

ПРИРОДНЫЕ РЕСУРСЫ АРКТИКИ И СУБАРКТИКИ

(до 2018 г. «Наука и образование»)

Научный журнал

2025, Том 30, № 1

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,
мерзловедению, экологии, биологическим ресурсам
и материаловедению арктических и субарктических
регионов

Главный редактор

Л.Н. Владимиров

Член-корреспондент РАН

Заместители главного редактора:

В. Ю. Фридовский, член-корр. РАН

Н.С. Данилова, д-р биол. наук

Ответственный секретарь

З.А. Корнилова

Адрес редакции:

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

<https://resar.elpub.ru>

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

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

© Академия наук РС(Я), 2025
© ФИЦ «Якутский научный центр», 2025
© Северо-Восточный федеральный университет
им. М.К. Аммосова, 2025
© Министерство образования и науки РС(Я), 2025

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

ARCTIC AND SUBARCTIC NATURAL RESOURCES

(until 2018 “Nauka i Obrazovanie”)

Scientific journal

2025, Vol. 30, No. 1

Founded in 1996
4 issues per year

Founders

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

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

Editor-in-Chief

L.N. Vladimirov

Corresponding Member, RAS

Deputy Editors-in-Chief:

V.Yu. Fridovsky

Corresponding Member, RAS

N.S. Danilova

Dr. Sci. (Biol.)

Executive Editor

Z.A. Kornilova

Editorial Office Address:

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

<https://resar.elpub.ru>

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

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

© Academy of Sciences of RS (Ya), 2025
© Federal Research Centre “The Yakut
Scientific Centre of SB RAS”, 2025
© M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, 2025
© Ministry of Education and Science of RS (Ya), 2025

ПРИРОДНЫЕ РЕСУРСЫ АРКТИКИ И СУБАРКТИКИ

ARCTIC AND SUBARCTIC NATURAL RESOURCES

Редакционный совет:

Крымский Г.Ф., *акад. РАН, ИКФИА СО РАН*; Лебедев М.П., *чл.-корр. 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*
Хуббертен Х.-В., *д-р, проф., Потсдамский ф-л Ин-та полярных и морских исслед. им. А. Вегенера, Потсдам, Германия*
Яковлев В.Л., *чл.-корр. РАН, ИГД УрО РАН, Екатеринбург, Россия*

Биологические науки

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

Материаловедение и химические технологии

Аннин Б.Д., *акад. РАН, ИГиЛ СО РАН, Новосибирск, Россия*
Дэ-Ён Чонг, *д-р, проф., Ун-т Инха, Инчхон, Республика Корея*
Качанов М.Л., *д-р, проф., Ун-т Тафтса, Медфорд, США*
Лепов В.В., *д.т.н., ИФТПС СО РАН, Якутск, Россия*
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, *Corresponding Member, 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*
H.-V. Hubberten, *Dr., Prof., Alfred Wegener Inst. for Polar and Marine Research, Potsdam Research Unit, Potsdam, Germany*
V.L. Yakovlev, *Corresponding Member, RAS, Inst. of Mining UB RAS, Yekaterinburg, Russia*

Biological Sciences

George Archibald, *Dr., International Crane Foundation, Baraboo, USA*
L.-Z.V. Budazhapov, *Corresponding Member, RAS, AS RS(Ya), Yakutsk, Russia*
N.S. Danilova, *Dr. Sci. (Biol.), Prof., Inst. for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Yakutsk, Russia*
B.M. Kershengolts, *Dr. Sci. (Biol.), Prof., Inst. for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Yakutsk, Russia*
Tetsuya Hiyama, *Dr., Prof., Nagoya Univ., Nagoya, Japan*
A.P. Isaev, *Dr. Sci. (Biol.), Inst. for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Yakutsk, Russia*
L.L. 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.), Larionov Inst. of Physical and Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk, Russia*
A.A. Okhlopova, *Dr. Sci. (Eng.), Prof., M.K. Ammosov NEFU, Yakutsk, Russia*
M.H. Salakhov, *Dr. Sci. (Phys. and Math.), Prof., Kazan Federal Univ. Kazan, Russia*

СОДЕРЖАНИЕ

Науки о Земле

Геология и полезные ископаемые

Схема создания редкометалльного кластера в Республике Саха (Якутия) <i>Матвеев А.И., Толстов А.В., Петров И.М.</i>	7
Гранитоидный магматизм Чохчуро-Чекурдахской зоны (север Верхояно-Колымского орогена) <i>Трунилина В.А.</i>	28

Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

Первые результаты мониторинга развития полигонального рельефа в зоне взаимодействия торфяник–озеро на севере Пур-Тазовского междуречья в 2021–2023 гг. <i>Данько М.М., Хомутов А.В.</i>	49
Подбор оптимальной модели климатического реанализа по годовой сумме осадков для территории Республики Саха (Якутия) <i>Тананаев Н.И.</i>	61
Изменение геоэкологических условий межгаласий Центральной Якутии при прогнозируемом потеплении климата <i>Новоприезжая В.А., Федоров А.Н.</i>	73

Биологические науки

Экология

Климатический отклик радиального роста лиственницы Каяндера и сосны обыкновенной в Центральной Якутии <i>Чжан С., Николаев А.Н., Арсак А., Колмогоров А.И., Васильев М.С., Пестрякова Л.А.</i>	85
Микроорганизмы мерзлотных лугово-степных почв Центральной Якутии <i>Кузьмина Н.П., Ермолаева С.В., Чевычелов А.П.</i>	97
Почвы на лёссовидных суглинках в сезонном мерзлотных ландшафтах Селенгинского среднегорья (Западное Забайкалье) <i>Сымпилова Д.П., Гынинова А.Б., Шахматова Е.Ю.</i>	109
Устойчивость ландшафтов и современное состояние фитопланктона водотоков Куларского золотоносного района <i>Копырина Л.И., Николаева Н.А.</i>	119

Биологические ресурсы

Динамика численности охотничьих видов млекопитающих Якутии в XX веке <i>Мордосов И. И., Мордосова Н. И.</i>	130
Структура и пространственное распределение сообществ прямокрылых насекомых (Orthoptera) таежно-аласных ландшафтов Лено-Амгинского междуречья (Центральная Якутия). Ч. 2. Сообщества прямокрылых Абалахской террасы <i>Ермакова Ю.В., Бурнашева А.П.</i>	139

Материаловедение и химические технологии

Исследование сохранения физико-механических свойств стекло-углепластиков при провокационном биозаражении в условиях холодного климата <i>Кычкин А.К., Кычкин А.А., Стручков Н.Ф.</i>	148
Обработка быстрым джоулевым нагревом углеродных пленок, сформированных осаждением в плазме метана <i>Неустроев Е.П., Прокопьев А.Р.</i>	162

CONTENTS

Earth sciences

Geology and mineral resources

The proposal for developing a rare metal cluster in the Republic of Sakha (Yakutia) <i>Matveev A.I., Tolstov A.V., Petrov I.M.</i>	7
Granitoid magmatism of the Chokhchuro-Chekurdakh zone (north of the Verkhoyansk-Kolyma orogen) <i>Trunilina V.A.</i>	28

Engineering geology, permafrost and soil science

The first results of monitoring the development of polygonal relief in the peatland-lake interaction zone in the Northern Pur-Taz interfluvium from 2021 to 2023 <i>Danko M. M., Khomutov A.V.</i>	49
Selection of the best-performing climate reanalysis model for the Republic of Sakha (Yakutia) based on mean annual precipitation <i>Tananaev N.I.</i>	61
Changes in geocryological conditions in interfluvial terrain under predicted climate warming, Central Yakutia <i>Novopriyazhaya V.A., Fedorov A.N.</i>	73

Biological sciences

Ecology

Climate response in radial growth of <i>Larix cajanderi</i> and <i>Pinus sylvestris</i> in Central Yakutia <i>Zhang X., Nikolaev A.N., Arzac A., Kolmogorov A.I., Vasiliev M.S., Pestryakova L.A.</i>	85
Microorganisms in the cryogenic meadow-steppe soils of Central Yakutia <i>Kuzmina N.P., Ermolaeva S.V., Chevychelov A.P.</i>	97
Soils in loess-like loams within the seasonally frozen landscapes of the Selenga Middle Mountains (Western Transbaikalian Region) <i>Sympilova D.P., Gyninova A.B., Shakhmatova E.Yu.</i>	109
Landscape resilience and the modern state of phytoplankton in the streams of the Kularsky gold-bearing region <i>Kopyrina L.I., Nikolaeva N.A.</i>	119

Biological resources

The dynamics of hunting mammal species populations in Yakutia during the 20th century <i>Mordosov I.I., Mordosova N.I.</i>	130
Structure and spatial distribution of Orthoptera communities in the taiga-alas landscapes of the Lena-Amga interfluvium (Central Yakutia). Part 2. Orthoptera communities on the Abalakh Terrace <i>Ermakova Yu.V., Burnasheva A.P.</i>	139

Materials science and chemical technologies

The preservation of physical and mechanical properties of glass-carbon composites under provocative biocontamination in cold climate conditions	
<i>Kychkin A.K., Kychkin A.A., Struchkov N.F.</i>	148
Fast Joule heating of carbon films formed by methane plasma deposition	
<i>Neustroev E.P., Prokopen A.R.</i>	162

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Геология и полезные ископаемые

УДК 34.33(571.56)

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-1-7-27>



Оригинальная статья

Схема создания редкометалльного кластера в Республике Саха (Якутия)

А. И. Матвеев^{✉,1,2}, А. В. Толстов^{3,4}, И. М. Петров⁵

¹Академия наук Республики Саха (Якутия), г. Якутск, Российская Федерация,

²Институт горного дела Севера СО РАН им. Н.В. Черского, г. Якутск, Российская Федерация

³Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

⁴Институт геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева, г. Новосибирск, Российская Федерация

⁵ООО «Исследовательская группа «Инфомайн», г. Москва, Российская Федерация

✉ andrei.mati@yandex.ru

Аннотация

Выполненными исследованиями в рамках региональных комплексных научных программ Республики Саха (Якутия) (КНИ-2) с учетом мирового и отечественного рынка редкометалльного сырья установлено, что к наиболее востребованным, помимо редких металлов и редкоземельных элементов (РМ и РЗЭ), заключенных в Томторском месторождении, относятся литий из гидроминеральных рассолов Западной Якутии и вольфрам Агылыкского месторождения. Для повышения эффективности проектов и организации в Якутии производства продукции с высокой добавленной стоимостью предлагается модель создания в РС(Я) единого редкометалльного кластера, включающего три проекта, предусматривающих: 1) извлечение лития из гидроминерального сырья (рассолы трубки «Удачная»); 2) получение РЗМ – ниобия, скандия (и, возможно, марганца) из руд Томторского месторождения; 3) получение вольфрамового концентрата из руд Агылыкского месторождения. Первые два проекта, включающих выпуск химических реагентов (каустическая сода, хлор или соляная кислота) из местных ресурсов, предполагается создать на территории Мирнинского и Оленекского районов РС(Я). Для извлечения лития предложено применение селективных сорбентов отечественного (аксионит) или китайского производства, конечной товарной продукцией является карбонат лития, который может поставляться для использования в РФ (например, ХМЗ в Красноярске) или на экспорт (в Китай). Первичная химическая обработка томторских руд с получением товарных промпродуктов: пирохлорового концентрата и обогащенного по РЗМ и скандию раствора, возможна при щелочном вскрытии с использованием производимых на месте реагентов и последующим использованием селективных сорбентов для выделения соединений редких земель. Важным объектом для комплексного развития редкометалльного производства Якутии может стать планируемый металлургический кластер на юге республики, где реализация пирометаллургических мощностей позволит наладить выпуск ферросплавной продукции (ферровольфрам, феррониобий, ферромарганец), которая может использоваться для выпуска высококачественной стали, в том числе на территории РС(Я).

Ключевые слова: Томтор, Агылыкское, Удачная, редкие элементы, РЗМ, минерализованные рассолы, литий, вольфрам, редкометалльный кластер

Финансирование. Работа выполнена в рамках выполнения II этапа Программы комплексных научных исследований в Республике Саха (Якутия), направленных на развитие ее производительных сил и социальной сферы на 2021–2024 годы (КНИ-2); государственного задания ИГАБМ СО РАН «Мантийный магматизм, эволюция литосферы и рудоносность восточной части Сибирской платформы, геоэкология недропользования» (№ FUGG-2024-0007). Состояние, анализ и оценка изученности REE-Nb-Sc-Y руд томторского типа выполнены при финансовой поддержке гранта РНФ № 23-63-10017.

Для цитирования: Матвеев А.И., Толстов А.В., Петров И.М. Схема создания редкометалльного кластера в Республике Саха (Якутия). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(1):7–27. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-1-7-27>

The proposal for developing a rare metal cluster in the Republic of Sakha (Yakutia)

Andrey I. Matveev^{✉,1,2}, Alexander V. Tolstov^{3,4}, Igor M. Petrov⁵

¹Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, Russian Federation

²Chersky Mining Institute of the North,

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

³Diamond and Precious Metal Geology Institute,

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

⁴V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy,

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

⁵LLC Research Group “Infomine”, Moscow, Russian Federation

✉ andrei.mati@yandex.ru

Abstract

The studies conducted as part of the KNI-2 regional complex scientific research in the Republic of Sakha (Yakutia) focused on analyzing both global and domestic markets for rare metal raw materials. The findings revealed that, in addition to the well-known group of rare earth metals (REM) and rare earth elements (REE) from the unique “Tomtor” deposit, lithium extracted from hydromineral brines and tungsten sourced from the Agylkinskoye deposit are also highly sought after. To improve project efficiency and facilitate the production of high-quality products in Yakutia, we propose a model for the establishment of a consolidated rare metal cluster within the Republic of Sakha (Yakutia). This model includes three principal initiatives: the extraction of lithium from hydromineral resources, particularly the brines associated with the “Udachnaya” pipe; the extraction of rare earth metals, such as niobium and scandium (and potentially manganese), from the ores located at the Tomtor deposit; and the development of the Agylkinskoye deposit for the production of tungsten concentrate. The first two projects are planned for implementation in the Mirninsky and Oleneksky districts of the Republic of Sakha (Yakutia). These projects will focus on the production of various chemical reagents, including caustic soda, chlorine, or hydrochloric acid, utilizing local resources. Selective sorbents, either of domestic origin (such as Axionite) or produced in China, may be employed for the extraction of lithium. The resultant commercial product will be lithium carbonate, which is intended for future distribution within the Russian Federation (for instance, to the KhMZ in Krasnoyarsk) or for export to China. The primary chemical treatment of Tomtor ore to produce commercially viable industrial products, such as pyrochlore concentrate and solutions enriched with REM and scandium, can be achieved through alkaline opening using locally produced reagents. This process is followed by the application of selective sorbents to extract rare earth compounds. The proposed metallurgical cluster in the southern region of the Republic of Sakha (Yakutia) represents a substantial opportunity for the advancement of rare metal production. The establishment of pyrometallurgical facilities within this cluster could significantly enhance the production of various ferroalloy products, including ferrotungsten, ferroniobium, and ferromanganese. These materials are essential for the production of high-quality steel, particularly in the Republic of Sakha (Yakutia).

Keywords: Tomtor, Agylkinskoye, Udachnaya, rare elements, REM, mineralized brines, lithium, tungsten, rare metal cluster

Funding. This study was conducted as part of the second phase of the Complex Scientific Research Program in the Republic of Sakha (Yakutia), which aimed to enhance productive capabilities and promote social development from 2021 to 2024. Additionally, it was conducted under the state assignment for the DPMGI SB RAS titled “Mantle magmatism, lithosphere evolution, and ore content of the eastern part of the Siberian platform, geoecology of subsurface use” (No. FUG-2024-0007). The condition, analysis, and assessment of the study concerning REE-Nb-Sc-Y ores of the Tomtor type were funded by the Russian Science Foundation (grant No. 23-63-10017).

For citation: Matveev A.I., Tolstov A.V., Petrov I.M. The proposal for developing a rare metal cluster in the Republic of Sakha (Yakutia). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(1):7–27. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-7-27>

Введение

Интерес к освоению месторождений редкоземельных элементов (РЗЭ) в настоящее время неуклонно растет. В нем заинтересованы все стра-

ны мира, поскольку это диктуется современными потребностями развития общества. К редкоземельным элементам/металлам (РЗЭ, РЗМ или «редким землям») относятся иттрий, лантан

и 13 лантаноидов: церий, празеодим, неодим, самарий, европий, гадолиний, тербий, диспрозий, гольмий, эрбий, тулий, иттербий, лютеций. Имеется классификация редких металлов А.Н. Зеликмана (табл. 1).

Все эти элементы обладают близкими свойствами и в природных условиях встречаются совместно. При этом РЗМ разделяют на три группы: «легкие» – от лантана до неодима, «средние» (от самария до эрбия) и тяжелые (от тербия до лютеция, а также иттрий). В зарубежной терминологии легкие обозначены как «light» (LREE), а средние и тяжелые чаще всего объединяют в одну группу тяжелых «heavy» (HREE). В отечественной литературе имеют место и другие названия этих групп – цериевая (легкие) и иттриевая (тяжелые).

РЗМ в качестве товарной продукции выпускаются в виде металлов, оксидов, солей (карбонатов) и другой продукции (смеси и сплавы). При этом соотношение товарных продуктов достаточно сильно различается для конкретных видов РЗМ. В частности, для церия превалирует выпуск карбоната Се, для лантана – оксида La; неодим и диспрозий выпускаются, в основном, в виде металлов (Nd, Dy). Среди смесей/сплавов, содержащих РЗМ, прежде всего следует выделить мишметалл и порошок Nd-Fe-B для выпуска магнитов.

РЗЭ относительно широко распространены в земной коре, однако при этом редко встречаются в концентрациях, подходящих для их рентабельной добычи. Основными промышленными минералами-концентраторами РЗМ являются, главным образом, бастнезит (CeCO_3F) и монацит (CePO_4). На долю бастнезитовых и монацит-бастнезитовых руд приходится около 80 % всех мировых запасов РЗМ. В основных минералах содержится разное количество РЗМ: 70–75 % в бастнезите, 55–60 % – в монаците и ксенотиме, 30–35 % – в лопарите. Ионно-абсорбционные глины характеризуются низким содержанием РЗМ – 10–15 % в минералах. При этом последние отличаются повышенной концентрацией элементов «тяжелой» группы – до 85–90 %. По этому показателю месторождение ионно-абсорбционных глин Lognan в Китае находится вне конкуренции среди других сырьевых объектов РЗМ в мире. Наибольшая часть мировых запасов РЗМ заключена в бастнезитовых месторождениях Китая и США, монацитовые месторождения получили распространение в Австралии, Бразилии, КНР,

Таблица 1

**Классификация редких металлов
(по А.Н. Зеликману)**

Table 1

**Classification of rare metals
(according to A.N. Zelikman)**

Подтип	Металл
Редкие щелочные	Литий, рубидий, цезий
Редкие щелочноземельные	Бериллий, стронций, барий
Редкоземельные	Скандий, иттрий, лантан и 13 лантаноидов (от церия до лютеция)
Редкие рассеянные	Галлий, индий, таллий, германий, рений, селен, теллур
Редкие тугоплавкие	Титан, цирконий, гафний, ванадий, ниобий, тантал, молибден, вольфрам

Источник: [1] / Source: [1].

Индии, Малайзии, ЮАР, Шри-Ланке, Таиланде, США. Остальные ресурсы РЗМ связаны с месторождениями ксенотима, ионно-адсорбционных глин, лопарита, фосфоритов, апатитов, вторичного монацита, эвдиалита и др. Оценка мировых запасов РЗМ, по разным источникам, колеблется от 100 до 150 млн т в пересчете на оксиды. В подтвержденных мировых запасах РЗМ, которые, по данным «Инфолайн», составляют около 96 млн т, лидирует Китай, его доля – около 55 % (табл. 2). Кроме того, относительно высокими долями характеризуются Россия (21 %), а также Канада и Гренландия (6 и 5 % соответственно).

Дефицит поставок редкоземельного сырья из Китая в первом десятилетии нашего века способствовал активизации деятельности по формированию новых источников РЗМ в мире. На данный момент ведется реализация проектов по разработке более 30 месторождений РЗМ в ряде стран Африки, в Канаде, США, Австралии, ЮАР и др. Эти проекты различны по плановой мощности, объему инвестиций; руды осваиваемых месторождений весьма разнятся по содержанию РЗЭ. Наиболее крупные запасы РЗМ характерны для месторождения в Гренландии Kvanefield (7 млн т), наиболее высоким содержанием РЗМ в рудах отличаются месторождения Steenkampskraal (ЮАР) – около 17 % оксидов РЗМ и Mount Weld (Австралия). Большинство других месторождений содержит от 1 до 5 %, ряд месторождений (Dubbo, Browns Range, Tanbreeze, Bokan и др.) характеризуются содержанием менее 1 % оксидов РЗМ.

Таблица 2

Оценочные запасы РЗМ в мире, млн т (в пересчете на оксиды РЗМ) [2]

Table 2

Estimated reserves of rare earth metals (REM) in the world, in million tons (converted to REM oxides) [2]

Страна	Всего	в том числе						Доля стран, %
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Y	
Китай	52,7	12,7	25,3	3,1	9,3	0,5	0,8	55
РФ	20,3	5,1	9,2	1,0	2,8	0,3	1,0	21,2
Канада	5,6	1,2	2,5	0,3	0,9	0,1	0,3	5,8
Гренландия	4,9	1,3	2,1	0,2	0,6	0,1	0,4	5,1
Австралия	3,8	0,8	1,7	0,2	0,7	0,1	0,2	3,9
Индия	3,1	0,7	1,4	0,2	0,6	0,1	0	3,2
США	2,2	0,7	1,1	0,1	0,3	0	0	2,3
Другие страны	3,2	1,0	1,5	0,1	0,4	0	0	3,4
Итого, млн т:	95,8	23,5	44,9	5,2	15,7	1,4	2,7	100

Источники: USGS [3], «Инфомайн» [2].

Sources: USGS [3], "Infomine" [2].

Объемы добычи/производства РЗМ в концентратах в пересчете на оксиды в 2018–2023 гг. представлены на рис. 1. Как видно из рисунка, в 2023 г. мировой выпуск РЗМ вырос до 353 тыс. т, что на 21,6 % выше уровня предыдущего года. Крупнейшим производителем является Китай, его доля в 2018–2023 гг. составляла 63–68 % (за исключением 2022 г.). Характерным является также рост добычи РЗМ в Австралии, США, Мьянме и других странах, тем не менее, позиция Китая пока является непоколебимой. Следует отметить, что здесь представлены официальные данные по Китаю на уровне выделенной квоты производства РЗМ. Добыча и производство РЗМ

в Китае ведется в девяти провинциях, при этом в пяти из них осуществляется разработка багнетитсодержащего сырья, содержащего «легкие» РЗМ, а в четырех – ионно-адсорбционных руд, содержащих «тяжелые» РЗМ и металлы средней группы. При этом РЗМ-отрасль Китая до недавнего времени была представлена мелкими компаниями, в большинстве своем являющимися нелегальными и полунелегальными предприятиями, осуществляющими первичную добычу и переработку сырья РЗМ. Официально в КНР было зарегистрировано более 100 компаний с мощностью до 600 тыс. т РЗМ в пересчете на оксиды.

В рамках широкомасштабной операции по «зачистке» отрасли от нелегальных производителей, начавшейся в 2011–2012 гг., за счет жестких мер контроля за добычей руд РЗМ, ужесточения требований охраны окружающей среды в Китае создано шесть основных компаний-производителей РЗМ – Northern Rare Earth Group (на базе Baotou Steel Rare Earth), Chinalco (Aluminum Group of China), China Southern Rare Earth Group (на базе Ganzhou Rare Earth), Minmetals Rare Earth (China Minmetals), Guangdong Province Rare Earth Industry Group и Xiamen Tungsten. В дальнейшем, в 2021 г., благодаря укрупнению, была создана новая крупная корпорация China Rare Earth Group, в состав которой вошли следующие компании – China Southern Rare Earth Group (Ganzhou Rare Earth Group), Chinalco (Aluminum Group of China), Minmetals Rare

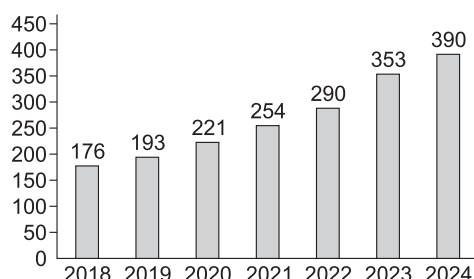


Рис. 1. Объемы добычи/производства РЗМ в концентратах в 2018–2024 гг. по странам-производителям, тыс. т оксидов РЗМ

Источник: USGS, BGS [3]

Fig. 1. Volumes of extraction/production of rare earth metals (REM) in concentrates from 2018 to 2024 by producing countries, measured in thousand tons of REM oxides

Source: USGS, BGS [3]

Таблица 3

Оценка структуры использования отдельных РЗМ при производстве различных видов продукции, %

Table 3

Assessment of the structure of individual REM usage in the production of various product types, %

Продукция	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Y	Другие
Магниты			23	69	0,8		2	0,2	5		
Сплавы для аккумуляторных батарей	50	33,4	3,3	10	3,3						
Металлургия	26	52	5,5	16,5							
Автокатализаторы	5	90	2	3							
Катализаторы крекинга	90	10									
Полирующие порошки	31,5	65	3,5								
Стекло	24	66	1	3						2	4
Люминофоры	8,5	11				4,9	1,8	4,6		69,2	
Керамика	17	12	6	12						53	
Прочие	19	39	4	15	2		1			19	1

Другие – Ho–Tm–Yb–Lu–Er; Источник: Lynas [4, 5].

Other – Ho–Tm–Yb–Lu–Er; Source: Lynas [4, 5].

Earth (China Minmetals). Основной объем производства РЗМ традиционно сосредоточен в провинции Внутренняя Монголия. Среди других стран-производителей РЗМ следует выделить США, Мьянму и Австралию. В США компания Molycorp осуществила в 2011 г. перезапуск в эксплуатацию рудника Mountain Pass на юге штата Калифорния. Плановая мощность предприятия составляла 20 тыс. т РЗМ в пересчете на оксиды. В настоящее время компанией MP Materials осуществляется выпуск М-концентрата, который поставляется на переработку в Китай в объеме 30–40 тыс. т (в пересчете на оксиды РЗМ).

Компания Lynas (Австралия) в 2011 г. ввела в эксплуатацию рудник на месторождении Mount Weld [4, 5]. Мощность по добыче и переработке составляет 200 тыс. т руды. Основными потребителями редкоземельной продукции являются в настоящее время компании, которые осуществляют выпуск магнитов на основе РЗМ, катализаторов крекинга и автокатализаторов, полирующих порошков, люминофоров, а также использующих РЗМ для легирования стали (структура использования РЗМ приведена в табл. 3).

