распознаваемых параметров северных оленей были выбраны: высота в холке (см); обхват груди (см); длина туловища (см); высота в локте (см); глубина груди (см); ширина груди (см); ширина в маклаках (см).

Данный набор параметров был выбран исходя из того, что они визуальны различимы и могут быть выявлены моделью, с одной стороны, и могут использоваться для расчета вычисляемых параметров оленей (вес, количество мышечной массы, возраст и т. д.) с другой. Часть результатов тестирования обученной модели и итоговые метрики приведены в таблице.

Результаты тестирования модели распознавания характеристик животных

Results of the evaluation of the animal characteristics recognition model

| Параметры | Фенотипические показатели, см | | | | | | |
|--|-------------------------------|--------------|------------------|----------------|---------------|--------------|-------------------|
| | Высота в холке | Обхват груди | Косая длина тул. | Высота в локте | Глубина груди | Ширина груди | Ширина в маклаках |
| Реальные параметры оленя № 1 | 101 | 126 | 109 | 53 | 48 | 28 | 26 |
| Спрогнозированные параметры оленя № 1 | 105 | 130 | 108 | 56 | 48 | 29 | 25 |
| Реальные параметры оленя № 2 | 102 | 132 | 104 | 54 | 48 | 30 | 27 |
| Спрогнозированные параметры оленя № 2 | 102 | 132 | 104 | 54 | 48 | 30 | 27 |
| Среднеквадратичная ошибка распознавания параметра по всей тестовой выборке | 3,1 | 2,4 | 3,3 | 1,7 | 0,4 | 1,2 | 2,1 |



Пример снимка северного оленя из обучающей выборки
An example of a reindeer image from the training dataset

Представленные в таблице результаты тестирования показывают, что модель распознавала характеристики животного на изображении со средней ошибкой в 2 см. Это говорит о применимости модели для поставленной задачи.

Использование AutoGenNet в представленной задаче позволило повысить эффективность использования ресурсов. Модели YOLOv11 генерировались в автоматическом режиме, без привлечения специалистов в машинном обучении. В совокупности с достигнутой точностью это позволяет говорить о применимости предложенного подхода в животноводстве для мониторинга характеристик различных животных.

Заключение

Реализованная система автоматизированного мониторинга характеристик северных оленей, основанная на архитектуре YOLOv11 и платформе AutoGenNet, подтвердила свою технологическую состоятельность и практическую значимость. Экспериментальная валидация на специализированном наборе изображений ямальского стада продемонстрировала способность системы к точ-

ному распознаванию семи ключевых биометрических параметров со средней абсолютной ошибкой 2 см при работе на ранее незнакомых особях. Данный результат достигнут в условиях экстремально ограниченного объема обучающих данных (40 изображений), что подтверждает эффективность применения модифицированного генетического алгоритма AutoGenNet для автоматической оптимизации гиперпараметров и архитектурных конфигураций YOLOv11. Каскадная обработка изображений, обеспечивающая одновременную сегментацию контуров и регрессию морфометрических показателей, устранила необходимость ручного измерения, снизив временные затраты на мониторинг по сравнению с традиционными методами.

Выбор YOLOv11 в качестве базовой архитектуры доказал свою обоснованность в контексте требований прецизионного животноводства. Полученные биометрические данные позволяют рассчитывать производно-оценочные показатели (живая масса, мышечная масса, репродуктивный потенциал), формируя основу для управленческих решений. Важнейшим достижением является реализация принципа бесконтактного мониторинга, исключая стресс-факторы фиксации животных и обеспечивающего соответствие стандартам биоэтики.

Платформа AutoGenNet продемонстрировала решающую роль в преодолении кадрового дефицита: автоматизация процессов обучения и оптимизации моделей позволила развернуть систему без привлечения специалистов в области машинного обучения, сократив сроки внедрения. Это подтверждает тезис о технологической доступности решений на базе AutoML для животноводческих предприятий. Успешная апробация на северных оленях, представляющих собой комплексный биологический эталон из-за экстремальной изменчивости признаков, гарантирует переносимость метода на другие виды сельскохозяйственных животных (свиньи, овцы и т. д.) в менее требовательных условиях.

Список литературы / References

1. Соболевский В.А., Лайшев К.А. Автоматические системы мониторинга животных на основе технологий AutoML. *Нормативно-правовое регулирование в ветеринарии*. 2024;(3): 114–116. <https://doi.org/10.52419/issn2782-6252.2024.3.114>
- Sobolevsky V.A., Laishev K.A. Automatic animal monitoring systems based on AutoML technologies. *Legal Regulation in*

Veterinary Medicine. 2024;(3):114–116. (In Russ.) <https://doi.org/10.52419/issn2782-6252.2024.3.114>

2. Chelotti J.O., Martinez-Rau L.S., Ferrero M., et al. Livestock feeding behaviour: A review on automated systems for ruminant monitoring. *Biosystems Engineering*. 2024;246:150–177. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2024.08.003>

3. Chen T., Zheng H., Chen J., et al. Novel intelligent grazing strategy based on remote sensing, herd perception and UAVs monitoring. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2024;219:108807. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108807>

4. Das M., Ferreira G., Chen C.P.J. Evaluating model generalization for cow detection in free-stall barn settings: Insights from the COW Localization (COLO) dataset. *Smart Agricultural Technology*. 2025;11:101054. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101054>

5. Djedidi M., Hassen M.B., Mrad H., Koubaa A. Real time contaminants detection in wood panel manufacturing process using YOLO algorithms. *Procedia Computer Science*. 2025; 253:1226–1235. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.01.184>

6. Hu S., Tang G., Yu K., et al. Embedded YOLO v8: Real-time detection of sugarcane nodes in complex natural environments by rapid structural pruning method. *Measurement*. 2025; 242:116291. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.116291>

7. Leliveld L.M.C., Brandolese C., Grotto M., et al. Real-time automatic integrated monitoring of barn environment and dairy cattle behaviour: Technical implementation and evaluation on three commercial farms. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2024;216:108499.

8. Nandal P., Mann P., Bohra N., et al. Tropical cyclone intensity estimation based on YOLO-NAS using satellite images in real time. *Alexandria Engineering Journal*. 2025;113:227–241. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.10.072>

9. Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. You only look once: Unified, real-time object detection. In: *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Las Vegas, NV, USA; 2016, pp. 779–788. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.91.2016:779-788>.

10. Ren S., He K., Girshick R., Sun J. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks. *Computer Vision and Pattern Recognition*. 2015; [arXiv:1506.01497v3 \[cs\]](https://arxiv.org/abs/1506.01497v3). <https://doi.org/10.48550/arXiv.1506.01497>

11. Simonyan K., Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. *International Conference on Learning Representations 2015*. [arXiv:1409.1556 \[cs.CV\]](https://arxiv.org/abs/1409.1556). <https://doi.org/10.48550/arXiv.1409.1556>

12. Sobolevskii V. Creation of automatic monitoring systems using AutoML technologies. In: Ilin, I., Youzhong, M. (eds) *Digital Systems and Information Technologies in the Energy Sector: Lecture Notes in Networks and Systems*. Vol. 1244. Springer, Cham; 2025. https://doi.org/10.1007/978-3-031-80710-7_29

13. Соболевский В.А., Колпащиков Л.А., Розенфельд С.Б., Михайлов В.В. Мониторинг крупных позвоночных арктической фауны с использованием интеллектуальной технологии AutoML. *Зоологический журнал*. 2025;104(3):112–122. <https://doi.org/10.31857/S0044513425030095>.

- Sobolevskii V.A., Kolpaschikov L.A., Rozenfeld S.B., Mikhailov V.V. Monitoring larger vertebrates of the Arctic fauna using intelligent AutoML technology. *Zoologičeskij žurnal*. 2025; 104(3):112–122. <https://doi.org/10.31857/S0044513425030095>

14. Xu P., Zhang Y., Ji M., et al. Advanced intelligent monitoring technologies for animals: A survey. *Neurocomputing*. 2024;585:127640. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2024.127640>

Об авторах

СОБОЛЕВСКИЙ Владислав Алексеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-7685-4991>, Scopus Author ID: 57204686470, SPIN: 1659-5622, email: arguzd@yandex.ru

ЛАЙШЕВ Касим Анверович, доктор ветеринарных наук, главный научный сотрудник, профессор, академик РАН, <https://orcid.org/0000-0003-2490-6942>, SPIN: 1839-1453, e-mail: layshev@mail.ru

Вклад авторов

Соболевский В.А. – разработка концепции, методология, проведение статистического анализа, проведение исследования, создание черновика рукописи; **Лайшев К.А.** – методология, проведение исследования, редактирование рукописи, визуализация

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

SOBOLEVSKY, Vladislav Alekseevich, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-7685-4991>, Scopus Author ID: 57204686470, SPIN: 1659-5622, e-mail: arguzd@yandex.ru

LAISHEV, Kasim Anverovich, Dr. Sci. (Vet.), Chief Researcher, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, <https://orcid.org/0000-0003-2490-6942>, SPIN: 1839-1453, e-mail: layshev@mail.ru

Authors' contribution

Sobolevsky V.A. – conceptualization, methodology, formal analysis, investigation, writing – original draft; **Laishev K.A.** – methodology, investigation, writing – review & editing, visualization

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 19.06.2025

Поступила после рецензирования / Revised 23.07.2025

Принята к публикации / Accepted 30.07.2025



Обзорная статья

Тепловизионные технологии в изучении животных

Л. Н. Владимиров¹, Г. Н. Мачахтыров¹, В. А. Мачахтырова^{✉,1},
Я. Л. Шадрина², В. В. Слепцова¹, В. А. Алексеев³

¹Академия наук РС(Я), г. Якутск, Российская Федерация

²ЯНИИСХ им. М.Г. Сафронова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

³Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация

✉ varvara-an@mail.ru

Аннотация

Тепловизионная технология, или инфракрасная термография (ИКТ), за последние годы стала важным инструментом для неинвазивного изучения различных физиологических процессов у животных, состояния их здоровья и поведенческих реакций. Метод позволяет регистрировать распределение поверхностной температуры тела, что дает возможность бесконтактно оценивать терморегуляцию, уровень стресса, наличие воспалительных процессов и некоторые адаптационные механизмы животных. Часто данный подход применяется при разнообразных физических нагрузках животных в условиях, где важна способность организма поддерживать температурный гомеостаз, включая негативное влияние комплекса факторов окружающей среды. Кроме того, метод применяется в некоторых исследованиях, посвященных анализу поведенческих реакций у разных видов животных, таких как социальное взаимодействие и адаптация к изменению климата. В данной статье рассматриваются современные подходы к использованию тепловизионной технологии в научных исследованиях в разных направлениях по изучению как домашних, так и диких видов млекопитающих. Показано, что ИКТ может быть эффективно использована в комплексе с другими методами диагностики и наблюдения, что делает ее ценным инструментом не только в биомедицинских, но и экологических и физиологических исследованиях. Также рассмотрены перспективы развития данной технологии, включая интеграцию с беспилотниками, системами искусственного интеллекта и мобильными приложениями. Дальнейшие разработки в области стандартизации протоколов проведения данных исследований по изучению специфичных реакций организма животных в различных условиях, несомненно, будут способствовать развитию как фундаментальных, так и прикладных исследований и помогут расширить применение тепловизионных технологий, в частности, в коневодстве.

Ключевые слова: тепловизионные исследования, терморегуляция, неинвазивная диагностика, якутская лошадь, коневодство

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-16-20083 «Изучение терморегуляторных механизмов лошадей для создания системы оценки и мониторинга холодовой адаптации на основе применения термографических методов», <https://rscf.ru/project/25-16-20083/> с софинансированием АНО «Якутский научный фонд».

Для цитирования: Владимиров Л.Н., Мачахтыров Г.Н., Мачахтырова В.А., Шадрина Я.Л., Слепцова В.В., Алексеев В.А. Тепловизионные технологии в изучении животных. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(3):486–499. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-486-499>

Thermal imaging technologies in the study of animals

Leonid N. Vladimirov¹, Grigory N. Machakhtyrov¹, Varvara A. Machakhtyrova^{✉,1},
Yana L. Shadrina², Vasilena V. Slepsova¹, Vladislav A. Alekseev³

¹Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, Russian Federation

²Safronov Yakut Scientific Research Institute of Agriculture, Yakutsk, Russian Federation

³Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

✉varvara-an@mail.ru

Abstract

Thermal imaging technology, commonly referred to as infrared thermography (IRT), has become a valuable non-invasive method for investigating various physiological processes, health conditions, and behavioral responses in animals. This method enables the recording of surface body temperature distribution, allowing for contactless assessment of thermoregulation, stress levels, inflammatory processes, and certain adaptive mechanisms in animals. IRT is frequently used to monitor animals during physical activities under conditions where maintaining thermal homeostasis is critical, including exposure to complex environmental stressors. Moreover, it is used in studies examining behavioral responses across diverse animal species, such as social interactions and adaptation to climate change. This article reviews modern approaches and applications of thermal imaging technology in research involving both domestic and wild mammal species. It highlights the effective integration of IRT with other diagnostic and observational methods, making it a valuable tool not only in biomedical research but also in environmental and physiological studies. Additionally, the article discusses future prospects for this technology, including its integration with unmanned aerial vehicles (drones), artificial intelligence systems, and mobile platforms. Progress in standardizing research protocols for assessing specific physiological responses in animals under various conditions is expected to enhance both fundamental and applied research. These developments will also promote the wider use of thermal imaging technologies, particularly in horse breeding.

Keywords: thermal imaging studies, thermoregulation, non-invasive diagnostics, Yakut horse, horse breeding

Funding. This study was supported by the Russian Science Foundation under grant No. 25-16-20083, titled “Investigating thermoregulatory processes in horses to establish a system for assessing and monitoring adaptation to cold environments through thermographic methods” (<https://rscf.ru/project/25-16-20083/>), with additional co-financing provided by the Autonomous Nonprofit Organization “Yakut Scientific Foundation”.

For citation: Vladimirov L.N., Machakhtyrov G.N., Machakhtyrova V.A., Shadrina Ya.L., Slepsova V.V., Alekseev V.A. Thermal imaging technologies in the study of animals. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(3):486–499. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-486-499>

Введение

Тепловизионные технологии представляют собой высокоточный инструмент для проведения наблюдения, бесконтактного (неинвазивного) измерения температуры и формирования изображения объектов, находящихся в поле зрения прибора тепловизора, на основе разности их температур относительно окружающей среды. Основной принцип работы тепловизора базируется на улавливании с помощью микроболюметрической матрицы излучаемых от объекта инфракрасных волн, интенсивность которых пропорциональна их температуре, которые он пре-

образует в электрический сигнал и формирует термограмму – цветное изображение распределения температур. Современные тепловизоры выпускаются в разных модификациях и обладают высокой чувствительностью (точность измерения до $\pm 0,1-0,5$ °C), широким диапазоном измерений (от -20 °C до $+150$ °C и выше), разрешением матрицы от 160×120 до 640×480 пикселей и оптическим разрешением (объективы с углом обзора $24^\circ-45^\circ$). Многие модели позволяют настраивать коэффициент излучения, что важно при съемке животных с разным типом шерстного покрова [1, 2]. Области применения

тепловизоров чрезвычайно разнообразны – от медицины и технического контроля, от экологических до биологических исследований.

Широкое использование тепловизионных устройств становится одним из передовых методов исследования при изучении животных благодаря своей способности неинвазивно регистрировать распределение температуры тела у животных и проводить анализ его динамики в ответ на внешние условия и раздражители [3–7]. В данной статье представлен обзор использования тепловизионных технологий в научных исследованиях, направленных на изучение диких и домашних животных.

*Применение тепловизионных технологий
в экологии, в мониторинге
биоразнообразия и экосистем*

Тепловизионные технологии, активно развивающиеся в последние десятилетия, становятся важным инструментом для мониторинга биоразнообразия и состояния экосистем. В экологии управление природными биоресурсами требует надежных, быстрых и доступных методов исследования популяций диких животных. Особое внимание уделяется их роли в оценке численности популяций исчезающих видов, создании карт мест обитания животных, анализе влияния климатических изменений на адаптацию организмов, а также в управлении инвазивными видами для минимизации их воздействия на природные экосистемы. В связи с этим инфракрасная термография (ИКТ) часто используется для дистанционного мониторинга численности популяций диких видов, особенно на больших территориях или в отдаленных и труднодоступных районах ареала обитания животных [4, 8, 9]. В такого рода исследованиях широко используются беспилотные летательные аппараты, оснащенные тепловизионными камерами, например, для распознавания видов диких млекопитающих и определения численности популяции. Так, применение тепловизионных изображений было эффективным для идентификации видов оленей – благородного оленя (*Cervus elaphus*) и косули (*Capreolus capreolus*) [4], когда можно было определить размер и структуру популяции по количеству оленей, их возраст и пол, а также распределение оленей по пастбищам с различными типами растительности в определенные сезоны. Результаты подсчетов по проведенным опытам и наблюдениями дали среднюю точечную оценку в 77 оленей (95%-й доверительный интервал 71–83), представ-

ляющих 81–97 % известного ареала популяции. При этом полеты в период захода солнца дали оценки с наивысшей точностью, в пределах или близко к истинному ареалу популяции. Отмечается, что изменчивость оценок в первую очередь зависела от суточных климатических условий и времени суток. Такой мониторинг популяций и видов является важным элементом управления и сохранения видов, и тепловизионный метод станет одним из экономичных по времени и менее инвазивным, чем традиционные методы изучения популяций диких животных [3].

По данным Н.Л. Larsen и соавторов [9], использование информационно-коммуникационных технологий для наблюдения за дикими крупными животными является безопасным и эффективным. Предложенные системы обеспечивают высокоточную классификацию животных, а также предоставляют изображения идентифицированных особей, что повышает достоверность результатов. Это позволяет применять технологии как для определенных целей, так и для снижения риска конфликтов между людьми и дикой природой [9].

В последнее время усовершенствование характеристик инфракрасных тепловизионных сканеров способствовало их активному применению в полевых исследованиях для обнаружения, учета, изучения и фотографирования насекомых и животных, в том числе ночных млекопитающих [10]. Помимо этого, тепловизионная термография оказалась эффективной не только для наблюдения за живыми организмами, но и для поиска туш диких кабанов в определенных природных условиях, что зависит от степени их сохранности. Этот подход рассматривается как один из инструментов профилактики распространения инфекционных заболеваний среди популяций диких и домашних животных [11].

Одним из ключевых преимуществ тепловизионных исследований является возможность обнаруживать и отслеживать тепловые сигнатуры животных даже в условиях низкой видимости или густой растительности. Как отмечают В. Chang с соавторами [12] также важным фактором при интерпретации данных, полученных с помощью тепловизионных систем, являются сезонные колебания температуры окружающей среды. Наблюдения, выполненные в зимний период, характеризующийся отсутствием листвы на деревьях, показали более высокую эффективность обнаружения тепловых сигналов от животных благодаря уменьшению маскирующего эффекта раститель-

ного покрова. Помимо этого авторами выявлено, что максимальная эффективность наблюдений достигается в пасмурные дни и в вечерние часы, когда тепловая контрастность между животными и окружающей средой наиболее выражена [12].