Применение РЗМ в ряде областей связано с использованием неразделенных РЗМ (металлургия, производство катализаторов для нефтеперерабатывающей промышленности, выпуск перезаряжаемых аккумуляторных батарей). Их оценочная доля в настоящее время не превышает 20–30 %. Наиболее крупной страной-потребителем РЗМ является Китай, доля этой страны,

по оценкам «Инфолайн», находится на уровне 75–80 %. Согласно прогнозам, в 2024–2028 гг. ежегодный прирост РЗМ составит 3–4 %. Наибольшими темпами будет расти выпуск магнитов, производство керамики, добавок в стекло и оптику, а также прочих (в том числе новых) направлений использования РЗМ. В табл. 4 приведена структура мирового потребления РЗМ по основным направлениям использования в 2018–2023 гг.

Увеличение использования редкоземельных NdFeB магнитов, связанное с развитием электротехники,

Таблица 4

Структура использования РЗМ по областям применения в 2018–2023 гг., %

Table 4

Structure of REM usage by areas of application from 2018 to 2023, %

Область использования	2018	2019	2020	2021	2023
Магнитные материалы	31	32	33	35	37
Сплавы	18	18	18	17	17
Катализаторы (крекинг, авто)	18	17	17	16	15
Полирующие материалы	13	13	13	12	11
Добавки в стекло и оптику	5	6	6	5	5
Люминофоры	3	3	3	2	2
Керамика	5	5	5	5	5
Прочее	6	6	7	7	7
Итого:	100	100	100	100	100

Источник: Lynas, «Инфолайн» [4, 5].

Source: Lynas, “Infomine” [4, 5].

Таблица 5
Прогноз темпов роста мирового рынка
РМ и РЗМ в 2023–2030 гг.

Table 5
Forecast of growth rates for the global market
of rare metals and rare earth metals in 2023–2030

Металл	Мировое потребление, тыс. т			% 2030 к 2023
	2023	2025	2030	
РЗМ	250	265	300	20
Ниобий	83	105	170	105
Литий	1008	1343	2400	138
Вольфрам	110	115	127	15
Скандий	0,03	0,05	0,3	900

Источник: экспертный анализ «Инфомайн» [5].

Source: “Infomine” [5].

тромобилей и ветроэнергетики, вызовет существенный рост использования неодима, празеодима и диспрозия (который в большей степени будет использоваться в магнитах для придания им высокой термостойкости). Именно по этим металлам прогнозируется наибольший ежегодный рост спроса. На совещании Президента РФ 24 февраля 2025 г. относительно развития редкометалльной промышленности Владимир Путин высказал следующее: «В этом году запущен национальный проект технологического лидерства. Он называется «Новые материалы и химия». В том числе, в рамках нацпроекта предстоит наладить всю линейку, полный цикл индустрии редких и редкоземельных металлов, обеспечить их добычу и переработку вплоть до производства готовых высокотехнологичных товаров с высокой добавленной стоимостью. Объём выпуска такой продукции по итогам нацпроекта должен вырасти кратно». Нашими исследованиями мирового рынка РЗМ выявлены ожидаемые высокие темпы его роста на перспективу до 2030 года (табл. 5).

Наличие на территории Якутии месторождений РЗМ, в том числе крупнейшего месторождения Томтор, предполагает маркетинговое изучение рынков отдельных металлов и оценку возможности организации производства по освоению и переработке сырья.

Методика исследований

Проведен анализ мирового и российского рынков редких и редкоземельных металлов (ниобий, РЗМ, скандий), запасами которых Якутия обладает в значительных объемах. В качестве основ-

ных источников информации по изучению рынков РМ использовались:

- данные специализированных зарубежных агентств (USGS, BGS, Roskill и др.);
- международные базы данных (World Bank, Eurostat и др.);
- данные международной торговли (UN Comtrade, Trade Map);
- данные статистических комитетов стран мира (Китай, Индия и др.), ЕАЭС (в том числе Росстата, Национального статистического комитета Республики Беларусь, Бюро национальной статистики Агентства по стратегическому планированию и реформам Республики Казахстан);
- данные Единой информационной системы в сфере закупок;
- данные базы СБИС;
- годовые отчеты зарубежных и отечественных участников рынка РМ;
- научно-техническая литература (elibrary и др.);
- база патентов ФИПС;
- база данных «Инфомайн» и т. д.

Данные источники представляются надежными и достоверными.

Результаты исследований российского рынка РЗМ и технологий

На Государственном балансе РФ числятся 18 редкометалльных месторождений, запасы РЗМ по категории А+В+С₁ оцениваются на уровне 17 млн т оксидов РЗМ, запасы по категории С₂ – около 12 млн т. При этом значительный объём содержится в трудноизвлекаемых апатитсодержащих рудах (около 10 млн т). Среднее содержание оксидов РЗМ в большинстве месторождений низкое (табл. 6), наиболее высокие характерны для Томторского (11,8 %) и Чуктуконского (5,4 %) месторождений. Относительная доля «тяжелых» РЗМ в общей сумме оксидов в балансовых месторождениях колеблется от 2–3 (Ловозерское месторождение), 4–6 (Томторское месторождение) до 50 % (Катугинское месторождение).

На долю Ловозерского комплексного редкометалльного месторождения (Кольский полуостров) приходится около 16 % запасов РЗМ России. При этом запасы Ловозерского месторождения характеризуются наличием, главным образом, РЗЭ цериевой группы. Основным минералом РЗМ Ловозерского месторождения является лопарит – комплексный минерал – титано-тантало-ниобат натрия (Ti, Nb, Ta и РЗМ), содержание которого в месторождении находится на уровне

Т а б л и ц а 6

Характеристика основных месторождений РЗМ в России

Table 6

Characteristics of major REM deposits in Russia

Месторождение	Регион	Тип	Размер запасов*	Содержание оксидов РЗМ, %	Степень освоения	Компания-разработчик (владелец лицензии)	Попутные компоненты
Ловозерское	Мурманская обл.	Лопаритовый	Крупное	1,12	Разрабатываемое	ООО «Ловозерский ГОК»	Nb, Ta, Ti, Sr, Zr
Хибинская группа (8 месторождений)	Мурманская обл.	Апатит-нефелиновый	Крупное	0,25–0,42	Разрабатывается на апатит и нефелин	ОАО «Апатит» (6 месторождений), ЗАО «Северо-Западная фосфорная компания» (2 месторождения)	Апатит, нефелин, Sr, Rb, Cs, Ga
Томторское (участок Бурачный)	Республика Саха (Якутия)	Пирохлор-монацитовый	Крупное	11,8	В стадии освоения	ООО «Восток Инжиниринг»	Nb, Sc, Zr, Sr, V
Селигдарское	Республика Саха (Якутия)	Апатитовый	Крупное	0,35	Резервное		Апатит
Белозиминское	Иркутская обл.	Пирохлор-apatитовый	Крупное	0,9	Резервное		Nb, Ta, апатит
Яретское	Республика Коми	Лейкоксовая россыпь	Крупное	0,039	Подготовлено к освоению на нефть и Ti	ОАО «Ярега Руда» (Нижняя россыпь), ООО «Лукойл-Коми» (участок Титановый 1)	Nb, Ta
Улут-Танзекское	Республика Тыва	Пирохлоровый	Среднее	0,063	Резервное		Nb, Ta, Zr
Катунинское	Забайкальский край	Пирохлор-циркон-иттрио-флюоритовый	Среднее	0,37	Резервное		Nb, Ta, Zr
Чукотское	Красноярский край	Пирохлор-монацитовый	Крупное	5,38	Резервное		Fe, Mn, Nb, P

* Мелкие <100 тыс. т оксидов РЗМ, средние 100–1000 тыс. т оксидов РЗМ, крупные >1000 тыс. т оксидов РЗМ.
Источник: Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации [23].
* Small <100 thousand tons of REE oxides; medium 100–1000 thousand tons of REE oxides; large >1000 thousand tons of REE oxides.
Source: State report on the condition and use of mineral resources in the Russian Federation [23].

2,4–2,6 %, а содержание оксидов РЗМ в рудах от 0,70 до 1,45 %. В отдельных типах руд Ловозерского месторождения – эвдиалитовых луювритах и лопаритсодержащих ювитах РЗЭ концентрируются в эвдиалите, который содержит 2,0–2,5 % суммы оксидов РЗМ, преимущественно иттриевой группы. Следует отметить, что запасы эвдиалитовых руд в настоящее время детально не подсчитаны, по разным оценкам, прогнозные ресурсы оксидов РЗМ в них составляют до 15–17 млн т.

Помимо Ловозерского месторождения, большое количество балансовых запасов РЗМ (около 32 % от запасов России) сосредоточено в апатит-нефелиновых рудах Хибинской группы месторождений: Юкспорское, Апатитовый Цирк, Плато Расвумчорр, Олений Ручей и другие. В этих рудах РЗМ находятся, главным образом, в апатите, содержание в нем суммы оксидов редких земель составляет около 0,9–1,0 %. Среди РЗМ преобладают элементы цериевой группы, относительное содержание иттриевых РЗМ – около 10 %. Массовая доля суммы оксидов РЗМ в хибинских апатит-нефелиновых рудах колеблется в пределах 0,25–0,42 %.

Около 26 % запасов РЗМ России сосредоточены в Селигдарском апатитовом месторождении (Республика Саха (Якутия)). Остальные запасы РЗМ России сосредоточены в редкометалльно-apatитовом Белозиминском месторождении (Иркутская область), титановом (Ярега, Республика Коми), редкометалльных месторождениях Улуг-Танзек (Республика Тыва), Катугинское (Забайкальский край), Томторское – Республика Саха (Якутия) и Чуктуконское (Красноярский край) [6]. Одним из наиболее перспективных объектов является Томторское месторождение. Первые данные о массиве Томтор появились в 1964 г. с выявления его геологами Эрлихом Э.Н. и Гулиным С.А. и первой оценки перспективности объекта Поршневым Г.И. и Степановым Л.Л. [6]. Особый интерес к Томтору вспыхнул после выявления в 1986 г. на Томторе геологами Амакинской (Чернышевской) геологоразведочной экспедиции АК «Алмазы России-Саха» уникальных пироксоломонацит-крандаллитовых руд участка Буранный в переотложенной коре выветривания карбонатов [7–9].

Месторождение расположено в северо-западной Якутии на территории Оленекского улуса, в 400 км к югу от моря Лаптевых, и приурочено оно к массиву Томтор. Площадь массива состав-

ляет около 250 км² [7, 8]. В его пределах выделены четыре геолого-промышленных типа редкометалльно-фосфорных руд (эндогенные карбонаты, остаточные коры выветривания, переотложенные коры выветривания, осадочные отложения), каждый из которых может перерабатываться по своей технологической схеме [9]. Месторождение расположено в зоне сплошного развития многолетнемерзлых пород [10]. Изучение месторождения показало, что промышленно значимыми являются руды в переотложенных корях выветривания [11–13]. При поисково-оценочных работах выявлено три участка – Северный, Буранный и Южный, в которых руды образуют залежи («рудный пласт») в верхней части коры выветривания [14]. Руды характеризуются аномально высоким содержанием ниобия, редкоземельных элементов, алюминия, а также повышенной концентрацией титана, железа, стронция, бария, ванадия, иттрия и скандия [13, 15]. Несмотря на наличие в пределах месторождения на глубине 175 м подземных вод, рудный пласт расположен исключительно в зоне сплошной мерзлоты [16, 17].

Отличительной особенностью томторских руд является повышенное содержание оксидов РЗМ+Y (от 0,8 до 29,8 %). Y и РЗМ концентрируются, в основном, в фосфатах: монаците и рабдофаните, в составе РЗЭ преобладает цериевая группа, которая фиксируется в повышенных концентрациях в перекрывающих отложениях всего региона западной Якутии [18, 19, 20]. В настоящее время в результате проведенных разведочных работ утвержденные запасы месторождения существенно увеличены до 4 млн т оксидов РЗМ.

Производство РЗМ в России находится на низком уровне [21, 22]. Выпуск РЗМ осуществляется на ОАО «Соликамский магниевый завод» (СМЗ, Соликамск, Россия). Кроме того, РЗМ выпускает ООО «ЛИТ» (группа компаний «Скайград», Московская область). Производство РЗМ в ООО «Интермикс-Мет» (Лермонтов) и на ПАО «АКРОН» (Новгород) прекращено. Выпуск РЗМ в России в 2018–2020 гг. в пересчете на оксиды стабилизировался на уровне 2,7–2,8 тыс. т, после чего он снизился до 2,2–2,4 тыс. т, и в 2024 г., по предварительным оценкам, производство РЗМ, вопреки ожиданиями, продолжило снижение.

Уровень выпуска РЗМ в РФ определяется мощностью СМЗ, доля которого превышает 95 %. Сырьем для производства РЗМ на Соликамском магниевом заводе является лопаритовый кон-

центрат, производимый на ООО «Ловозерский ГОК» (Мурманская область). В химико-металлургическом цехе завода, который начал работу с конца 1971 г., применяется процесс хлорирования лопаритового концентрата в расплаве хлористых солей (проектная мощность цеха по переработке концентрата составляет до 13 тыс. т в год).

ООО «ТриАрк Майнинг» намеревалось инвестировать в течение 3–4 лет около 1 млрд долларов в редкоземельные проекты, один из них – строительство предприятия по переработке монацитового концентрата в г. Краснокаменск (Читинская область). В целом из концентрата планировалось получение до 40–44 тыс. т РЗМ. Для реализации этого проекта создана дочерняя структура «ТриАрк Майнинг» – ООО «РедЗем-Технологии». Строительство завода планировалось начать в 2014 г. и закончить в 2017 г. с выходом на проектную мощность в 2018 г. Однако эти планы не реализованы. Самым сложным вопросом является высокая радиоактивность концентрата и необходимость захоронения радиоактивных отходов. Стоит отметить слабое «звено» РЗМ промышленности России, базирующейся на единственном сырьевом объекте (Ловозерское месторождение), который после вступления Финляндии в НАТО стал приграничным с недружественной страной (менее 100 км от границы) с возросшими соответствующими геополитическими рисками.

Альтернативные лопаритовому концентрату источники РЗМ сырья в России имеются (в частности, это Томторское месторождение), однако сроки введения его в эксплуатацию находятся в среднесрочной перспективе. Нельзя не отметить, что в последнее время активно начались работы по извлечению РЗМ из отходов производства фосфатных удобрений при переработке апатита. Традиционно сложилось так, что из-за отсутствия мощностей по получению индивидуальных металлов РЗМ продукция СМЗ ориентирована преимущественно на экспорт, а внутренний рынок России потребляет готовую импортную РЗМ-продукцию из Китая, занимающую его львиную долю. Вместе с тем, российская минерально-сырьевая база критических РМ имеет все предпосылки (геологические, технологические и экономические) для создания отечественного конкурентоспособного редкометалльного производства, способствующего инновационному развитию России, в том числе за счет использования нетрадиционных источников минерального сырья. Согласно

прогнозу «Инфомайн», в рамках оптимистического варианта к 2025 г. прогнозируется выпуск РЗМ на уровне 3 тыс. т (за счет СМЗ и «Скайграда»). В базовом же сценарии «Инфомайн» производство РЗМ в 2025 г. составит 2,2 тыс. т (табл. 7).

В 2030 г. в оптимистическом варианте предусматривается рост производства «Скайград» и начало реализации проекта по Томтору, за счет чего производство РЗМ может составить 11 тыс. т [23–26]. В базовом варианте этот показатель существенно ниже – 6 тыс. т. Что касается прогноза потребления РЗМ в России, в подпрограмме «Развитие промышленности редких и редкоземельных металлов» заложен крайне высокий рост использования этой продукции – текущее потребление РЗМ российскими производителями в России было оценено на уровне 2000 т, что не соответствует действительности [27–30]. При этом Подпрограмма предполагала уровень потребления РЗМ по базовому варианту в 2020 г. – около 7 тыс. т, из них около 4 тыс. т должно было потребляться предприятиями Ростеха. Предполагалось, что начнут развиваться инновационные производства – потребители РЗМ, основным из которых должно стать производство магнитов на основе РЗМ для альтернативной энергетики, которое может потребовать около 3000 т индивидуальных оксидов РЗМ в год. На наш взгляд, этот показатель является завышенным, объемы использования РЗМ для выпуска магнитов находятся на ничтожно малом уровне на фоне роста импорта Россией китайских готовых магнитов и товаров с их наполнением.

Таблица 7
Прогноз производства и потребления РЗМ в России до 2030 г., тыс. т (в пересчете на оксиды)

Table 7
Forecast of production and consumption of REM in Russia until 2030, in thousand tons (converted to oxides)

Показатель	2022	2023	2024	2025	2027	2030
Производство, оптимистичный вариант	2,4	2	1,9	3	7	11
Производство, базовый вариант	2,4	2	1,9	2,2	3	6
Потребление	1,9	1,7	2	2,2	2,5	3

Источник: экспертный анализ «Инфомайн».
Source: expert analysis by “Infomine”.

Также считалось, что рост потребления РЗМ может обеспечить группа инновационных проектов, включая выпуск автомобильных катализаторов, нейтрализаторов и систем выхлопа; производство пластиковых дисплеев нового поколения, изделий из наноструктурированной керамики, оптического волокна с защитным нанопокрытием из аморфного углерода, монокристаллического твердосплавного металлорежущего инструмента с наноструктурированным покрытием и другие. С этим можно частично согласиться (особенно в области производства автомобильных катализаторов), однако на уровень потребления РЗМ в России эти направления существенного влияния не оказывают.

В нашей стране отсутствуют «драйверы» роста в лице высокотехнологичных отраслей, поэтому рост потребления РЗМ в России в ближайшие годы может произойти исключительно за счет традиционных направлений. Прогнозируемый рост потребления РЗМ связан, по нашему мнению, только с расширением выпуска катализаторов крекинга. Также мы прогнозируем рост спроса на оксид неодима при производстве каучука – как марки СКД, так и изопренового каучука СКИ. Увеличение потребления РЗМ возможно со стороны предприятий черной металлургии – при производстве высокопрочных видов стали для изготовления магистральных нефтегазопроводов, работающих в условиях Крайнего Севера и в других областях. Тем не менее, реальное потребление РЗМ в России при благоприятном развитии может составить только 3000 т к 2030 г. (см. табл. 7).

Минерально-сырьевая база редких металлов Республики Саха (Якутия) достаточно разнообразна. Основные месторождения РЗМ Якутии представлены в табл. 8.

В целом на территории РС(Я) имеется 42 месторождения различных полезных ископаемых, включающие РЗМ, которые находятся на Государственном балансе РФ. При этом из общего количества (21) в Якутии имеются месторождения лишь 10 редких металлов. Большая же часть РМ сосредоточена в месторождениях, которые имеют невысокую долю от общероссийских запасов (табл. 9).

Исключение составляют скандий (50 % запасов РФ по категории А+В+С₁), висмут (46,1), РЗМ (43,9), ниобий (21,3) и вольфрам (12,9 %). Кроме того, высоким уровнем запасов (23 %) по категории С₂ характеризуется индий, содержа-

щийся в трех месторождениях Якутии. Следует отметить также, что максимальное количество месторождений РМ на территории Якутии имеют в своем составе вольфрам (22), ванадий (6), висмут (4), индий (3) и РЗМ (2). Остальные РМ сосредоточены в отдельных месторождениях.

В развитии РЗМ отрасли РФ с учетом перспективы роста потребления (см. табл. 9) большая роль может принадлежать Якутии за счет развития, главным образом, трех проектов: разработка Томторского месторождения (РЗМ, ниобий, иттрий, скандий), Агылкинского месторождения (вольфрам, висмут, селен, теллур), а также добыча лития на основе использования гидроминерального сырья (в том числе высокоминерализованных рассолов кимберлитовой трубки «Удачная»). Наиболее реальным из них является проект по разработке Томторского месторождения (Якутия).

На месторождении наиболее изучен и разведан участок Буранный, его площадь составляет 1,5 км², мощность рудного пласта – от 2 до 42 м. Утвержденные запасы по категории А+В+С₁ составляют около 3 млн т оксидов РЗМ при содержании TR₂O₃ – 11,83 %. Руды могут рассматриваться как природный концентрат первичного обогащения, пригодный для непосредственного извлечения РЗМ, Y и других ценных компонентов. Руды содержат Th и природные радионуклиды продуктов его распада, отходы их переработки относятся к нижнему классу радиоактивности (РАО – 6 класса) и подлежат захоронению. Содержание Th в исходной руде составляет 0,12–0,16 %. Удельная активность (Аэфф) томторской руды (по максимальной активности пробы) составляет от 4 000 до 14 000 Бк/кг. Соответственно, при переработке РЗМ будут образовываться радиоактивные отходы, удельная активность которых, по предварительной оценке, составит до 65 Бк/г. За прошедшие 15 лет неоднократно были попытки начать разработку месторождения. Среди заинтересованных сторон отмечены АК «АЛРОСА» (ПАО) и ФГУП «Горно-химический комбинат» (ГХК, Железногорск) [26, 28, 31]. В частности, этими предприятиями в 2005 г. на конкурс Русских Инноваций был подан проект «Металлургический завод по производству редкоземельных металлов», его предполагаемая мощность – 3200 т цериевой группы РЗМ и 120 т триоксида иттрия. На ФГУП «КГХК» (г. Железногорск) было создано опытное производство по переработке сырья [9, 31].

Таблица 8

Основные месторождения редких металлов на территории Республики Саха (Якутия)

Table 8

Major deposits of rare metals in the Republic of Sakha (Yakutia)

Месторождение	Степень освоения	Владелец лицензии	Тип месторождения	Компоненты (редкие металлы)	Содержание
Дружное	Разведываемое	АО «Эльконский горно-металлургический комбинат»	Золото-урановое	Ванадий	0,05 % V_2O_5
				Молибден	0,075 % Mo
Непроходимое	Разведываемое	АО «Эльконский горно-металлургический комбинат»	Золото-урановое	Ванадий	0,05 % V_2O_5
Курунгское	Подготавливаемое к освоению	АО «Эльконский горно-металлургический комбинат»	Золото-урановое	Ванадий	0,05 % V_2O_5
Эльконское	Подготавливаемое к освоению	АО «Эльконский горно-металлургический комбинат»	Золото-урановое	Ванадий	0,05 % V_2O_5
Эльконское	Разведываемое	АО «Эльконский горно-металлургический комбинат»	Золото-урановое	Ванадий	0,05 % V_2O_5
Северное	Разведываемое	АО «Эльконский горно-металлургический комбинат»	Золото-урановое	Ванадий	0,05 % V_2O_5
Агылкинское	Подготавливаемое к освоению	АО «Серебро Магадана»	Медно-вольфрамовое	Висмут	0,0462 % Bi
				Вольфрам	1,271 % WO_3
				Селен	54 г/т Se
				Теллур	21 г/т Te
Одинокое	Нераспределенный фонд		Оловорудное	Висмут	0,0183 % Bi
				Вольфрам	0,028 % WO_3
Чурпунья	Нераспределенный фонд		Оловорудное	Висмут	0,0413 % Bi
				Вольфрам	0,044 % WO_3
Одинокий ручей	Нераспределенный фонд		Россыпное олово	Висмут	2,8188 г/м ³
				Вольфрам	45,4 г/м ³
				Индий	0,1 г/м ³
Россыпь ручей Тирехтах	Разрабатываемое	АО «Янолово»	Россыпное олово	Вольфрам	15,4 г/м ³
				Индий	0,03 г/м ³
Депутатское	Нераспределенный фонд		Оловорудное	Индий	20 г/т
Алыс-Хая	Нераспределенный фонд		Вольфрамитовое жильное	Вольфрам	0,088 % WO_3
Аляскитовое	Нераспределенный фонд		Вольфрамитовое жильное	Вольфрам	0,619 % WO_3
Илинтас	Нераспределенный фонд		Вольфрамитовое жильное	Вольфрам	0,64% WO_3
				Индий	46,2 г/т
Томторское (участок Буранный)	Подготавливаемое к освоению	ООО «Восток Инжиниринг»	Пироклор-монацит-крандаллитовое	Ниобий	4,18 % Nb_2O_5
				РЗМ	11,83 % оксидов РЗМ
				Скандий	339 г/т Sc_2O_3
Селигдарское	Нераспределенный фонд		Апатит-карбонатное	РЗМ	0,35 % оксидов РЗМ

Источник: анализ Государственных балансов запасов полезных ископаемых РФ [23].

Source: State report on the condition and use of mineral resources in the Russian Federation [23].

Таблица 9
Количество месторождений
редких металлов Якутии
и доля в общероссийских запасах

Table 9
Number of rare metal deposits in Yakutia
and their share in the total Russian reserves

Компоненты (редкие металлы)	Количество месторождений на балансе	Доля Якутии в запасах РФ, %	
		A+B+C ₁	C ₂
Ванадий	6	0	1,1
Висмут	4	46,4	14,1
Вольфрам	22	12,85	2,9
Галлий	0	0	0
Гафний	0	0	0
Германий	0	0	0
Индий	3	0,23	23
Литий	0	0	0
Молибден	1	0	0,1
Ниобий	1	21,3	9,1
Рений	0	0	0
РЗМ	2	43,9	11,8
Рубидий	0	0	0
Селен	1	0	0,76
Скандий	1	90,1	51,6
Стронций	0	0	0
Тантал	0	0	0
Теллур	1	0	0,54
Титан	0	0	0
Цезий	0	0	0
Цирконий	0	0	0

Источник: анализ Государственных балансов запасов полезных ископаемых РФ [23].

Source: State report on the condition and use of mineral resources in the Russian Federation [23].

В 2014 г. совместное предприятие Госкорпорации Ростех и группы ИСТ – «ТриАрк Майнинг» – выиграло аукцион на право пользования участком недр Томторского месторождения (участок Буранный) для разведки и добычи руд ниобия, редкоземельных металлов, скандия и попутных компонентов. Специально созданная для реализации проекта освоения месторождения компания «Восток Инжиниринг» (дочерняя компания «ТриАрк Майнинг») начала разведку на участке Буранный в 2015 г. В 2015–2017 гг. на участке Буранный выполнялась доразведка, на 2018–2019 гг. была запланирована подготовка ТЭО постоянных кондиций, технического проекта и ОВОС; с 2019 по 2022 г. – намечалось

проектирование и строительство объектов инфраструктуры, на 2022–2023 гг. – строительномонтажные работы; 2023 г. – пуско-наладочные работы и запуск производства; транспортировка первой партии руды – 2024 г. Однако эти сроки не были выполнены.

Для переработки руды Томторского месторождения в Забайкальском крае создано ООО «Краснокаменский гидрометаллургический завод» (дочерняя компания «ТриАрк Майнинг»). Мощность по переработке – до 160 тыс. т руды в год. Планировавшийся ранее срок начала работы предприятия – 2024 г. Согласно отчету «Ростеха», целевой объем производства определен в 13 тыс. т разделенных оксидов РЗМ, основными видами редкоземельной продукции предполагается концентрат Nd/Pr и концентрат средне-тяжелой группы РЗМ. Совокупный объем капитальных затрат оценивался в 560 млн долларов США. Предполагалось финансирование проекта Внешэкономбанком.

Структура ООО «ТриАрк Майнинг» до недавнего времени была следующей: 50 % плюс 1 акция – у группы ИСТ, 25 % плюс 1 акция – у «РТ-Глобальные ресурсы». 24,99 % принадлежало кипрской компании Decerno, эта доля была выкуплена ООО «ПСК» Владислава Ресина. Государственная корпорация «Ростех» реализовала свою долю ООО «ТриАркМайнинг» кипрской компании Zaltama Holding, которая связана с председателем совета директоров «Восточной горнорудной компании» Олегом Мисеврой. В начале 2020 г. этот пакет перешел под контроль Tomtor Limited, которая стала единственным владельцем «ТриАрк Майнинг». В «Ростехе» выход из проекта объяснили выполнением поставленной правительством задачи и началом подготовки участка к разработке. Компания Мисевры при этом получила 24,97 % в Tomtor Limited, которая контролируется группой ИСТ через кипрскую ICT Holding Ltd и ООО «ПС-консалтинг». В настоящее время завершены геологоразведочные работы, выполнен подсчет запасов участка, проводится проработка технологических решений переработки руды. Согласно лицензионному соглашению, добыча редкоземельных металлов на месторождении Томтор запланирована на 2027–2028 гг.

В рамках Петербургского международного экономического форума в 2023 г. подписано соглашение о строительстве Краснокаменского гидрометаллургического комбината для переработки

руд Томторского месторождения. По словам, генерального директора ООО «ТриАрк Майнинг» А. Алешина, проект будет реализован в соответствии с лицензионными требованиями. Общий объем инвестиций в проект составит около 160 млрд рублей.

Вместе с тем, до настоящего дня все признаки активного освоения месторождения отсутствуют, что послужило причиной рассматриваемого сейчас вопроса об отзыве лицензии на право пользования участком недр у действующего недропользователя. Как следует из официальной информации и СМИ, интерес к освоению месторождения проявляет ПАО «Роснефть». По самым последним данным, лицензия на Буранный участок Томторского месторождения может быть передана в управление «Роснефтегаз», компания предполагает осуществлять доставку и переработку сырья в пос. Хатанга [34].

Анализ предлагаемых технологий переработки руд Томторского месторождения показал сложность с учетом применения методов химического разложения и разделения продуктов [9, 30]. Кроме этого, в связи с рассматриваемой в настоящее время перспективой добычи на Томторском месторождении также и марганцевых руд, залегающих ниже уникально богатых РЗЭ руд, возможно включение в технологическую систему промышленных производств извлечения марганцевого концентрата [7, 8].

Возможность создания гидрометаллургического предприятия для переработки руды Томторского месторождения на территории РС(Я) имеет целый ряд минусов, в частности, сложная логистика по транспортировке нескольких видов химических реагентов в больших объемах, необходимых для выщелачивания РЗМ-сырья, высокая затратность разделительного производства с «нуля» и необходимость частичного захоронения радиоактивных отходов. Тем не менее, на территории Якутии возможна организация первичной переработки исходной руды с получением готовых промышленных продуктов, включая пироксеновый концентрат, пригодный для выплавки ферроникобия, и коллективный концентрат РЗМ [9, 24]. В целом схема сети промышленных производств по извлечению ниобия, РЗМ и скандия из руды Томторского месторождения в РС(Я) представлена на рис. 2.

Литий входит в перечень основных видов стратегического минерального сырья, утвержденный Распоряжением Правительства Рос-

сийской Федерации от 30.08.2022 № 2473-р. Цели по импортозамещению редких металлов, в том числе лития, включены в «Стратегию развития металлургической промышленности Российской Федерации на период до 2030 года», утверждена распоряжением Правительства РФ от 28 декабря 2022 г. № 4260-р.

Стратегия социально-экономического развития Республики Саха (Якутия) до 2032 г. с целевым видением до 2050 г. рассматривает как перспективную добычу Li из рассолов. Из первоначальных изысканий объектов на Li наиболее перспективным считаются рассолы из шахты и карьера рудника Удачный, которые в настоящее время обратной закачиваются в трещины в недрах, для чего вблизи действующих ГОКов АК «АЛРОСА» (ПАО) организованы узлы обратной закачки [10, 16, 17]. Предварительная оценка показала наличие концентраций Li и Br в рассолах, возможность постановки их на Государственный баланс и последующего извлечения [26]. С учетом притоков в горные выработки Удачинского ГОКа, оцениваемых в 300 м³/ч, при насыщенности их Li, Br, Rb и Sr, на текущем уровне добычи в рамках опытно-методического участка можно ежегодно получать более 350 т Li, 7 тыс. т Br, более 40 т Rb и 2 тыс. т Sr без дополнительных затрат на добычу гидроминерального сырья. Результаты опытно-промышленных работ позволяткратно увеличить добычу, для чего необходимо получение лицензии на геологоразведочные работы, проведение ГРП с последующей постановкой запасов гидроминерального сырья на баланс [25, 26].

На этапе ГРП будут уточнены данные о геологическом строении месторождения и собраны исходные данные для разработки проекта освоения месторождения и строительства инфраструктуры по добыче и обратной закачке переработанных рассолов в подземные резервуары. Производство карбоната Li в Мирнинском районе Республики Саха (Якутия) может стать первым звеном в цепочке предприятий ее комплексного развития, в рамках которого в Западной Якутии возможна организация новых отраслей: газопереработки, производства гелия, лития и критических металлов [7, 10, 16, 17, 22]. Учитывая опыт Ангарского электролизного химического комбината (АЭХК), запустившего первую линию по производству гидроксида и карбоната Li с годовой производительностью до 100 т, создание опытно-промышленного участка на свободных производственных мощностях п. Удачный реально выполнить

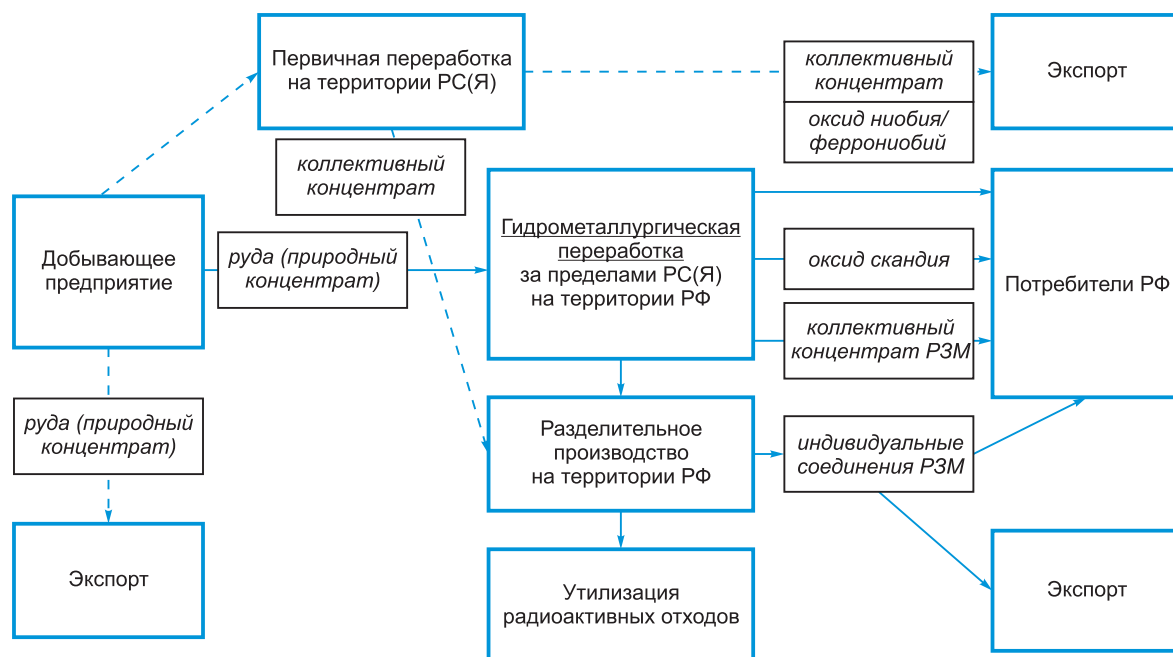


Рис. 2. Схема сети промышленных производств по извлечению ниобия, РЗМ и скандия из руды Томторского месторождения в РС(Я)

Fig. 2. Diagram illustrating the industrial production network for the extraction of niobium, rare earth metals, and scandium from the ore of the Tomtor deposit in the Republic of Sakha (Yakutia)

за два года [33]. Целевыми потребителями товарной продукции могут выступить переработчики карбоната Li для производства Li-ионных аккумуляторов в РФ и в Китае. По мере развития технологий и рынка в Якутии и на Дальнем Востоке возможна последующая переработка карбоната Li в Республике Саха (Якутия). В качестве технологии рассматриваются методы прямого извлечения Li (DLE) с получением карбоната. Технология потребует дополнительной настройки и учета региональных и климатических особенностей для каждого месторождения. В контур проекта возможно включение производства соляной кислоты, едкого натра и кальцинированной соды из каменной соли [12].

Эти соединения являются ключевыми для производства карбоната лития по технологии прямого извлечения, предлагаемой компанией Strong Technology (Китай). Принимая во внимание удаленность площадки проекта от действующих производителей, сложную логистику, необходимость строительства вместительных складов для реагентов, целесообразно в качестве альтернативы на этапе предварительного ТЭО учесть возможность производства соляной кислоты, кальцинированной соды и едкого натра непосредственно

в п. Удачный. Сырьем может быть каменная соль Кемпендэйского месторождения (Сунтарский район, Республика Саха (Якутия)), удаленного на 800 км от п. Удачный и соединенного с ним круглогодичной автодорогой. За счет деятельности по добыче алмазов в районе имеется достаточно развитая энергетическая и транспортная инфраструктура. Проект производства лития может использовать собственную сырьевую базу, газоснабжение возможно от строящегося газопровода Айхал–Удачный, энергообеспечение возможно за счет высвобождающихся мощностей при переходе с электроотопления на отопление газом, а также за счет строительства собственной газовой электростанции.

Реализация проекта возможна на условиях территории опережающего развития (ТОР), которой должен быть предоставлен специальный налоговый режим как по налогам на добычу полезных ископаемых, так и по имущественному налогу, налогу на прибыль, социальным налогам. Основным вызовом проекта является отсутствие аналогичных проектов в России, неопределенность в порядке и условиях подобного лицензирования участка недр, необходимость согласования работ для обеспечения безопасности

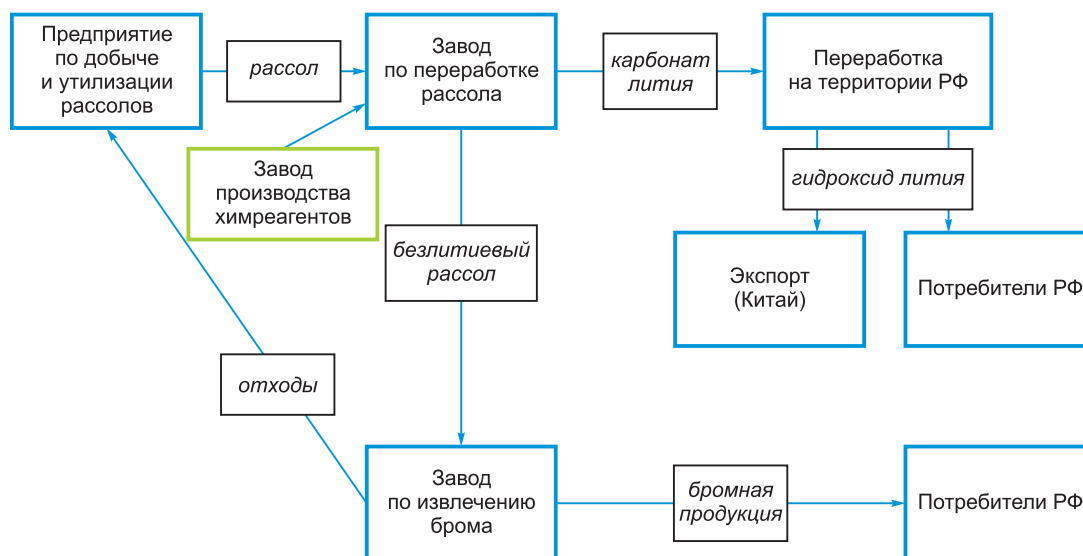


Рис. 3. Схема сети промышленных производств по извлечению лития из гидроминерального сырья в РС(Я)

Fig. 3. Diagram of the network of industrial enterprises for lithium extraction from hydromineral raw materials in the Republic of Sakha (Yakutia)

эксплуатации шахты и карьера Удачный [10, 16, 17]. Схема сети промышленных производств по извлечению лития в Мирнинском районе РС(Я) представлена на рис. 3.

Вовлечение в эксплуатацию Агылкинского месторождения **вольфрама** предусмотрено «Стратегией социально-экономического развития Республики Саха (Якутия) до 2032 г. с целевым видением до 2050 г.» и позволит реализовать комплексный подход по развитию горнодобывающей промышленности региона с положительным экономическим эффектом. Владелец лицензии на право разведки и добычи полезных ископаемых на Агылкинском участке недр сроком на 27 лет (до 2050 г.) является АО «Серебро Магадана», входящее в холдинг АО «Полиметалл». В настоящее время недропользователь ведет геологоразведочные работы. Технический проект предполагается подготовить к марту 2026 г. Помимо вольфрамового концентрата, на обогатительной фабрике будет производиться медный концентрат, а также возможно извлечение в гравитационный концентрат золота и серебра.

Агылкинский участок недр расположен в 167 км от п. Хандыга Томпонского района РС(Я). Месторождение комплексное и содержит стратегические виды полезных ископаемых – 90,8 млн т запасов вольфрама, 193,4 млн т меди и ряд попутных элементов (золото, серебро, висмут, селен, теллур, олово). Вольфрам входит в перечень ос-

новных видов стратегического минерального сырья, утвержденный Распоряжением Правительства Российской Федерации от 30.08.2022 № 2473-р. Цели по импортозамещению редких металлов, в том числе вольфрама, включены в «Стратегию развития металлургической промышленности Российской Федерации на период до 2030 г.», утвержденную распоряжением Правительства РФ от 28 декабря 2022 г. № 4260-р. В стратегии металлургической промышленности указано, что добыча вольфрама должна быть обеспечена за счет проекта «Ростеха» на Тырныаузском месторождении в Кабардино-Балкарии. Объемы производства на нем к 2026 г. должны составить 5 тыс. т по оксиду вольфрама, что с учетом действующих производств полностью закроет потребности отечественной промышленности (сроки реализации Проекта сдвинуты до 2028 г.). В связи с планами создания в РС(Я) кластера черной металлургии, в том числе Южно-Якутского металлургического комбината (Стратегия социально-экономического развития Республики Саха (Якутия) до 2032 г. с целевым видением до 2050 г. Ц-3.11.), по оценке «Инфолайн», возможно создание на базе данного комбината производства ферровольфрама с его последующим использованием при выплавке стали. Схема сети промышленных производств по добыче вольфрама на Агылкинском месторождении в РС(Я) представлена на рис. 4.

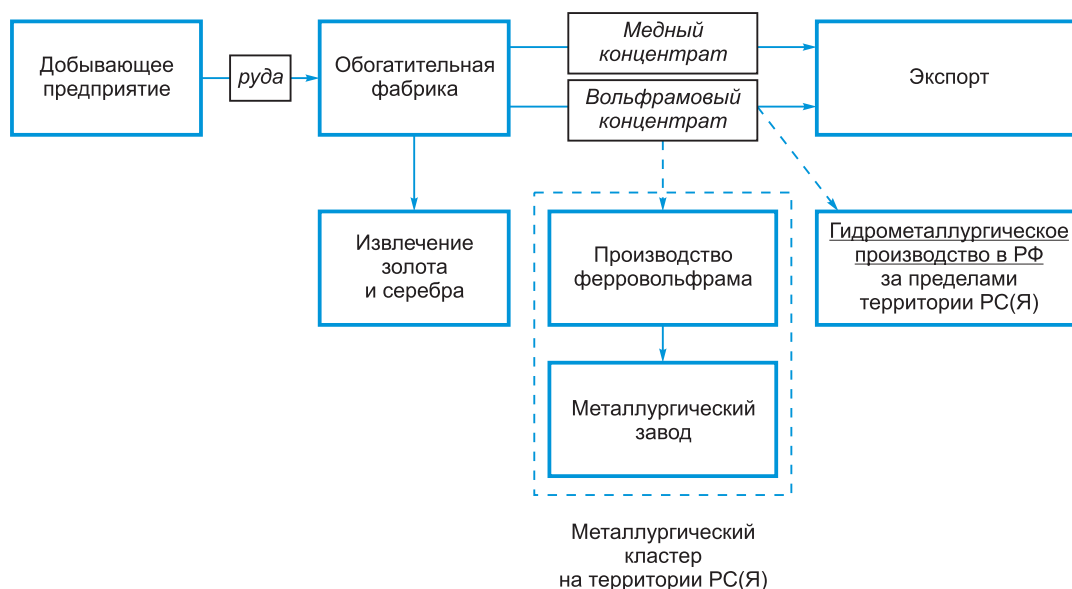


Рис. 4. Схема сети промышленных производств при добыче вольфрама на Агылкинском месторождении в РС(Я)

Fig. 4. Diagram of the industrial production network for tungsten extraction at the Agylkinskoye deposit in the Republic of Sakha (Yakutia)

Результаты и обсуждение

Реализация проектов по разработке отдельных месторождений руд РМ и РЗМ в силу ограниченности рынков сбыта готовой продукции, волатильности цен на РМ и РЗМ и технологических проблем переработки руд имеет высокие инвестиционные риски, а также невысокий экономический эффект [27, 28]. Эффективность реализации таких проектов может быть достигнута путем формирования производственных цепочек полного цикла на основе вертикальной и горизонтальной кооперации предприятий или формированием сети технологически связанных промышленных производств, связанных с потреблением и выпуском продуктов, содержащих РЗМ [7, 22, 28, 29, 30].

Такой подход позволяет создать условия для реализации нескольких инвестиционных проектов производства продуктов, востребованных в современных отраслях высоких технологий. Размещение производства в Западной Якутии дает возможность использовать перспективные ресурсы лития в подземных рассолах непосредственно на месте залегания с эксплуатацией имеющейся энергетической, логистической и транспортной инфраструктуры.

С целью повышения эффективности проектов и развития в Якутии производства продукции с высокой добавленной стоимостью возможной представляется модель создания в РС(Я) единого

редкометалльного кластера, включающего три рассмотренных проекта – по извлечению лития из гидроминерального сырья (рассолы трубки «Удачная») [16, 17], по извлечению РЗМ, ниобия, скандия (и, возможно, марганца) из руд Томторского месторождения [8, 9], также по разработке Агылкинского месторождения с получением вольфрамового концентрата (рис. 5).

Предлагается использование двух площадок с созданием мощностей по глубокой переработке руд. Первая – на территории Мирнинского района РС(Я), где возможно размещение завода по извлечению лития и брома из литийсодержащих рассолов трубки «Удачная» и создание предприятия по выпуску химических реагентов (каустическая сода, хлор или соляная кислота). Сырьем для производства этих реагентов могут быть богатые соляные природные растворы, а также местное сырье (галит). При этом возможно создание дополнительно химического производства по переработке поваренной соли (растворение, электролиз) – с получением хлора и каустической соли (NaOH). Отдельным дальнейшим переделом можно выпускать соляную кислоту (HCl), что явится принципиальным звеном в создании цепочки производственных мощностей по переработке продуктов РЗМ.

Для извлечения лития могут быть применены селективные сорбенты отечественного (например, аксионит) или китайского производства. Товар-

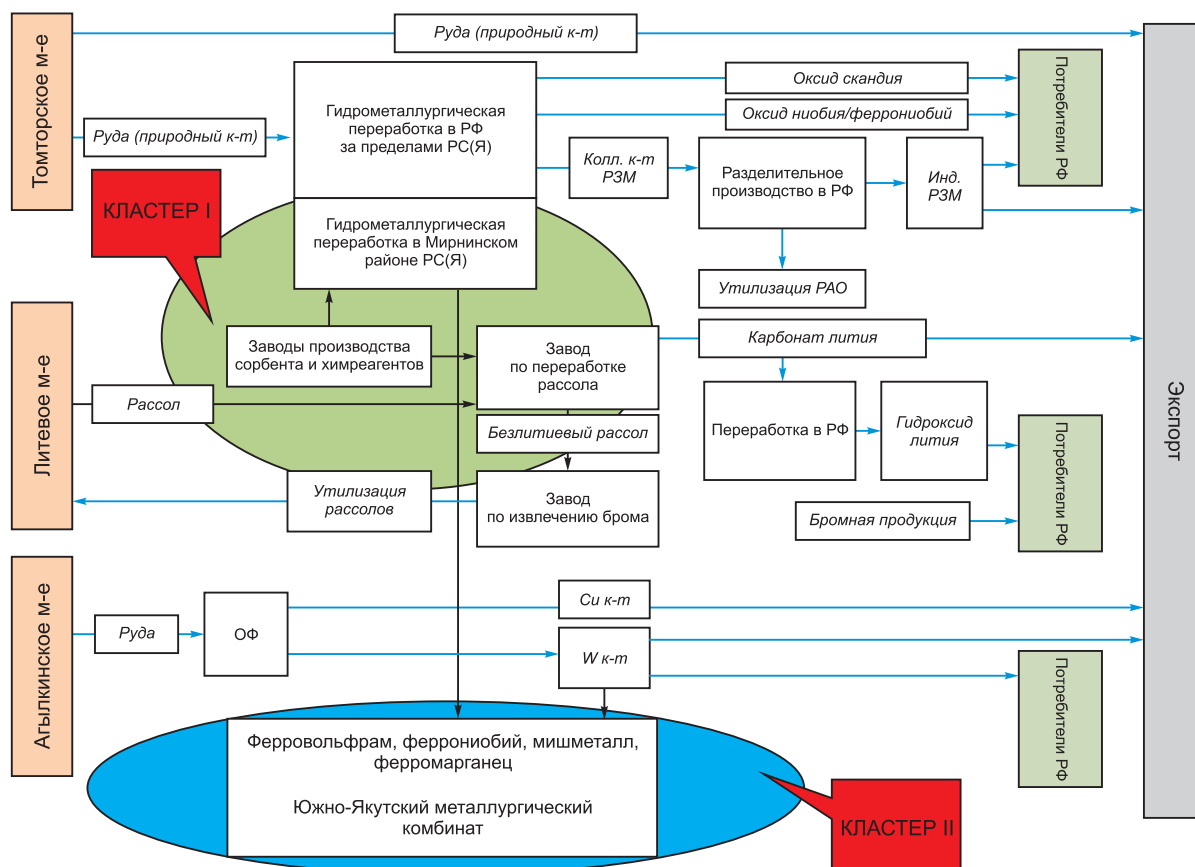


Рис. 5. Схема сети промышленных производств при создании единого редкометалльного кластера в РС(Я)

Fig. 5. Diagram of the network of industrial companies aimed at establishing a consolidated rare metal cluster in the Republic of Sakha (Yakutia)

ной продукцией при данном переделе является карбонат лития, который может поставляться в дальнейшем для использования в РФ (например, на ХМЗ в Красноярске) или на экспорт (в Китай). На Удачинской площадке, согласно разработкам ИХХТ СО РАН, возможно также проведение первичной переработки томторской руды с получением товарной продукции – пирохлорового концентрата для последующего получения из него феррониобия [9].

Возможным является также щелочное вскрытие с использованием производимой каустической соды. Продукцией в данном случае может быть наиболее богатый по РЗМ, ниобию и скандию концентрат. Для дальнейшей его переработки (согласно схеме ВИМСа) необходима азотная кислота, которая пока не производится в РС(Я). Ее выпуск должен быть налажен в случае начала добычи и переработки апатитовой руды Селигдарского месторождения, где требуются большие объемы азотной или серной кислоты.

В качестве одного из вариантов глубокой переработки руд Томторского месторождения на территории РС(Я) следует рассмотреть возможный отказ от разделения РЗМ методами экстракции и использование селективных сорбентов (в частности, других марок аксионита). Это потребует создания на базе редкометалльного кластера в Мирнинском районе специального сорбционного отделения для выделения лития из рассолов и извлечения РЗМ из растворов переработки руды Томторского месторождения. Вторым возможным местом глубокой переработки редких металлов, на наш взгляд, может стать металлургический кластер на юге Якутии. Наличие там пирометаллургических мощностей является альтернативным вариантом первичной переработки томторских руд обжигом и плавкой с получением продукта, близкого по своим свойствам к мишметаллу, для дальнейшего легирования.

Получаемый в процессе флотационной переработки руд Агылкинского месторождения воль-

фрамовый концентрат может перерабатываться на создаваемых плавильных мощностях этого кластера в ферровольфрам. В случае выделения при переработке руды Томторского месторождения после щелочной и кислотной обработки первичного товарного ниобиевого продукта (пироклорового концентрата) он может быть переработан в феррониобий на плавильных мощностях Южно-Якутского металлургического комбината. Кроме того, при принципиальном решении вопроса возможности получения марганцевого концентрата из руд Томтора [9] этот продукт также может плавиться на ферромарганец. Таким образом, на базе кластера черной металлургии возможен выпуск ферросплавной продукции широкого спектра (ферровольфрам, феррониобий, ферромарганец), которая может использоваться для выпуска высококачественной стали, в том числе на территории РС(Я) [7–9, 31].

Заключение

1. В рамках настоящего исследования проведен анализ минерально-сырьевой базы редких металлов Республики Саха (Якутии). Показано, что в Якутии расположены крупные запасы редких металлов – РЗМ, ниобия, иттрия, скандия, марганца, вольфрама и висмута. Выполнен анализ мирового и российского рынка РЗМ, ниобия, скандия, лития и вольфрама, а также висмута. Проанализированы существующие и перспективные проекты добычи РМ и РЗМ в Российской Федерации, в том числе в Республике Саха (Якутия).

2. Определены общие мировые и российские тенденции развития рынка редких и редкоземельных металлов. На основе прогнозных данных выделены наиболее перспективные проекты по добыче РМ и РЗМ на территории Республики Саха (Якутия): освоение Томторского месторождения (РЗМ, ниобий, иттрий, скандий, марганец), Агылкинского месторождения (вольфрам) и получение лития из гидроминерального сырья (в том числе на основе рассолов кимберлитовой трубки «Удачная»).

3. Разработаны принципиальные технологические схемы первичного обогащения и глубокой переработки вольфрама, лития и редкоземельных элементов, используемые на месторождениях, аналогичных вышеперечисленным. На основании SWOT-анализа проектов по разработке месторождений редких металлов в Якутии оценены возможность и последовательность освоения наиболее перспективных месторождений РМ и РЗМ.

4. Выявлены факторы, определяющие формирование моделей сети промышленных производств при переработке руд месторождений редких металлов Республики Саха (Якутии), а также проанализированы нормативные и стратегические документы, которые необходимо учитывать при формировании моделей.

5. Разработаны схемы сети промышленных производств по извлечению ниобия, РЗМ, иттрия и скандия из руд Томторского месторождения, по добыче вольфрама на Агылкинском медно-вольфрамовом месторождении, а также по извлечению лития из рассолов с учетом их частичной переработки на территории РС(Я).