Применение тепловизионных технологий не ограничивается только наблюдением за исчезающими видами. Они также эффективны для создания подробных карт мест обитания и маршрутных схем различных животных. Современные автономные системы на основе алгоритмов, таких как YOLOv8, позволяют автоматически обнаруживать и классифицировать тепловые профили животных с помощью данных, собранных дронами. Эти системы способны работать в режиме реального времени, предоставляя операторам понятный интерфейс для анализа информации непосредственно на мобильных устройствах в зависимости от конкретных потребностей исследователей. Важно отметить, что эти технологии особенно полезны для мониторинга экосистем в ночное время или в условиях низкой видимости, когда традиционные методы оказываются более ограниченными и менее эффективными при таких обстоятельствах. Согласно исследованиям J. Hermann, Y. Toras, J. Hoffmann и других, дроны, оснащенные тепловизорами и RGB-камерами, способны осуществлять мониторинг на значительных территориях и в труднодоступных районах со сложным ландшафтом, например, в горных и лесных местностях. Это делает их эффективным инструментом для долгосрочного мониторинга экосистем и оценки влияния климатических изменений на биоразнообразие [13].

В последнее время разработаны современные тепловизионные устройства, обеспечивающие передовые возможности для анализа данных благодаря радиометрическому режиму, который позволяет измерять температуру для каждого пикселя изображения на термографе. Например, беспилотник JOUAV CW-25E, оснащенный инфракрасной камерой с разрешением 640×512 пикселей, обеспечивает точное наблюдение за животными в любое время суток. Оснащение таких систем комплексом специализированных инструментов особенно полезно для мониторинга исчезающих видов, численность которых критически мала и требует постоянного наблюдения. Использование дронов с тепловизионными камерами позволяет исследователям собирать данные об этих животных, их этологии без прямого контакта в их естественной среде обитания, что

минимизирует стресс у животных и снижает риск отклонений их поведения при вынужденном контакте с человеком [14].

Наряду с изучением задач в области сохранения отдельно взятых видов животных дикой фауны, тепловизионные технологии также успешно применяются для управления инвазивными видами животных на больших территориях. Как отмечают S. Dawson, P. Adams, T. Low с соавторами, проект ThermEye представляет собой пример успешного использования искусственного интеллекта для автоматического анализа тепловизионных изображений для обнаружения животных, определения видов и плотности их популяции. Алгоритм способен четко различать виды животных, что позволяет землепользователям и экологами эффективно отслеживать плотность популяций таких вредителей, как дикие свиньи и олени. Информация, собранная с помощью подобных систем, имеет большое значение для решения задач, связанных с мониторингом экосистем и воздействием климатических изменений [15].

Несмотря на многочисленные преимущества, применение тепловизионных технологий сталкивается с рядом ограничений. Например, остаются нерешенными вопросы, связанные, в частности, со сложностями ведения мониторинга за животными, характеризующимися высокой степенью подвижности, а также с отсутствием достаточного количества репрезентативных данных для составления необходимых алгоритмов. Между тем, тепловизионные исследования животных стали важным эффективным инструментом для мониторинга численности популяций, анализа их пространственного распределения и изучения определенных физиологических реакций животных в различных экологических условиях. Для повышения точности, надежности и масштабируемости таких исследований необходимы дальнейшие разработки и расширение баз данных по исследуемым объектам, что откроет новые возможности для использования тепловидения в экологических исследованиях.

Одним из главных барьеров является высокая стоимость оборудования, что затрудняет доступ к нему для малых предприятий и бюджетных секторов [16]. Современные тепловизионные камеры с высоким разрешением требуют значительных инвестиций в производство. Кроме того, эффективность использования тепловизоров может снижаться в определенных погодных условиях, та-

ких как сильный дождь или густой туман. Эти факторы необходимо учитывать при планировании исследований, особенно в труднодоступных регионах, где надежность оборудования имеет решающее значение для успешного мониторинга животных.

Применение тепловизионных технологий в ветеринарии

Метод инфракрасной термографии, являясь неинвазивным методом измерения температуры животного, создавая визуализацию распределения тепла поверхности кожи, стал находить широкое применение в ветеринарной практике. Одним из основных преимуществ тепловизионной съемки в ветеринарии считается ее способность обнаруживать проблемы со здоровьем животного на ранней стадии болезни. Это происходит из-за того, что малейшие изменения в терморегуляции животного могут указывать на наличие у него воспаления, травмы или инфекции. Так, в молочном скотоводстве тепловизионные технологии нашли применение при ранней диагностике воспалительных процессов в конечностях крупного рогатого скота, а своевременное и эффективное выявление болезней и патологий в конечностях дойных коров, особенно на ранних стадиях, имеет большое практическое значение для поддержания здоровья и уровня производства молока в хозяйствах [16–18]. Как отмечают G. Nag-

ris-Bridge и другие [19], наравне с показателем максимальной температуры и визуализацией области копыта, необходимо учитывать другие статистические величины как расчеты достоверности, стандартное отклонение и коэффициент вариации, что делает метод наиболее точным при диагностике и выявлении дерматита у крупного рогатого скота. При этом авторы установили, что инфракрасная термография позволяет точно обнаруживать области поражения копыт путем измерения изменений в температуре коронарного пояса и поверхности кожи копыта, тем самым обеспечивая раннее выявление заболеваний [18,19].

В работе A. Verduzco-Mendoza с соавторами отмечается, что инфракрасная термография крайне чувствительна к изменениям температуры тела до точности 0,1 °С, зависящим от сужения или расширения поверхностных кровеносных сосудов, благодаря чему этот метод служит надежной оценкой при проведении хирургических операций, при ожоговых травмах и воспалениях [20].

Кроме того, инфракрасная термография активно применяется в диагностике мастита, одного из самых распространенных и экономически значимых заболеваний у дойных коров [21, 22].

Исследования Mansoor Nabi et al. показали, что ИКТ может применяться для выявления субклинического и клинического мастита у молочных коров (рис. 1). При этом количество сомат-

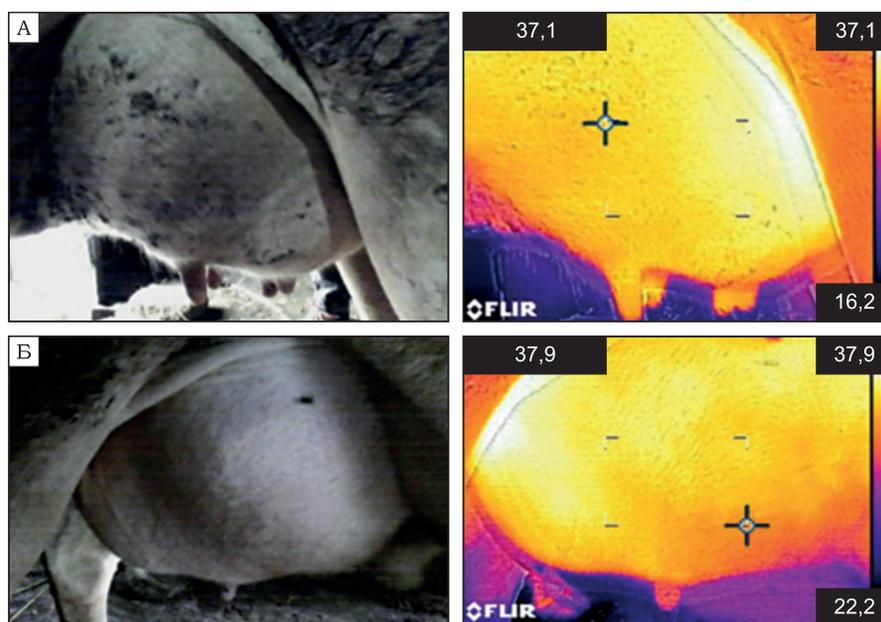


Рис. 1. Тепловые изображения здоровой четверти вымени (А) и четверти вымени с маститом (Б) [22]

Fig. 1. Thermal images of a healthy udder quarter (А) and an udder quarter with mastitis (Б) [22]

тических клеток в молоке (SCC), превышающее 200 000 клеток/мл, служило золотым стандартом для выявления инфекции. ИРТ продемонстрировала умеренную чувствительность (65 %) и высокую специфичность (84 %) для выявления субклинического мастита. В клинических случаях как чувствительность (86,11 %), так и специфичность (89 %) были выше. ИРТ выявила значительные колебания температуры между поверхностью кожи тела и вымени, главным образом в клинических случаях [22].

Одним из существенных преимуществ тепловизионных исследований является выявление изменений температуры поверхности тела животного, вызванных различными проблемами в физиологическом функционировании организма, такими как нарушение кровообращения [23, 24]. Например, в экспериментах на кроликах с тромбозом глубоких вен ИКТ показала повышение температуры пораженной конечности от 39,14–39,24 °С до 41,08–41,91 °С, что подтверждает чувствительность метода к изменениям кровообращения при диагностике сосудистых патологий [26]. В случае изучения ожогов на поверхности кожи свиней исследования Jeng J.C. с соавторами продемонстрировали, что повреждения увеличивают кровоток на 15–20 %, тогда как при глубоких ожогах наблюдается снижение кровотока на $4 \pm 2,1\%$ до $27 \pm 11,8\%$ [26]. Кроме того, как отмечают Vitorino D.V. с соавторами, повышение температуры воздуха вызывает изменения в показателях термографии кожи у лошадей, что важно для понимания адаптации животных к стрессовым условиям [27]. Такие данные демонстрируют потенциал ИКТ не только для применения в диагностике, но и для оценки степени повреждений при различных травмах и ранах животных.

Следовательно, ИКТ в режиме реального времени позволяет выявлять изменения интенсивности теплового излучения, отражающие динамику кровообращения и микроциркуляции, что делает ее ценным инструментом для неинвазивной оценки сосудистых нарушений. В хирургии метод эффективен для мониторинга жизнеспособности тканей после реконструктивных вмешательств и анастомозов, позволяя оценить восстановление перфузии. При ожоговых поражениях ИКТ помогает дифференцировать зоны некроза, ишемии и воспаления, что способствует более точному определению глубины поврежде-

ния. Вместе с тем, для повышения достоверности диагностики авторы рекомендуют использовать инфракрасную термографию в комплексе с другими визуализирующими и диагностическими методами.

В коневодстве метод инфракрасной термографии является одним из основных способов проведения диагностики у лошадей. В клинической практике такие системы помогают быстро и точно выявлять патологии и воспалительные процессы, анализируя минимальные изменения температуры в конечностях лошадей [28]. Это особенно важно для спортивной медицины, где своевременная диагностика необходима для предотвращения серьезных травм. M. Dymek, M. Worowska, N. Kozłowska с соавторами показали, что повышение температуры кожи в области суставов может указывать на развитие воспаления за две недели до проявления клинических симптомов, что делает ИКТ ценным инструментом для ранней диагностики артритов и тендовагинитов у лошадей [28].

Применение тепловизионных технологий в физиологии

В ряде исследований отмечается перспективность применения инфракрасной термографии в спортивной физиологии для раннего выявления перегрузок, воспалительных процессов и контроля этапов восстановления спортивных животных [29]. В частности, ИКТ демонстрирует высокую эффективность при оценке терморегуляторных реакций скаковых лошадей в условиях физических нагрузок. Исследование J.R. Amory, I.A. Wright и Mason C.S проводилось на группе лошадей, выполнявших стандартизированную тренировку на беговой дорожке [30]. Температура поверхности кожи измерялась до и после нагрузки в нескольких анатомических точках: области плюсны, предплечья, спины и бедра. Измерения проводились с помощью тепловизора при контролируемых условиях окружающей среды. После физической нагрузки наблюдалось значительное повышение температуры кожи в области конечностей, особенно в дистальных участках. Наибольшие изменения зафиксированы в плюсневой области, что связано с высокой мышечной активностью и увеличением кровотока [30].

Одной из серьезных проблем в животноводстве являются стрессы у животных, вызываемые различными факторами и проведением зооветеринарных мероприятий. Так исследованиями Aragona F. с соавторами, проведенными у лоша-

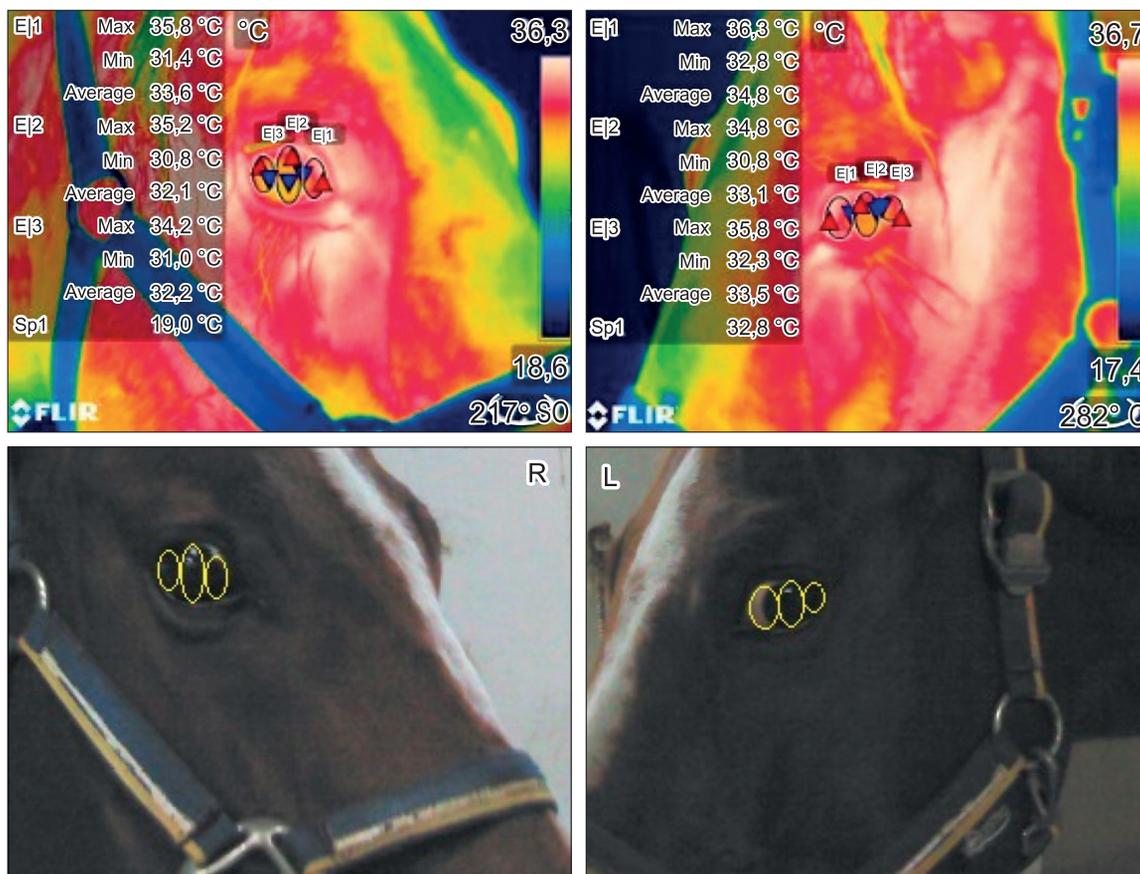


Рис. 2. Репрезентативные левый и правый глаз с выбранными областями интереса (EL1 (медиаьный угол глаза), EL2 (центральный угол роговицы) и EL3 (латеральный угол глаза)) и полученными температурами EL1max, EL1avg и EL1min, EL2max, EL2avg и EL2min и EL3max, EL3avg и EL3min у лошади [31]

Fig. 2. Representative images of the left and right eyes with the selected ROIs (EL1 (medial canthus), EL2 (central cornea) and EL3 (lateral canthus)) and the obtained temperatures EL1max, EL1avg and EL1min, EL2max, EL2avg and EL2min and EL3max, EL3avg, and EL3min in a horse [31]

дей, было установлено, что стрессовые ситуации сопровождаются снижением температуры в области носа и глаз (рис. 2), связанным с активацией симпатической нервной системы [31].

Аналогичные данные приводят Т. Travain с соавторами, когда у собак было установлено снижение температуры в носовой и в глазной области при эмоциональном напряжении [32]. Эти данные позволяют использовать ИКТ для оценки уровня стресса при транспортировке, ветеринарных процедурах и и других зооветеринарных мероприятиях, являющихся стрессовыми для животных.

М. Domino с соавторами использовали инфракрасную термографию в качестве потенциально полезного инструмента для обнаружения беременности у непарнокопытных [33]. Для этого методом ИКТ измеряли температуру поверхности тела, которая, как правило, увеличивается со

сроком беременности из-за увеличения кровотока и метаболической активности в матке и тканях плода. Авторы подчеркивают, что данное исследование было направлено на разработку новых методов цифровой обработки тепловых изображений беременных кобыл для раннего обнаружения беременности с более высокой точностью [33].

Исходя из вышеизложенного следует, что преимуществами тепловизионного метода являются его безопасность, высокая чувствительность и возможность дистанционного применения для изучения животных. Современные исследования демонстрируют эффективность ИКТ как инструмента для комплексной оценки и мониторинга здоровья, благополучия и физиологического состояния животных. Использование тепловизоров в животноводстве способствует раннему обнаружению патологий, болезней и предотвраще-

нию распространения инфекционных заболеваний из-за точного выявления минимальных температурных отклонений у животных. В крупных хозяйствах, где стадо насчитывает сотни или даже тысячи животных, использование тепловизоров позволяет провести быстрое неинвазивное сканирование животных всего стада за сравнительно короткий срок и выявлять тех, у кого повышена температура поверхности всего тела или отдельно взятых его частей, что означает начало воспалительного процесса или болезни. Это не только сохраняет здоровье животных, но и способствует экономному расходованию средств на лекарственные препараты, так как лечение на ранних стадиях заболеваний обходится хозяйствам гораздо дешевле, чем борьба после обширного распространения инфекций.

Будущие направления развития тепловизионных исследований животных: перспективы технологии и интеграция ИИ

В последние годы технологические достижения в области тепловизионных исследований значительно расширили возможности изучения животных. Однако будущее этой области обещает еще более значительные прорывы, углубление понимания экосистем, терморегуляции и адаптации видов к изменяющимся условиям окружающей среды. Основными направлениями прогресса являются «миниатюризация» оборудования, интеграция искусственного интеллекта (ИИ), использование новых материалов для снижения стоимости и повышения чувствительности камер, а также применение облачных технологий для анализа данных в реальном времени [12, 24, 34, 35].

Одним из ключевых трендов является миниатюризация тепловизионных камер, что открывает новые горизонты для наблюдений за маленькими животными. Новые подходы к производству тепловизионных устройств позволяют значительно уменьшить размеры и стоимость оборудования. Например, камеры с разрешением до 1920×1080 пикселей могут быть произведены по более низкой цене, что сделает их доступными для массового использования в экологических исследованиях. Компактность таких устройств позволяет устанавливать их на дроны типа FPV, что особенно важно для работы в сложных ландшафтных условиях или при необходимости минимизации человеческого воздействия на естественную среду обитания животных, а также позволяет отслеживать термические паттерны таких мелких объектов для изучения, как грызу-

ны или насекомые, включая их ночную активность [24].

Параллельно с «миниатюризацией» развивается интеграция с искусственным интеллектом для автоматизации анализа больших объемов данных, собранных тепловизионными системами. Современные алгоритмы машинного обучения уже способны различать виды животных, таких как овцы, на основе тепловых сигнатур [35]. Кроме того, автономные системы на основе YOLOv8, описанные в недавних исследованиях, позволяют операторам управлять дронами и анализировать данные одновременно, что значительно снижает трудозатраты при анализе большого объема полученных данных [39]. Мобильные приложения, разработанные для таких систем, предлагают понятный интерфейс для анализа данных в режиме реального времени, что особенно полезно для мониторинга хищников и других видов животных в их естественной среде обитания.