6. Представлена модель создания в РС(Я) единого редкометалльного кластера на основе трех проектов, рассмотренных выше, а также проект по созданию в Якутии кластера черной металлургии, в том числе Южно-Якутского металлургического комбината, на базе которого возможен выпуск востребованной продукции с высокой добавленной стоимостью, в том числе ферровольфрама, феррониобия, ферромарганца.

Список литературы / References

1. Зеликман А.Н., Коршунов Б.Г. *Металлургия редких металлов*. М.: Металлургия; 1991. 432 с.
Zelikman A.N., Korshunov B.G. *Metallurgy of rare metals*. Moscow: Metallurgiya Publ.; 1991. 432 p. (In Russ.)
2. *Обзор рынка редкоземельных элементов (металлов) в мире*. 3-е издание. М.: ООО «Исследовательская группа «Инфомайн»; 2022. Режим доступа: <http://www.infomine.ru/research/38/622> (платный доступ) (дата обращения: 11.01.2023).
Overview of the rare earth elements (metals) market in the world. 3rd edition. Moscow: Infomine Research Group LLC; 2022. Available at: <http://www.infomine.ru/research/38/622> (access requires payment) (accessed: 11.01.2023). (In Russ.)
3. BGS. World Mineral Production 2018-2022. Available at: <https://www.bgs.ac.uk/news/world-mineral-production-2018-to-2022-is-now-available/>
4. Lynas Rare Earths. Annual Report. 2018-2023. Available at: <https://lynasrareearths.com/investors-media/reporting-centre/annual-reports/> (assessed: 30.10.2024).
5. Lynas Rare Earths. Presentation. Available at: <https://lynasrareearths.com/investors-media/reporting-centre/presentations/> (accessed: 12.11.2024)
6. Толстов А.В., Тян О.А. *Геология и рудоносность массива Томтор*. Якутск: ЯНЦ СО РАН; 1999. 164 с.
Tolstov A.V., Tyan O.A. *Geology and ore content of the Tomtor massif*. Yakutsk: Yakut Scientific Center of SB RAS; 1999. 164 p. (In Russ.)
7. Толстов А.В., Лапин А.В. Поведение марганца в карбонатах и их корах выветривания на примере

массива Томтор. *Геосферные исследования*. 2024;(3): 1130121. <https://doi.org/10.17223/25421379/32/11>

Tolstov A.V., Lapin A.V. The behavior of manganese in carbonatites and their weathering crusts on the example of the Tomtor massif. *Geosphere research*. 2024;(3):113–121. <https://doi.org/10.17223/25421379/32/11> (In Russ.)

8. Толстов А.В., Лапин А.В. Перспективы Томторского рудного поля на месторождения марганца. *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*. 2024;60(4a):79–86. <https://doi.org/10.20403/2078-0575-2024-4a-79-86>

Tolstov A.V., Lapin A.V. The prospects of the Tomtor ore field for manganese deposits. *Geology and mineral resources of Siberia*. 2024;60(4a):79–86. <https://doi.org/10.20403/2078-0575-2024-4a-79-86> (In Russ.)

9. Толстов А.В., Лапин А.В., Кузьмин В.И. Новый взгляд на геологию, технологию и экономику ниобий-иттрий-скандиевых руд Томторского месторождения. В кн.: Фридовский В.Ю. (ред.) *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России 2024: Материалы XIV Международной научно-практической конференции, посвященной 300-летию РАН и 100-летию золотодобывающей промышленности РС (Я), г. Якутск, 26–29 декабря 2024 года*. Новосибирск; 2024. С. 223–229.

Tolstov A.V., Lapin A.V., Kuzmin V.I. A New look at the geology, technology, and economics of niobium-yttrium-scandium ores of the Tomtorskoye deposit. In: Fridovsky V.Yu. (ed). *Geology and Mineral Resources of the North-East of Russia: Proceedings of the 14th International Scientific and Practical Conference on the 300th Anniversary of the Russian Academy of Sciences and 100th Anniversary of the Gold Mining Industry of the Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, December 26–29, 2024*. Novosibirsk; 2024, pp. 223–229. (In Russ.)

10. Янников А.М. *Гидрогеология Мирнинского кимберлитового поля (Республика Саха (Якутия))*. Мирный: АК АЛРОСА (ПАО); 2021. 238 с.

Yannikov A.M. *Hydrogeology of the Mirninsky kimberlite field (Republic of Sakha (Yakutia))*. Mirny: AK ALROSA (PAO); 2021. 238 p. (In Russ.)

11. Лапин А.В., Толстов А.В., Набелкин О.А., Куликова И.М. Уникальная поликомпонентная рудная формация кор выветривания карбонатитов: новые перспективы – Fe, Mn, Ti, V. *Геология и геофизика*. 2024; 65(8):1080–1092. <https://doi.org/10.15372/GiG2023206>

Lapin A.V., Tolstov A.V., Nabelkin O.A., Kulikova I.M. Unique multicomponent Fe, Mn, Ti, V mineralization in laterite profiles of weathered carbonatites: new prospects. *Russian Geology and Geophysics*. 2024;65(8): 927–935. <https://doi.org/10.2113/RGG20234676>

12. Похиленко Н.П., Толстов А.В. Перспективы освоения Томторского месторождения комплексных ниобий-редкоземельных руд. *ЭКО*. 2012;461(11):17–27.

Pokhilenko N.P., Tolstov A.V. Prospects for the development of the Tomtor deposit of complex niobium-rare earth ores. *ECO*. 2012;461(11):17–27. (In Russ.)

13. Похиленко Н.П., Крюков В.А., Толстов А.В., Самсонов Н.Ю. Томтор как приоритетный инвестиционный проект обеспечения России собственным источником редкоземельных элементов. *ЭКО*. 2014; 476;(2):22–35.

Pokhilenko N.P., Kryukov V.A., Tolstov A.V., Samsonov N.Yu. Tomtor as priority investment project to provide Russia with its own source of rare earth elements. *ECO*. 2014;476;(2):22–35. (In Russ.)

14. Толстов А.В., Похиленко Н.П., Самсонов Н.Ю. Новые возможности получения редкоземельных элементов из единого арктического сырьевого источника. *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия*. 2017;10(1):125–138. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0012>

Tolstov A.V., Pokhilenko N.P., Samsonov N.Yu. New opportunities for producing rare earth elements one of the arctic raw material source. *Journal of Siberian Federal University. Chemistry* 2017;10(1):125–138. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0012>. (In Russ.)

15. Лазарева Е.В., Жмодик С.М., Толстов А.В. и др. Уникальное Nb-REE месторождение Томтор (Арктическая Сибирь). В кн.: *Металлогения древних и современных океанов-2024. Рудогенез*. Миасс: ЮУ ФНИЦ МиГ УрО РАН, 2024. С. 119–122.

Lazareva E.V., Zhmodik S.M., Tolstov A.V., et al. Unique Nb-REE Tomtor deposit (Arctic Siberia). In: *Metallogeny of ancient and modern oceans-2024. Ore genesis*. Miass: SU FRC MG UB RAS, 2024, pp. 119–122. (In Russ.)

16. Янников А.М. *Гидрогеология Алакит-Мархинского кимберлитового поля Республика Саха (Якутия)*. Мирный: АК АЛРОСА (ПАО); 2022. 131 с.

Yannikov A.M. *Hydrogeology of the Alakit-Markha kimberlite field, Republic of Sakha (Yakutia)*. Mirny: AK ALROSA (PAO); 2022. 131 p. (In Russ.)

17. Янников А.М. *Гидрогеология Далдынского кимберлитового поля: Республика Саха (Якутия)*. Мирный: АК АЛРОСА (ПАО); 2023. 305 с.

Yannikov A.M. *Hydrogeology of the Daldyn kimberlite field: Republic of Sakha (Yakutia)*. Mirny: AK ALROSA (PAO); 2023. 305 p. (In Russ.)

18. Игнатов П.А., Еременко Р.У., Толстов А.В., Овчинников И.М. Перспективы обнаружения месторождений стратегических полезных ископаемых (Cu, Co, Ni, EPG, Sc, V, Li, REE, Sr, графит, углеводород) в алмазоносных районах юга Западной Якутии. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2024;66(1):65–78. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-1-65-78>.

Ignatov P.A., Eremenko R.U., Tolstov A.V., Ovchinnikov I.M. Prospects for the discovery of strategic mineral deposits (Cu, Co, Ni, EPG, Sc, V, Li, REE, Sr, graphite, hydrocarbons) in the diamond-bearing areas of the South of Western Yakutia. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2024; 66(1):65–78. (In Russ.) <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-1-65-78>. (In Russ.)

19. Крюков В.А., Толстов А.В., Афанасьев В.П. и др. Обеспечение российской промышленности высокотехнологичной сырьевой продукцией на основе гигантских месторождений Арктики – Томторского ниобий-редкоземельного и Попигайского сверхтвёрдого абразивного материала. В кн.: *Север и Арктика в новой парадигме мирового развития. Лузинские чтения – 2016, г. Апатиты, 14–16 апреля 2016 года*. Апатиты: Институт экономических проблем им. Г.П. Лузина Кольского научного центра РАНС. 204–206.
- Kryukov V.A., Tolstov A.V., Afanasyev V.P., et al. Provision of the Russian industry with high-tech raw materials based on giant deposits in the Arctic: Tomtor niobium-rare earth deposits and Popigay superhard abrasive materials. In: *The North and the Arctic in a New Paradigm of Global Development, Luzin Readings – 2016, Apatity, April 14–16, 2016*. Apatity: Luzin Institute of Economic Problems, Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, pp. 204–206. (In Russ.)
20. Лазарева Е.В., Жмодик С.М., Добрецов Н.Л. и др. Главные рудообразующие минералы аномально богатых руд месторождения Томтор (Арктическая Сибирь). *Геология и геофизика*. 2015;56(6):1080–1115. <https://doi.org/10.15372/GiG20150603>
- Lazareva E.V., Zhmodik S.M., Dobretsov N.L., et al. Main minerals of abnormally high-grade ores of the Tomtor deposit (Arctic Siberia). *Russian Geology and Geophysics*. 2015;56(6):844–873. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.05.003>
21. Похиленко Н.П., Крюков В.А., Толстов А.В., Самсонов Н.Ю. Создание сильной редкоземельной промышленности: без госкорпораций не осилить. *ЭКО*. 2016;506(8):25–36.
- Pokhilenko N.P., Kryukov V.A., Tolstov A.V., Samsonov N.Yu. Creating a strong rare earth industry in Russia: state corporations without not overpower. *ECO*. 2016;506(8):25–36. (In Russ.)
22. Похиленко Н.П., Толстов А.В., Афанасьев В.П., Самсонов Н.Ю. Новые механизмы государственного управления минерально-сырьевой базы стратегических полезных ископаемых Арктической зоны Сибири и Дальнего Востока. *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. 2016;(5):60–63.
- Pokhilenko N.P., Tolstov A.V., Afanasyev V.P., Samsonov N.Y. New mechanisms of state management of the mineral resource base of strategic minerals in the Arctic zone of Siberia and the Far East. *Mineral Resources of Russia. Economics & Management*. 2016;(5):60–63. (In Russ.)
23. Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации, 2018–2022. Режим обращения: <https://vims-geo.ru/ru/activity/iacn/russia/gosdokladi/> (дата обращения: 01.10.2024)
- State Report on the state and use of mineral resources of the Russian Federation, 2018–2022. Available at: <https://vims-geo.ru/ru/activity/iacn/russia/gosdokladi/> (accessed: 01.10.2024)
24. Chagnes A., Swiatowska J. *Lithium Process Chemistry: Resources, Extraction, Batteries, and Recycling*. 2015
25. SQM. Available at: https://s25.q4cdn.com/757756353/files/doc_financials/2023/ar/annual-report-2023_final.pdf (accessed: 01.11.2024)
26. Albemarle. Available at: <https://investors.albemarle.com/financials/annual-reports/default.aspx> (accessed: 01.11.2024)
27. Крюков В.А., Толстов А.В., Самсонов Н.Ю. Стратегическое значение редкоземельных металлов в мире и в России. *ЭКО*. 2012;461(11):5–16. (In Russ.)
- Kryukov V.A., Tolstov A.V., Samsonov N.Yu. The strategic importance of rare earth metals in the world and in Russia. *ECO*. 2012;461(11):5–16.
28. Похиленко Н.П., Афанасьев В.П., Толстов А.В. и др. Перспективы развития и проблемы освоения сырьевой базы дефицитных стратегических полезных ископаемых Сибири. *Геология рудных месторождений*. 2023;65(5):476–492. <https://doi.org/10.31857/S0016777023050088>
- Pokhilenko N.P., Afanasyev V.P., Tolstov A.V., et al. Perspectives of the development and problems of exploration of a resource base of deficient strategic mineral deposits of Siberia. *Geology of Ore Deposits*. 2023; 65(5):494–509. (In Russ.)
29. Толстов А.В., Самсонов Н.Ю. Томтор: геология, технологии, экономика. *ЭКО*. 2014;476(2):36–44.
- Tolstov A.V., Samsonov N.Yu. Tomtor: geology, technologies, economics. *ECO*. 2014;476(2):36–44. (In Russ.)
30. Толстов А.В., Лапин А.В., Похиленко Н.П., Овчинников К.В. Скандий и иттрий Томторского рудного поля. *Цветная металлургия*. 2015;(4):37–43.
- Tolstov A.V., Lapin A.V., Pokhilenko N.P., Ovchinnikov K.V. Scandium and Yttrium of Tomtor ore field. *Non-ferrous Metals*. 2015;(4):37–43.
31. Толстов А.В., Гунин А.П. Комплексная оценка Томторского месторождения. *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2001;(11):144–160.
- Tolstov A.V., Gunin A.P. *Comprehensive assessment of the Tomtor field. Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*. 2001; (11):144–160.
32. Редкие земли засверкали «Звездами». *Коммерсант*. 08.11.2024. Режим доступа: <https://www.kommersant.ru/doc/7284777> (дата обращения: 09.11.2024)
- Rare Earths Sparkled with “Stars”. *Kommersant*, 08.11.2024. Available at: <https://www.kommersant.ru/doc/7284777> (accessed: 09.11.2024)
33. <https://strana-rosatom.ru/2021/03/26/na-aehk-zapustili-opytuju-ustanovku-p/>.

Об авторах

МАТВЕЕВ Андрей Иннокентьевич, доктор технических наук, главный ученый секретарь, Академия наук Республики Саха (Якутия), г. Якутск, Российская Федерация; главный научный сотрудник, Институт горного дела

Севера им. Н.В. Черского СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-4298-5990>, ResearcherID: AAO-6487-2020, SPIN: 6263-7533, Scopus Author ID: 7102723417, e-mail: andrei.mati@yandex.ru

ТОЛСТОВ Александр Васильевич, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии благородных металлов СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация; ведущий научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-3863-5071>, ResearcherID: O-2643-2013, Scopus Author ID: 6603548567, SPIN: 7895-6601, e-mail: tols61@mail.ru

ПЕТРОВ Игорь Михайлович, доктор технических наук, генеральный директор, ООО «Исследовательская группа «Инфомайн», г. Москва, Российская Федерация, Scopus Author ID: 7101601440, SPIN: 9035-7080, e-mail: igo382@yandex.ru

Вклад авторов

Матвеев А.И. – разработка концепции, методология, верификация данных, выполнение анализа, администрирование данных, создание черновика рукописи и редактирование текста статьи, визуализация, руководство исследованием по горнорудной части, администрирование проекта; **Толстов А.В.** – разработка концепции, методология, верификация и анализ литературных и архивных данных по геолого-минералогическим и лабораторно-аналитическим исследованиям, создание и редактирование черновика рукописи, визуализация, руководство исследованием по минерально-сырьевому направлению; **Петров И.М.** – разработка концепции, методология, верификация данных, визуализация и анализ современного состояния рынков редких металлов, создание черновика рукописи, редактирование рукописи

Конфликт интересов

Двое из авторов – доктор геолого-минералогических наук Толстов А.В. и доктор технических наук Матвеев А.И. являются членами редколлегии журнала «Природные ресурсы Арктики и Субарктики». Авторам неизвестно о любом потенциальном конфликте интересов, связанном с данной статьей.

About the authors

MATVEEV, Andrey Innokentevich, Dr. Sci. (Eng.), Scientific Secretary, Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, Russian Federation; Chief Researcher, Chersky Mining Institute of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-4298-5990>, ResearcherID: AAO-6487-2020, SPIN: 6263-7533, Scopus Author ID: 7102723417, e-mail: andrei.mati@yandex.ru

TOLSTOV, Alexander Vasilevich, Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Leading Researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation; Leading Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-3863-5071>, ResearcherID: O-2643-2013, Scopus Author ID: 6603548567, SPIN: 7895-6601, e-mail: tols61@mail.ru

PETROV, Igor Mikhaylovich, Dr. Sci. (Eng.), CEO, LLC Research Group “Infomine”, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID: 7101601440, SPIN: 9035-7080, e-mail: igo382@yandex.ru

Authors' contribution

Matveev A.I. – conceptualization, methodology, validation, analysis, data administration, writing – original draft, writing – review & editing, visualization, supervision of the mining part, project administration; **Tolstov A.V.** – conceptualization, methodology, verification and analysis of literary and archival data on geological, mineralogical and laboratory analytical research, writing – original draft, writing – review & editing, visualization, supervision of research in the mineral resource area; **Petrov I.M.** – conceptualization, methodology, data verification, visualization and analysis of the current state of rare metals markets, writing – original draft, writing – review & editing

Conflict of interest

Two of the authors, Tolstov A.V., Dr. Sci. (Geol. and Mineral.) and Matveev A.I., Dr. Sci. (Eng.), are members of the Editorial Board for the journal “Arctic and Subarctic Natural Resources”. The authors are unaware of any potential conflict of interest relating to this article.

Поступила в редакцию / Submitted 28.02.2025

Поступила после рецензирования / Revised 04.03.2025

Принята к публикации / Accepted 11.03.2025



Оригинальная статья

Гранитоидный магматизм Чохчуро-Чекурдахской зоны (север Верхояно-Колымского орогена)

В. А. Трунилина✉

Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация
✉ trunilina40@mail.ru

Аннотация

Представлены результаты исследований по мезозойскому интрузивному магматизму Чохчуро-Чекурдахской зоны (ЧЧЗ), протягивающейся в субмеридиональном направлении через всю Приморскую (Яно-Индигирскую) низменность от Бакынского массива Северного батолитового пояса на юге до мыса Святой Нос моря Лаптевых на севере. Гранитоидные массивы ЧЧЗ интрузируют складчатые толщи поздней юры и раннего мела, и их положение контролируется зоной регионального разлома, т. е. массивы сформированы в постколлизийный этап в результате процессов растяжения. Имеющиеся данные свидетельствуют о близком времени их становления (105–109 млн лет – ^{40}Ar – ^{39}Ar -метод). Рассмотрены петрография, минералогия и петрогеохимические особенности пород, слагающих массивы и сопровождающих их даек, определены Р–Т-параметры генерации материнских расплавов и кристаллизации гранитоидов. Установлена принадлежность гранитоидов массивов северной части зоны к гранитоидам I-типа, формировавшимся в надсубдукционной обстановке, а массивов южной части зоны и постгранитных даек риолит-порфиров – к гранитам А-типа, сформированным в обстановке континентальной окраины (граниты массивов) и близкой к континентально-рифтогенной (дайки риолит-порфиров). Температуры и давления при магмогенерации для всех массивов зоны близки, что указывает на смену состава магнообразующих субстратов вдоль зоны с севера на юг. Геохимические характеристики свидетельствуют о коровом происхождении гранитоидов, тогда как высокие температуры магмогенерации (1000–1200 °С) и начала кристаллизации (900–1150 °С) требуют поступления ювенильного тепла для начала плавления коровых субстратов.

Ключевые слова: Верхояно-Колымский ороген, Чохчуро-Чекурдахская зона интрузий, гранитоиды, I-тип, А-тип, окраинно-континентальная обстановка, надсубдукционная обстановка

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ИГАБМ СО РАН, проект № 124052900042-7 (№ FUG-2024-0005).

Благодарности. Автор признателен А.В. Прокопьеву и О.В. Королевой за советы при обсуждении статьи и помощь в подготовке окончательной версии рукописи.

Для цитирования: Трунилина В.А. Гранитоидный магматизм Чохчуро-Чекурдахской зоны (север Верхояно-Колымского орогена). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(1):28–48. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-1-28-48>

Original article

Granitoid magmatism of the Chokhchuro-Chekurdakh zone (north of the Verkhoyansk-Kolyma orogen)

Vera A. Trunilina✉

Diamond and Precious Metal Geology Institute,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation
✉ trunilina40@mail.ru

Abstract

This article presents findings from research conducted on the Mesozoic intrusive magmatism within the Chokhchuro-Chekurdakh zone (CCZ). This zone extends in a submeridional direction across the Primorskaya (Yano-Indigirka) lowland, from the Bakyn massif of the Northern batholith belt in the south to Cape Svyatoy Nos on the Laptev Sea in the north. All granitoid massifs of this series intrude upon the folded strata of the Late Jurassic and Early Cretaceous

periods. Their location is controlled by a regional deep fault zone, indicating that the massifs formed during the post-collision stage of the tectonic stretching process. Available data suggest a close timeframe for their formation, estimated at 105–109 million years ago, as determined by the ^{39}Ar – ^{40}Ar dating method. Petrography, mineralogy and petro-geochemical features of rocks, forming the massifs of the zone and their associated dikes are examined. The P–T parameters of the generation for parent melts and the crystallization of granitoids are calculated. It has been determined that the granitoids of the massifs of the northern part of the zone belong to I type granitoids, which formed in a suprasubduction environment. In contrast, the massifs of the southern part of the zone and the postgranitic dikes of rhyolite-porphyry are defined as A-type granites, formed under the conditions of the continental margin (granites of massifs) and close to the continental rift-related one (dikes of rhyolite-porphyry). The temperatures and pressures during magma generation are close for all massifs in the zone, indicating a change in the composition of magma-forming substrates along the zone from north to south. Geochemical criteria correspond to the crustal origin of the granitoids, whereas the high temperatures of magma generation (1000–1200 °C) and the beginning of crystallization (900–1150 °C) require the inflow of juvenile heat to begin melting crustal substrates.

Keywords: Verkhoyansk-Kolyma orogen, Chokhchuro-Chekurdakh zone of granitoids, I-type, A-type, suprasubduction environment, marginal-continental conditions

Funding. This study was conducted within the state assignment for the DPMGI SB RAS, No. 124052900042-7 (No. FUG-2024-0005).

Acknowledgements. The author expresses gratitude to Andrey V. Prokopiev and Olga V. Koroleva for their valuable advice during the discussion of this article and for their assistance in preparing the final version of the manuscript.

For citation: Trunilina V.A. Granitoid magmatism of the Chokhchuro-Chekurdakh zone (north of the Verkhoyansk-Kolyma orogen). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(1):28–48. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-28-48>

Введение

Верхояно-Колымский ороген характеризуется интенсивным развитием позднемезозойского гранитоидного магматизма. Пояса крупных (батолитоподобных) плутонов маркируют осевую часть орогена («Колымскую петлю») – Главный пояс и Северный пояс. Во внутренних районах орогена прослеживаются цепочки относительно мелких штокообразных гранитоидных тел, ориентированных субортогонально простиранию складчатости – поперечные ряды интрузий и сопряженных с ними даек (рис. 1) [1]. Наименее изученным к настоящему времени является самый северный из них Чохчуро-Чекурдахский поперечный ряд (или Чохчуро-Чекурдахская зона – ЧЧЗ) (рис. 2) [2]. С севера на юг от мыса Святой Нос на побережье моря Лаптевых до хребта Полоусный на расстояние более 300 км среди перекрывающих кайнозойских отложений Приморской (Яно-Колымской) низменности прослеживаются выходы гранитоидных массивов: Святой Нос, Юрюнг-Хастах, Харстан, Максунуоха, Зимовье, Чекурдах, Хамняня, Чурпунья, Ньюлкучан, Чохчур (см. рис. 2).

Согласно В.Б. Спектору и В.С. Гриненко [2], массив Святой Нос локализован в пределах одноименной островодужной зоны, а остальные массивы ЧЧЗ – в пределах преддуговой Северо-Полоусненской зоны Святоносско-Аньюской (или Святоносской) складчатой системы. Святоносская магматическая дуга намечается по выходам верхнеюрских вулканогенно-осадочных обра-

зований на полуострове Святой Нос. В работе С.М. Прохоровой и О.А. Иванова [3] приведено детальное описание внутреннего строения массивов и петрографии слагающих их пород, но данных по их петрогеохимическому составу явно недостаточно. К настоящему времени относительно полно состав и строение массива и даек м. Святой Нос описаны М.В. Лучицкой и А.В. Моисеевым [4].

В статье представлены новые данные по массивам Харстан, Хамняня, Ньюлкучан и Чохчур. Материалы по массиву Святой Нос приводятся по [4], Юрюнг-Хастах, Чекурдах и Максунуох – по [3] и Объяснительным запискам к государственным геологическим картам [5–7 и др.]. Массив Зимовье и субвулкан Чурпунья, породы которых преобразованы в рудные метасоматиты, в статье не рассматриваются. Целью исследований являлось уточнение петрогеохимической специфики гранитоидных массивов ЧЧЗ и оценка геодинамических условий их становления, что послужит реконструкции геологической истории развития этой части региона Арктики, с которым связаны не только месторождения олова, золота и редких металлов, но и перспективы нефтегазоносности.

Материалы и методы

Каменный материал получен в результате многолетних полевых исследований гранитоидного магматизма Верхояно-Колымского орогена.