Технологии ИИ обладают замечательной способностью автоматизировать анализ тепловизионных изображений с высокой эффективностью. Эта автоматизация значительно ускоряет процесс диагностики. Традиционный ручной анализ тепловизионных изображений может занимать много времени и быть подвержен человеческому фактору, но алгоритмы ИИ способны быстро и согласованно обрабатывать и интерпретировать большие объемы изображений [38]. Это особенно важно при работе с несколькими животными или в ситуациях, когда быстрое принятие решений критически важно, например, в экстренных случаях или во время хирургических операций. Например, в загруженной ветеринарной клинике ИИ может быстро анализировать тепловизионные изображения, полученные в разное время, чтобы отслеживать ход выздоровления животного. Сравнивая эти изображения, ИИ может обнаруживать едва заметные изменения температуры, которые могут остаться незамеченными невооруженным глазом, что позволяет ветеринарам точно определить проблемные области и принимать обоснованные решения о лечении [37].

Развитие технологий производства тепловизионных камер также играет важную роль в снижении их стоимости и повышении чувствительности. Например, компания Obsidian Sensors разработала инновационные тепловизионные устройства на основе стеклянных подложек, что снижает стоимость производства в сотни раз по сравнению с традиционными методами. Эти

устройства характеризуются высоким разрешением и большим углом обзора, что особенно важно для наблюдений за движущимися объектами. Разработка таких технологий открывает новые возможности для долгосрочного мониторинга экосистем и оценки влияния климатических изменений на биоразнообразие [40].

Сочетание тепловизионных данных с другими методами визуализации, например магнитно-резонансной томографией (МРТ) или компьютерной томографией (КТ), открывает новые горизонты для моделирования сложных патофизиологических процессов в организме животных. Такие данные имеют важное значение для выбора оптимальной стратегии лечения и прогнозирования исходов заболеваний [41].

Одним из ключевых направлений развития тепловизионных исследований является использование многослойных нейронных сетей для автоматизации анализа термографических изображений. Современные алгоритмы машинного обучения, такие как нейронные сети (CNN), уже демонстрируют высокую точность в классификации видов животных и распознавании их тепловых сигнатур даже в условиях ограниченной видимости. Так, система, основанная на CNN, разработанная S. Meivel и коллегами, позволяет точно определять тепловые паттерны различных видов, включая слонов, что особенно важно для экологических исследований и мониторинга популяций исчезающих видов [42].

Таким образом, тепловизионные исследования представляют собой перспективное направление в изучении животных, которое активно развивается благодаря прогрессу современных технологий, программ искусственного интеллекта и автоматизированных методов анализа огромного количества данных. Комбинация ИКТ с другими методами визуализации, использование многослойных нейронных сетей и применение компактных устройств открывают новые возможности для диагностики заболеваний, моделирования патологических процессов и мониторинга состояния животных в естественных условиях. При этом данные технологии применимы в ветеринарии, где изменение температурных показателей может служить индикатором стресса, адаптационных механизмов или заболеваний, а также для мониторинга за течением лечения и восстановления животных. Кроме того, тепловизионные технологии предоставляют информацию о текущих физиологических состояниях в опре-

деленных условиях окружающей среды, а также могут выявлять некоторые механизмы адаптации животных при воздействии различных факторов среды.

Однако остаются вызовы, такие как необходимость создания более сбалансированных наборов данных для обучения моделей ИИ и дальнейшее снижение стоимости оборудования, чтобы сделать эти технологии доступными для широкого круга исследователей.

*Перспективы применения
тепловизионных технологий
в табунном коневодстве
Республики Саха (Якутия)*

В России, охватывающей различные климатические зоны, особое место занимает Республика Саха (Якутия), занимающая примерно 1/5 часть территории страны. Специфика региона продиктована географической расположенностью основной площади территории в арктической и субарктической зонах, характеризующихся наличием многолетней мерзлоты и резко-континентальным климатом. Несмотря на сочетание сложных природных факторов, в регионе развивается северное животноводство, основанное на традиционных занятиях коренных жителей и разведении аборигенных пород животных. Наряду с этим, наличие огромного количества естественных угодий делает регион перспективным для более интенсивного развития животноводства и увеличения производства сельскохозяйственной продукции. При этом одной из отраслей, позволяющих эффективное освоение такой обширной территории за сравнительно короткий период без огромных финансовых затрат, является табунное коневодство. Якутская порода табунной лошади, сформированная под влиянием сложных природных условий и селекции, наилучшим образом приспособлена к круглогодичному вольнокосячному пастбищному содержанию.

Исторически сложившаяся технология ведения табунного коневодства Якутии как круглогодичное пастбищное содержание основана на исключительно высокой выносливости и неприхотливости якутской лошади. Непревзойденная приспособленность к крайне низким температурам, нетребовательность к кормовым условиям, высокая выносливость, способность к быстрой наживке и накоплению питательных веществ в короткий период обеспечивают выживание лошади при изнурительной тебеневке в течение 7–8 месяцев при самых неблагоприятных факторах среды.

Также этому способствуют генетически обусловленные морфофизиологические признаки организма якутской лошади, к которым можно отнести характерный экстерьер, специфичный кожно-волосяной покров, его теплоизоляционные свойства, способность лошадей к быстрому нагулу, уменьшение легочной вентиляции в зимний период [43] и другие. Между тем, самостоятельная добыча корма из-под снега при крайне низких температурах в течение продолжительного зимнего периода зачастую приводит к потере веса, которая порой у кобыл может достигать 20–22 %, что может стать причиной падежа, выкидышей и абортот [44]. В то же время, несмотря на большое количество работ, посвященных улучшению способов табунного коневодства, методы оценки и контроля за состоянием лошадей в зимний период, разработанные в 70-х и 80-х годах прошлого столетия, по-прежнему остаются субъективными, не отражающими истинного состояния лошади, так как данная оценка проводится зимой визуальным способом на расстоянии и в основном зависит от опыта и навыков табунщика. Как показывают реалии настоящего времени, данная отрасль, не имеющая аналогов в мире благодаря высокой рентабельности из-за применения технологии круглогодичного пастбищного содержания лошадей, практически не менявшейся в течение столетий, оказалась не подвержена действиям санкций и остается абсолютно независимой от завоза племенного материала из-за рубежа.

Очень сложным для якутских табунных лошадей является продолжительный зимний период с комплексным прессингом негативных факторов на их организм: длительное воздействие низких температур до и ниже $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, глубина снежного покрова, туманы, ветра, низкий уровень питательности корма и энергозатраты на его добычу из-под толщии снега, осадки. Несмотря на приспособительные качества, основная масса табунных лошадей стремительно теряет живую массу, что часто сопровождается увеличением непроизводительного отхода и снижением показателей воспроизводства (падеж, аборты и выкидыши). Контроль за состоянием лошадей в этот период проводится в соответствии с принятыми инструкциями по бонитировке табунных лошадей, предусматривающими применение метода путем визуальной оценки кондиции лошади, основанной только на опыте и навыках табунщика, что указывает на субъективность такой оценки.

Применение технологии пастбищного содержания лошадей якутских пород круглогодично в непростых условиях Севера подвергает лошадей воздействию суровых погодных факторов в течение всего года. Несомненно, что лошади, в частности кобылы и молодняк, испытывают значительную нагрузку негативных факторов, влияние которых может вызвать нарушения в терморегуляции, ощутимые потери живой массы, как правило, приводящие к серьезным потерям как взрослого поголовья, так и молодняка. Вместе с тем, организм некоторых животных сформировал адаптационные механизмы, благодаря которым отдельно взятые кобылы, полученное от них потомство выходят из зимнего тебеневого периода без ощутимых потерь для своего организма. Метод визуальной оценки, применяемый в настоящее время в практике табунного коневодства, не позволяет выявлять истинные потери живой массы у тебенеющих лошадей в силу своей субъективности.

Якутская лошадь является наиболее подходящей «моделью» для изучения механизмов адаптации рода лошадиных (*Equus*) к холоду из-за широкого ареала обитания и высокой приспособленности к экстремальным условиям. В то же время комплексное исследование терморегуляции организма лошади, основанное на изучении экологических, морфологических, физиологических, этологических аспектов, представляет несомненный интерес (рис. 3).

В связи с этим комплексное изучение терморегуляции организма лошади, охватывающее экологические, морфологические, физиологические и этологические аспекты, представляет значительный научный и практический интерес. Особую актуальность при этом приобретает внедрение в практику инновационных решений, направленных на модернизацию и совершенствование существующих технологий с учетом специфических биологических особенностей табунных лошадей.

Заключение

С учетом современных литературных данных, свидетельствующих о перспективности применения ИКТ в животноводстве, представляется целесообразным расширение потенциала метода для мониторинга физиологического состояния лошадей в условиях табунного содержания в зимний период. Особое значение данная техно-

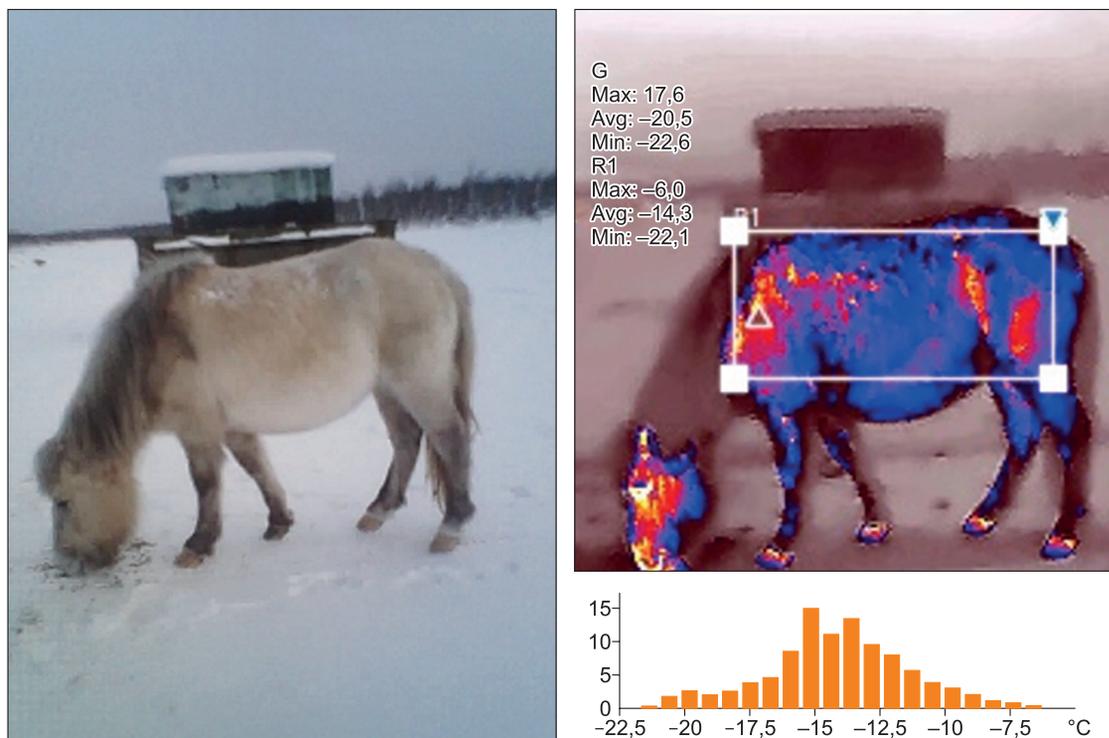


Рис. 3. Термограмма табунной лошади якутской породы, февраль 2025 г. (фото авторов)

Fig. 3. Thermogram of a Yakut breed herd horse, February 2025 (photo by the authors)

логия приобретает в контексте изучения механизмов терморегуляции – ключевого адаптивного процесса, обеспечивающего гомеостаз организма лошади при экстремально низких температурах, характерных для северных регионов. Однако в доступной научной литературе недостаточно исследований, посвященных особенностям терморегуляторных реакций у лошадей в условиях продолжительной зимней экспозиции при температурах ниже -40°C . Это ограничивает понимание интегративных физиологических ответов организма на холодовой стресс и снижает достоверность экстраполяции данных, полученных в умеренных климатических зонах.

Качество и интерпретируемость термографических измерений существенно зависят от ряда экзогенных и эндогенных факторов, включая скорость ветра, влажность воздуха, качество шерстного покрова, фазу суточного цикла, уровень энергетического обмена и поведенческие адаптации животных. Эти параметры могут оказывать значительное влияние на распределение поверхностной температуры тела, что, в свою очередь, требует строгого контроля условий измерений, стандартизации методики и тщательной подго-

товки полевых исследований. Таким образом, для получения объективных и воспроизводимых термографических данных необходимо разработать стандартизованный протокол термографического мониторинга табунных лошадей. Данный протокол должен учитывать как биологические, анатомо-физиологические особенности якутской лошади, так и специфические экстремальные условия Севера. Внедрение такого подхода создаст основу для неинвазивной оценки функционального состояния уникальных животных и позволит углубить понимание физиологических и метаболических механизмов, лежащих в основе их устойчивости к холодовому стрессу.

Список литературы / References

1. Ring E.F. The historical development of temperature measurement in medicine. *Infrared Physics & Technology*. 2007;49(3):297–301. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2006.06.029>
2. Hovei K., Durek K., Soroko M. Thermal camera performance and image analysis repeatability in equine thermography. *Infrared Physics & Technology*. 2020;110:103447. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2020.103447>
3. Soroko M., Davies M. *Equine Thermography in practice*. Cabi; 2016. 116 p.
4. Hänninen L., Pastell M., Keeling L.J., et al. Thermographic assessment of stress in horses during different handling

- procedures. *Physiology & Behavior*. 2009;98(5):633–637. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2009.09.002>
5. Turner T.A. Thermography as a tool for evaluating equine lameness. *AAEP Proceedings*. 2003;49:130–132.
 6. Amory J.R., Wright I.A., Mason C.S. The use of infrared thermography to assess surface temperature changes in horses following treadmill exercise. *The Veterinary Journal*. 2002;164(2):148–153. <https://doi.org/10.1053/tvjl.2002.0715>
 7. McCafferty D.J. The value of infrared thermography for research on mammals: previous applications and future directions. *Mammal Review*. 2007;37(3):207–223. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2907.2007.00103.x>
 8. Jones J.P., Asner G.P., Butchart S.H., Karanth K.U. The ‘why’, ‘what’ and ‘how’ of monitoring for conservation. In: *Key Topics in Conservation Biology 2*. Hoboken, NJ: Wiley Online Library; 2013:327–343.
 9. Larsen H.L., Møller-Lassen K., Enevoldsen E.M.E., et al. Drone with Mounted Thermal Infrared Cameras for Monitoring Terrestrial Mammals. *Drones*. 2023;7(11):680. <https://doi.org/10.3390/drones7110680>
 10. Havens K.J., Sharp E.J. Chapter 11 – Using Thermal Imagers for Animal Ecology. In: Havens K.J., Sharp E.J., eds. *Thermal Imaging Techniques to Survey and Monitor Animals in the Wild*. Academic Press; 2016:245–314. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803384-5.00011-7>
 11. Rietz J., van Beeck Calkoen S.S., Ferry N., et al. Drone-based thermal imaging in the detection of wildlife carcasses and disease management. *Transboundary and Emerging Diseases*. 2023;2023:5517000. <https://doi.org/10.1155/2023/5517000>
 12. Chang B., Hwang B., Lim W., et al. Enhancing wildlife detection using thermal imaging drones: designing the flight Path. *Drones*. 2025;9(1):52. <https://doi.org/10.3390/drones9010052>
 13. Hermann J., Topac Y., Hoffmann J., et al. User-Centric Wildlife Monitoring: AI-Powered Animal Detection and Tracking with Drone-Based Thermal Imaging. In: *Proceedings of Woodstock '18: ACM Symposium on Neural Gaze Detection; 2018 Jun 3–5*; Woodstock, NY. New York, NY: ACM; 2018:12 p.
 14. JOUAV. How to Use Drones for Wildlife Conservation? JOUAV Blog. 2023. URL: <https://www.jouav.com/blog/wildlife-drone.html> (дата обращения: 12.04.2025).
 15. Dawson S., Adams P., Low T., et al. *Automated thermal imagery analysis platform for multiple pest species*. Canberra: Centre for Invasive Species Solutions; 2022. 28 p. ISBN 978-1-922971-00-5.
 16. Кирсанов В.В., Павкин Д.Ю., Довлатов И.М. и др. Разработка математической модели определения состояния копыт крупного рогатого скота на основе профилей термограмм. *Агроинженерия*. 2022;24(5):35–39. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-5-35-39>
 17. Kirsanov V.V., Pavkin D.Yu., Dovlatov I.M., et al. Development of a mathematical model for determining the condition of cattle hooves based on thermogram profiles. *Agroengineering*. 2022;24(5):35–39. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-5-35-39>
 18. Kang X., Zhang X.D., Liu G. A Review: Development of computer vision-based lameness detection for dairy cows and discussion of the practical applications. *Sensors*. 2021;21(3):753. <https://doi.org/10.3390/s21030753>
 19. Lokesh Babu D.S., Jeyakumar S., Patil J.V., et al. Monitoring foot surface temperature using infrared thermal imaging for assessment of hoof health status in cattle: a review. *Journal of Thermal Biology*. 2018;78:106–115. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2018.08.021>
 20. Harris-Bridge G., Young L., Handel I., et al. The use of infrared thermography for detecting digital dermatitis in dairy cattle: What is the best measure of temperature and foot location to use? *The Veterinary Journal*. 2018;237:26–33.
 21. Verduzco-Mendoza A., Olmos-Hernández A., Bueno-Nava A., et al. Thermal imaging in biomedical research: a non-invasive technology for animal models. *Frontiers in Veterinary Science*. 2025;12:1544112. <https://doi.org/10.3389/fvets.2025.1544112>.
 22. Жилич Е.Д., Рогальская Ю.Н., Колоско Д.Н. Применение метода термографии для идентификации заболевания молочной железы коров. *Техника и технология в животноводстве*. 2022;(2):108–112. <https://doi.org/10.51794/27132064-2022-2-108>
 23. Zhilich E.D., Rogalskaya Yu.N., Kolosko D.N. Application of the thermography method for identification of mammary gland disease in cows. *Engineering and technology in animal husbandry*. 2022;(2):108–112. (In Russ.) <https://doi.org/10.51794/27132064-2022-2-108>
 24. Mansoor Nabi, et al. Assessing the potential of infrared thermography for early detection of subclinical mastitis in crossbred cows. *International Journal of Veterinary Sciences and Animal Husbandry*. 2025;10(2):08–15.
 25. Stewart M., et al. Eye temperature and health status in cattle measured using infrared thermography. *Physiology & Behavior*. 2008;93(4–5):858–866.
 26. McCafferty D.J. The value of infrared thermography for research on mammals: previous applications and future directions. *Mammal Review*. 2007;37(3):207–223. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2907.2007.00113.x>.
 27. Wang L., et al. Monitoring of deep vein thrombosis in a rabbit model using infrared thermography. *Biomedical Optics Express*. 2018;9(6):2783–2795. <https://doi.org/10.1364/BOE.9.002783>.
 28. Jeng, J.C., et al. Skin temperature changes in second- and third-degree burns in a porcine model using infrared thermography. *Journal of Burn Care & Rehabilitation*. 2003;24(5):315–320. <https://doi.org/10.1097/00004623-200309000-00006>
 29. Vitorino, D.V., et al. Infrared thermography as a method to assess thermal comfort in horses (Equus caballus). *Journal of Thermal Biology*. 2019;85:102410. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2019.102410>.
 30. Dymek K., Eksell P., Wattle O., Roepstorff L. Use of thermography to detect subclinical lameness in horses. *Equine Veterinary Journal*. 2006; 38. № 5; 454–458. <https://doi.org/10.2478/acve-2023-0023>
 31. Amory J.R., Wright I.A., Mason C.S. The use of infrared thermography to assess surface temperature changes in horses following treadmill exercise. *The Veterinary Journal*. 2002;164(2):148–153.
 32. Kruljc. Thermographic Examination of the Horse. *Acta Veterinaria*; 2023: 73. 289–316. <https://doi.org/10.2478/acve-2023-0023>.
 33. Aragona F., Rizzo M., Arfuso F., et al. Eye temperature measured with infrared thermography to assess stress responses to road transport in horses. *Animals*. 2024; 14(13):1877. <https://doi.org/10.3390/ani14131877>.
 34. Travain T., Colombo E. S., Grandi L. C., et al. How good is this food? A study on dogs’ emotional responses to a potentially pleasant situation using infrared thermography. *Physiology & Behavior*. 2016;155: 99–105. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2015.11.036>.
 35. Domino M., Borowska M., Kozłowska N., et al. Advances in thermal image analysis for the detection of pregnancy in horses using infrared thermography. *Sensors*. 2022; 22: 191. <https://doi.org/10.3390/s22010191>

34. Daniel A., Ferdous S., Mathew A., Amanda J. Collectively advancing deep learning for animal detection in drone imagery: Successes, challenges, and research gaps. *Ecological Informatics*. 2024;83:102842. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102842>.
35. Jinxin Liang, Zhiyu Yuan, Xinhui Luo, et al. Application of non-invasive monitoring technology in intensive sheep farming: A review. *Smart Agricultural Technology*. 2025;12:101215. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101215>.
36. Reddy C., Kumar S., Sharma S., Natesan G., et al. Real-time tracking of wildlife with iot solutions in movement ecology. *Journal of Advanced Zoology*. 2023; 44: 1122–1134. <https://doi.org/10.17762/jaz.v44iS-5.1191>.
37. Meivel S., Karthikraja R., Mohamad Sajudeen S., Rokith K. Thermal imaging based animal intrusion using artificial intelligence. May 2021. *Türk Fizyoterapi ve Rehabilitasyon Dergisi/Turkish Journal of Physiotherapy and Rehabilitation*.
38. Hermann J., Topac Y., Hoffmann J., et al. User-centric wildlife monitoring: ai-powered animal detection and tracking with drone-based thermal imaging. In: *Woodstock '18: ACM Symposium on Neural Gaze Detection, June 03–05, 2018. Woodstock, NY. ACM, New York, NY, USA;2018*. 12 pages.
39. Dave B., Mori M., Bathani A., Goel P. Wild animal detection using YOLOv8. *Procedia Computer Science*.2023; 230: 100–111. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.12.065>.
40. Rogalski A. Infrared detectors: advances and applications. *Progress in Quantum Electronics*. 2022; 85: 100421.
41. Oikonomou G., et al. Multimodal imaging in veterinary medicine: combining thermography with MRI and CT for improved diagnosis in equine and canine patients. *Veterinary Journal*. 2021; 278: 105743. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2021.105743>.
42. Hartmann M., Schott M., Dsouza,A., et al. A text and image analysis workflow using citizen science data to extract relevant social media records: Combining red kite observations from Flickr, eBird and iNaturalist. *Ecological Informatics*. 2022;71: 101782. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101782>.
43. Алексеев Н.Д., Неустроев М.П., Иванов Р.В. *Биологические основы повышения продуктивности лошадей*. Якутск; 2006. 280 с.
- Alekseev N.D., Neustroev M.P., Ivanov R.V. *Biological basis for increasing the productivity of horses*. Yakutsk; 2006: 280 p. (In Russ.)
44. Винокуров Н.Т., Владимиров Л.Н., Мачахтырова В.А. Особенности динамики изменений живой массы лошадей якутской породы в зимнее время. *Достижения науки и техники АПК*. 2012; 4: 80–82.
- Vinokurov N.T., Vladimirov L.N., Machakhtyrova V.A. Peculiarities of the dynamics of changes in the live weight of Yakut horses in winter. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2012; 4: 80–82. (In Russ.)

Об авторах

ВЛАДИМИРОВ Леонид Николаевич, доктор биологических наук, член-корреспондент РАН, профессор, <https://orcid.org/0000-0002-5889-281X>, Scopus Author ID: 57004575000, SPIN: 2189-0659, e-mail: vladimirovln@mail.ru

МАЧАХТЫРОВ Григорий Николаевич, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-8328-4744>, ResearcherID: ABA-4349-2021, Scopus Author ID: 57222057965, SPIN: 2088-3016, e-mail: aylga@mail.ru

МАЧАХТЫРОВА Варвара Анатольевна, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-0988-0943>, ResearcherID: ABA-4356-2021, Scopus Author ID: 57222058847, SPIN: 6781-3467, e-mail: varvara-an@mail.ru

ШАДРИНА Яна Лаврентьевна, кандидат ветеринарных наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-4477-6332>, ResearcherID: J-6517-2018, SPIN: 6121-0532, e-mail: yanalina_12@mail.ru

СЛЕПЦОВА Василиена Васильевна, научный сотрудник, <https://orcid.org/0009-0003-0657-4355> SPIN: 2168-8658, e-mail: vvsleptsova1990@mail.ru

АЛЕКСЕЕВ Владислав Амирович, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-6751-6210>, ResearcherID: G-6157-2019, Scopus Author ID: 57222298326, SPIN: 2904-9620, e-mail: vldslvalekseev@gmail.com

Вклад авторов

Владимиров Л.Н. – руководство исследованием, разработка концепции, получение финансирования; **Мачахтыров Г.Н.** – администрирование проекта, редактирование рукописи; **Мачахтырова В.А.** – методология; создание черновика рукописи; **Шадрин Я.Л.** – проведение исследования; **Слепцова В.В.** – ресурсное обеспечение исследования; **Алексеев В.А.** – ресурсное обеспечение исследования

Конфликт интересов

Один из авторов – доктор биологических наук, член-корреспондент РАН, профессор Владимиров Леонид Николаевич является главным редактором журнала «Природные ресурсы Арктики и Субарктики». Авторам неизвестно о каком-либо другом потенциальном конфликте интересов, связанном с этой статьей.

About the authors

VLADIMIROV, Leonid Nikolaevich, Dr. Sci. (Biol.), Correspondent Member of RAS, Professor, <https://orcid.org/0000-0002-5889-281X>, Scopus Author ID: 57004575000, SPIN: 2189-0659, e-mail: vladimirovln@mail.ru

MACCHAKHTYROV, Grigory Nikolaevich, Cand. Sci. (Biol.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-8328-4744>, ResearcherID: ABA-4349-2021, Scopus Author ID: 57222057965, SPIN: 2088-3016, e-mail: aylga@mail.ru

MACCHAKHTYROVA, Varvara Anatolyevna, Cand. Sci. (Biol.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-0988-0943>, ResearcherID: ABA-4356-2021, Scopus Author ID: 57222058847, SPIN: 6781-3467, e-mail: varvara-an@mail.ru

SHADRINA, Yana Lavrentievna, Cand. Sci. (Vet.), Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-4477-6332>, ResearcherID: J-6517-2018, SPIN: 6121-0532, e-mail: yanalina_12@mail.ru

SLEPTSOVA, Vasilena Vasilievna, Researcher, <https://orcid.org/0009-0003-0657-4355>, SPIN: 2168-8658, e-mail: vvsleptsova1990@mail.ru

ALEKSEEV, Vladislav Amirovich, Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-6751-6210>, ResearcherID: G-6157-2019, Scopus Author ID: 57222298326, SPIN: 2904-9620, e-mail: vldslvalexseev@gmail.com

Authors' contribution

Vladimirov L.N. – supervision; conceptualization, funding acquisition; **Machakhtyrov G.N.** – project administration, writing – review & editing; **Machakhtyrova V.A.** – methodology, writing – original draft; **Shadrina Ya.L.** – investigation; **Sleptsova V.V.** – resources; **Alekseev V.A.** – resources

Conflict of interest

One of the authors, Leonid N. Vladimirov, Dr. Sci. (Biol.), Corresponding Member of RAS, Professor is the 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 14.08.2025

Поступила после рецензирования / Revised 09.09.2025

Принята к публикации / Accepted 15.09.2025

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 519.63:539.373

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-500-509>



Оригинальная статья

Управление температурным режимом сварки полиэтиленовых труб в условиях низких температур

Р. С. Тихонов✉, Н. П. Старостин

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

✉roman_tikhon@mail.ru

Аннотация

Для широкого применения полиэтиленовых труб при строительстве газопроводов в регионах очень холодного климата необходима разработка оперативной технологии сварки с целью выполнения ремонтно-восстановительных работ без использования теплых укрытий. Предлагается технология оперативной электромуфтовой сварки полиэтиленовых труб при низких температурах на открытом воздухе с управляемой кристаллизацией материала сварного шва. Сокращение времени выполнения соединения достигается предварительным подогревом с помощью закладного нагревателя и выравнивания температур путем свободного охлаждения. Расчет температурного режима сварки методом конечных элементов показал, что при последующем нагреве по режиму сварки в нормальных условиях объем расплава соответствует объему расплава сварки при допустимой температуре воздуха. Для соблюдения режима кристаллизации расплава полиэтилена в условиях низких температур, характерных для сварки при допустимых температурах воздуха, предлагается изменение мощности нагревателя по времени. Для определения временной зависимости мощности закладного нагревателя, обеспечивающей соответствующую кристаллизацию материала сварного шва и зоны термического влияния, решена обратная задача теплопроводности методом градиентной минимизации функционала. На основе решения несвязанной термоупругой задачи с использованием программного средства Dolphin/FEniCS проведен сравнительный анализ влияния распределений температур на сварочные напряжения при сварке по предлагаемой и стандартной технологиям. Расчетами показано, что при сварке с управляемой кристаллизацией напряжения между трубой и муфтой находятся в допустимом диапазоне. Исследования с помощью растрового электронного микроскопа JEOL JSM-7800F надмолекулярных структурных образований в материале зоны термического влияния показали, что предлагаемая технология управляемой кристаллизации обеспечивает формирование в зоне термического влияния сферолитов с размерами, характерными для сварки в нормальных условиях.

Ключевые слова: полиэтиленовая труба, сварка, тепловой процесс, управление кристаллизацией, надмолекулярная структура, напряжения

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда «Разработка основ сварки полиэтиленовых труб деталями с закладными нагревателями при низких температурах» № 24-29-20135, <https://rscf.ru/project/24-29-20135/>.

Для цитирования: Тихонов Р.С., Старостин Н.П. Управление температурным режимом сварки полиэтиленовых труб в условиях низких температур. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(3):500–509. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-500-509>

Temperature control for welding polyethylene pipes in low-temperature conditions

Roman S. Tikhonov✉, Nikolay P. Starostin

*Institute of Oil and Gas Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yakutsk, Russian Federation
✉roman_tikhon@mail.ru*

Abstract

To promote the widespread use of polyethylene pipes in constructing gas pipelines in cold climates, it is essential to develop a welding technology that enables repair and restoration without the need for heated shelters. This article investigates the operational electrofusion welding of polyethylene pipes at low temperatures in open air, focusing on controlling the crystallization of the weld material. To reduce the time required for making a joint in low temperatures, we propose using a preheating method using an embedded heater, followed by equalizing temperatures through free cooling. Calculations of the welding temperature regime, performed using the finite element method, indicate that subsequent heating, according to the welding parameters under standard conditions, results in a melt volume that corresponds to the weld melt volume at acceptable air temperatures. To maintain the appropriate crystallization conditions for the polyethylene melt during welding in low-temperature environments, we suggest varying the heater power over time. To determine the time dependence of the embedded heater's power required for proper crystallization of the weld material and heat-affected zone, we solve the inverse problem of thermal conductivity through the gradient minimization of the functional. Using Dolfin/FEniCS software, we conducted a comparative analysis of temperature distributions and their effects on welding stresses during the implementation of the proposed method versus standard technology. Our calculations demonstrate that when utilizing controlled crystallization, the stresses between the pipe and coupling remain within permissible limits. Studies conducted with a JEOL JSM-7800F scanning electron microscope on supramolecular structural formations in the heat-affected zone revealed that the proposed controlled crystallization technique enables the formation of spherulites in the heat-affected zone, with sizes comparable to those observed in welding under normal conditions.

Keywords: polyethylene pipe, welding, thermal process, crystallization control, supramolecular structure, stress

Funding. This study was supported by the Russian Science Foundation under grant No. 24-29-20135, titled “Fundamentals of electrofusion welding of polyethylene pipes at low temperatures”, <https://rscf.ru/project/24-29-20135/>.

For citation: Tikhonov R.S., Starostin N.P. Temperature control for welding polyethylene pipes in low-temperature conditions. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(3):500–509. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-500-509>

Введение

Соединения полиэтиленовых (ПЭ) труб для газопроводов выполняются двумя методами сварки: сваркой встык нагретым инструментом и сваркой с закладными нагревателями (ЗН) [1–3]. Сварка с ЗН незаменима при выполнении ремонтных работ на газопроводах в стесненных условиях, когда нет возможности перемещения труб вдоль оси. Нормативные документы рекомендуют сварку с ЗН выполнять в интервале температур окружающего воздуха (ОВ) от –10 до 40 °С. При более низких температурах воздуха необходимо выполнять сварку в укрытиях, где поддерживается температура из допустимого интервала. При этом для

начала проведения сварочных работ концы труб и сварные детали должны выдерживаться при допустимой температуре длительное время в зависимости от толщины стенки. При толщине стенки, превышающей 8 мм, минимальное время кондиционирования составляет 6 ч, при толщине более 16 мм – 10 ч. При выполнении ремонтно-восстановительных работ на газопроводах в зимний период в регионах холодного климата такие длительные подготовительные работы недопустимы. Актуальной является разработка существенно сокращающих затраты времени на выполнение соединения технологий оперативной сварки ПЭ труб при низких температурах.

При сварке полимерных материалов и изделий протекают сложные физические и химические процессы. Тепловой процесс – ключевой для всех остальных, происходящих при сварке. Поэтому его исследованию всегда уделяется особое внимание. Ограничение по температуре воздуха при сварке ПЭ труб связано с повышением скорости охлаждения в сварном соединении. В условиях низких температур при быстром охлаждении процесс формирования надмолекулярной структуры прерывается на промежуточном этапе. Образуется мелкокристаллическая структура, обуславливающая пластичность материала сварного шва [4]. При допустимых же температурах воздуха в зоне структурных изменений температурные поля обуславливают формирование надмолекулярных структурных образований, обеспечивающих прочное соединение. Получение прочного сварного соединения при низких температурах тесно связано с управлением тепловым процессом. Чтобы при сварке в условиях низких температур получить соединение с необходимой прочностью, необходимо выполнение следующих условий. Во-первых, образование такого же объема расплава, как при сварке при допустимой температуре. Во-вторых, обеспечение временного изменения температур в зоне сварного шва и зоне термического влияния, свойственного при сварке в нормальных условиях. Тогда в зоне структурных изменений будут сформированы структурные образования, обеспечивающие прочность соединения не ниже чем при сварке в нормальных условиях.

Технология сварки ПЭ труб деталями с ЗН при температуре ОВ ниже рекомендуемых предложена в работе [5]. В этой технологии для снижения потерь тепла при выполнении всех операций и скорости охлаждения сварного соединения используется слой теплоизоляционного материала. Теоретически и экспериментально установлено, что предварительным подогревом с помощью ЗН и выравниванием температур при отключенном нагревателе в зонах сварного шва и термического влияния можно обеспечить поле температур со значениями в интервале допустимых для выполнения сварки. Тогда нагрев для оплавления свариваемых поверхностей осуществляется в регламентированном режиме сварки. Толщина теплоизоляции определяется расчетным путем из условия обеспечения динамики температурного поля соединения стандартной сварки.

Установлено, что при такой сварке качество соединения не ниже, чем при стандартной сварке. В данной технологии из-за использования теплоизоляционного материала высока вероятность влияния человеческого фактора на качество сварного соединения.

Технология сварки ПЭ труб деталями с ЗН при низких температурах без использования теплоизоляции, позволяющая управлять движением фронта кристаллизации и выполнять соединение в автоматическом режиме, предложена в работе [6]. При этом выполняются подогрев, выравнивание температур дополнительно и нагрев по режиму стандартной сварки. На стадии охлаждения снижение скорости изменения температуры достигается путем обеспечения изменения мощности нагревателя по определенной закономерности. Реализация предлагаемой технологии разработанным прототипом сварочного аппарата описана в работе [7]. Поскольку отличительной особенностью данной технологии является управление процессом формирования кристаллитов, назовем ее технологией с управлением кристаллизацией.

Температурный режим, обуславливающий формирование структуры материала, необходимой для получения качественного соединения, обеспечивается в зоне сварного шва и зоне термического влияния (ЗТВ). Вне указанных зон соединения значения температур могут быть ниже, чем при сварке в условиях допустимых температур воздуха. В результате сварочные давления в соединении, возникающие в условиях неравномерного нестационарного нагрева, могут сильно отличаться от давления сварки при допустимых температурах воздуха, что может снизить качество соединения. В связи с этим наряду с тепловым процессом при сварке необходимо исследование напряженно-деформированного состояния (НДС).

В то же время, НДС сварных соединений, выполненных при низких температурах по технологии с управлением кристаллизацией, не исследовалось. Целью данной работы является исследование термоупругого состояния сварных соединений полиэтиленовых труб для доказательства протекания термомеханических процессов при сварке с управлением кристаллизацией по закономерности, характерной для сварки при допустимых температурах.

Методы исследования

Рассмотрим сварку ПЭ труб с помощью муфт, наиболее удобную для отработки методик расчета. Учитывая осевую симметрию и симметрич-

ное расположение труб относительно середины муфты, исследовалось термоупругое состояние стенок трубы и муфты, схема которых представлена на рис. 1. Нестационарное температурное поле $T(r,z,t)$ в стенках трубы и муфты при выполнении всех операций сварки в условиях низких температур (подогрев, выравнивание температур, нагрев и охлаждение) описывалось уравнением теплопроводности в цилиндрических координатах с учетом осевой симметрии:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{Q(t)}{V} \gamma, \quad (1)$$

$$(r, z) \in \Omega; \quad 0 < t \leq t_{\text{cool}};$$

$$\gamma = 1, (r, z) \in S; \quad \gamma = 0, (r, z) \notin S,$$

где t – время; r, z – цилиндрические координаты; c – удельная теплоемкость, ρ – плотность; λ – теплопроводность; V – объем нагревателя.