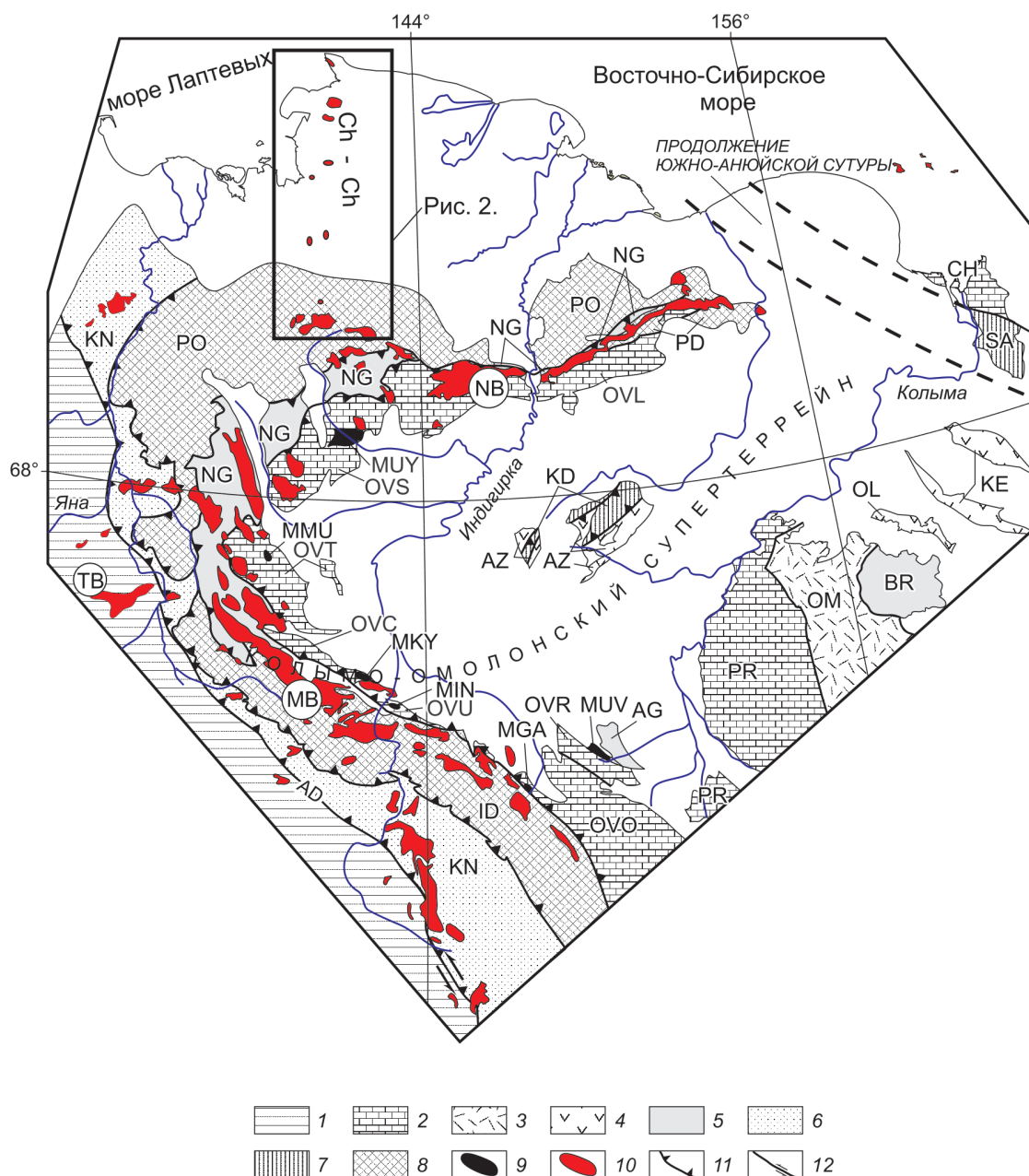


Рис. 1. Тектоническое строение северной части Верхояно-Колымского орогена (по [1] с изменениями) и положение изученных интрузивов.

1 – Верхоянский складчато-надвиговый пояс; 2 – миогеоклинальные террейны: КТ – Котельный, PR – Приколымский, CH – Чукотский, DL – Де Лонга и блоки Омудевского террейна: OVO – Омудевский, OVR – Рассохинский, OVU – Уччинский, OVC – Чемалгинский, OVT – Тас-Хаяхтахский, OVS – Селенняхский, OVL – Улахан-Тасский; 3 – Омогонский кратонный террейн (OM); 4 – островодужные террейны: AZ – Алазейский, KE – Хетакчанский, OL – Олойский; 5 – турбидитовые террейны: BR – Березовский, AG – Аргатасский, NG – Нагонджинский; 6 – Кулар-Нерский турбидитовый террейн подножия континентальной окраины (сланцевый пояс) (KN); 7 – террейны аккреционного клина, сложенные преимущественно океаническими породами: SA – Южно-Анхойский, KD – Кенкельдинский; 8 – Полоусно-Дебинский террейн аккреционного клина, сложенный преимущественно турбидитами (PD); 9 – океанические (офиолитовые) террейны: SH – Шалауровский, DE – Дебинский и фрагменты Мунилканского террейна: MUY – Уядинский, MMU – Мунилканский, MKY – Кыбытыгасский, MIN – Индигирский (Уччинский), MGA – Гарбыньинский, MUV – Увязкинский; 10 – массивы гранитоидов: NB – Северный пояс, MB – Главный пояс, TB – Поперечный пояс, Ch-Ch – Чохчуро-Чекурдахский ряд интрузий; 11 – надвиги: AD – Адыча-Тарынский; 12 – сдвиги

Fig. 1. The tectonic map of the northern part of the Verkhoyansk-Kolyma orogen (according to [1] with changes) and the position of the studied intrusions.

1 – Verkhoyansk fold-and-thrust belt (deformed proximal Verkhoyansk passive continental margin) (slate belt); 2 – miogeoclinal terranes: PR – Prikolyma, CH – Chukotka, DL – De Longa, and blocks of the Omulevka terrane: OVO – Omulevka, OVR – Ras-sokha, OVU – Uchcha, OVC – Chernalga, OVT – Tas-Khayakhtakh, OVS – Selennyakh, OVL – Ulakhan-Tas; 3 – Omolon crat-onal terrane (OM); 4 – Island arc terranes: AZ – Alazeya, KE – Khetchan, OL – Oloy; 5 – turbidite terranes: BR – Beryozovka, AG – Arga Tas, NG – Nagondzha; 6 – Kular-Nera continental margin terrane (deformed distal Verkhoyansk passive continental margin) (slate belt); 7 – accretionary wedge terranes composed mainly of oceanic rocks: SA – South Anyui, AD – Kenkel'da; 8 – Polousno-Debinsky terrane of the accretion wedge, composed mainly of turbidites (PD); 9 – oceanic (ophiolite) terranes: SH – Shalaurov, DE – Debin, and fragments of Munilkan terrane: MUY – Uyandina, MMU – Munilkan, MKY – Kybytygas, MIN – Indigirka (Uchcha), MGA – Garbun'ya, MUV – Uvyazka; 10 – granitoids: NB – Northern belt, MB – Main belt, TB – trans-versal belts, Ch-Ch – Chokhchuro-Chekurdakh zone; 11 – thrust: AD – Adycha-Taryn; 12 – strike-slip fault

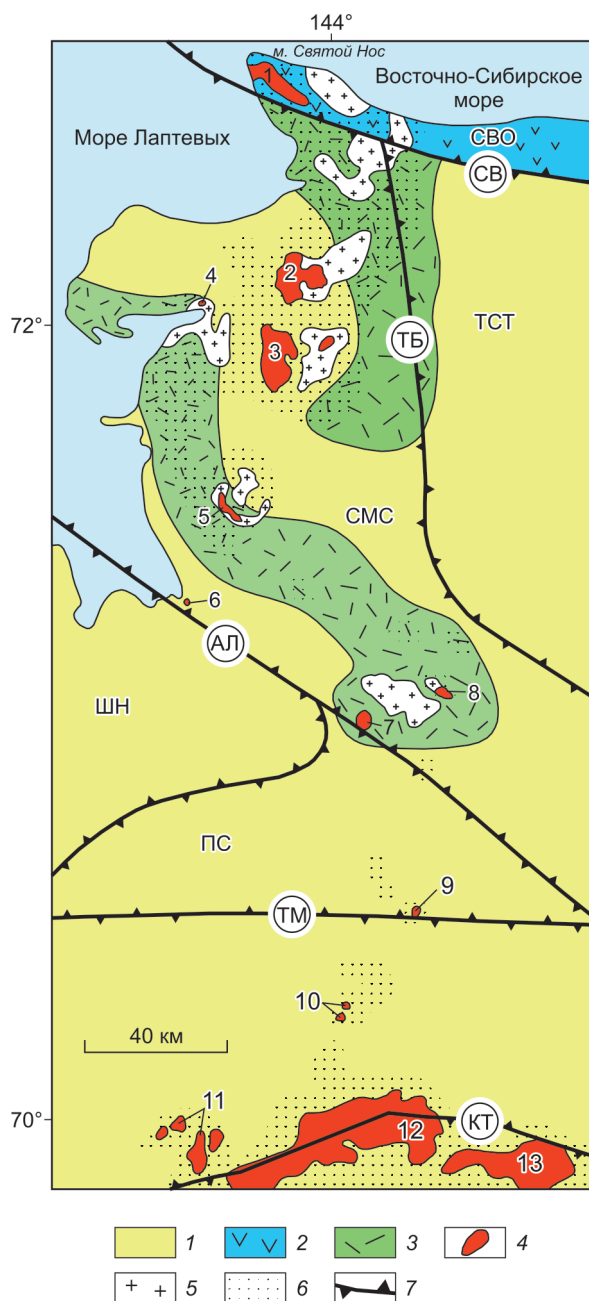


Рис. 2. Схема геологического строения Чохчуро-Чекурдакской зоны по [2].

1 – палеогеновые и четвертичные отложения, 2 – вулканогенно-осадочные породы поздней юры, 3 – меловые вул-

каногенно-осадочные породы; 4 – выходы гранитоидных массивов (Чохчуро-Чекурдакская зона: 1 – Святой Нос, 2 – Юрюнг-Хастах, 3 – Харстан, 4 – Чекурдах, 5 – Максунуоха, 6 – Зимовье, 7 – Хамняня, 8 – Чурпунья, 9 – Ньюлькучан, 10 – Чохчур; массивы Северного гранитного пояса: 11 – Укачилканский, 12 – Бакынский, 13 – Куранахский); 5 – нескрытые гранитоидные массивы по геофизическим данным, 6 – роговиковые поля, 7 – глубинные разломы: СВ – Святоносский, ТБ – Тюбеляхский, АЛ – Аллайховский, ТМ – Туматский, КТ – Кюнь-Тасский; СВО – Святоносско-Олойский вулканогенный пояс Святоносско-Анюйской складчатой системы; ТСТ – Тастахский прогиб; СМС – Столбовско-Максунуохский синклиниорий; ПС – Полоусненский синклиниорий, ШН – Шелонский блок. Местоположение см. на рис. 1.

Fig. 2. The geological map of the Chokhchuro-Chekurdakh zone according to [2].

1 – Paleogene and Quaternary sediments, 2 – volcanogenic-sedimentary rocks of the Late Jurassic, 3 – Cretaceous volcanogenic-sedimentary rocks; 4 – outcrops of granitoid massifs (Chokhchuro-Chekurdakh zone: 1 – Svyatoy Nose, 2 – Yuryung-Hastakh, 3 – Kharstan, 4 – Chekurdakh, 5 – Maksunuoha, 6 – Zimovye, 7 – Khamnyan, 8 – Churpunya, 9 – Nyulkuchan, 10 – Chokhchur; massifs of the Northern granite belt: 11 – Ukachilkan, 12 – Bakynsky, 13 – Kuranakhsy); 5 – undiscovered granitoid massifs according to geophysical data, 6 – horn fields, 7 – deep faults: CB – Svyatonosky, TB – Tyubelyakhsky, AL – Allaikhovsky, TM – Tumatsky, KT – Kyun-Tassky; CBO – Svyatonosko-Oloysky volcanic belt of the Svyatonosko-Anyui folded system; TCT – Tastakhsky trough; CMC – Stolbovsko-Maksunuokhsy synclinorium; PC – Polousnensky synclinorium, SHN – Shelonsky block. See location in Fig. 1

Петрографическое описание пород проведено на оптическом микроскопе Olympus с фотографированием шлифов наиболее представительных образцов. В лаборатории физико-химических методов анализа Института геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения РАН (ИГАБМ СО РАН, Якутск) по стандартным методикам выполнены полные силикатные анализы пород. Состав минералов определен электронно-микронзондовым анализом с использованием микроанализатора Camebax (Самеса, Франция) в ИГАБМ СО РАН. Анализ микроэлементов выполнен на масс-спектрометре ELAN (DRC-e) в лаборатории ООО «ХАЦ «Плазма» (г. Томск).

Геологическое строение Чохчуро-Чекурдахской зоны

Позднемезозойские гранитоидные массивы ЧЧЗ прорывают деформированные фаунистически охарактеризованные оксфорд-кимериджские терригенные отложения, представленные пачками переслаивания песчаников, аргиллитов и алевролитов. На них несогласно залегают раннемеловые (апт-альбские) вулканогенные образования. На севере в районе м. Святой Нос среди них преобладают базальты, андезиты и их кластолавы, перемежающиеся с туфами и маломощными пластами песчаников и пачек переслаивания аргиллитов и алевролитов (святоносская свита) мощностью 750–950 м. Базальты и андезиты принадлежат к низкокальцевой толеитовой серии и сопоставимы с островодужными образованиями [4, 5, 8]. Изотопный К–Аг-возраст базальтов: 148 ± 5 , 153 ± 5 , 157 ± 5 млн лет. Им комагматичны редкие дайки диабазовых, диоритовых и андезитовых порфиров [8].

Южнее (горы Юрюнг-Хастах, Харстан и Чекурдах) на осадочной толще оксфорд-кимериджа несогласно залегают лавы, туфолавы и туфы дацит-риолитового состава, сменяющиеся вверх по разрезу андезитами, их туфами и туфолавами. Суммарная мощность вулканогенных образований 290 м [5]. У г. Максунуоха и в береговых обрывах Ванькиной губы вскрываются датированные остатками бухий волжские терригенные отложения, несогласно перекрытые берриас-валанжинскими вулканогенными породами. Нижняя часть их разреза сложена пестроцветными андезитами и их туфами мощностью 200–250 м. Выше чередуются крупнообломочные туфолавы андезитов и риолитов (100–150 м) [8]. Здесь же установлены апт-альбские трахидациты, трахириодациты с пластами туфов и туфобрекчий кислого состава суммарной мощностью 280 м. Изотопный К–Аг-возраст пород 112–106 млн лет [8].

В пределах ЧЧЗ выделяются магматические образования диорит-гранодиорит-гранитного (святоносский комплекс), гранодиорит-гранитного (тарский комплекс) и гранит-лейкогранитного (кигиляхский комплекс) составов [5–8]. Выходы массивов контролируются субмеридиональным региональным разломом (см. рис. 2). К святоносскому комплексу отнесены массивы северной части зоны: Святой Нос, Юрюнг-Хастах, Харстан, Чекурдах, Максунуоха, Хамняня. В их составе преобладают двупироксеновые и амфибол-пироксеновые гранодиориты, вблизи контак-

тов местами сменяющиеся кварцевыми диоритами. Гранодиориты содержат округлые автолиты кварцевых диоритов и ксенолиты диоритов и диоритовых порфиров и рассекаются многочисленными дайками раннемеловых гранодиорит-порфиров, гранит-порфиров, лейкогранитов, аплитов и позднемеловых риолит-порфиров, риодацитов и риолитов. В экзоконтактах массивов закартированы дайки и мелкие штоки догранитоидных диоритовых порфиров. К дайкам гранит- и риолит-порфиров и зонам тектонических нарушений в массивах приурочены кварцевые, кварц-турмалиновые, аксинитовые, кварц-полевошпатовые, хлорит-кварцевые, кварц-кальцитовые жилы и минерализованные зоны дробления. Они несут вкрапленность касситерита, топаза, флюорита. U–Pb SIMS возраст гранитоидов массива Святой Нос и даек – 111–114 млн лет; дайки диоритовых порфиров в его экзоконтакте – 119 ± 1 млн лет [4]. Для остальных массивов изотопный возраст определен ^{40}Ar – ^{39}Ar -методом: $106,4 \pm 0,8$ млн лет для гранитов массива Харстан; $105,9 \pm 0,8$ млн лет – массива Максунуоха; $108,3 \pm 1,3$ млн лет по амфиболу и $104,1 \pm 0,7$ млн лет по биотиту – массива Хамняня, ^{40}Ar – ^{39}Ar -возраст постмагматического актинолита в гранитах этого массива $81 \pm 3,5$ млн лет [9].

В южной части ЧЧЗ локализованы два небольших гранитных массива: Нюлькучан и Чохчур. Первый представляет собой шток с площадью выхода 6 км^2 , сложенный мелко- и среднезернистыми амфибол-биотитовыми гранитами, переходящими к контакту в мелкозернистые порфировидные гранодиориты и граносиениты. ^{40}Ar – ^{39}Ar изотопный возраст гранитов по биотиту $107,8 \pm 0,8$ млн лет [9]. Массив рассечен дайками аплитов и грейзенизированных гранит- и риолит-порфиров. Наиболее поздней является единственная дайка лампрофира.

Массив Чохчур представляет собой трещинную интрузию порфировидных пироксен-биотитовых гранитов и граносиенитов с площадью выхода около 3 км^2 . Он вскрывается на северной вершине г. Чохчур среди терригенных пород поздней юры. На юго-западном склоне г. Чохчур обнажаются пироксен-биотитовые и двупироксеновые монзониты и микродиориты. На южной вершине г. Чохчур и ее склонах начинают вскрываться трещинная интрузия и серия даек гранит- и риолит-порфиров. Породы несут многочисленные нодулы турмалин-флюоритового состава. Повсеместно и в гранитах, и во вмещающих по-

родах наблюдаются жилы и штокверковые зоны кварца с касситеритом, вольфрамитом, флюоритом, топазом.

Петрография магматических пород

Догранитоидные диоритовые и андезитовые порфиристы порфиоровые, с микропризматическзернистой, интерсертальной или микропойкилитовой основной массой (Приложение, рис. 1а, б). Вкрапленники в них сложены зональным лабрадором или андезин-лабрадором и магнезиоавгитом (железистость $f = 16,1 \%$). Расчетная по [10] температура кристаллизации $T = 1130^\circ\text{C}$ при давлении $P = 13,9$ кбар (Приложение, табл. 1). Амфибол образует более мелкие вкрапленники и срастания с выделениями плагиоклаза. Представлен бурой роговой обманкой с железистостью $f [f = (\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO})) = 45,1 \%, T = 859^\circ\text{C}$ (расчеты по [11, 12]), по которой в свою очередь развиваются актинолит или канниллоит (Приложение, табл. 1). Основная масса состоит из микропризм альбитизированного андезина и ксеноморфных зерен роговой обманки с $f = 64,1\text{--}67,2 \%, T = 826\text{--}763^\circ\text{C}$. Вблизи контакта с гранитами в породах появляются мелкие чешуйки биотита, по составу отвечающего таковым гранитоидов I-типа мантийно-корового происхождения (Приложение, табл. 2). Содержание кварца и ортоклаза в породах не превышает первых процентов. Акцессорные минералы: магнетит, ильменит, циркон и апатит.

Кварцевые диориты в массивах святоносского комплекса образуют округлые и неправильной формы обособления в гранодиоритах. Это мелко- и среднезернистые породы, вблизи контактов порфиоровые с вкрапленниками плагиоклаза, пироксена и амфибола в гипидиоморфно-зернистой или призматически-зернистой основной массе. В массивах Максунуоха и Хамняня с ростом количества щелочного полевого шпата кварцевые диориты сменяются монцонитами (Приложение, рис. 1д).

Порфиоровые выделения плагиоклаза сложены зональным андезин-лабрадором и андезином ($53\text{--}42 \%$ an). Плагиоклаз основной массы – андезин и олигоклаз-андезин ($35\text{--}28 \%$ an). Клинопироксен – магнезиальный авгит с $f = 11 \%, T = 1220\text{--}1228^\circ\text{C}$ и $P = 11,9\text{--}12,5$ кбар (Приложение, табл. 1). Он образует соизмеримые с плагиоклазом порфиоровые выделения и мелкие идиоморфные включения в его центральной зоне (Приложение, рис. 1с). Клинопироксен замещается магнезиальным энстатитом или

магнезиальным пижонитом с $f = 19,5\text{--}23,1 \%, T = 1138\text{--}1157^\circ\text{C}$ и $P = 12,5\text{--}7,1$ кбар. По пироксенам развивается роговая обманка, замещающаяся актинолитом. Мелкие ксеноморфные чешуйки биотита выполняют интерстиции между зернами плагиоклаза основной массы. Калиевый полевой шпат, представленный промежуточным микроклином, наблюдается только в основной массе в виде ксеноморфных зерен или в микропегматитовых срастаниях с кварцем. В монцонитах массивов Хамняня и Чохчур отмечаются соизмеримые с амфиболом зерна нерешетчатого микроклина. Акцессорные минералы в кварцевых диоритах представлены апатитом, алланитом, титанитом, ильменитом, цирконом.

Гранодиориты слагают главные фации массивов святоносского комплекса. Породы преимущественно среднезернистые, с гипидиоморфно-зернистой структурой, в эндоконтактах – невадитовые или гломеропорфиоровые. В массиве Хамняня с ростом количества калий-натрового полевого шпата гранодиориты сменяются граносиенитами (Приложение, рис. 1ф).

Плагиоклаз гранодиоритов зональный: $48\text{--}50 \%$ an в центре и $30\text{--}24 \%$ an – на периферии. Плагиоклаз содержит антипертиты ортоклаза. В срастании с плагиоклазом наблюдаются короткопризматические зерна магнезиального геденбергита ($f = 32,9\text{--}45 \%, T = 1153^\circ\text{C}, P = 7,7$ кбар). Ортопироксен – энстатит ($f = 46,8\text{--}53 \%, T = 1027\text{--}1074^\circ\text{C}$ и $P = 6\text{--}8,5$ кбар) обрамляет клинопироксен, выполняет интерстиции в срастаниях крупных зерен клинопироксена и плагиоклаза. И клино-, и ортопироксен при $789\text{--}708^\circ\text{C}$ замещаются бурой магнезиальной роговой обманкой с $f = 48,1\text{--}57,6 \%$, которая, в свою очередь, замещается канниллоитом и актинолитом (Приложение, табл. 1). Биотит в среднезернистых гранодиоритах образует крупные идиоморфные пластинки в срастании с амфиболом. Железистость и параметры образования близки таковым амфибола: $f = 45,6\text{--}52,3 \%, T = 709\text{--}781^\circ\text{C}; P = 0,9\text{--}1,1$ кбар (расчеты по [13–16]) (Приложение, табл. 2). Биотит беден F ($0,08\text{--}0,12 \%$), обогащен Cl ($0,42\text{--}0,62 \%$) и близок по составу биотитам мантийно-коровых гранитоидов I-типа (рис. 3а–д) [17–19]. В центре одного из зерен установлено включение Mg-биотита с $f = 26,4 \%$, соответствующего биотитам мантийных производных. Биотит насыщен мелкими вростками апатита, циркона, алланита, ильменита. Калиевый полевой шпат в гранодиоритах большинства массивов святоносского

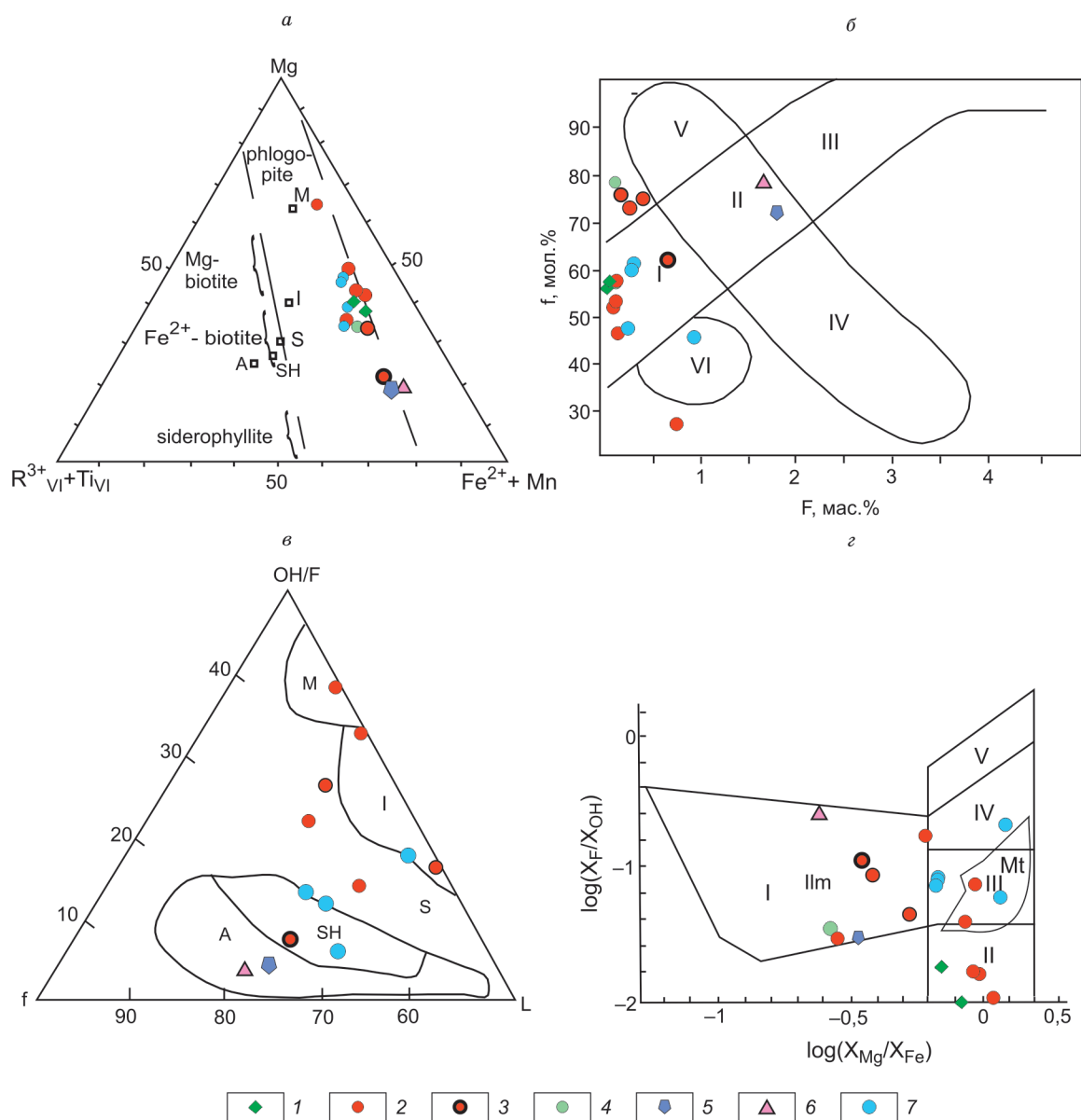


Рис. 3. Состав биотитов гранитоидов Чохчуро-Чекурдахской зоны.

Биотиты: 1 – диоритов, 2 – гранодиоритов массива Харстан, 3 – даек массива Харстан, 4 – гранодиоритов массива Хамняня, 5 – гранита массива Максунуоха, 6 – гранита массива Чохчур, 7 – даек риолитов. а – соотношение $(R^{3+}+Ti) - Mg - (Fe^{2+}+Mn)$ в биотитах, $R^{3+} = Fe^{3+}+Al^{3+}$, поля составов и точки средних составов биотитов различных петротипов гранитоидов [17]: М, I, S, А – биотиты из гранитоидов типов М, I, S, А, SH – биотиты из гранитоидов шошонитовой серии; б – соотношение железистости и содержаний фтора в биотитах, поля диаграммы по [18]: I–II–III – биотиты пород гранит-лейкогранитной и гранодиорит-гранитной ассоциаций, IV–II–V – габбро-гранитных ассоциаций, VI – производных мантийных магм; в – соотношения фтористости (OH/F), глиноземистости ($L = Al/(Si+Al+Fe+Mg)$) и железистости ($f = Fe/(Fe+Mg)$) биотитов, поля диаграммы – биотиты стандартных типов гранитоидов по [17]: I – мантийно-коровые островных дуг, М – мантийные, S – коровые и мантийно-коровые коллизионных обстановок, SH – постколлизийные шошонитовые, А – анорогенных обстановок; г – соотношения $F/OH - Mg/Fe$ в биотитах, поля диаграммы по [19] – составы биотитов гранитоидов – производных расплавов: I – образованных путем контаминации и ассимиляции субморских метаосадков; II – мантийных; III – корово-мантийных; IV – мантийно-коровых; V – коровых анатектических, Mt – биотиты магнетитовых и Ilm – ильменитовых серий гранитоидов

Fig. 3. Composition of biotites from magmatic rocks of the Chokhchuro-Chekurdakh zone.