В области расположения нагревателя в уравнении (1) берутся значения свойств металлического нагревателя, в остальной части – свойства полиэтилена. Теплота фазового превращения учитывается введением эффективной теплоемкости [8, 9]. Кроме того, учитывается зависимость теплофизических свойств полиэтилена от степени кристалличности и температуры [7].

При подогреве, нагреве и охлаждении свариваемых труб и муфты ЗН действует как равномерно распределенный источник теплоты мощностью $Q(t)$. При выравнивании температур источник теплоты равен нулю. На стадии подогрева и выравнивания максимальная температура не превышает температуры размягчения полиэтилена, что позволяет плотность ρ , удельную теплоемкость $c(T)$ и коэффициент теплопроводности $\lambda(T)$ считать постоянными и равными их значениям в твердой фазе ρ^-, c^- и λ^- .

На свободных поверхностях труб и муфты Γ задавалось условие конвективного теплообмена с ОВ вида

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_0), \quad (r, z) \in \Gamma_i, \quad i = 1, 2, 3, 5, \quad (2)$$

где n – нормаль к поверхности; α – коэффициент теплоотдачи.

На границе Γ_0 задавалось условие равенства нулю теплового потока, являющееся следствием симметричного расположения труб относительно середины муфты. По линии Γ_4 , достаточно удаленной от теплового источника, принималось допущение о справедливости граничного условия первого рода:

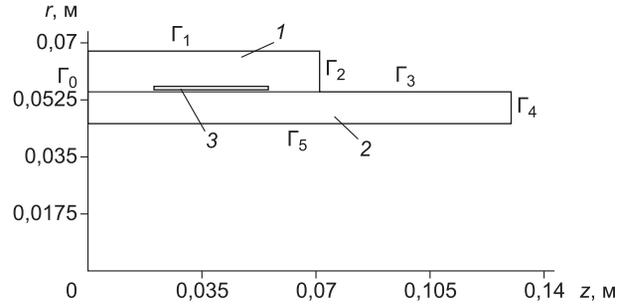


Рис. 1. Расчетная схема электромуфтовой сварки полиэтиленовых труб. Расчетная схема электромуфтовой сварки полиэтиленовых труб: 1 – муфта; 2 – труба; 3 – нагревательный элемент; Γ_0 – Γ_5 – границы

Fig. 1. Design scheme for the electrofusion welding of polyethylene pipes. Design scheme of electrofusion welding of polyethylene pipes: 1 – coupling; 2 – pipe; 3 – heating element; Γ_0 – Γ_5 – boundaries

$$T(r, z, t) = T_{\text{окр}}, \quad (3)$$

где $T_{\text{окр}}$ – температура ОВ.

Для определения деформаций, вызванных неоднородностью температурного поля, были приняты следующие граничные условия:

$$\sigma n = \beta(T - T_0),$$

$$x \in \Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2 \cup \Gamma_3 \cup \Gamma_5;$$

$$u_z = 0, \quad x \in \Gamma_0; \quad u = 0, \quad x \in \Gamma_4, \quad (4)$$

где $\beta = \beta_T(3\lambda + 2\mu)$, β_T – температурный коэффициент линейного расширения, λ, μ – коэффициенты Ламе, T – текущая температура, T_0 – равновесная температура.

Пренебрегая влиянием деформаций на температурное поле, для описания термоупругости используем квазистационарное приближение, которое позволяет уравнения теплопроводности и упругости решать последовательно [10, 11]. Сначала решается уравнение теплопроводности с начальными и краевыми условиями. Полученное температурное поле в текущий момент времени подставляется в уравнение упругости. Используя равенство энергии деформации и внутренних объемных сил энергии поверхностных сил, запишем вариационную постановку термоупругой задачи:

$$2\pi \int_{\Omega} \{e^T(\mathbf{v}) D \varepsilon(\mathbf{u}) - (\beta \text{grad}(T - T_0), \mathbf{v})\} r dr dz =$$

$$= 2\pi \int_{\Gamma} \beta(T - T_0) \mathbf{v} r ds. \quad (5)$$

Здесь \mathbf{v} – пробная вектор-функция для вектора перемещений \mathbf{u} , D – известная матрица перехода между компонентами тензоров напряжений и деформаций.

Результаты и обсуждение

Рассматривалась сварка ПЭ труб 100 диаметром 110 с толщиной стенки 10 мм с помощью муфты с ЗН. Учитывая плотное расположение витков, ЗН представлялся в виде медной трубки длиной 34 мм и толщиной стенки 0,7 мм. При допустимой температуре сварка проводится, подавая на клеммы напряжение $U = 40$ В, время нагрева – 200 с, время охлаждения – 15 мин.

В расчетах использовались следующие значения теплофизических свойств трубного полиэтилена в твердой фазе: $c^- = 1900$ Дж/(кг·°C); $\rho^- = 950$ кг/м³; $\lambda^- = 0,38$ Вт/(м·°C). В жидкой фазе – $c^+ = 2150$ Дж/(кг·°C); $\rho^+ = 850$ кг/м³; $\lambda^+ = 0,26$ Вт/(м·°C). При сварке в условиях допустимых температур известны подаваемое напряжение и время нагрева. В этом случае мощность теплового источника вычислялась по формуле

$$Q(t) = \frac{U^2}{R \cdot (1 + \beta_R(T - 20))}. \quad (6)$$

Сопротивление нагревателя для рассматриваемой муфты $R = 0,96$ Ом. Свойства материала закладного нагревателя: удельная теплоемкость $c = 410$ Дж/(кг·°C); плотность $\rho = 8960$ кг/м³, коэффициент теплопроводности $\lambda = 401$ Вт/(м·°C), температурный коэффициент электрического сопротивления $\beta_R = 0,0043$ 1/°C.

Задача (1)–(5) решалась методом конечных элементов, используя программу свободного доступа Dolfin/FEniCS [12, 13]. Для триангуляции расчетной области использовался генератор сетки Gmsh [14]. Визуализация полученных результатов осуществлялась пакетом программ Paraview [15].

Предполагалось, что трубы и муфта выдержаны на открытом воздухе с температурой –40 °C достаточно длительное время, чтобы на их стенках установилась однородная температура. Предпо-

лагая, что на клеммы муфты подается напряжение 11 В в течение 22 мин, моделировался предварительный подогрев сборки труб с муфтой. Выравнивание температур при отключенном нагревателе осуществлялось в течение 4 мин. В результате в ЗТВ и зоне сварного шва значения температур лежат в интервале от 28,5 до 38,4 °C. Полученное температурное поле в свариваемых областях позволяет произвести нагрев в стандартном режиме. На рис. 2 представлены температурные поля в момент завершения нагрева в нормальных условиях и при температуре –40 °C по предлагаемой технологии.

Термический анализ показывает, что фазовое превращение трубного полиэтилена происходит в интервале от 120 до 140 °C. На рис. 2 показаны изотермы с температурой 140 °C, ограничивающие области полностью расплавленного полимера. Объемы расплавов свариваемых участков труб и муфты при нагреве в условиях низкой температуры с предварительным подогревом и в нормальных условиях получаются практически одинаковыми. Различаются распределения температур на удаленных от нагревателя участках, что может обуславливать различие сварочных давлений.

Научный интерес представляет стадия охлаждения, при которой необходимо обеспечить в зоне структурных изменений кристаллизацию расплава полиэтилена по закономерности, свойственной при сварке в условиях допустимой температуры воздуха. Для определения временной зависимости мощности закладного нагревателя, обеспечивающей кристаллизацию материала сварного шва и ЗТВ, как при допустимой для сварки температуре, решалась обратная задача. В качестве дополнительной температурной информации при решении обратной задачи определения функции $Q(t)$ использовались значения температур, полученные расчетом при сварке в условиях допусти-

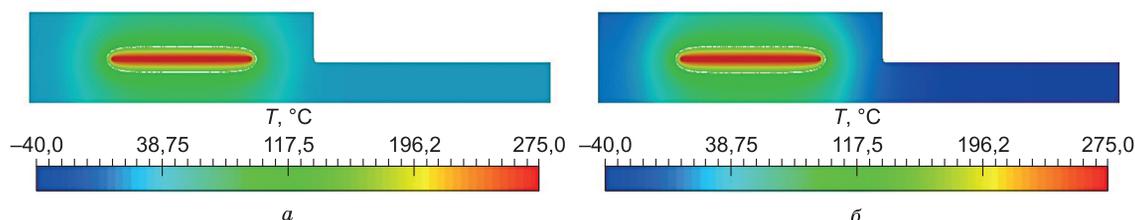


Рис. 2. Температурные поля в конце стадии нагрева сварки при температурах 20 °C (а) и –40 °C (б) по разработанной технологии

Fig. 2. Temperature distributions at the conclusion of the welding heating phase at temperatures of: а) 20 °C; б) –40 °C according to the developed technology

мой температуры. Расчеты проводились для температуры воздуха 20 °С. Значения температур во временном интервале охлаждения брались на границе зон сварного шва и термического влияния, представляющей изотерму 140 °С в момент завершения нагрева стандартной сварки. Выбор местоположения точек задания температур обусловлен тем, что при механических испытаниях сварных соединений разрушение чаще происходит по зоне термического влияния. В этой зоне материал полностью не расплавляется и находится в двухфазном состоянии.

Для обеспечения прочного соединения при сварке в условиях низких температур мощность нагревателя при охлаждении будем определять из условия обеспечения движения фронта кристаллизации полиэтилена в ЗТВ, как при допустимой температуре. Дополнительную температурную информацию для решения обратной задачи зададим в точках изотермы 140 °С.

Пусть временные зависимости температур $f_k(t)$, служащие дополнительной информацией для решения обратной задачи, получены в точках с координатами (r_k, z_k) , $k = 1, \dots, n$. Тогда обратная задача состоит в определении функций $Q(t)$ и $T(r, z, t)$ на стадии охлаждения из условия минимума функционала

$$J[Q(t)] = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \int_0^{t_{\text{cool}}} \rho_k(t) [T(r_k, z_k, t) - f_k(t)]^2 dt, \quad (7)$$

представляющего меру отклонения температур $T(r_k, z_k, t)$, полученных решением уравнения (1) с условиями (2)–(3) при известном приближении функции $Q(t)$, от заданных $f_k(t)$. Для упрощения изложения время начала охлаждения взято за ноль. В качестве начального условия бралось распределение температуры в конце нагрева. Нелинейная обратная задача определения мощности нагревателя при охлаждении в условиях низких температур решалась итерационным методом на основе метода сопряженных градиентов [16, 17].

На рис. 3 приведена функция мощности нагревателя от времени при охлаждении, полученная решением обратной задачи.

Далее предполагается, что при охлаждении сварочный аппарат автоматически обеспечивает временное изменение мощности ЗН согласно функции, полученной решением обратной задачи. В результате управления тепловым процессом, несмотря на интенсивную теплоотдачу в окружающую среду с низкой температурой, температурный режим на стадии охлаждения в зоне структур-

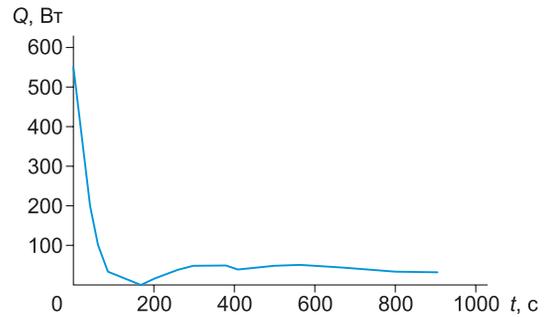


Рис. 3. Зависимость функции мощности нагревателя от времени на стадии охлаждения

Fig. 3. Dependence of the heater power on time during the cooling stage

ных изменений будет обуславливать формирование надмолекулярных структур, характерных при сварке в условиях допустимых температур.

Приведем анализ НДС сварных соединений ПЭ труб, выполненных при различных температурах ОВ. За равновесную температуру примем 20 °С. При расчетах использовались следующие значения свойств материала трубы и муфты: температурные коэффициенты линейного расширения полиэтилена в твердой и жидкой фазе соответственно $\beta^- = 0,9 \cdot 10^{-5}$; $\beta^+ = 2,8 \cdot 10^{-5}$ 1/К; модули упругости $E^- = 250,0$; $E^+ = 12,5$ МПа; коэффициенты Пуассона $\nu^- = 0,35$; $\nu^+ = 0,49$. Для материала нагревателя $E = 100$ ГПа; $\nu = 0,34$. В интервале фазового превращения принято линейное изменение свойств материала от температуры.

При сварке ПЭ труб деталями с ЗН прочность соединения зависит от многих параметров. Первостепенную роль имеют радиальные напряжения в зоне шва. На рис. 4 показаны распределения температур и напряжений по радиусу в областях максимальных и минимальных значений температур в окрестности ЗН.

Несмотря на различие распределений температур по радиусу в удаленных от нагревателя участках соединения, сжимающие радиальные напряжения между трубой и муфтой ($r = 0,055$ м) в момент начала охлаждения при сварке в различных условиях практически равны.

На рис. 5, а представлены распределения температур по радиусу в середине свариваемого участка трубы и муфты в конце охлаждения.

Распределение температуры в окрестности между трубой и муфтой ближе к значениям температур при сварке при +40 °С, но не превышает допустимые. Такое распределение достигнуто

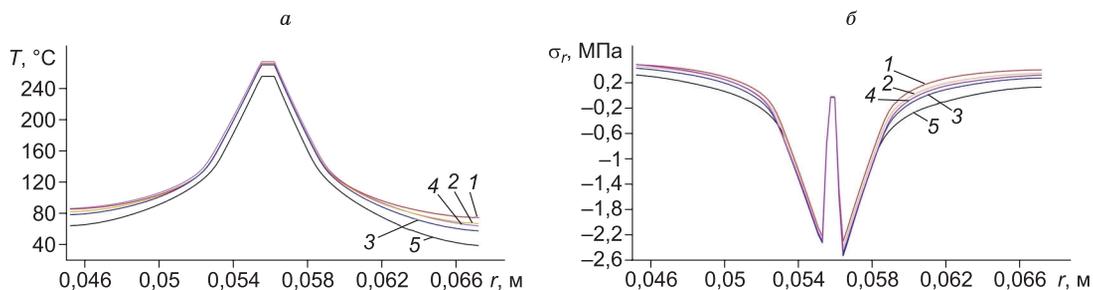


Рис. 4. Распределения температур и радиальных напряжений по вертикальной линии, проходящей через середину и конец закладного нагревателя, при сварке при температурах, °С: 40 (1), 20 (2), –10 по стандартному режиму (3), –40 по предлагаемой технологии (4), –40 с нарушением в момент завершения нагрева (5)

Fig. 4. The distribution of temperatures and radial stresses along a vertical line passing through the center and end of the embedded heater during welding is presented for the following temperature conditions: (1) 40 °С, (2) 20 °С, (3) –10 °С under the standard mode; (4) –40 °С according to the proposed technology; and (5) –40 °С with a deviation at the moment of heating completion.

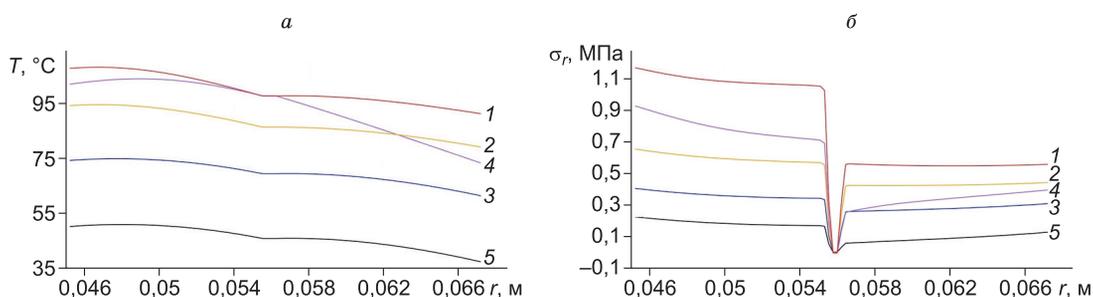


Рис. 5. Распределения температур и радиальных напряжений по вертикальной линии, проходящей через середину закладного нагревателя, при сварке при температурах, °С: 40 (1), 20 (2), –10 по стандартному режиму (3), –40 по предлагаемой технологии (4), –40 °С с нарушением в конце охлаждения (5)

Fig. 5. The distribution of temperatures and radial stresses along a vertical line passing through the center of the embedded heater during welding is presented for the following temperature conditions: (1) 40 °С, (2) 20 °С, (3) –10 °С, corresponding to the standard mode; (4) –40 °С, according to the proposed technology; and (5) –40 °С with a deviation occurring at the end of the cooling phase

специальным выбором в функционале (7) весовых функций $\rho_k(t)$ для повышения значимости заданной температурной информации в конце ЗН. При этом значимость заданной температуры в середине нагревателя была снижена.

На рис. 5, б радиальные напряжения становятся растягивающими и их значения при сварке в условиях низкой температуры по предлагаемой технологии изменяются в пределах допустимых.

Выполнены электромуфтовые сварные соединения труб ПЭ100 Ø110 SDR 11 при различных режимах сварки: 1 – по предлагаемой технологии для низкой температуры; 2 – по режиму для допустимой температуры, 3 – в условиях низкой температуры по режиму для допустимой температуры (с нарушением). Проведены исследования надмолекулярных структурных образований в материалах сварных соединений, выполненных при различных режимах сварки,

с помощью растрового электронного микроскопа JEOL JSM-7800F (Япония). На рис. 6 представлены снимки надмолекулярной структуры материала зоны термического влияния, определенной расчетным путем.

По полученным снимкам определены распределения надмолекулярных образований (сферолитов) по размерам. На рис. 7 представлены гистограммы распределений размеров сферолитов в материалах ЗТВ сварных соединений, выполненных по различным режимам.