Biotites: 1 – diorites, 2 – granodiorites of the Kharstan massif, 3 – dikes of the Kharstan massif, 4 – granodiorites of the Khamnyanya massif, 5 – granite of the Maksunuoha massif, 6 – granite of the Chokhchur massif, 7 – dikes of rhyolites. а – the ratio $(R^{3+}+Ti) - Mg - (Fe^{2+}+Mn)$ in biotites, $R^{3+} = Fe^{3+}+Al^{3+}$, composition fields and points of average compositions of biotites of various petrotypes of granitoids [17]: M, I, S, A – biotites from granitoids of M, I, S, A types, SH – biotites from granitoids of the

shoshonites; δ – F vs. f diagram for biotites. Fields of the diagram [18]: I–II–III–biotites from rocks of granite–leucogranite and granodiorite–granite associations; IV–II–V–gabbro–granite associations; VI–derivatives of mantle magmas; ϵ – ratios of fluorine content (OH/F), alumina content ($L = Al/(Si+Al+Fe+Mg)$) and ferruginous content ($(f = Fe+Mn)/(Fe+Mn+Mg)$) biotites, fields of the diagram [17]: biotites of standard types of granitoids: I – mantle – crustal island arcs, M – mantle, S – crustal and mantle – crustal collision environments, SH – post – collisional shoshonite, A – anorogenic environments; z – F/OH – Mg/Fe ratios in biotites, fields of the diagram according to [19]: compositions of biotites of granitoid derivatives from melts: I – contaminated and assimilated marine metasediments; II – mantle; III – crustal – mantle; IV – mantle – crustal; V – crustal anatexis; Mt – magnetite and Ilm – ilmenite series of granitoids

комплекса представлен высоким и промежуточным ортоклазом, а в монцонитах и граносиенитах массива Хамняня – микроклином. Акцессорные минералы: ильменит, хромсодержащий магнетит (до 3 % Cr_2O_3), апатит, зональный циркон ($ZrO_2/HfO_2 = 102–45$), титанит, алланит.

Граниты в массивах святоносского комплекса распространены незначительно, наблюдаются на наиболее эродированных уровнях. Структуры их гипидиоморфно-зернистые, с участками графического строения, часто – порфировидные и невадитовые с аллотриоморфной мелкозернистой основной массой. Порфировидные выделения сложены плагиоклазом и амфиболом. Плагиоклаз зональный: от 37–39 % an в центре до 21–12 % an на периферии. Плагиоклаз основной массы – олигоклаз или олигоклаз-альбит. Вкрапленники амфибола представлены магнезиальной роговой обманкой [3]. Биотит – лепидомелан и Fe-биотит с $f = 61,3–74,6$ %, $T = 663–735$ °C образует как соизмеримые с плагиоклазом идиоморфные пластинки, так и мелкие ксеноморфные чешуйки в основной массе порфировидных разностей. По составу он сопоставим с биотитами коровых гранитов I-S типа (см. рис. 3). Калиевый полевой шпат представлен высоким до промежуточного ортоклазом и микроклином. В протоловке гранита массива Харстан встречаются единичные зерна клиноэнстатита ($f = 50,1$, $T = 1049$ °C, $P = 15,4$ кбар), скорее всего, реститовые. Акцессорные минералы: ильменит, магнетит, апатит, циркон ($ZrO_2/HfO_2 = 79–38$), титанит, алланит, пироп-альмандин (до 21 % ру) и рутил.

Массивы Чохчур и Ньюлькучан отнесены к кигильяхскому комплексу. Они сложены гранитами, на контактах местами переходящими в граносиениты. От гранитов святоносского комплекса породы отличаются существенным преобладанием калиевого полевого шпата над плагиоклазом и более низким содержанием темноцветных минералов. Порфировидные выделения представлены олигоклазом с 15–23 % an, амфиболом и микро-

клином (Приложение, рис. 1f, g). Плагиоклаз основной массы – олигоклаз или олигоклаз-альбит. Плагиоклаз заметно альбитизирован, а при грейзенизации замещается кварц-мусковитовым или кварц-топазовым агрегатом. Калий-натровый полевой шпат порфировидных выделений – промежуточный до низкого микроклин и микроклинпертит с содержанием 20–25 % ab и менее 1 % an, а основной массы – высокий до промежуточного ортоклаз и микроклин.

Амфибол образует мелкие порфировые выделения, обычно нацело замещенные актинолитом. Биотит наблюдается как в соизмеримых с плагиоклазом идиоморфных пластинках, так и в мелких ксеноморфных чешуйках в основной массе порфировидных разностей. Содержит включения касситерита, ильменита, алланита, малакона, торита. Это богатый фтором (1,6–1,7 %) лепидомелан и железистый биотит ($f = 71–79$, $T = 680–663$ °C), идентичный биотитам коровых гранитов S- или A-типа (см. рис. 3; Приложение, табл. 2).

В гранодиорит-порфирах даек вкрапленники кварца, андезин-олигоклаза, амфибола и биотита аналогичны соответствующим минералам гранодиоритов. Основная масса микроаллотриоморфно-зернистая до фельзитовой, кварц-полевошпатовая с примесью микрочешуек биотита. Дайки аплитов и мелкозернистых лейкогранитов тяготеют к трещинам отдельности во вмещающих гранитоидах и имеют с ними как резкие, так и нечеткие контакты. Структуры их аллотриоморфно-зернистые и гипидиоморфно-зернистые (Приложение, рис. 2a). Сложены они кварцем, промежуточным ортоклазом или нерешетчатым микроклином, олигоклазом с 12–20 % an, слюдами, турмалином. Отмечаются реликты хлоритизированного биотита. Акцессорные минералы: титанит, циркон, алланит, касситерит. Дайки иногда имеют зональное строение с аплитовой внешней и пегматитовой внутренней зонами (Приложение, рис. 2b).

Дайки риолит-порфиров приурочены преимущественно к более поздним тектоническим нару-

шениям и имеют четкие интрузивные контакты с гранитоидами. Мы относим их к позднемеловому тигляханскому комплексу. Породы гломеропорфировые и порфировые с вкрапленниками кварца, санидина, олигоклаза и почти нацело замещенных актинолитом и хлоритом магнезиальной роговой обманки ($f = 40,6 \%$, $T = 851 \text{ }^\circ\text{C}$) и биотита ($f = 46\text{--}59,7 \%$, $T = 762\text{--}783 \text{ }^\circ\text{C}$), по составу соответствующего биотитам гранитов корово-мантийного происхождения (см. рис. 3, *з*). Биотит кристаллизовался при высоком потенциале воды и хлора ($\log f \text{ H}_2\text{O} = 2,4\text{--}2,8$, $\log f \text{ HCl} = 2,7\text{--}3,6$) (расчеты по [20]). Наиболее магнезиальные биотиты по величине OH/F соответствуют биотитам гранитоидов I-типа, а наиболее железистые – биотитам гранитов А-типа (см. рис. 3, *в*). По биотиту развиваются псевдоморфозы мусковита. Вкрапленники кварца двух генераций: крупные зерна неправильной формы, катаклазированные или резорбированные на фрагменты, и более мелкие округлые зерна в фибролитовой кайме (Приложение, рис. 2с–*ф*). Основная масса сложена микрокристаллическим, фельзитовым или сферолитовым кварц-полевошпатовым агрегатом, включающим шпильки мелкочешуйчатого биотита, отдельные зерна и скопления микрокристаллов турмалина. Породы часто заметно грейзенизированы с формированием флюорит-мусковитовых и топаз-мусковитовых с касситеритом агрегатов и гнезд сульфидов (преимущественно арсенопирит). Акцессорные минералы: магнетит, ильменит, фтор-апатит, пироп-альмандин (20–21 % ру).

Постгранитоидные дайки трахиандезитовых порфиритов установлены в пределах массивов Харстан и Хамняня, с гранитоидами которых имеют четкие интрузивные контакты. Породы даек массивные, порфировые и гломеропорфировые, с пилотакситовой и гиалопилитовой основной массой и вкрапленниками плагиоклаза, ортопироксена и базальтической роговой обманки (Приложение, рис. 2г, *h*). По ортопироксену и роговой обманке развиваются эпидот, карбонат, серпентинохлорит. Крупные вкрапленники плагиоклаза замещены карбонатом, мелкие – альбитизированы. По данным [3], среди акцессорных минералов, кроме магнетита, ильменита, алланита и титанита, присутствует широкий комплекс сульфидов, а также касситерит и турмалин. В единственной дайке лампрофира все вкрапленники нацело замещены карбонатом и оксидами железа и распознаются только по морфологии зерен.

Петрохимия гранитоидов Чохчуро-Чекурдахской зоны

Наиболее ранние интрузивные образования ЧЧЗ – диориты и диоритовые порфириты, известково-щелочные, метаглиноземистые: $\text{al} [\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{FeO}+\text{MgO})]$, мас.% = 0,9–1,2, коэффициент ASI $[\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}+\text{CaO})]$, мол.% = 0,68–0,82 (рис. 4, *а–в*; Приложение, табл. 3) [21–23]. Параметры состава отвечают гранитоидам I-типа по [24]. Максимальная расчетная температура расплава $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ при $P = 14,3$ кбар [26, 27]. Близкие параметры получены и по программе [28]: $T = 1175\text{--}1200 \text{ }^\circ\text{C}$ при $P = 12\text{--}15$ кбар. Температурный интервал кристаллизации определен температурами образования клинопироксена и амфибола и температурами насыщения апатитом и монацитом [29]: 1153, 859–825, 825–787, 793–645 $^\circ\text{C}$ соответственно. Породы диопсид-гиперстен-нормативные, индекс дифференциации DI [30] 40–46 %. Средние значения $\text{ab/ort} = 2,3$, $\text{hup/di} = 1,3$. Низкие температуры насыщения и преобладание пироксена среди темноцветных минералов говорят об относительно низком содержании воды в материнском расплаве. Давление паров воды определено в 0,5–0,6 кбар [27]. Генерация материнских расплавов происходила на уровне амфиболитовых горизонтов коры (рис. 5, *б*) [31].

Породы северных массивов ЧЧЗ: Святой Нос, Юрюнг-Хастах, Харстан, Чекурдах, характеризуются нормальной щелочностью и варьируют по составу от кварцевых диоритов до гранитов, а их дайковая фация представлена умеренно-щелочными гранитами и лейкогранитами. В строении массивов Максунуоха и Хамняня сочетаются породы нормальной и умеренной щелочности: кварцевые диориты и монцониты, гранодиориты и граносиениты, преимущественно умеренно-щелочные граниты и лейкограниты (см. рис. 4, *а*). Кварцевые диориты метаглиноземистые ($\text{ASI} = 0,87\text{--}0,97$), кварц-диопсид-гиперстен-нормативные, соответствуют гранитоидам I-типа (рис. 5, *а, в*). От диоритовых порфиритов они отличаются более высокими содержаниями фосфора и фтора (в среднем, 0,17–0,37 % и 0,05–0,22 % против 0,15–0,23 % и 0,06 % соответственно), а также более высокими значениями DI (54–61 %), железистости (0,59–0,73) и глиноземистости (1,46–1,76) (средние значения для разных массивов) (Приложение, табл. 3). При этом в кварцевых диоритах от массива Святой Нос до массивов Максунуоха и Чохчур растут

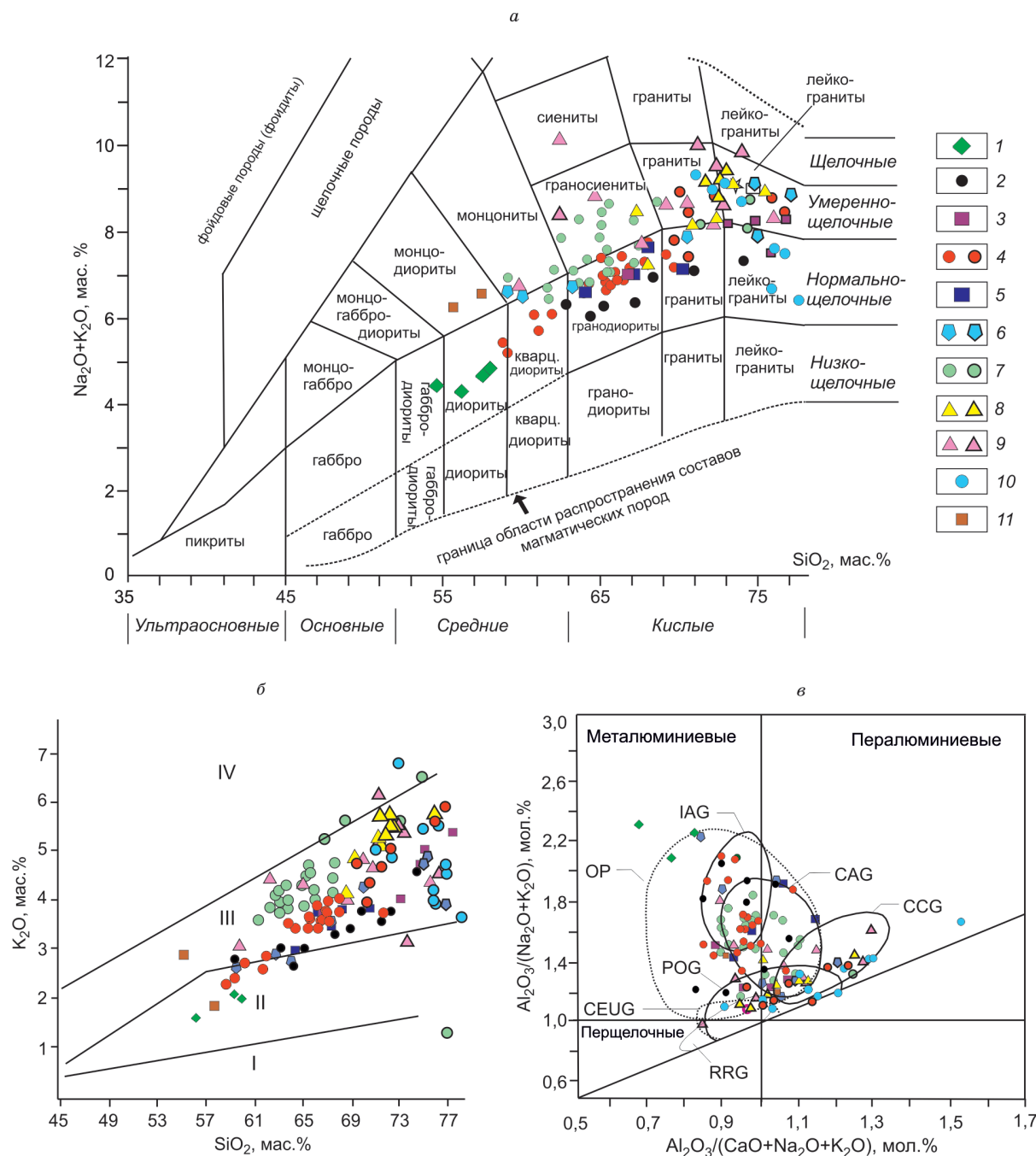


Рис. 4. Петрохимические диаграммы для магматических пород Чохчуро-Чекурдахской зоны.

a – $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - \text{SiO}_2$ по [21]; *б* – $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ по [22], петрохимические серии: I – толеитовая, II – известково-щелочная, III – высококалиевая, IV – шошонитовая; *в* – $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - \text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ по [23], гранитоиды: IAG – островных дуг, CAG – континентальных дуг, CCG – континентальной коллизии, POG – посторогенные, CEUG – континентального эпейрогенического воздымания, RRG – рифтогенные. Магматические тела: 1 – догранитоидные дайки; 2–9 – массивы и ассоциированные с ними дайки: 2 – Святой Нос, 3 – Юрюнг-Хастах, 4 – Харстан, 5 – Чокурдах, 6 – Максунуоха, 7 – Хамняня, 8 – Ньюлкучан, 9 – Чохчур; 10 – дайки риолит-порфиров, 11 – постгранитоидные дайки трахиандезитов

Fig. 4. Petrochemical diagrams for igneous rocks of the Chokhchuro-Chekurdakh zone.

a ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) – SiO_2 according to [21]; *б* $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ according to [22], petrochemical series: I – tholeiitic, II – calc-alkaline, III – high-potassium, IV – shoshonitic; *в* $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - \text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ according to [23], granitoids: IAG – island arcs, CAG – continental arcs, CCG – continental collision, POG – postorogenic, CEUG – continental epeirogenic uplift, RRG – rifting. Intrusions: 1 – pre-granitoid dikes; 2–9 – massifs and associated dikes: 2 – Svyatoy Nose, 3 – Yuryung-Hastakh, 4 – Kharstan, 5 – Chokurdakh, 6 – Maksunukha, 7 – Khamnyanya, 8 – Nyulkuchan, 9 – Chokhchur; 10 – rhyolite-porphyry dikes, 11 – postgranitoid dikes of trachyandesites

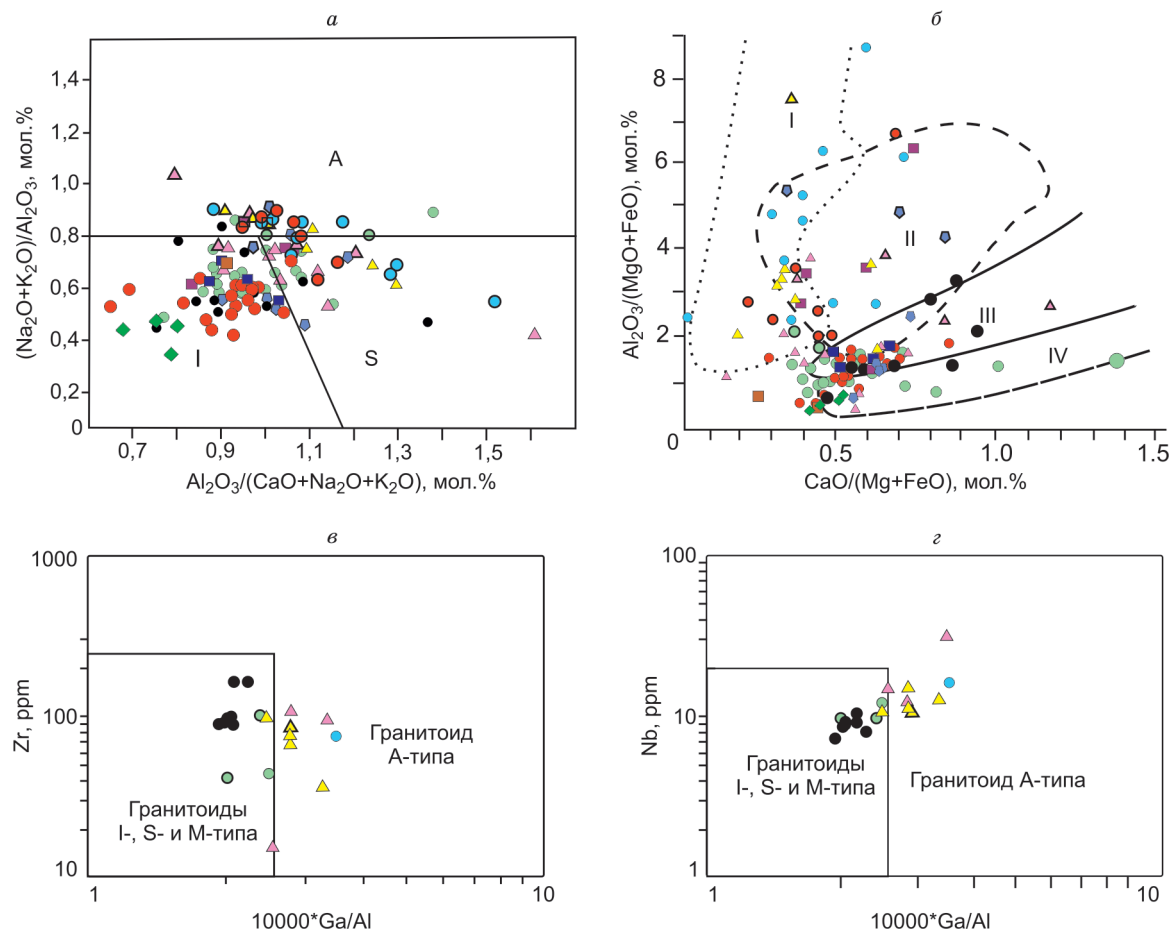


Рис. 5. Петротипы гранитоидов Чохчуро-Чекурдахской эоны и субстраты генерации материнских расплавов. Диаграммы: а – $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$ – $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$, I, A, S – поля гранитоидов I, S, A типов по [24]; б – $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{MgO} + \text{FeO})$ – $\text{CaO}/(\text{Mg} + \text{FeO})$, субстраты магмогенерации, поля частичного плавления по [31]: I – метапелитов, II – метаграувакк, III – дацитов – тоналитов, IV – амфиболитов; в – Zr – Ga/Al и г – Nb – Ga/Al в гранитоидах по [25]. Условные знаки см. на рис. 4

Fig. 5. Petrotypes of granitoids and substrates of magma generation. Diagrams: а) $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$ – $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$, I, S, A are the fields of granitoids of types I, S, A according to [24]. б) $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{MgO} + \text{FeO})$ – $\text{CaO}/(\text{Mg} + \text{FeO})$, magmogenesis substrates, partial melting fields according to [31]: I – metapelites, II – metagraywacke, III – dacites – tonalites, IV – amphibolites; в) Zr – Ga/Al and г) Nb – Ga/Al ratios in granitoids according to [25]. Symbols in Fig. 4

содержания фосфора и фтора, количество нормативных кварца и ортоклаза, отношения or/ab (1,2–2,1) и hpr/di 2,8–7, а известковые породы сменяются щелочно-известковыми, известково-щелочными и щелочными (см. рис. 4, а, б). Расчетные параметры магмогенерации несколько ниже, чем для предшествовавших диоритов: $T = 1150\text{--}1078$ °C, $P = 11\text{--}13,3$ кбар по [32, 27] и $1100\text{--}1050$ °C и 10 кбар по [28], а температуры насыщения апатитом и цирконом заметно выше: $858\text{--}940$ и 882 °C [29], что согласуется с ростом содержания воды и давления паров воды в расплаве (0,6–0,78 кбар).

Гранодиориты массивов святоносского комплекса метаглиноземистые или слабо пересыщенные глиноземом ($\text{ASI} = 0,87\text{--}1,1$), преимущественно магнезиальные, известковистые (Приложение, табл. 3). $\text{DI} = 66\text{--}75$ %. Нормативный состав кварц-диопсид-гиперстенный. Содержания фосфора (0,14–0,16 %), фтора (0,05–0,07 %), Li (36–51 г/т) и Rb (130–140 г/т) ниже, чем в диоритах и монзонитах. Исключение составляют гранодиориты и граносиениты массивов Хамняня и Максунуоха, содержащие в среднем 0,21–0,38 % P_2O_5 и до 0,23 % F. В гранодиоритах от массива Святой Нос на юг до массивов Максунуоха и Хамняня

снижаются количества нормативного диопсида от 7,3 до 0–1,1; растут количество нормативного корунда от 0 до 0,9–1,3, отношения or/ab – от 0,67 до 0,9, f от 0,65 до 0,75, al – от 1,97 до 2,42. В массивах Максунуоха и Хамняня наблюдаются переходы от гранодиоритов к граносиенитам (см. рис. 4, а). Породы принадлежат к гранитоидам I-типа (см. рис. 5, а, в). Их материнские расплавы генерировались при температурах до 1059 °C и давлении до 12,5 кбар в амфиболитовых субстратах или у границы амфиболитовых и дацит-тоналитовых субстратов (см. рис. 5, б) [31]. Температуры насыщения апатитом для гранодиоритов всех массивов близки: 848–967 °C для массива Святой Нос, 868–907 °C для массива Харстан, 842–922 °C для массива Максунуоха и 879–1017 °C для массива Хамняня. Температуры насыщения цирконом 746–815 °C для гранодиоритов массива Святой Нос, 796–923 °C для массива Хамняня; температуры насыщения монацитом составляют 740–780 °C для гранодиоритов массива Святой Нос, 723–745 °C для гранодиоритов массива Хамняня. Давление паров воды при кристаллизации гранодиоритов возрастает до 0,67–0,83 кбар.

Граниты массивов святоносского комплекса бедны F (0,04–0,06 %), Li (15–27 г/т), Rb (100–130 г/т), в основном слабо пересыщены глиноземом ($ASI = 0,96–1,18$), обладают нормальной щелочностью и принадлежат к высококалиевой петрохимической серии (см. рис. 4) (Приложение, табл. 3). Нормативный состав кварц-гиперстеновый со средним значением ab/ort 1,23, $DI = 75–94$ %. На диаграмме (см. рис. 5, а) [24] точки их составов локализуются в поле гранитов S-типа. Расчетные параметры магмогенерации: $T = 930–1010$ °C, $P = 6,4–8,4$ кбар. Температуры насыщения апатитом достигают 967 °C, цирконом – 880 °C, монацитом – 769 °C.

Граниты массивов Ньюлкучан и Чохчур отличаются от остальных более высокими содержаниями фтора (0,26–0,29 %), Rb (200–225 г/т). Содержание Li составляет (41–56 г/т). Это умеренно щелочные породы высококалиевой петрохимической серии, железистые ($f = 0,79–0,93$), преимущественно пересыщенные глиноземом ($al = 3–8$, $ASI = 0,97–1,25$ в гранитах массива Ньюлкучан и 0,91–1,14 в гранитах массива Чохчур), известково-щелочные до щелочных. По составу соответствуют в основном гранитам А-типа (см. рис. 5, а, в, г). Генерация материнских расплавов происходила на уровне дацит-тоналитовых субстратов или метаграувакк (см. рис. 5, б)

при $T = 1010–1029$ °C и $P = 9–10,1$ кбар. Нормативный состав кварц-гиперстеновый, $ab/or = 0,84–1,1$. Температура апатитонасыщения 922–1015 °C, циркононасыщения – 832–908 °C, монацитонасыщения – 701–784 °C. Температура конца кристаллизации, определенная по составу биотита, – 663–680 °C (Приложение, табл. 2).

Дайки аплитов, лейкогранитов и кварцевых порфиров на диаграмме TAS занимают область умеренно-щелочных лейкогранитов (см. рис. 4, а). Все породы щелочно-известковые, железистые, высокоглиноземистые: $f = 0,73–0,89$, $al = 4–6,8$. По составу они определяются как граниты А-или S-типа. В нормативном составе ортоклаз преобладает над альбитом. Расчетная температура расплавов по [32] – 905–996 °C при $P = 4–7$ кбар по [27].

Точки составов риолитов на диаграмме TAS образуют практически вертикальный тренд от нормально-щелочных лейкогранитов до умеренно-щелочных гранитов, характерный для гранитов А-типа (см. рис. 4, а). Эти породы характеризуются высокими значениями f (0,73–1), al (4,8–11,2), ASI (0,9–1,3), DI (91–99 %). Содержания в них P, F, Li, Rb низкие 0,05–0,07 %, 0,03–0,07 %, 22–34 г/т, 140–170 г/т соответственно); $ab/or = 0,86–1,05$. Как правило, породы интенсивно грейзенизированы, поэтому определение параметров магмогенерации проблематично. Максимальные расчетные данные для наименее измененных разностей составляют: $T = 1046$ °C, $P = 10$ кбар. Температуры апатитонасыщения – 903–1043 °C, циркононасыщения – 853–937 °C, монацитонасыщения – 752 °C. По составу породы соответствуют гранитам А-типа (см. рис. 5, а, в, г).

Состав поздних даек отвечает трахиандезитам. Породы магнезиальные с $f = 0,43–0,61$, высококалиевой петрохимической серии, $ASI = 0,9–1,05$. Они отличаются от близких по кремнекислотности догранитоидных диоритовых порфиров высокими содержаниями P_2O_5 – 0,36 % и F – 0,2 %. Нормативный состав диопсид-гиперстеновый, отношение $hup/di = 1,7$. Расчетные параметры магмогенерации: $T = 1350$ °C, $P = 16,5$ кбар. Температура апатитонасыщения 732 °C, циркононасыщения – 719 °C, монацитонасыщения – 645 °C.

Распределение редкоземельных элементов в породах изученных массивов характеризуется различной степенью дифференцированности, нарастающей от гранитоидов массива Святой Нос к гранитоидам массивов Чохчур и Ньюлкучан за счет увеличения содержаний лантаноидов

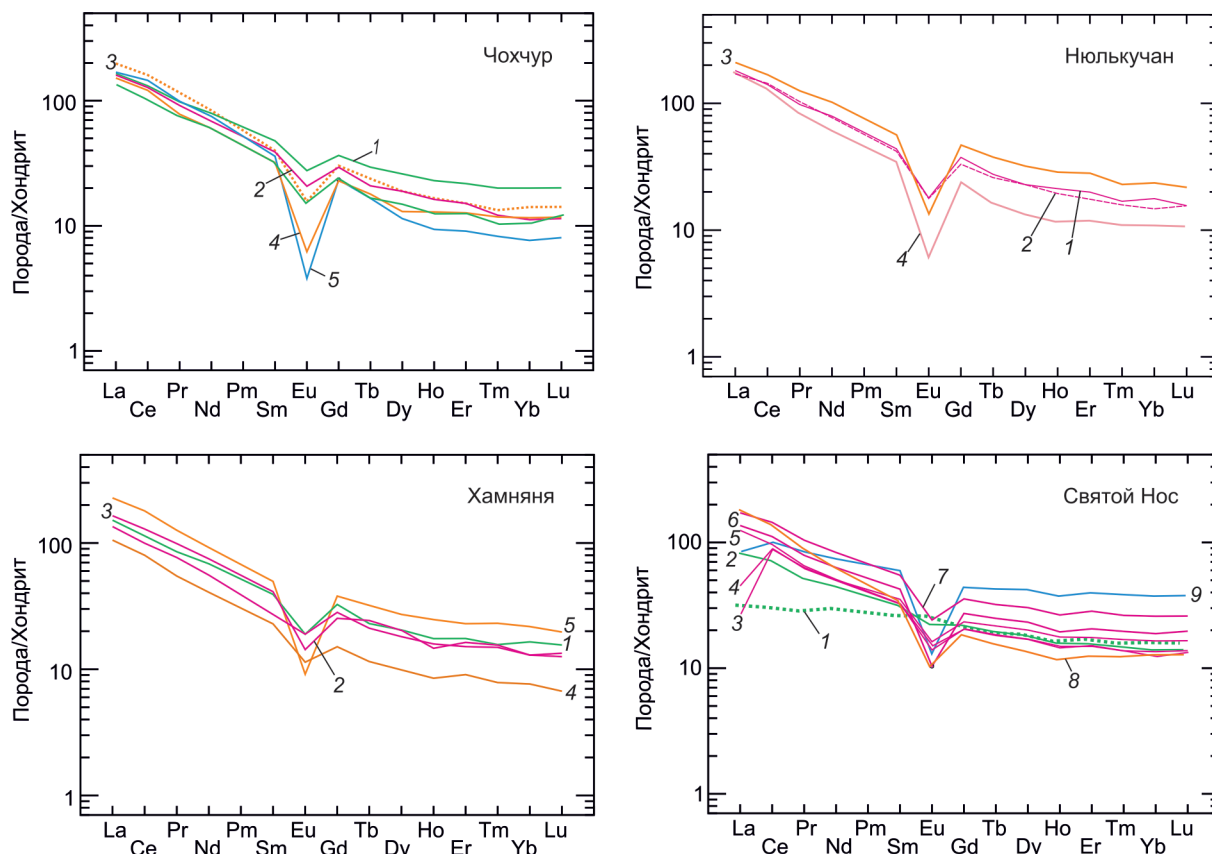


Рис. 6. Нормированное по хондриту [33] распределение редкоземельных элементов в гранитоидах Чохчуро-Чекурдахской зоны.

Массив Чохчур: 1 – 8/1 – диорит, 2 – 10/4 – гранодиорит, 3 – 9/2 – гранит, 4 – 8/1 – гранит-порфир, 5 – 10/5 – риолит; массив Ньюлькучан: 1 – 772/2 – гранодиорит, 2 – 772/1 – гранодиорит, 3 – 770/2 – гранит, 4 – 769/1 – гранит; массив Хамняня: 1 – 20 – диорит, 2 – 22/4 – гранодиорит, 3 – 22/3 – гранодиорит, 4 – 18/8 – гранит, 5 – 18/3 – лейкогранит; массив Святой Нос (по [4]): 1 – 010-01 – диорит, 2 – 022-01 – монцодиорит, 3 – 001-06 – гранодиорит, 4 – 018-01 – гранодиорит, 5 – 006-01 – гранодиорит, 6 – 015-03 – гранодиорит, 7 – 013-01 – гранодиорит, 8 – 020-01 – гранит, 9 – 006-02 – монзонит

Fig. 6. Chondrite-normalized distribution of REE in granitoids of the Chokhchuro-Chekurdakh zone.

Chokhchur massif: 1 – 8/1 – diorite, 2 – 10/4 – granodiorite, 3 – 9/2 – granite, 4 – 8/1 – granite-porphry, 5 – 10/5 – rhyolite; Nyul'kuchan massif: 1 – 772/2 – granodiorite, 2 – 772/1 – granodiorite, 3 – 770/2 – granite, 4 – 769/1 – granite; Khamnyanya massif: 1 – 20 – diorite, 2 – 22/4 – granodiorite, 3 – 22/3 – granodiorite, 4 – 18/8 – granite, 5 – 18/3 – leucogranite; Svyatoy Nose massif (according to [4]): 1 – 010-01 – diorite, 2 – 022-01 – monzodiorite, 3 – 001-06 – granodiorite, 4 – 018-01 – granodiorite, 5 – 006-01 – granodiorite, 6 – 015-03 – granodiorite, 7 – 013-01 – granodiorite, 8 – 020-01 – granite, 9 – 006-02 – monzonite

(рис. 6; Приложение, табл. 4). Средние значения отношений La_n/Yb_n для гранитоидов главных фаций массивов в этом направлении возрастают от 3,8 для массива Святой Нос до 13 для массива Ньюлькучан при сохранении для всех массивов низкой степени дифференцированности HREE: отношение Gd_n/Yb_n в среднем 1,46 – для массива Святой Нос; 2 – для массива Хамняня; 2,1 – для массивов Чохчур и Ньюлькучан (нормировано по [33]). На трендах распределения REE фиксируется отрицательная аномалия Eu с тенденцией ее углубления в том же направлении: Eu/Eu^* для гранодиоритов массива Святой Нос варьирует в пределах 0,53–0,58; для гранитоидов массива

Хамняня – 0,49–0,6, массива Чохчур – 0,44–0,51, массива Ньюлькучан – 0,25–0,47. Eu/Eu^* для гранит- и риолит-порфиров – 0,11–0,24.

Обсуждение результатов

Самые ранние интрузивные образования ЧЧЗ представлены небольшими штоками и дайками раннемеловых диоритов и диоритовых порфиров с U–Pb изотопным возрастом 111–119 млн лет [4]. Расчетные параметры магмогенерации ($T = 1200^\circ\text{C}$ и $P = 15$ кбар), преобладание среди темноцветных минералов высокотемпературного клинопироксена ($T = 1130^\circ\text{C}$, $P = 13,9$ кбар – Приложение, табл. 1); состав биотита, соответствующий

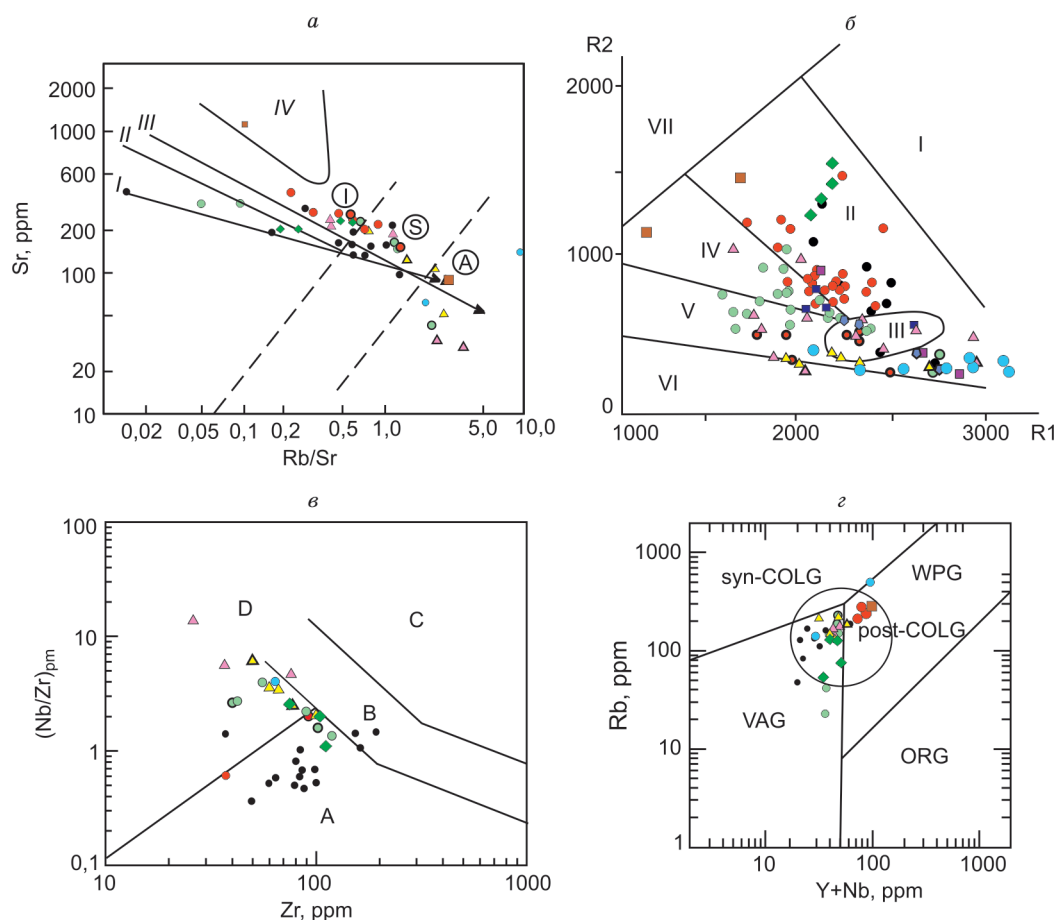


Рис. 7. Типизация и геодинамические обстановки формирования гранитоидов Чохчуро-Чекурдахской зоны.

Диаграммы: *a* – Sr – Rb/Sr, тренды дифференциации эталонных серий по [38]: I – толеитовый островных дуг, II – известково-щелочной островных дуг, III – известково-щелочной активных окраин, IV – континентально-рифтогенный, I, S, A – типы гранитоидов; *б* – R2 – R1, поля диаграммы по [39]: I – производные мантийных магм, II – предколлизийное (субдукционное), III – синколлизийное, IV – постколлизийных поднятий, V – позднеорогенное, VI – анорогенное, VII – производных щелочных магм; *в* – (Nb/Zr)_{pm} – Zr, поля геодинамических обстановок формирования гранитоидов по [41]: A – вулканических и плутонических пород надсубдукционных обстановок (островные дуги и окраины континентов), B – пород зон коллизии континент-континент, C – лав и плутонов внутриконтинентальных областей и океанических островов, D – высокоглиноземистых пород зон коллизии. Nb/Zr отношения нормализованы к примитивной мантии [41]; *з* – Rb – (Y+Nb) в гранитоидах, поля диаграммы по [40]: ORG – океанических хребтов, VAG – островодужное, syn-COLG – синколлизийное, post-COLG – постколлизийное, WAG – внутриплитное. Условные знаки см. на рис. 4

Fig. 7. Typification and geodynamic conditions of formation of granitoids of the Chokhchuro-Chekurdakh zone.

Diagrams: *a*) Sr – Rb/Sr, trends of differentiation of typical series [38]: I – tholeiitic island arcs, II – calcareous-alkaline island arcs, III – calcareous-alkaline active margins, IV – rift zones of continents; I, S, A – petrotypes of granitoids; *б*) R2 – R1, the fields of the diagram according to [39] are: I – derivatives of mantle magmas, II – precollisional (subduction), III – syncollisional, IV – postcollisional uplifts, V – late orogenic, VI – anorogenic, VII – derivatives of alkaline magmas; *в*) (Nb/Zr)_{pm} – Zr, fields of geodynamic settings for the formation of granitoids according to [41]: A – volcanic and plutonic rocks of suprasubduction environments (island arcs and continental margins), B – rocks of continent – continent collision zones, C – lavas and plutons of intracratonic regions and oceanic islands, D – high-alumina types of collision zones. The Nb/Zr ratios are normalized to the primitive mantle [41]; *з*) Rb – (Y+Nb), the fields of the diagram after [40]: ORG – ocean ridge granites, VAG – volcanic arc granites, syn-COLG – syn collision granites, post-COLG – post-collision granites, WAG within-plate granites. Symbols in Fig. 4

щий биотитам мантийно-коровых производных (см. рис. 3), низкий индекс дифференциации $DI = 40-46\%$, высокая магнезиальность указывают на участие основных пород в процес-

сах магмогенерации. В то же время, значения $Rb/Sr > 0,1$, $Nb/Ta = 9,8-12,7$ (в мантийных производных – 17,5) являются признаками происхождения из корового источника [34, 35] (Приложе-

ние, табл. 4). Соотношения петрогенных оксидов и $(\text{Ce/Yb})_n - \text{Ce}_n$ (10,5–62; 3–7,1) соответствуют генерации расплавов в амфиболитовых горизонтах коры, а соотношения $\text{Ce/Sm} - \text{Ce}$ (1,3–30,5; 1,4–49; 2,3–52) говорят о низкой степени его плавления (2–5 %) [36, 37]. Можно предполагать, что материнский расплав образовался за счет плавления нижнекоровых субстратов смешанного состава или при воздействии на нижнекоровые субстраты мантийного основного расплава. На диаграмме Sr-Rb/Sr (рис. 7, а) [38] точки составов диоритовых порфиритов располагаются в поле мантийно-коровых известково-щелочных пород, тяготея к тренду известково-щелочных образований островных дуг. Положение точек составов на диаграммах мультипликативной R1-R2 [39], $\text{Rb} - (\text{Y+Nb})$ [40], $(\text{Nb/Zr})_{\text{pm}} - \text{Zr}$ [41] (рис. 7, б–г соответственно), как и плоские тренды распределения РЗЭ определяют геодинамическую обстановку формирования ранних диоритов как надсубдукционную.

Все гранитоидные массивы ЧЧЗ по данным $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ изотопного датирования сформированы практически одновременно в альбское время (105–108 млн лет) [9]. Массивы северной части зоны сложены диорит-гранодиорит-гранитной ассоциацией пород. Как и для ранних диоритов, магнезиальный характер пироксенов, состав биотитов, отвечающих таковому биотитов мантийно-коровых производных, высокие температуры магмогенерации и кварцевых диоритов, и гранодиоритов (1178–1059 °С) указывают на связь процессов их формирования с основными расплавами. Значения Rb/Sr (0,1–1,3) и содержания «коровых» элементов Rb (110–160 г/т), K_2O (3–3,8 мас. %), Th (11–21 г/т), Pb (21–28 г/т) в них выше, чем в ранних диоритах (Приложение, табл. 3, 4). Вариации значений K/Rb (в среднем 182–279 для разных массивов) и соотношения $\text{La/Nb} - \text{Ce/Y} = 2,1-3,6$ к $1,3-3,2$ (Приложение, табл. 4) соответствуют генерации расплавов в субстратах, представлявших смесь корового и мантийного вещества [42, 33]. По параметрам состава рассматриваемые породы относятся к гранитоидам I-типа, а соотношения в них петрогенных оксидов отвечают генерации материнских расплавов в амфиболитовых субстратах или у их границы с дацит-тоналитовыми субстратами (см. рис. 5, б). На диаграммах R1-R2 и $(\text{Nb/Zr})_{\text{pm}} - \text{Zr}$ (см. рис. 7, б, в) точки их составов локализуются в основном в полях надсубдук-

ционных образований. Тренды распределения РЗЭ в гранодиоритах главных фаций характеризуются плоским рисунком в области HREE с отношениями $\text{Gd}_n/\text{Yb}_n = 1,2-1,6$ для массива Святой Нос и $\text{Tb}_n/\text{Yb}_n = 1-1,2$ для массива Харстан. На спайдер-диаграммах отчетливо проявлены минимумы Nb , La , P , Ti , также типичные для надсубдукционных образований [42, 43] (рис. 8).

Гранитоиды массивов Максунуоха и Хамняня отличаются наличием переходных к кварцевым монзонитам и граносиенитам разностей и пограничным положением точек их составов между полями надсубдукционных образований и образований активных окраин (см. рис. 7). Отношения Gd_n/Yb_n для гранодиоритов главной фации массива Хамняня возрастают до 2,2–2,3. Минимумы Nb , La , P , Ti на спайдер-диаграммах выражены значительно меньше, чем для массива Святой Нос.

Массивы южной части Чохчуро-Чекурдахской зоны – Ньюлкучан и Чохчур сложены граносиенит-лейкогранитной ассоциацией пород умеренной щелочности, с отклонениями до щелочных (см. рис. 4, а). Максимальные температуры материнского расплава 1010–1029 °С при давлении 9–10,1 кбар. Температурный интервал кристаллизации гранитов 1010–1015–643 °С (температуры апатитонасыщения и температуры кристаллизации биотитов) (расчеты по [29]). По соотношениям R1-R2 , $(\text{Nb/Zr})_{\text{pm}} - \text{Zr}$ и $\text{Rb} - (\text{Y+Nb})$ они соответствуют преимущественно постколлизийным образованиям (см. рис. 7, а, в, г), а соотношения петрогенных оксидов и элементов-примесей (см. рис. 5, а, в, г; рис. 7), как и высокие температуры циркононасыщения (866–908 °С), определяют их в основном как граниты А-типа.

Риолит-порфиры даек отличаются от гранитов массивов Чохчур и Ньюлкучан низкими содержаниями P_2O_5 и F , варьирующими значениями железистости и глиноземистости, что обусловлено их постмагматическими изменениями (Приложение, табл. 3). Преобладают высокодифференцированные разности с $\text{DI} = 91-98$ %. Тренды распределения РЗЭ наиболее дифференцированные: $(\text{La/Yb})_n = 22$, $(\text{La/Sm})_n = 4,7$, $(\text{Gd/Yb})_n = 3$, $\text{Eu/Eu}^* = 0,12-0,21$ (Приложение, табл. 4). Максимальная расчетная температура магмогенерации – $T = 1046$ °С, $P = 10,1$ кбар, температуры циркононасыщения – 853–937 °С. Составы пород соответствуют гранитам А-типа, а обстановка их формирования близка к внутримантийной рифтогенной (см. рис. 4, а, 5, а, 7).

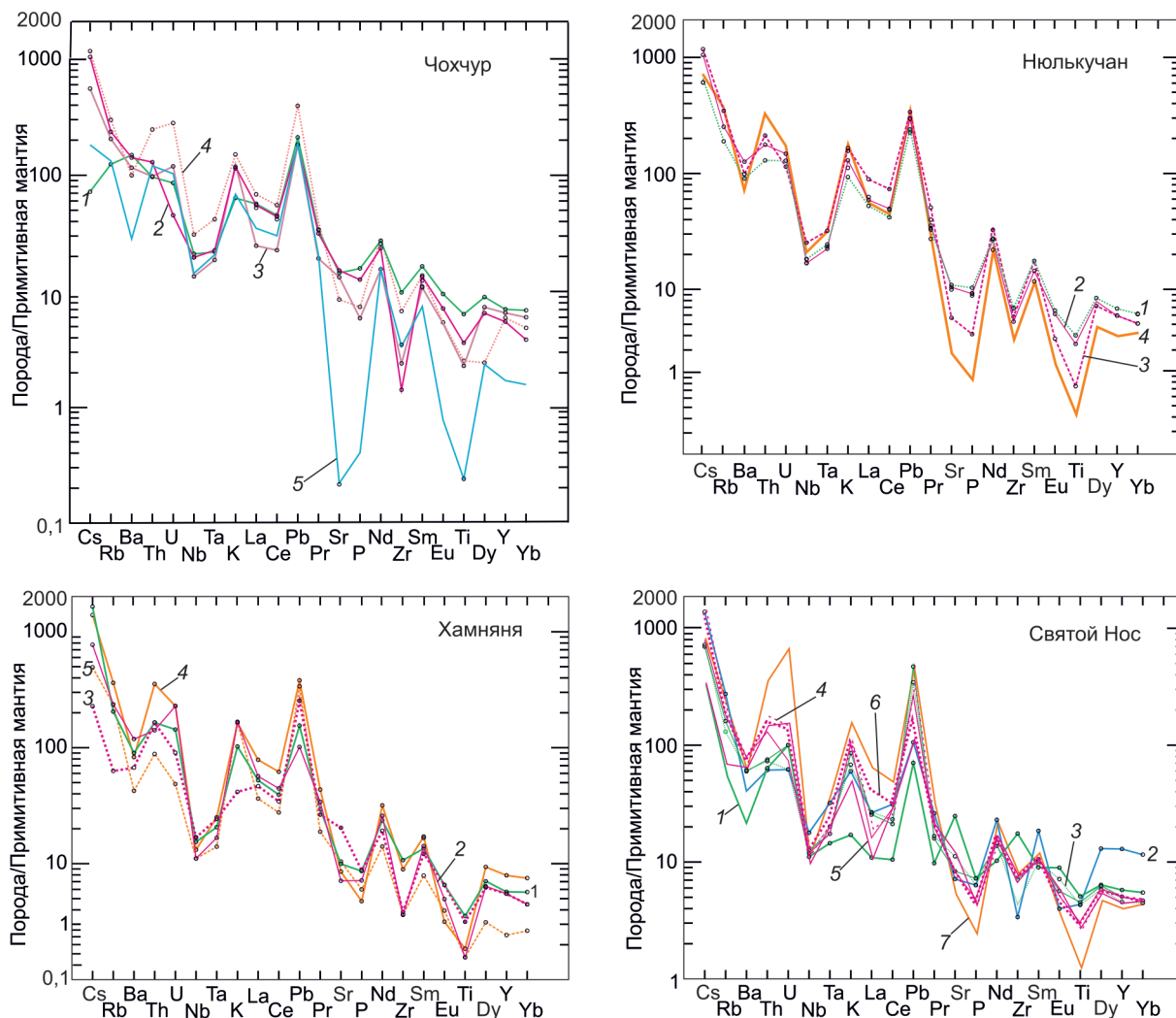


Рис. 8. Спайдер-диаграммы для магматических пород Чохчуро-Чекурдахской зоны (нормировано по [42]).
 Массив Чохчур: 1 – 9/1, диорит, 2 – 10/4, гранодиорит, 3 – 9/2, гранит, 4 – 8/1, гранит, 5 – 10/5 – риолит; массив Ньюлукчан: 1 – 772/2, гранодиорит, 2 – 772/1, гранодиорит, 3 – 770/2 – гранит, 4 – 769/1, гранит; массив Хамняня: 1 – обр. 20, диоритовый порфирит, 2 – 22/4, гранодиорит, 3 – 21/3, гранодиорит, 4 – 22/3, гранодиорит, 5 – 18/3 – гранит, 6 – 18/8, гранит-порфир; массив Святой Нос (по [4]): 1 – 010-01, диорит, 2 – 006-02, монзонит, 3 – 022-01, кварцевый диорит, 4 – 016-01, гранодиорит, 5 – 022-01, гранодиорит, 6 – 015-03, гранит, 7 – 020-01, гранит

Fig. 8. Spidergrams for igneous rocks of the Chokhchuro-Chekurdakh zone (normalized according to [42]).
 Chokhchur massif: 1 – 9/1, diorite, 2 – 10/4, granodiorite, 3 – 9/2, granite, 4 – 8/1, granite, 5 – 10/5 – rhyolite; Nyulkuchan massif: 1 – 772/2, granodiorite, 2 – 772/1, granodiorite, 3 – 770/2 – granite, 4 – 769/1, granite; Khamnyanya massif: 1 – 20, diorite porphyrite, 2 – 22/4, granodiorite, 3 – 21/3, granodiorite, 4 – 22/3, granodiorite, 5 – 18/3 – granite, 6 – 18/8, granite-porphyr; Svyatoy Nose massif (according to [4–12]): 1 – 010-01, diorite, 2 – 006-02, monzonite, 3 – 022-01, quartz diorite, 4 – 016-01, granodiorite, 5 – 022-01, granodiorite, 6 – 015-03, granite, 7 – 020-01, granite

На диаграмме $\text{FeO} - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - (\text{CaO} + \text{MgO})$ [44] точки составов гранитов и риолитов локализуются в основном в поле гранитов A_1 , а на диаграмме Y-Nb-Ce [25] занимают пограничное положение между гранитоидами A_1 и A_2 типов (рис. 9).