В структуре материала, сваренного по режиму 3, преобладают мелкокристаллические образования, обуславливающие пластичность материала. В результате реализации предварительного подогрева и управления кристаллизацией при охлаждении распределение размеров сферолитов в ЗТВ сварного соединения, выполненного по режиму 1, сопоставимо с таковым в структуре

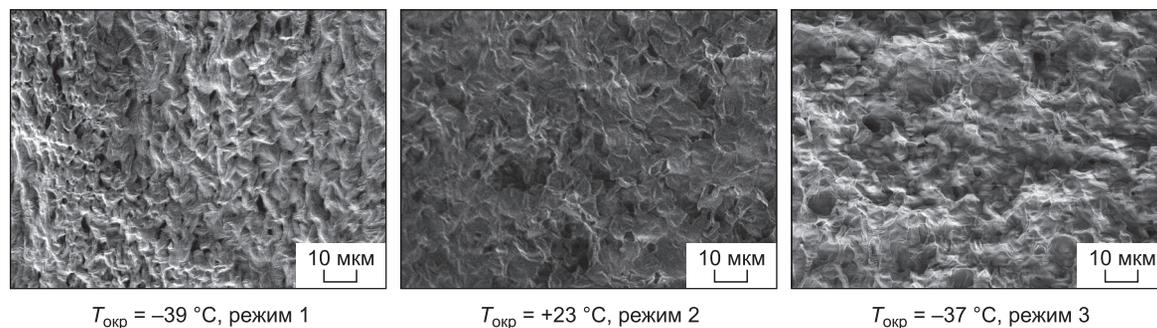


Рис. 6. Надмолекулярные структуры материалов сварных соединений, выполненных по различным режимам
Fig. 6. Supramolecular structures of welded joint materials produced under various conditions

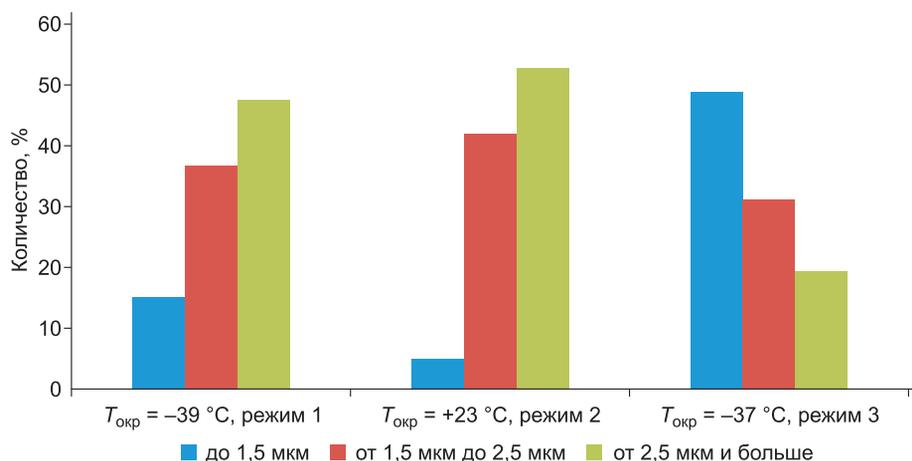


Рис. 7. Распределение размеров надмолекулярных образований в материалах ЗТВ сварных соединений, выполненных по различным режимам

Fig. 7. Distribution of the sizes of supramolecular formations in the heat-affected zone materials of welded joints produced under various conditions

материала соединения, выполненного по режиму 2. Полученная надмолекулярная структура материала ЗТВ сварного соединения, выполненного при низкой температуре по предлагаемой технологии, должна обеспечить прочность сварного соединения не ниже чем при сварке в нормальных условиях.

Заключение

– Расчетами установлено, что при сварке полиэтиленовых труб в условиях низких температур предварительный подогрев и выравнивание с расчетными параметрами и нагрев по режиму сварки в нормальных условиях обеспечивают получение достаточного объема расплава.

– Охлаждение сварного соединения при низких температурах с управлением кристаллизацией в зонах сварного шва и термического влияния путем изменения мощности нагревателя по

временной закономерности, согласно решению обратной задачи теплопроводности, обеспечивает динамику температурного поля, соответствующую сварке в условиях допустимых температур воздуха.

– Установлено что между трубой и муфтой обеспечивается давление, достаточное для формирования сварного соединения, равнопрочного соединению при сварке в условиях допустимых температур.

– Предлагаемая технология сварки с управляемой кристаллизацией при низких температурах обеспечивает в зоне структурных изменений температурный режим, обуславливающий формирование надмолекулярных структурных образований, характерных для сварки в условиях допустимых температур.

– Полученные результаты и методики могут служить основой для разработки технологии свар-

ки полиэтиленовых труб при низких температурах деталями различной конфигурации с закладными нагревателями.

Список литературы / References

1. Иванов Н.И., Чевычелов Д.А., Писевич Е.Ю. и др. Сварка нагретым инструментом трубопроводов из полиэтилена для газоснабжения диаметром 90–315 мм. *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2023; 27(2):24–41. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-24-41>

Ivanov N.I., Chevychelov D.A., Pisevich E.Yu., et al. Hot tool welding of pipelines from polyethylene for gas supply with a diameter of 90–315 mm. *Proceedings of the Southwest State University*. 2023;27(2):24–41. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-24-41>

2. Кимельблат В.И., Волков И.В. Процедуры и основные параметры сварки полиэтилена. *Вестник Казанского технологического университета*. 2014;17(14):293–296.

Kimelblat V.I., Volkov I.V. Procedures and main parameters of polyethylene welding. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2014;17(14):293–296. (In Russ.)

3. Петкевич В.М., Гладких С.А., Глаголев И.М., Пячин С.А. Испытание муфтовых соединений полиэтиленовых труб. В кн.: Игнатенко И.В. (ред.) *Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке: труды Всероссийской научно-практической конференции творческой молодежи с международным участием, г. Хабаровск, 16–19 апреля 2024 г. Т. 2*. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС; 2024. С. 451–456.

Petkevich V.M., Gladkikh S.A., Glagolev I.M., Pyachin S.A. Testing of coupler connection of polyethylene pipes. In: *Scientific, technical and economic cooperation between the Asia-Pacific countries in the 21st century: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference for Creative Youth with international participation, Khabarovsk, April 16–19, 2024, Vol. 2*. Khabarovsk: DVGUPS Publishing House; 2024, pp. 451–456. (In Russ.)

4. Шурайц А.Л., Каргин В.Ю., Вольнов Ю.Н. *Газопроводы из полимерных материалов: Пособие по проектированию, строительству и эксплуатации*. Саратов: Издательство «Журнал «Волга – XXI век»; 2007. 612 с.

Shuraitis A.L., Kargin V.Yu., Volnov Yu.N. *Gas pipelines made of polymeric materials: Features of design, construction and operation*. Saratov: Publishing House “Journal “Volga – 21st century”; 2007. 612 p. (In Russ.)

5. Старостин Н.П., Аммосова О.А. Управление тепловым процессом электромуфтовой сварки полиэтиленовых труб при низких температурах. *Сварка и диагностика*. 2017;(5):21–25.

Starostin N.P., Ammosova O.A. Control of the thermal process of electrofusion welding of polyethylene pipes at low temperatures. *Welding and Diagnostics*. 2017;(5):21–25. (In Russ.)

6. Старостин Н.П., Аммосова О.А. Управление движением фронта кристаллизации при сварке полиэтиленовых труб в условиях низких температур. *Тепловые процессы в технике*. 2024;16(4):162–169.

Starostin N.P., Ammosova O.A. Crystallization front movement control when welding polyethylene pipes at low temperatures. *Thermal Processes in Engineering*. 2024;16(4):162–169. (In Russ.)

7. Старостин Н.П., Аммосова О.А., Петров Д.Д. и др. Сварка полиэтиленовых труб муфтами с закладными нагревателями при низких температурах. Часть 1. Реализация управления фронтом кристаллизации. *Сварка и диагностика*. 2024;(6):44–49. https://doi.org/10.52177/2071-5234_2024_06_44

Starostin N.P., Ammosova O.A., Petrov D.D., et al. Welding of polyethylene pipes with couplings with embedded heaters at low temperatures. Part 1. Implementation of crystallization front control. *Welding and Diagnostics*. 2024;(6):44–49. (In Russ.)

8. Chebbo Z., Vincent M., Boujlal A., et al. Numerical and experimental study of the electrofusion welding process of polyethylene pipes. *Polymer Engineering and Science*. 2015; 55(1):123–131. <https://doi.org/10.1002/PEN.23878>

9. Spina R., Spekowiak M., Hopmann C. Simulation of crystallization of isotactic polypropylene with different shear regimes. *Thermochimica Acta*. 2018;659:44–54. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2017.10.023>

10. Бородин П.Ю., Галанин М.П. Динамическая связанная задача термоупругости в различных пространственных приближениях. *Математическое моделирование*. 1998;10(3): 61–82.

Borodin P.Yu., Galanin M.P. Dynamic coupled problem of thermoelasticity in different spatial approximations. *Mathematical Modeling*. 1998;10(3):61–82. (In Russ.)

11. Sivtsev P.V., Stepanov S.P., Smarzewski P. Numerical study of soil-thawing effect of composite piles using gmsfem. *Journal of Composites Science*. 2021;5(7):167. <https://doi.org/10.3390/jcs5070167>

12. Zienkiewicz O.C., Jaylor R.L., Zhu J.Z. *The Finite Element Method: its Basis and Fundamentals (Seventh Edition)*. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2013. 714 p.

13. Logg A., Mardal K.A., Wells G. *Automated Solution of Differential Equations by the Finite Element Method: The FEniCS Book*. New York: Springer Sci. & Business Media; 2012. 731 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-23099-8>

14. Software package GMSH. Available at: <https://gmsh.info/> (accessed: 05.06.2025).

15. Software package ParaView. Available at: <http://paraview.org/> (accessed: 05.06.2025)

16. Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Румянцев С.В. *Экстремальные методы решения некорректных задач*. М.: Наука; 1988. 288 с.

Alifanov O.M., Artyukhin E.A., Romyantsev S.V. *Extreme methods for solving ill-posed problems*. Moscow: Nauka; 1988. 288 p. (In Russ.)

17. Алифанов О.М., Михайлов В.В. Решение граничной обратной задачи в переопределенной постановке. *Инженерно-физический журнал*. 1983;45(3):776–781.

Alifanov O.M., Mikhailov V.V. Solution of the inverse boundary heat conduction problem in a new statement. *Journal of engineering physics and thermophysics*. 1983;45(3):776–781. (In Russ.)

Об авторах

ТИХОНОВ Роман Семенович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-9930-3305>, ResearcherID: AAF-6352-2021, Scopus Author ID: 56763891300, SPIN: 1064-3402, e-mail: roman_tikhon@mail.ru

СТАРОСТИН Николай Павлович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-5686-1817>, ResearcherID: B-2841-2016, Scopus Author ID: 7004125992, SPIN: 3150-2664, e-mail: nikstar56@mail.ru

Вклад авторов

Тихонов Р.С. – методология, программное обеспечение, визуализация, создание черновика рукописи; **Старостин Н.П.** – разработка концепции, создание и редактирование рукописи, методология, администрирование проекта

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

ТИХОНОВ, Roman Semenovich, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-9930-3305>, ResearcherID: AAF-6352-2021, Scopus Author ID: 56763891300, SPIN: 1064-3402, e-mail: roman_tikhon@mail.ru

STAROSTIN, Nikolay Pavlovich, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5686-1817>, ResearcherID: B-2841-2016, Scopus Author ID: 7004125992, SPIN: 3150-2664, e-mail: nikstar56@mail.ru

Authors' contribution

Tikhonov R.S. – methodology, software, visualization, writing – original draft; **Starostin N.P.** – conceptualization, writing – original draft, writing – review & editing, methodology, data curation

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 11.06.2025

Поступила после рецензирования / Revised 21.07.2025

Принята к публикации / Accepted 01.08.2025



Оригинальная статья

Прочность и электропроводность бетонных композитов, модифицированных оксидом графена

В. В. Лепов^{✉,1}, Д. Н. Попов², А. С. Анисимов¹

¹Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН,
г. Якутск, Российская Федерация

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

✉wisecold@mail.ru

Аннотация

Создание и применение так называемых умных, многофункциональных и гибридных материалов является одним из актуальных направлений современного материаловедения. В работе приведены результаты механических испытаний, исследований микроструктуры, оценки электрофизических свойств, а также стохастического моделирования разрушения образцов из бетонного композита, модифицированного переработанным вторичным сырьем в виде восстановленного оксида графена. Работы проведены с целью создания материалов повышенной прочности и с заданной электропроводностью. Дан обзор исследований в области создания и моделирования процессов разрушения гибридных материалов. Приведены подходы к оценке напряженного состояния и обосновано применение концепции зоны предразрушения и структурного размера для описания процессов разрушения в квазихрупких материалах. Показано, что высокие прочностные свойства и электропроводность графена позволяют существенно улучшить характеристики гибридного композита при незначительной концентрации модификатора. Образцы для испытаний были изготовлены с добавлением 0,2 и 0,5 мас.% оксида графена. Для исследования структуры и состава использовались электронная сканирующая растровая микроскопия и инфракрасная спектроскопия. Механические испытания показали, что добавление восстановленного оксида графена вызывает увеличение прочности на 48 % при содержании всего 0,5 мас.% оксида графена и снижение электрического сопротивления до 550–600 Ом, при этом снятие нагрузки восстанавливает прежние значения проводимости. Установлено, что модификация бетона графеном улучшает как электрические, так и механические характеристики. Подобные гибридные материалы могут быть применены в системах мониторинга состояния конструкций, самонагреваемых элементах, при заземлении электроопор, с целью повышения надежности и безопасности эксплуатации энергетических комплексов и технических систем в экстремальных климатических условиях Арктики и Субарктики.

Ключевые слова: гибридный материал, бетонный композит, оксид графена, электропроводящий композит, квазихрупкое разрушение, зона предразрушения, стохастическое моделирование

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект «Многоуровневое моделирование процессов разрушения повреждающихся конструкционных материалов с фазовыми переходами», (№ 24-21-20122, <https://rscf.ru/project/24-21-20122>).

Благодарности. Авторы выражают благодарность ЦКП ЯНЦ СО РАН и СВФУ им. М.К. Аммосова за содействие в проведении исследований и предоставление оборудования.

Для цитирования: Лепов В.В., Попов Д.Н., Анисимов А.С. Прочность и электропроводность бетонных композитов, модифицированных оксидом графена. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(3):510–520. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-510-520>

Mechanical strength and electrical conductivity of concrete composites enhanced with graphene oxide

Valeriy V. Lepov^{✉,1}, Dmitry N. Popov², Andrey S. Anisimov¹

¹Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

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

✉ wisecold@mail.ru

Abstract

The development and application of “smart”, multifunctional, and hybrid materials are among the most significant areas of modern materials science. This article presents the results of mechanical testing, microstructural analysis, evaluation of electrophysical properties, and stochastic modeling of the failure of samples made from a concrete composite reinforced with recycled secondary materials in the form of reduced graphene oxide. The aim of this work was to create materials with increased strength and a given electrical conductivity. An overview of research on the creation and modeling of failure processes in hybrid materials is provided. Approaches for assessing stress states are presented, and the use of the concept of the pre-fracture zone and structural scale to describe failure processes in quasi-brittle materials is justified. It has been shown that the high strength and electrical conductivity properties of graphene can significantly enhance the characteristics of a hybrid composite material with a low concentration of modifier. Concrete samples were prepared with graphene oxide mass fractions of 0.2% and 0.5%. Structural and chemical characterizations were conducted via scanning electron microscopy and infrared spectroscopy. Mechanical testing demonstrated that the inclusion of reduced graphene oxide at 0.5% concentration increased strength by 48% and decreased electrical resistance to 550–600 ohms, with conductivity values reverting to baseline upon load removal. These findings suggest that graphene modification significantly enhances the electrical and mechanical performance of concrete composites. Therefore, these hybrid materials hold considerable potential for use in structural health monitoring systems, self-heating elements, grounding electrodes, and for improving the reliability and safety of energy infrastructure and engineering systems, especially those functioning in harsh Arctic and Subarctic environments.

Keywords: hybrid material, concrete composite, reduced oxidize-graphene, electrically conductive composite, quasi-brittle fracture, pre-fracture zone, stochastic modeling

Funding. This study was supported by the Russian Science Foundation under the project “Multilevel modeling of fracture processes in damaging structural materials with phase transition” (No. 24-21-20122, <https://rscf.ru/project/24-21-20122>).

Acknowledgements. The authors would like to thank the Core Shared Research Facilities of the Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre SB RAS” and NEFU for their support in conducting the research and providing equipment.

For citation: Lepov V.V., Popov D.N., Anisimov A.S. Mechanical strength and electrical conductivity of concrete composites enhanced with graphene oxide. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(3):510–520. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-510-520>

Введение

В последние годы композиты, армированные волокнами, находят все более широкое применение в гражданском строительстве при реставрации существующих сооружений и при строительстве новых. Такие композиты обладают рядом преимуществ перед сталью, включая высокое соотношение прочности и веса и хорошую коррозионную стойкость. В результате использование стеклопластиковых композитов в качестве

внешнего армирования для модернизации конструкций стало очень популярным в последние годы [1]. В настоящее время во всем мире проводится большое количество исследований, посвященных изучению характеристик различных видов конструкций, изготовленных только из композитов или из композитов в сочетании с другими материалами (гибридных конструкций) [2, 3]. Примерами могут служить стеклопластиковые мостовые покрытия, бетонированные стеклопла-

стиковые трубы в качестве колонн и свай, а также стеклопластиковые кабели.

Но по сравнению со сталью и обычным бетоном такие композиты имеют ряд недостатков, к которым относятся относительно высокая стоимость, линейно-упруго-хрупкое поведение при деформации, низкое отношение модуля упругости к прочности и плохая огнестойкость. При реконструкции экономия средств достигается за счет ряда аспектов, которые компенсируют более высокую стоимость материалов, но при новом строительстве окупаемость их низкая, поскольку модифицированные фиброй композиты по требованиям экономической эффективности, особенно с точки зрения оценки стоимости жизненного цикла [2, 3], используются преимущественно в зонах, подверженных растяжению, а их пониженная огнестойкость приемлема для наружных, включая мостовые, конструкций, но для шахт и взрывоопасных производств требуется создание гибридных жаростойких конструкций, что достигается в настоящее время использованием стали, бетона и добавок в виде дорогих углеродных нанотрубок. Область использования гибридных конструкций в новом строительстве становится отдельным направлением исследований модифицированных полимерных, бетонных и стеклопластиковых композитов. Таким образом, целью использования гибридных конструкций является

достижение оптимальной комбинации для повышения ресурса и надежности, обеспечения экономической эффективности эксплуатации системы.

С другой стороны, гибридные материалы сочетают в себе свойства двух или более монолитных веществ, в том числе находящихся в разном фазовом состоянии [4]. К ним относятся волокнистые и гранулированные композиты, пенопласты и решетки, аэрогели, многослойные (сэндвич) панели, и природные материалы [5, 6]. В настоящее время к ним относят в основном сочетания неорганических и органических материалов с уникальными свойствами, что позволяет находить им широкое применение (рис. 1).

Например, полимерные материалы, являющиеся изоляторами, используются уже как проводники электричества за счет создания специальной молекулярной структуры, например, в электропроводящих сопряженных полимерах (Нобелевская премия по химии за 2000 г.). Эта разработка 1977 г. связана с обнаружением объемных структурных переходов в полимерах, обеспечивающих чувствительность к приложенному напряжению и позволяющих использовать их в качестве сервоприводов.

В качестве примера разработки перспективного гибридного материала можно привести композит на основе бамбукового волокна и графенсодержащих наполнителей [7]. Исследовались композиты, армированные натуральной тканью и полученные путем переплетения бамбуковых волокон методом ручной укладки. Было изучено три состава композита с массовой долей наномодификаторов, таких как оксид графена (ОГ) и флэш-графен (ФГ), в 0,5, 0,75 и 1,0 %. Оказалось, что добавление ФГ в композиты может быть эффективным подходом в плане механических свойств по сравнению с исходной тканью и ОГ-композитом, и при 0,75 мас.% ФГ-композит оказался на 30 % прочнее при растяжении, на 19 по ударной вязкости, на 16 по твердости и 15 % по тепловому прогибу. При содержании наномодификатора выше оптимального механические свойства композита ухудшались.

Гибридные материалы привлекают большое внимание в области хранения энергии, поскольку, например, сочетание углеродных и псевдоемкостных материалов (оксидов переходных металлов или проводящих полимеров) способствует улучшению характеристик суперконденсаторов [3]. Такие структуры могут быть включены в сеть емкостных материалов для получения электродов



Рис. 1. Классификация гибридных материалов по назначению и виду связи

Fig. 1. Classification of hybrid materials by purpose and type of bond

с гибридным электрохимическим откликом, что позволит сократить разрыв между батареями и суперконденсаторами по плотности энергии и мощности. При этом структура материалов для хранения энергии играет фундаментальную роль. Например, уменьшение частиц модификатора до наноразмеров может привести даже к емкостно-подобному поведению материалов. Возможны и множественные гибридизации (углерод/оксид / проводящий полимер).

В строительстве для электроэнергетики электропроводящие бетоны имеют широкие перспективы применения в качестве заземляющих опор, обеспечивающих безопасную эксплуатацию [8]. Применение их в качестве конденсаторов атмосферного электричества, его аккумуляции и хранения требует отдельного рассмотрения, в том числе в составе новейших интегрированных и распределенных сетей [9].

Гибридные материалы и конструкции, таким образом, становятся весьма перспективными областями исследования. Разнообразие получаемых свойств и материалов, используемых при производстве гибридных конструкций, применимо в различных областях, от конструкционного машиностроения, горного производства до электронной и биомедицинской промышленности. Многофункциональные композиты становятся наиболее высокотехнологичными инженерными материалами, способными выдерживать механические нагрузки и отличающимися высокой термостабильностью, усталостной прочностью, а также повышенной коррозионной стойкостью.

Однако проектирование таких композитов с заранее заданными свойствами представляет собой трудную задачу. Гибрид материалов с разной прочностью порождает композит с промежуточными механическими свойствами, зависящими от содержания компонентов, например, льда и базальтовой фибры [10]. При этом можно добиться существенного упрочнения материала в определенном направлении. Однако добиться заданных физических свойств, например электро- и теплопроводности, а также емкости (как конденсатора), например электропроводящих бетонов, сложнее.

Усложняется также задача моделирования разрушения хрупких материалов. В отличие от вязких, в квазихрупких гибридных композитах напряженное состояние в вершине трещины отличается более широкой и затупленной зоной предразрушения (ЗПР) с накопленными микропо-

вреждениями [11]. Так, для бетона предел прочности и трещиностойкость будут зависеть от размера этой зоны, поскольку высокий уровень поглощения энергии повышает вязкость разрушения, однако понижает прочность ввиду более раннего зарождения трещины.

Кроме геометрии зоны предразрушения, значимыми представляются также энергия разрушения и характерный структурный параметр (размер) материала. Структурный параметр c_c связан с размером микроструктурных элементов материала (зерна, заполнителя) и определяет масштаб, на котором материал переходит от хрупкого поведения к квазихрупкому. Таким образом, в крупнозернистом бетоне в вершине трещины зона предразрушения больше, чем в мелкозернистом. Саму зону при этом можно рассматривать как совокупность n элементов микроструктуры (зерен, или частиц), участвующих в процессе разрушения. Предел прочности материала $\sigma_{сж}$ и трещиностойкость K_{IC} в значительной степени определяются развитием ЗПР: большее поглощение энергии и высокая трещиностойкость, малая номинальная прочность материала из-за раннего зарождения трещины.

Материалы и методы

По результатам испытаний различных бетонов ширина ЗПР примерно в 3 раза превышает максимальный размер крупного заполнителя: $b_n = 3 \cdot c_c$, а длина порядка $l_n = 1,5 \cdot c_c$. Тогда предельная нагрузка на образец с надрезом (трещиной) может быть выражена через структурный параметр [12]

$$P_{max} = A_3 \cdot \sigma_t \quad (1)$$

где σ_t – предел прочности на разрыв, а A_3 – коэффициент, имеющий размерность площади ($\sim \pi \cdot c_c^2$) и зависящий от характеристик ЗПР и геометрии образца.

Соотношение (1) обобщает классический критерий прочности материалов и линейно-упругий критерий Гриффитса для квазихрупкого случая. Также известно соотношение, связывающее предел прочности и вязкость разрушения:

$$K_{IC} = 2 \sigma_t c_c^{1/2} \quad (2)$$

Для различных хрупких и квазихрупких материалов структурный параметр c_c может различаться весьма существенно. Так, для монокристаллического кремния структурный параметр – размер атома $\sim 3 \text{ \AA}$, а для бетона с крупным наполнителем – около 20 мм. В табл. 1 указаны прочность

Структурный параметр и трещиностойкость материалов согласно (2)

Table 1

Structural parameter and crack resistance of materials according to (2)

| Материал | σ_p , МПа | c_c , м | P_{max} , Н | K_{IC} , МПа·м ^{1/2} |
|---------------|------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| Кремний | ~2000 | ~3 · 10 ⁻¹⁰ | ~5,7 · 10 ⁻¹⁰ | ~6900 |
| Гранит | ~100 | ~2,5 · 10 ⁻³ | 1960 | ~10 |
| Бетон В15М200 | ~15 | ~2 · 10 ⁻² | 18850 | ~4,7 |
| Керамика | ~50 | ~5 · 10 ⁻⁴ | ~40 | ~0,42 |
| ОГ-бетон В15 | ~45 | ~2 · 10 ⁻⁵ | ~ 0,057 | ~0,4 |

Таблица 2

Состав бетонной смеси
для гибридного материала

Table 2

Composition of concrete mixture
for hybrid material

| Состав | Масса, кг |
|--|---------------|
| Портландцемент СЕМ I 32, 5 % | 5,62 |
| Известняковый заполнитель, град. 10–20 и 20–40 мм | 16,16 |
| Вода | 2,76 |
| Речной песок | 7,73 |
| Пластификатор + жидкое стекло | 0,114 |
| Восстановленный оксид графена (ОГ), 0,2 и 0,5 мас. % | 0,011 и 0,031 |

и структурные параметры некоторых материалов, а также вычисленные по (1), (2) предельные нагрузки и трещиностойкость. Следует учитывать, что расчетные параметры являются локальными и указывают на способность образования трещины в ЗПР и поглощение в ней энергии деформации.

С целью разработки передовых материалов для конструкционных применений и исследования влияния оксида графена на электропроводность и механические свойства цементных композитов выполнена серия экспериментов. Высокие электропроводность и прочность графена могут значительно улучшить свойства бетонных матриц. Исследователями рассматривались проблемы агрегации частиц графена в цементной матрице, приводящей к неоднородности и снижению армирующего эффекта, а также проблемы производства таких композитов [13–19]. Предложено использовать оксид графена, а также наносити графен на поверхность заполнителей [16].

Для создания электропроводящих бетонов важен выбор электропроводящих добавок [17], а для повышения стабильности и чувствительности электрических характеристик к механическим воздействиям требуется разработка специальных композитных бетонов [18, 19]. И хотя потенциал графена в качестве функциональной добавки весьма высок, использование графеновых бетонов в качестве «умных» материалов для самодиагностики все еще находится на стадии изучения.

Для исследования свойств взяты образцы бетона марки М15, модифицированные восстановленным ОГ в количестве 0,2 и 0,5 % от массы цемента (табл. 2). Для характеристики взаимодействия между ОГ и цементной матрицей были использованы методы спектроскопии, включая комбинационную и инфракрасную.

В качестве пластифицирующей добавки для бетонов в данной работе используется высококонцентрированная суперпластифицирующая добавка на основе полиариловых и поликарбоксилатных эфиров для бетонов с повышенной ремонтпригодностью – MasterPolyheed 4001 для уменьшения замедляющего воздействия на гидратацию цемента, в соответствии с организационным стандартом STO 70386662-309-2021. За рабочий состав бетона был принят состав, подобранный по ГОСТ 27006-2019 для выбранных материалов по нормативной прочности, соответствующей классу В12.5 в соответствии с межгосударственным стандартом ГОСТ 26633-2015. Исходные компоненты, указанные в табл. 1, были смешаны с использованием лабораторного миксера LS-СВ-10 и утрамбованы в формах размером 100×100×400 мм с использованием вибростолы ВМ-6.4 в соответствии с межгосударственным стандартом ГОСТ 10180-2012. Взвешивание компонентов производилось на электронных весах

A&D GF-6100. Бетон готовился в лаборатории «Строительные материалы» ИТИ СВФУ.

Для измерения удельного сопротивления бетонов в свободном состоянии использовался цифровой мультиметр FAZA MAS830L (Россия). Удельное сопротивление бетона при нагрузке измеряли с помощью программируемого источника питания АКТАКОМ APS-7151 (Финляндия). Для этой цели в образцы в виде призм размером $40 \times 10 \times 10$ см во время формования были встроены четыре сетчатых электрода из нержавеющей стали размером 8×12 см. Анализ поведения удельного электрического сопротивления бетона при деформации проводился в соответствии с межгосударственным стандартом ГОСТ 10180-2012.

Результаты и обсуждение

Результаты показали, что добавление ОГ снизило электрическое сопротивление, которое для образцов с содержанием ОГ 0,2% уменьшилось примерно с 600 Ом до 550 Ом при сжатии, а за-

тем вернулось к исходным значениям. Измерения, проведенные как двухзондовым методом, так и с помощью цифрового мультиметра, показали, что увлажненный материал может обнаруживать нагрузки даже при надавливании пальцем (~ 1 Н). Предельная прочность составила около 40–50 кН с резким снижением удельного сопротивления при разрушении (давление пластины на 100 см^2). Испытания на прочность при сжатии показали увеличение прочности на 48 % при использовании всего 0,05 % оксида графена. Эти результаты свидетельствуют о том, что включение графена повышает как электропроводность, так и механическую прочность, это делает композиты пригодными одновременно как для мониторинга технического состояния зданий и сооружений, так и для самонагревающихся систем.

Результаты рамановской и ИК-спектроскопии подтвердили успешное внедрение частиц оксида графена в минеральную матрицу бетона (рис. 2).

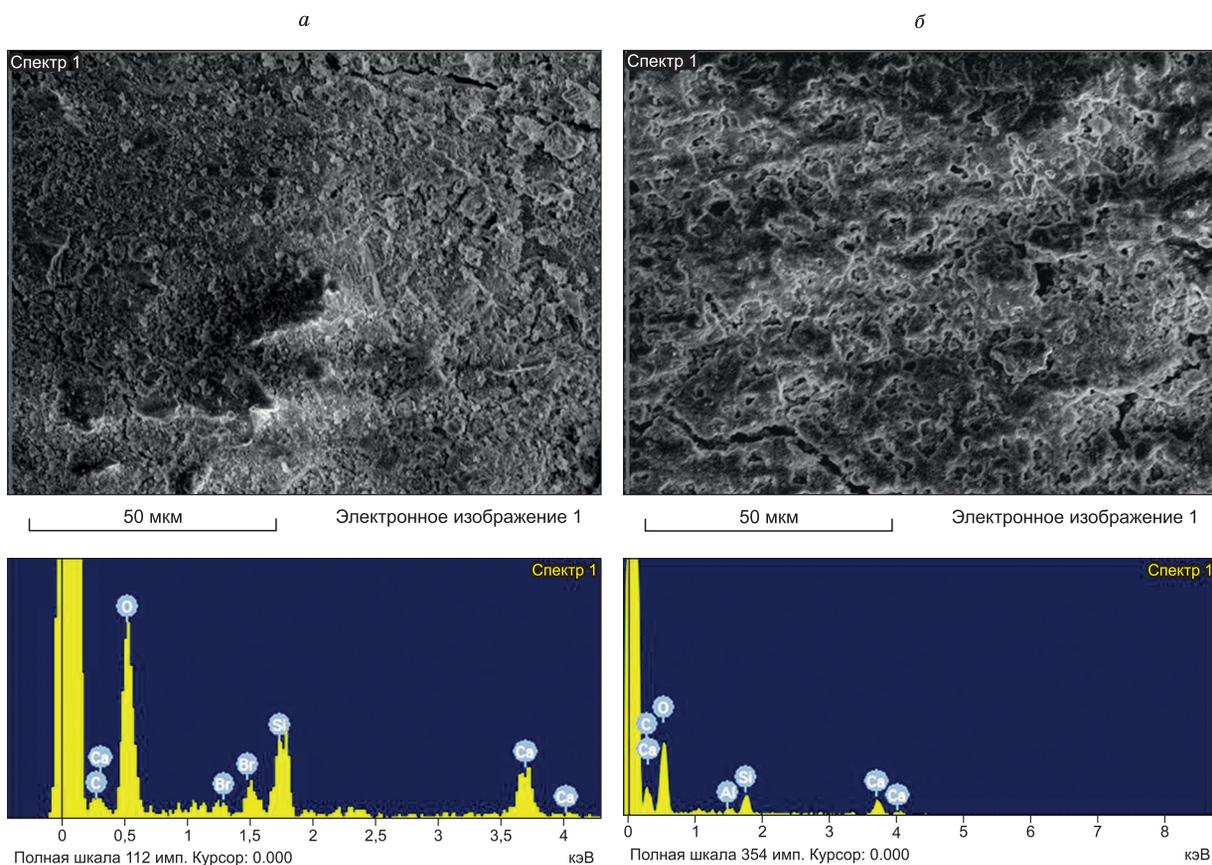


Рис. 2. Микроизображения поверхности и данные ИК-спектроскопии образцов после испытаний с дефектами в виде: пор и микротрещин (а) и микро- и макротрещин (б)

Fig. 2. Surface scan images and IR spectroscopy data for testing samples reveal defects such as pores and microcracks (a), micro- and macrocracks (b)

Структурные искажения и различные дефекты, наблюдаемые в графене, свидетельствуют о его взаимодействии с компонентами цементного композита.

Добавление ОГ в количестве 0,2 % от массы цемента снизило удельное сопротивление с увеличением прочности вследствие уплотнения, что и повысило проводимость. Скорость изменения удельного сопротивления при дальнейшем сжатии уменьшалась, и при определенном уровне нагрузки было отмечено резкое падение проводимости, что свидетельствует о высокой чувствительности проводящих свойств ОГ-композита к механическим повреждениям.

Определение свойств композитов как гибридных материалов в случае отсутствия экспериментальных данных может быть осуществлено с помощью подходов Фойгта и Рейсса, которые применяются, в частности, для оценки эффективного модуля упругости композита на основе соотношения его компонентов без необходимости рассмотрения особенностей микроструктуры [8]. Подход применим также для оценки теплопроводности гибридных материалов при допущениях идеального контакта между матрицей (здесь бетонной) и частицами модификатора (ОГ), возможности осреднения температур и теплового потока по представительному объему [20].

На рис. 3 показаны диаграммы деформации образцов композита при испытании на сжатие при различных концентрациях ОГ в течение 7, 14 и 28 дней. По результатам испытаний бетона марки В12.5 (прочность до 12,5–15,5 МПа) с содержанием МОГ 0,2 и 0,5 % от массы цемента было выявлено, что при добавлении МОГ в бетонную смесь удельное сопротивление готового изделия снижается с увеличением внешней нагрузки (сжатия). Скорость изменения удельного сопротивления бетона снижалась с увеличением сжатия образца (рис. 4). Предел текучести бетона наблюдался в диапазоне 40–50 кН для всех возрастов бетона.

Рисунок 4 иллюстрирует изменение электропроводности с ростом нагрузки для всех образцов, что указывает на чувствительность бетона к деформации при сжатии. Быстрее всего проводимость растет в начале нагрузки, а затем рост замедляется. Для образца с 0,2 мас.% графена электрическое сопротивление падает более резко (в 2 раза), чем для образца с 0,5 мас.% графена. Чувствительность к деформации выше у образцов

с 7-дневной выдержкой по сравнению с образцами с 14- и 28-дневной выдержкой. При достижении предела прочности происходит резкий скачок электрического сопротивления, связанный с разрушением образца. Диаграммы имеют сходный характер для всех периодов отверждения, что указывает на воспроизводимость результатов. Таким образом, введение графена повышает чувствительность бетона к деформации при сжатии. Эти графики иллюстрируют возможность использования бетона, модифицированного графеном, в качестве самочувствующего «умного» материала.

Стохастическое моделирование и визуализация процесса разрушения новых композиционных материалов осуществляется при известных внутренней структуре и характеристиках частиц, содержащих ОГ [5, 6], а также с применением концепции ЗПР для квазихрупких материалов [11]. На рис. 5 показана микроструктура поверхности образцов после испытаний с дефектами в виде пор и микротрещин (*a*) и микро- и макротрещин (*b*). Выявлен эффект огибания дефекта. Тем самым выявлен механизм разрушения гибридного материала, когда мелкие частицы в ОГ-бетоне инициируют микротрещины, но макротрещина растет только вокруг крупного дефекта. Для достоверности подобного моделирования необходима достаточно полная база данных по разрушению бетона без модификаторов из той же партии, а также точное распределение дефектов и включений в образцах.

Заключение

Таким образом, введение восстановленного окисленного графена улучшило электропроводящие свойства бетона как гибридного материала широкого применения. Образцы гибридного композита – модифицированного оксидом графена бетона марки М15, – продемонстрировали снижение удельного сопротивления с начала нагружения до 550–600 Ом и возврат к исходным значениям после разгрузки. Предел текучести составил около 40–50 кН. Для кубических образцов повышение чувствительности к внешним нагрузкам требовало повышенной влажности. Измерения, проведенные как двухзондовым методом, так и цифровым мультиметром, показали обнаружение нагрузки влажным материалом даже при надавливании пальцем (1 Н).

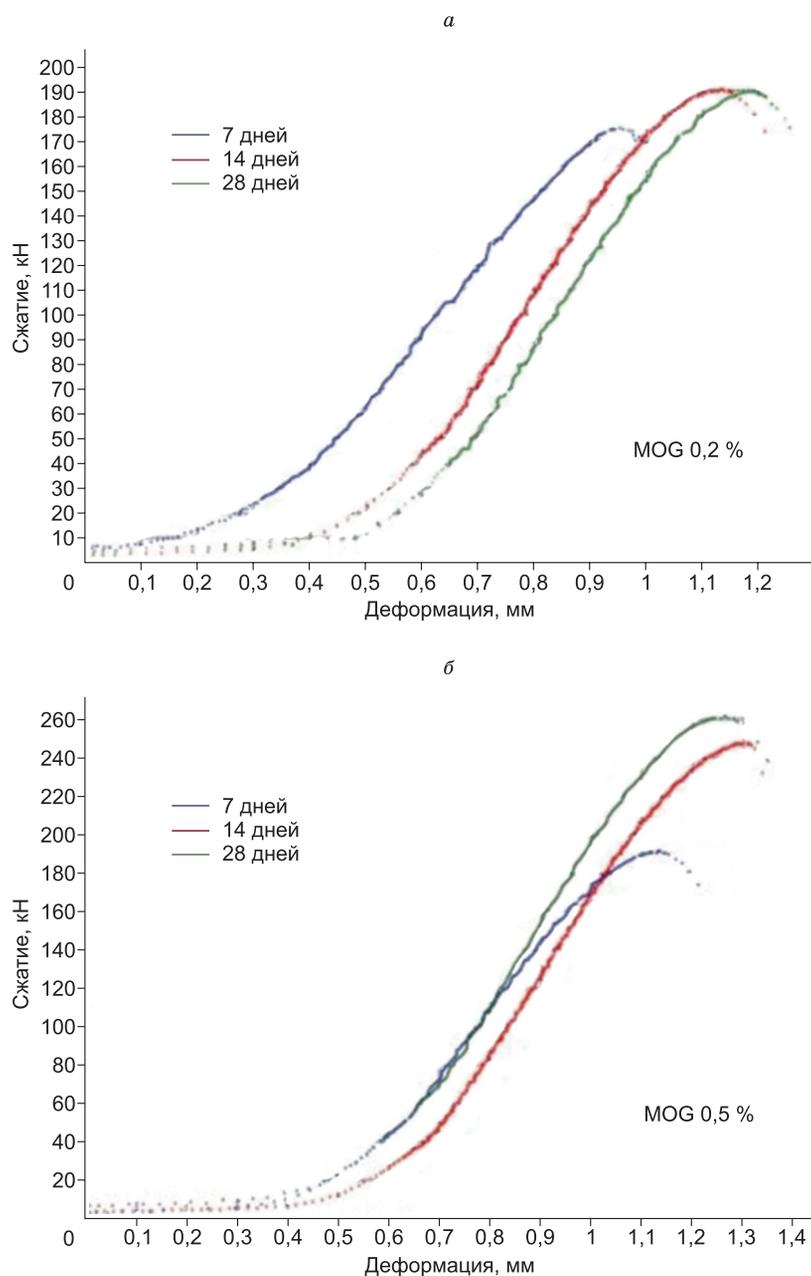


Рис. 3. Диаграммы деформации ОГ-бетонного композита при испытании на сжатие в течение 7, 14 и 28 дней при концентрациях ОГ, мас. %: 0,2 (а), 0,5 (б)

Fig. 3. Deformation diagrams of OG-composite under compression test after 7, 14 and 28 days at OG concentrations of: а) 0.2%; б) 0.5%

Введение восстановленного оксида графена значительно улучшило электропроводящие свойства бетона, открывая широкие перспективы применения благодаря возможности:

- электромагнитного экранирования в жилых и промышленных зданиях;

- экономичного обогрева дорожных покрытий, полов внутри помещений, предотвращения обледенения за счет резистивного или индукционного нагрева;

- мониторинга механических напряжений и деформаций для обеспечения целостности и эффективности эксплуатации конструкции;

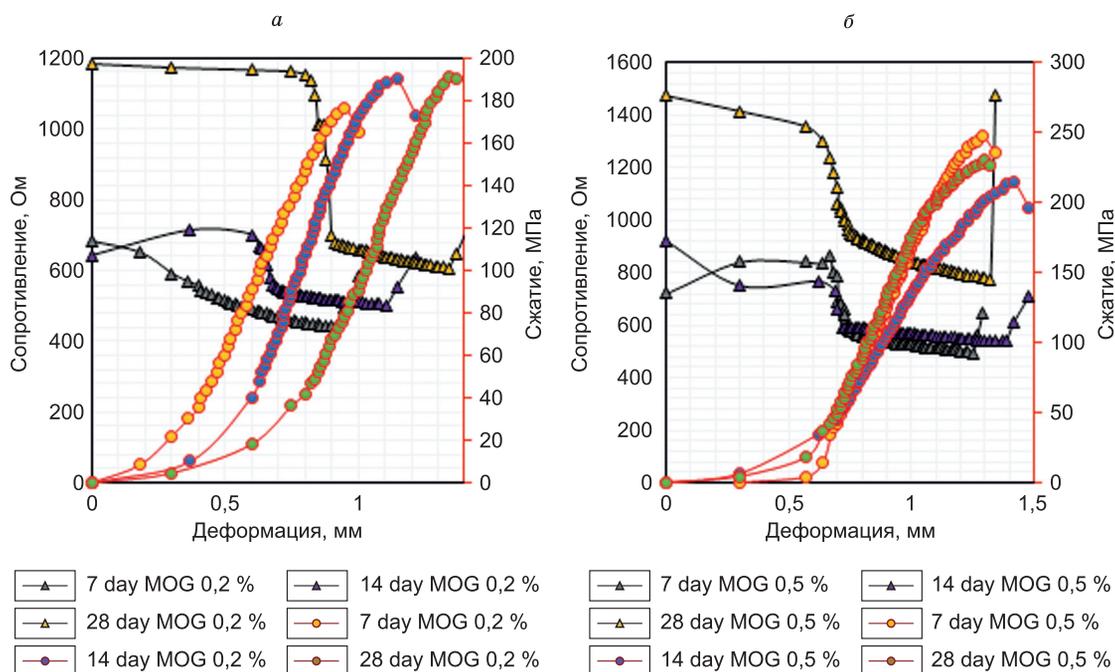


Рис. 4. Диаграммы внутреннего сопротивления и деформации образцов в течение 7, 14 и 28 дней отверждения с содержанием ОГ 0,2 (а) и 0,5 мас.% (б)

Fig. 4. Diagrams of internal resistance and deformation of samples during 7, 14, and 28 days of solidification with 0.2% (a) and 0.5% (b) OG content

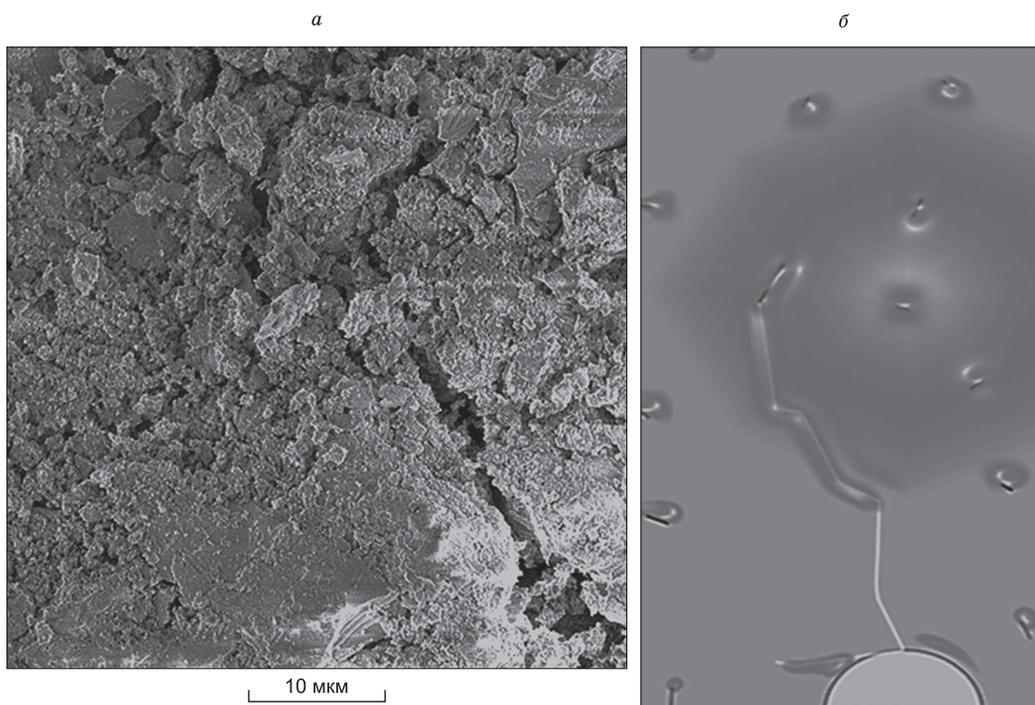


Рис. 5. Изображение поверхности разрушенного образца из бетона, предварительно модифицированного восстановленным ОГ с трещиной (а), и визуализация результата стохастического моделирования роста трещины (б) в образце ОГ-композиата под действием сжимающей нагрузки

Fig. 5. Image of the surface of a fractured specimen showing a crack (a) and a visualization of the stochastic modeling of crack growth (b) in a sample of OG-composite subjected to a compressive load test

- обеспечения защиты от коррозии и морозно-го растрескивания железобетонных конструкций, подверженных воздействию агрессивных сред;
- накопления энергии в качестве емкостного элемента для использования в виде батарей и суперконденсаторов;
- использования в качестве беспроводной зарядки на дороге для электромобилей, с целью увеличения пробега.

Список литературы / References

1. Yu T., Remennikov A.M. Novel hybrid FRP tubular columns for sustainable mining infrastructure: Recent research at University of Wollongong. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2014;24(3):311–316. <http://doi.org/10.1016/j.ijmst.2014.03.004>
2. Das P.P., Chaudhary V., Singh R.K., et al. Advancement in hybrid materials, its applications and future challenges: A review. *Materials Today: Proceedings*. 2021;47(13): 3794–3801. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.009>
3. Gomez-Romero P., Pokhriyal A., Rueda García D., et al. Hybrid Materials: A metareview. *Chemistry of Materials*. 2023; 36(1):8–27. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.3c01878>
4. Ashby M.F., Bréchet Y.J.M. Designing hybrid materials. *Acta Materialia*. 2003;51(19):5801–5821. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(03\)00441-5](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(03)00441-5)
5. Bisong M.S., Lepov V.V., Landrine T. Physico-mechanical characteristics and multiscale stochastic modeling of cement mortar reinforced with oil palm mesocarp fibers. *Industrial Laboratory. Materials Diagnostics*. 2022;88(5):62–70. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-5-62-70>
6. Лепов В.В., Бисонг С.М., Голых Р.Н. Многоуровневый подход к моделированию процессов разрушения материалов с субмикроструктурой, применимых в условиях Арктики и Субарктики. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(1):156–171. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-156-171>
- Lepov V.V., Bisong S.M., Golykh R.N. Foundation of multilevel approach to fracture modeling for materials with submicrostructure applicable for Arctic and Subarctic environment. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(1):156–171. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-156-171>
7. Sandip Ku. Khatua, Pritam Ku. Sahoo, Kumari K., et al. Behavioural study of graphene oxide/functionalized graphene on bamboo fiber reinforced composite. *Materials Today: Proceedings*. 2021;47(13):3633–3636. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.100>
8. Агунов А.В., Терёхин И.А., Баранов И.А. Анализ применения электропроводящих бетонов в электроэнергетике. *Транспортные системы и технологии*. 2021;7(2):5–15. <https://doi.org/10.17816/transsyst2021725-15>
- Agunov A.V., Terekhin I.A., Baranov I.A. Analysis of the application of electric conducting concrete in the power industry. *Transportation Systems and Technology*. 2021;7(2):5–15. (In Russ.) <https://doi.org/10.17816/transsyst2021725-15>
9. Karamov D.N., Minarchenko I.M., Kolosnitsyn A.V., Pavlov N.V. Installed capacity optimization of autonomous photovoltaic systems under energy service contracting. *Energy Conversion and Management*. 2021;240:114256. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114256>
10. Лепов В.В., Дьячковский И.И. Моделирование разрушения композиционного материала на основе ледовой матрицы. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(2):313–325. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-313-325>
- Lepov V.V., Dyachkovsky I.I. Modeling of ice-matrix composite fracture. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(2): 313–325. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-313-325>
11. Wu Y., Wang T., Duan J., Song L. Mesoscale numerical study of size effect on concrete fracture characteristics based on FDEM. *Electronic Journal of Structural Engineering*. 2025;25(1): 46–51. <https://doi.org/10.56748/ejse.24667>
12. Liu Y., Liu X., Zhang H., Zhu F. A size effect model combining both surface effects and the Fracture Process Zone (FPZ) for rocks under uniaxial compression. *Applied Sciences*. 2024;14(20):9413. <https://doi.org/10.3390/app14209413>
13. Yuxia Suo, Rongxin Guo, Haiting Xia, et al. A review of graphene oxide/cement composites: Performance, functionality, mechanisms, and prospects. *Journal of Building Engineering*. 2022;53:104502. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104502>
14. Polverino S., Del Rio Castillo A.E., Brencich A., et al. Few-layers graphene-based cement mortars: production process and mechanical properties. *Sustainability*. 2022;14(2):784. <https://doi.org/10.3390/su14020784>
15. Papanikolaou I., Arena N., Al-Tabbaa A. Graphene nanoplatelet reinforced concrete for self-sensing structures – A lifecycle assessment perspective. *Journal of Cleaner Production*. 2019;240:118202. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118202>
16. Gokhale D.G.K., Kaish A.B.M.A. Recent trends in incorporating graphene coated sand in self-sensing cementitious composites. *Materials Proceedings*. 2023;14(1):48. <https://doi.org/10.3390/IOC2023-14544>
17. Wang Z., Wang Z.-J., Ning M., et al. Electro-thermal properties and Seebeck effect of conductive mortar and its use in self-heating and self-sensing system. *Ceramics International*. 2017;43(12):8685–8693. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.03.202>
18. Hu Y.G., Awol J.F., Chen S., et al. Experimental study of the electrical resistance of graphene oxide-reinforced cement-based composites with notch or rebar. *Journal of Building Engineering*. 2022;51:04331. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104331>
19. Lavagna L., Santagati A., Bartoli M., et al. Cement-based composites containing oxidized graphene nanoplatelets: effects on the mechanical and electrical properties. *Nanomaterials*. 2023;13(5):901. <https://doi.org/10.3390/nano13050901>
20. Андреев А.Н. Моделирование процессов теплопроводности в однонаправленно армированных композитных средах. *Вестник Кемеровского государственного университета*. 2015;62(2-1):6–10.
- Andreev A.N. Modeling the thermal conductivity processes in unidirectionally reinforced composite environments. *Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2015;62(2-1): 6–10. (In Russ.)

Об авторах

ЛЕПОВ Валерий Валерьевич, доктор технических наук, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-2360-7983>, ResearcherID: F-9875-2011, Scopus Author ID: 6508081764, SPIN: 1397-6725, e-mail: wisecold@mail.ru

ПОПОВ Дмитрий Николаевич, инженер лаборатории инновационных технологий «Север»; аспирант, <https://orcid.org/0000-0001-9639-7601>, Scopus Author ID: 58879397600, SPIN: 6042-8027, e-mail: dmiitryy09@gmail.com

АНИСИМОВ Андрей Сергеевич, аспирант, e-mail: bspaladin@yandex.ru

Вклад авторов

Лепов В.В. — разработка концепции, методология, программное обеспечение, проведение исследования, редактирование рукописи, визуализация, руководство исследованием, администрирование проекта; **Попов Д.Н.** — верификация данных, проведение исследования, создание черновика рукописи; **Анисимов А.С.** — методология, создание черновика рукописи

Конфликт интересов

Один из авторов – доктор технических наук, главный научный сотрудник Лепов Валерий Валерьевич является членом редакционного совета журнала «Природные ресурсы Арктики и Субарктики». Авторам неизвестно о каком-либо другом потенциальном конфликте интересов, связанном с этой рукописью.

About the authors

LEPOV, Valeriy Valerievich, Dr. Sc. (Eng.), Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-2360-7983>, ResearcherID: F-9875-2011, Scopus Author ID: 6508081764, SPIN: 1397-6725, e-mail: wisecold@mail.ru

POPOV, Dmitry Nikolaevich, Engineer of Innovative Technologies Laboratory “Sever”; Post-graduate Student, <https://orcid.org/0000-0001-9639-7601>, Scopus Author ID: 58879397600, SPIN: 6042-8027, e-mail: dmiitryy09@gmail.com

ANISIMOV, Andrey Sergeevich, Post-graduate Student, e-mail: bspaladin@yandex.ru

Authors' contribution

Lepov V.V. – conceptualization, methodology, software, formal analysis, investigation, visualization, supervision, project administration; **Popov D.N.** – validation, investigation, original draft; **Anisimov A.S.** – methodology, original draft

Conflict of interest

One of the authors – Valeriy V. Lepov, Dr. Sci. (Eng.), 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 manuscript.

Поступила в редакцию / Submitted 16.06.2025

Поступила после рецензирования / Revised 24.07.2025

Принята к публикации / Accepted 30.07.2025

ЮБИЛЕИ

Борису Моисеевичу Кершенгольцу 75 лет



6 сентября 2025 г. исполнилось 75 лет известному ученому, организатору науки и высшего образования, почетному работнику науки и техники РФ, заслуженному деятелю науки РС (Я), лауреату Государственной премии в области науки и техники РС (Я), заслуженному деятелю науки СО РАН, доктору биологических наук, профессору, академику АН РС (Я) Борису Моисеевичу Кершенгольцу.

Б.М. Кершенголец родился в семье педагогов в г. Якутск. Его научная и профессорская деятельность на протяжении почти 50 лет неразрывно связана с научно-образовательной сферой Республики Саха (Якутия).

В 1976 г. после окончания химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, аспирантуры и защиты кандидатской диссертации вернулся в г. Якутск, работал на БГФ ЯГУ, пройдя путь от ассистента до декана факультета, в течение 18 лет возглавлял кафедру биохимии.

Значимый период научной жизни Бориса Моисеевича (с 1978 г. по наст. время) посвящен дея-

тельности в ИБПК СО РАН: ученый секретарь, зам. директора по научной работе, многие годы заведующий лабораторией биохимического направления, в настоящее время г.н.с. отдела экологической, медицинской биохимии и биотехнологии. В 1992 г. защитил докторскую диссертацию в Институте биохимии им. А.Н. Баха РАН (г. Москва), в 2000 г. присвоено звание профессора по кафедре биохимии.

На протяжении более 40 лет руководил 12 крупными научными государственными заданиями в области физико-химической биологии и биотехнологии, выполняемыми в ЯГУ и ИБПК СО РАН, включая грант Госкомитета по науке и технике при Совете Министров СССР (1984–1988 гг.).

В 1993 г. был избран в первый состав членов Академии наук РС (Я), где ярко раскрылся талант организатора, интегратора науки. Все четыре президента академии желали видеть динамичного, компетентного Бориса Моисеевича в своей команде и возлагали на него выполнение ответственных должностей главного ученого секретаря, вице-президента и советника Академии наук РС (Я).

Б.М. Кершенгольцем создана научная школа в области экологической, медицинской биохимии и биотехнологии, под его руководством и при консультативной помощи защищено 26 кандидатских и 5 докторских диссертаций. Многие его ученики ныне работают в ведущих вузах и научных институтах России и за рубежом. Он автор и соавтор более 500 научных трудов, в том числе 22 крупных монографий, учебников и учебных пособий для вузов, 63 авторских свидетельств СССР и патентов РФ, 7 временных фармацевтических статей и свидетельств Роспотребнадзора (ЕВРАЗЭС) на БАДы, 5 рекомендаций для практического здравоохранения, утвержденных Министерствами здравоохранения РСФСР и РС (Я).

Спектр современных научных интересов Б.М. Кершенгольца весьма широк и охватывает:

– изучение биохимических механизмов адаптации организмов растений и животных к дейст-

ЮБИЛЕИ

вию комплекса стресс-факторов среды химической, физической, биологической природы (человека – также к психогенным стресс-факторам);

– изучение биохимических механизмов патогенеза ряда заболеваний человека: сахарного диабета и атеросклероза, вирусных гепатитов, туберкулеза и COVID-19, болезней адаптации, остеопороза, постоперационных осложнений и др., разработку методов их биохимической и биофизической диагностики, профилактики лечения и реабилитации;

– физико-химические биотехнологии производства комплексов природных биоактивных веществ медицинского, пищевого, косметологического назначения;

– биохимические и биофизические механизмы процессов самоорганизации различных систем: глобального климата, социума, воды, нейронной сети организма высших животных и др.;

– холодовые технологии применительно к созданию криохранилищ семян растений и других биообъектов в толще многолетнемерзлых пород за счет использования только природного холода.

Б.М. Кершенгольц – один из организаторов журнала «Природные ресурсы Арктики и Субарктики» по биологическому направлению.

Уважаемый Борис Моисеевич! Желаем Вам крепкого здоровья, счастья, неиссякаемой творческой энергии, успехов в реализации всех планов, благополучия родным и близким!

*И.И. Колодезников,
президент Академии наук РС (Я) (2008–2019 гг.)*