Отношения Nb/Ta в гранитах массивов Ньюлукчан и Чохчур варьируют от 9,4 до 13,6 (При-

ложение, табл. 4), в риолитах – от 11,6 до 12,1, т. е. заметно ниже, чем в мантийных гранитоидах [34]. Значения нормированных отношений $(\text{Y/Nb})_n = 0,19-0,46$, $(\text{Th/Nb})_n = 0,56-1,05$, $(\text{Th/Ta})_n = 0,52-0,8$ в тех и других соответствуют в основном гранитам А-типа конвергентных окраин. Соотношения нормированных по примитивной мантии $(\text{Y/Nb})_{pm} = 0,19-0,48$ – $(\text{Ce/Pb})_{pm} = 0,37-0,39$,

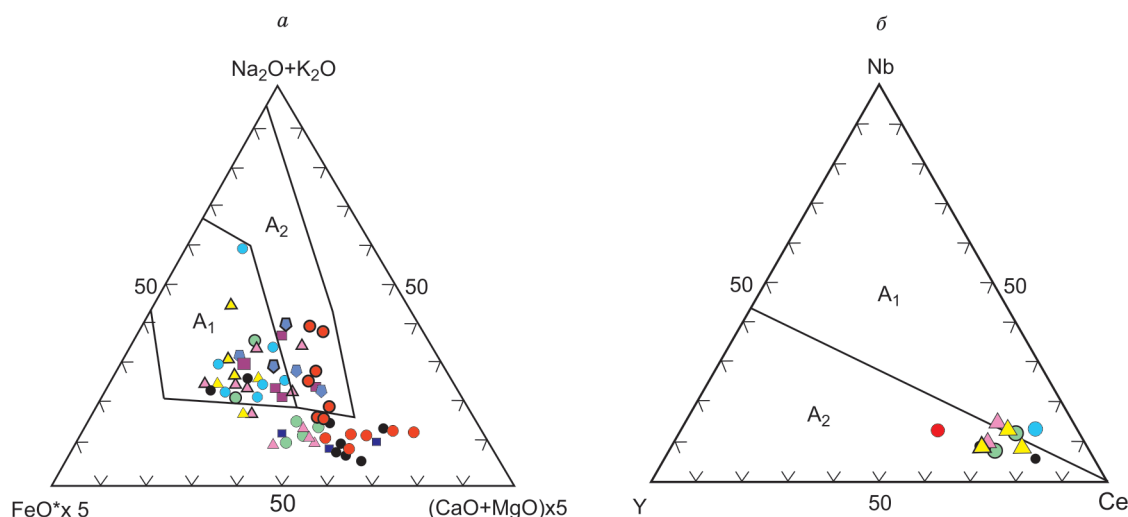


Рис. 9. Соотношения микроэлементов в гранитах и риолитах Чохчуро-Чекурдахской зоны.

Диаграммы: а – $\text{FeO} - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - (\text{CaO} + \text{MgO})$ [44]; б – $\text{Y} - \text{Nb} - \text{Ce}$ [25]. Поля диаграмм: A_1 – граниты океанических островов, континентальных рифтов и горячих точек, образованные из базальтового источника океанических островов, внутриплитных или рифтовых сред, A_2 – постколлизийные, посторогенные и анорогенные граниты, образованные из базальтового источника островных дуг и континентальных окраин, или коровым источником тоналитов и гранодиоритов, или частичным плавлением коры. Массивы: 1 – Святой Нос (по [4]), 2 – Юрюнг-Хастах (по [3]), 3 – Чокурдах (по [3]), 4 – Харстан, 5 – Максунуоха; 6–8 – дайки массивов: 6 – Хамняня, 7 – Нюлькучан, 8 – Чохчур, 9 – риолит-порфиры. Условные знаки см. на рис. 4

Fig. 9. Ratios of rock-forming and trace element contents in granites and rhyolites of the Chokhchuro-Chekurdakh zone.

Diagram: a) $\text{FeO} - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - (\text{CaO} + \text{MgO})$ [44]; б) $\text{Y} - \text{Nb} - \text{Ce}$ [25]. Fields: A_1 – granites of oceanic islands, continental rifts and hot spots formed from a basalt source of oceanic islands, intraplate or rift environments, A_2 – post-collisional, post-orogenic and anorogenic granites formed from a basalt source of island arcs and continental margins, or a crustal source of tonalites and granodiorites, or partial melting of the crust. Massifs: 1 – Svyatoy Nose (according to [4]), 2 – Yuryung-Khastakh (according to [3]), 3 – Chokurdakh (according to [3]), 4 – Kharstan, 5 – Maksun; 6–8 – dikes massifs: 6 – Khamnyanya, 7 – Nyulkuchan, 8 – Chokhchur, 9 – rhyolite-porphyry. Symbols in Fig. 4

как и отчетливо проявленные минимумы Ta, Sr, P, Ti на спайдер-диаграммах (см. рис. 8), характерны для коровых гранитов А-типа [41, 45] (Приложение, табл. 4). На коровую природу протолитов указывает и состав биотитов (см. рис. 3). Эти данные позволяют отнести породы массивов Чохчур и Нюлькучан к гранитам A_2 -типа, который включает кремнекислые континентально-окраинные и континентальные внутриплитные образования [44]. Риолиты имеют близкие характеристики, различаясь максимально выраженными минимумами Sr, P, Ti, менее выраженными максимумами K и Pb и низкими содержаниями HREE. На диаграммах А.В. Гребенникова и G.N. Eby (см. рис. 9) точки составов риолитов располагаются в краевой части полей гранитов A_1 .

В целом большинство параметров составов всех изученных гранитоидов ЧЧЗ свидетельствует об их коровом происхождении. В то же время определены высокие и близкие для всех массивов температуры и глубины магмогенерации.

Частичное плавление континентальной коры возможно только при температуре более 850 °С, которая может быть достигнута за счет поступления ювенильного тепла [36, 46, 47 и др.]. Следовательно, в пределах зоны существовали погребенные очаги основных расплавов, активизация которых в альбе и обусловила плавление коровых субстратов.

Геологическое положение и изотопный возраст гранитоидов ЧЧЗ говорит об их становлении в близкое время в постколлизийный этап развития территории. По данным [43, 48], в постколлизийный этап над зоной субдукции формируются гранитоиды I-типа, а над континентальной окраиной – гранитоиды А-типа. Действительно, гранитоиды святоносского комплекса относятся к I-типу и несут все признаки надсубдукционных образований [4, 8]. В южной части зоны развиты в основном окраинно-континентальные граниты А-типа. Гранитоиды массивов Хамняня и Максунуоха имеют промежуточные между

надсубдукционными и окраинно-континентальными характеристиками. То есть ЧЧЗ сформирована над границей островодужной и преддуговой зон, как это предполагал еще В.Б. Спектор [2].

Завершающие магматизм ЧЧЗ единичные дайки трахиандезитов и лампрофиров интенсивно изменены. Они принадлежат к латитовой петрохимической серии: $(\text{Na}+\text{K})/\text{Ca} = 0,93$ и $1,07$ при $\text{As} = 1,9$ и $10,1$ (по [49]) и определяются как рифтогенные внутриплитные образования (см. рис. 7, а, з). Максимальные расчетные параметры магмогенерации $T = 1350$ °C при $P = 16,5$ кбар. Соотношения $\text{La/Nb} - \text{Y/Ce}$ (0,3–5,9) и $(\text{La/Yb})_n - \text{Yb}_n$ (24,5–5,9) указывают на плавление гранат-содержащей мантии, а соотношение $\text{La/Yb} - \text{Yb}$ (36 – 1,4) отвечает плавлению метасоматически обогащенного лерцолита [50].

Заключение

1. Формирование всех гранитоидных массивов ЧЧЗ происходило в близкое время на постколлизционном этапе развития территории.

2. Гранитоиды массивов северной части зоны представлены I-типом надсубдукционных образований. Граниты ее южной части относятся к гранитам A_2 -типа окраинно-континентальных образований. К гранитам S-типа могут быть отнесены только дайки аплитов и гранит-порфиров.

3. Температуры и давления при магмогенерации для всех массивов близки, что указывает на смену состава субстратов гранитоидов, а также состава коры «фундамента» ЧЧЗ с севера на юг от массива Святой Нос к массивам Чохчур и Ньюлукчан. Эта смена проходит примерно по широте выходов массивов Хамняня и Максунуоха.

4. Все массивы зоны имеют коровое происхождение, а высокие (более 1000 °C) температуры магмогенерации и начала кристаллизации могут быть обусловлены только поступлением ювенильного тепла из долгоживущих погребенных очагов расплавов основного состава.

Список литературы / References

1. Парфенов Л.М., Кузьмин М.И. (ред.). *Тектоника, геодинамика и металлогения Республики Саха (Якутия)*. М.: МАИК "Наука/Интерпериодика"; 2001, 571 с.
- Parfenov L.M., Kuz'min M.I. (Eds.) *Tectonics, Geodynamics and Metallogeny of the Sakha Republic (Yakutia)*. Moscow: MAIK Nauka/Interperiodica, 2001; 571 p. (In Russ.)
2. Спектор В.Б., Гриненко В.С. *Геологическая карта Якутии масштаба 1: 500 000. Нижнеянский блок*. СПб.: ВСЕГЕИ; 1995.

Spector V.B., Grinenko V.S. *Geological Map of Yakutia 1:500 000 scale. Nizhneyansk block*. St. Petersburg: VSEGEI; 1995. (In Russ.)

3. Прохорова С.М., Иванов О.А. *Оловоносные гранитоиды Яно-Индигирской низменности и связанные с ними россыпи*. Л.: Недра; 1978. 291 с.

Prokhorova S.M., Ivanov O.A. *Tin-bearing granitoids of the Yano-Indigirsk lowland and associated placers*. Leningrad: Nedra; 1978. 291 p. (In Russ.)

4. Лучицкая М.В., Моисеев А.В. Возраст, особенности состава и геодинамическая обстановка формирования гранитоидов и пород комплекса даек мыса Святой Нос, Восточная Арктика. *Геотектоника*. 2020;(3):29–54. DOI: 10.31857/S0016853X20030066.

Luchitskaya M.V., Moiseev A.V. Age, Composition and Geodynamic Setting of Granitoids and Dike Rocks from Cape Svyatoi Nos, Eastern Arctic. *Geotectonics*. 2020;(3):29–54.

5. Лопатин Б.Г. (ред.). *Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1: 1000 000 (новая серия). Лист S-53-55 – Новосибирские острова*. Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ; 1999. 208 с.

Lopatin B.G.(Ed.) *State Geological Map of Russian Federation. Scale 1: 1000 000 (new series). Sheet S-53-55 – Novosibirsk Islands*. Explanatory note. St. Petersburg: VSEGEI; 1999. 208 p. (In Russ.)

6. Самусин А.И., Белоусов К.Н., Иванов А.М. *Геологическая карта СССР. Масштаб 1: 200 000. Серия Новосибирские острова*. Листы S-53: Объяснительная записка. М.: Мингео СССР (ВСЕГЕИ); 1985. 130 с.

Samusin A.I., Belousov K.N., Ivanov A.M. *Geological Map of USSR. 1: 200 000 scale. The Novosibirsk Islands series. Sheets S-53: An explanatory note*. Moscow: Min. GeO USSR (VSEGEI); 1985. 130 p. (In Russ.)

7. Натапов Л.М., Сурмилова Е.П. (ред.). *Геологическая карта СССР. Масштаб 1: 1000000 (новая серия). Лист R-53-(55) – Депутатский*. Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ; 1992. 105 с.

Natapov L.M., Surmilova E.P. (Eds.) *Geologic map of the USSR. Sheet R-53-55. Deputatskiy. Scale 1:1 000 000 (new series)*. Explanatory note. St. Petersburg: VSEGEI; 1992. 111 p.(In Russ.)

8. Орлов Ю.С., Трунилина В.А., Холмогоров А.И. Магматизм Чохчуро-Чекурдахской вулcano-плутонической зоны. *Отечественная геология*. 2000;(5):66–70.

Orlov Yu.S., Trunilina V.A., Kholmogorov A.I. Magmatism of the Chokhchuro-Chekurdakh volcanic-plutonic zone. *Otechestvennaya geologiya*. 2000;(5):66–70. (In Russ.)

9. Laver P.W., Newberry R., Fujita K., et al. Tectonic setting of the plutonic belts of Yakutia, northeast Russia, based on $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology and trace element geochemistry. *Geology*. 2001;29(2):167–17.

10. Yavuz F. Win Pyrox: A Windows program for pyroxene calculation classification and thermobarometry. *Amer. Miner*. 2013;98:1338–1359.

11. Hollister L.S., Grisson G.P., Peters E.K., et al. Confirmation of the empirical correlation on the Al in

hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons. *Amer. Miner.* 1987;72(3-4):231–239.

12. Rudolfi R., Renzulli A. Calcic amphiboles in calc-alkaline and alkaline magmas: thermobarometric and chemometric empirical equations valid up to 1130 °C and 2,2 GPa. *Contribution to Mineralogy and Petrology*. 2012;163:877–895. Doi: 10.1007/s00410-011-0704-6.

13. Tindle A.G., Webb R.P. Estimation of lithium contents in trioctahedral micas using microprobe data: application to micas from granitic rocks. *European J. of Mineralogy*. 1990;(2):595–610.

14. Трошин Ю.П., Гребенщикова В.И., Антонов А.Ю. Летучие компоненты в биотитах и металлогеническая специализация интрузий. В кн.: Руденко С.А., Рундквист Д.В. (ред.). *Минералогические критерии оценки рудоносности*. Л.: Наука; 1981. С. 73–83.

Troshin Y.P., Grebenshikova V.I., Antonov A.Y. Volatile components in biotites and metallogenic specialization of intrusions. In: Rudenko S.A., Rundkvist D.V. (eds). *Mineralogical criteria for ore content assessment*. Leningrad: Nauka; 1981, pp. 73–83. (In Russ.)

15. Henry D.A., Guidotti Ch.V., Thompson J.A. The Ti-saturation surface for low-to-medium pressure metapelitic biotites: implication for geothermometry and Ti-substitution mechanism. *Amer. Miner.* 2005;90:316–328.

16. Uchida E., Endo S., Makino V. Relationship between solidification depth of granitic rocks and formation of hydrothermal ore deposits. *Resource Geology*. 2007;57(1):47–56.

17. Гусев А.И. Типизация гранитоидов на основе составов биотитов. *Успехи современного естествознания*. 2009;(4):54–57.

Gusev A.I. Typification of granitoids, based on biotite composition. *Successes of modern natural science*. 2009;(4):54–57. (In Russ.)

18. Бушляков И.Н., Холоднов В.В. *Галогены в петрогенезе гранитоидов*. М.: Недра; 1986. 192 с.

Bushlyakov I.N., Kholodnov V.V. *Halogens in Petrogenesis of Granitoids*. Moscow: Nedra; 1986. 192 p. (In Russ.)

19. Brimhall G.H., Crerar D.A. Ore fluids: Magmatic to supergene, in Thermodynamic modeling of geological materials: Minerals, fluids and melts, I. *Mineralogic Society of America Reviews in Mineralogy*. 1987; V. 17(1): 235–321. <https://doi.org/10.1515/9781501508950-010>

20. Wones D.R., Eugster H.P. Stability of biotite: experiment, theory and application. *Amer. Mineral.* 1985;(9): 1228–1272.

21. Шарпенюк Л.Н., Костин А.Е., Кухаренко Е.А. TAS-диаграмма сумма щелочей – кремнезем для химической классификации плутонических пород. *Региональная геология и металлогения*. 2013;(56):40–50.

Sharpenok L.N., Kostin A.E., Kukharensko E.A. TAS-diagram sum of alkalis-silica for chemical classification and diagnostics of plutonic rocks. *Regional Geology and Metallogeny*. 2013;(56):40–50. (In Russ.)

22. Peccerillo A., Taylor S.R. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contrib. Miner. Petrol.* 1976;58: 63–81. DOI: 10.1007/BF00384745

23. Maniar P.D., Piccoli P.M. Tectonic discrimination of granitoids. *Geol. Soc. Americ Bull.* 1989;101:635–643. 10.1130/0016-7606(1989)101<0635:TDOG>2.3.CO;2

24. Maeda J. Opening of the Kuril Basin deduced from the magmatic history of Central Hokkaido, northern Japan. *Tectonophysics*. 1990;(174):235–255.

25. Eby G.N. Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications. *Geology*. 1992;20:641–644.

26. French W.J., Cameron E.P. Calculation on the temperature of crystallization of silicates from basaltic melts. *Mineralogical Magazine*. 1981;44:19–26.

27. Беляев Г.М., Рудник В.А. *Формационно-генетические типы гранитоидов*. Л.: Недра; 1978. 168 с.

Belyaev G.M., Rudnik V.A. *Formational-Genetic Types of Granitoids*. Leningrad: Nedra; 1978. 168 p. (In Russ.)

28. Куликова В.В., Куликов В.С. *Петрохимическая классификация магматических пород*. Петрозаводск: Кольский научный центр; 2001. 115 с.

Kulikova V.V., Kulikov V.S. *Petrochemical classification of magmatic rocks*. Petrozavodsk: Kola scientific center; 2001. 115 p. (In Russ.)

29. Janoušek V., Farrow C.M., Erban V. Interpretation of whole-rock geochemical data in igneous geochemistry: Introducing Geochemical Data Toolkit (GCDkit). *J. Petrology*. 2006;47:1255–1259. 10.1093/petrology/egl013

30. Thornton C.P., Tuttle O.F. Chemistry of igneous rocks, differentiation index. *American J. Sciences*. 1960; 258(11):664–684.

31. Gerdes A., Worner G., Henk A. Post-collisional granite generation and HT-LP metamorphism by radiogenic heating: The Variscan South Bohemian Batholith. *Geol. Soc. Lond.* 2000;157:577–587.

32. Jung S., Pfander J.A. Source composition and melting temperatures of orogenic granitoids – constraints from CaO/Na₂O, Al₂O₃/TiO₂ and accessory mineral saturation thermometry. *European Journal of Mineralogy*. 2007;1:5–40.

33. McDonough W.F., Sun S.S. The composition of the Earth. *Chemical Geology*. 1995;120:223–253.

34. Green T. H. Experimental studies of trace-element partitioning applicable to igneous petrogenesis – Sedona 16 years later. *Chemical Geology*. 1994;117(1-4):1–36.

35. Rudnik R.L., Gao S., Composition of the Continental Crust. In: Holland H.D., Turekian K.K. (eds.). *Treatise on Geochemistry. V. 4. (Second edition)*. Netherlands: Elsevier Ltd., pp. 1–51; 10.1016/B978-0-08-095975-7.00301-6

36. King P.L., White A.J.R., Chappell B.W., Allen C.M. Characterization and Origin of aluminous A-type Granites from the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia. *Journal of Petrology*. 1997;38:371–391.

37. Rollinson H.R. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. London: Longman Group Limited; 1993. 261 p.
38. Даценко В.М. Петрогеохимическая типизация гранитоидов юго-западного обрамления Сибирской платформы В кн.: Юшкин Н.П. (ред.). *Петрография на рубеже XXI века: Итоги и перспективы. Материалы Второго Всероссийского петрографического совещания*. Т. 2. Сыктывкар: Коми НЦ; 2000. С. 270–274.
- Datsenko V.M. Petrogeochemical typification of granitoids of the south-western framing of the Siberian platform. In: Yushkin N.P. (ed.). *Petrography at the turn of the 21st century: Results and prospects. Materials the Second All-Russian Petrographic Meeting*. V. 2. Syktyvkar: Komi Scientific Center; 2000, pp. 270–274. (In Russ.)
39. Batchelor R.A., Bowden P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters. *Chem. Geol.* 1985;48:43–55. 10.1016/0009-2541(85)90034-8
40. Pearce J.A., Harris N.B.W., Tindle A.G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J. Petrol.* 1984;25(4):956–983.
41. Thieblemont D., Tegye M. Une discrimination geochimique des roches différenciées témoin de la diversité d'origine et de situation tectonique des magmas calco-alcalins. *Comptes Rendus L'académie Sci.* 1994; 319. Ser. II: 87–94.
42. Hofmann A.W. Mantle geochemistry: the message from oceanic volcanism. *Nature*. 1997;385:219–228.
43. Yadav B.S., Ahmad T., Kaulina T., et al. Origin of post-collisional A-type granites in the Mahakoshal Supracrustal Belt, Central Indian Tectonic Zone, India: Zircon U–Pb ages and geochemical evidences. *J. Asian Earth Sci.* 2020;191:104247.
44. Гребенников А.В. Гранитоиды А-типа: проблемы диагностики, формирования и систематики. *Геология и геофизика*. 2014;55(9):1356–1373.
- Grebennikov A.V. Granitoids of A-type: problems of diagnostics, formation and systematics. *Russian Geology and Geophysics*. 2014;55(9):1074–1086. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.08.003>
45. Moreno J.A., Molina J.F., Montero P.O., et al. Unraveling sources of A-type magmas in juvenile continental crust: Constraints from compositionally diverse Ediacaran post-collisional granitoids in the Katerina Ring Complex, southern Sinai, Egypt. *Lithos*. 2014;192–195: 56–85. doi:10.1016/j.lithos.2014.01.010
46. Wang L. X., Ma C.Q., Zhang C. Halogen Geochemistry of Island A-Type Granites from Jiuhuashan Region (South China): Insights into the Elevated Fluorine in A-Type Granite. *Chem. Geol.* 2018;478:164–182. 10.1016/j.chemgeo.2017.09.033.
47. Whalen J.B., Hildebrand R.S., de Juan C. Trace element discrimination of arc, slab failure, and A-type granitic rocks. *Lithos*. 2019;348–349:105179. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.105179>
48. Wu F.Y., Sun D.Y., Li H.M. A-Type Granites in Northeastern China: Age and Geochemical Constraints on Their Petrogenesis. *Chem. Geol.* 2002;187 (1/2):143–173. 10.1016/s0009-2541(02)00018-9
49. Бородин Л.С. *Петрохимия магматических серий*. М.: Наука; 1987. 241 с.
- Borodin L.S. *Petrochemistry of magmatic series*. Moscow: Nauka; 1987. 241 p. (In Russ.)
50. Drill S.I., Kuzmin M.I., Tsipukova S.S., Zonen-shain L.P. Geochemistry of basalts from the West Woodlark, Lau and Manus basins: implication for their petrogenesis and source rock composition. *Marine Geology*. 1997;142:57–83.

Дополнительные материалы доступны по адресу: <https://www.diamond.ysn.ru/wp-content/uploads/2025/03/Доп-материалы-к-статье-Трунилиной-ВА-Гранитоидный-магматизм-Чохчуро-Чекурдахской-зоны.pdf> (Прил_Рис_1. Микрофотографии магматических пород Чохчуро-Чекурдахской зоны; Прил_Рис_2. Микрофотографии пород даек Чохчуро-Чекурдахской зоны; Таблица 1. Состав пироксенов и амфиболов гранитоидов Чохчуро-Чекурдахской зоны; Таблица 2. Состав биотитов магматических пород Чохчуро-Чекурдахского ряда; Таблица 3. Средние составы магматических пород Чохчуро-Чекурдахской зоны; Таблица 4. Состав магматических пород Чохчуро-Чекурдахской зоны по данным силикатного и ICP-MS анализов).

Об авторе

ТРУНИЛИНА Вера Аркадьевна, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-0911-2386>, Scopus Author ID: 6506344347, SPIN: 8225-5388, e-mail: trunilina40@mail.ru

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

About the author

TRUNILINA, Vera Arkadyevna, Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Chief Researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-0911-2386>, Scopus Author ID: 6506344347, SPIN: 8225-5388, e-mail: trunilina40@mail.ru

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 16.11.2024

Поступила после рецензирования / Revised 25.02.2025

Принята к публикации / Accepted 10.03.2025

Оригинальная статья

**Первые результаты мониторинга развития полигонального рельефа
в зоне взаимодействия торфяник–озеро
на севере Пур-Тазовского междуречья в 2021–2023 гг.**

М. М. Данько[✉], А. В. Хомутов

*Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, г. Тюмень, Российская Федерация
[✉]mdanko1996@mail.ru*

Аннотация

Мониторинг состояния многолетнемерзлых пород, в который входят наблюдения за изменениями глубины их сезонного протаивания и температуры, проводится с прошлого столетия и имеет широкое географическое распространение. Однако, увеличение суммы среднесуточных положительных температур воздуха и среднегодовой температуры воздуха приводит к резкой активизации криогенных процессов на севере Западной Сибири. С 2016 г. на Пур-Тазовском междуречье проводятся детальные комплексные исследования многолетнемерзлых полигональных торфяников. С 2021 г. организован мониторинг развития полигонального рельефа и верхней части многолетнемерзлых пород под влиянием природных процессов на полигональных торфяниках по берегам озер. Проведена оценка изменений полигонального рельефа в зоне взаимодействия торфяник–озеро на полигональных торфяниках в результате проявления экзогенных процессов на фоне современных климатических колебаний. Основу проделанной работы составили полевые методы и подходы, включающие организацию мониторинговых площадок для наблюдения за состоянием геокриологических условий и съемку с применением беспилотного летательного аппарата для оценки изменений рельефа и проявлений криогенных процессов на берегах озер. Результаты полевых наблюдений обрабатывались с использованием как классических статистических методов, так и специального программного обеспечения для обработки получаемых по результатам беспилотной съемки ортофотопланов и цифровых моделей рельефа и их сопоставления с космическими снимками. Определено несколько климатических и ландшафтных факторов, влияющих на полигональные торфяники в зоне взаимодействия торфяник–озеро. Накопленные данные мониторинга на нескольких участках в этой зоне в сочетании с результатами мониторинга ключевых торфяников района исследований позволили сделать предварительный вывод об общей зависимости деградации полигональных торфяников по берегам озер, вызываемой волновым воздействием озерной воды, от розы ветров района исследований на фоне современных климатических колебаний и от ландшафтно-геоморфологических условий мониторинговых площадок.

Ключевые слова: полигональные торфяники, глубина сезонного протаивания, изменение рельефа, криогенные процессы, Пур-Тазовское междуречье, озера

Финансирование. Работа выполнена в Институте криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRZ-2021-0012).

Благодарности. Авторы выражают признательность сотрудникам ИКЗ ТюмНЦ СО РАН Е.М. Бабкину, Е.А. Бабкиной, Н.А. Задорожной, В.И. Иванову, А.О. Кузнецовой, В.А. Марееву и Н.Ю. Факашуку за помощь в проведении исследования.

Для цитирования: Данько М.М., Хомутов А.В. Первые результаты мониторинга развития полигонального рельефа в зоне взаимодействия торфяник–озеро на севере Пур-Тазовского междуречья в 2021–2023 гг. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(1):49–60. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-1-49-60>

The first results of monitoring the development of polygonal relief in the peatland-lake interaction zone in the Northern Pur-Taz interfluvium from 2021 to 2023

Mikhail M. Danko✉, Artem V. Khomutov

Earth Cryosphere Institute Tyumen Scientific Centre,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tyumen, Russian Federation
✉mdanko1996@mail.ru

Abstract

Since the last century, the monitoring of permafrost rocks, which involves observing changes in the depth of seasonal thawing and temperature, has been conducted across a wide geographical area. However, an increase in the cumulative average daily positive air temperatures and the average annual air temperature has significantly activated cryogenic processes in the northern part of Western Siberia. Since 2016, extensive and thorough research on permafrost polygonal peatlands has been undertaken in the Pur-Taz interfluvium area. In 2021, a study was initiated to observe changes in polygonal relief and the upper layers of permafrost, which are affected by natural processes occurring in peatlands near lake shores. An assessment of changes in polygonal relief in the peatland-lake interaction zone of polygonal peatlands has been conducted as a result of exogenous processes against the background of modern climatic fluctuations. This study used field methods and approaches, including the establishment of monitoring sites to observe geocryological conditions and the use of unmanned aerial vehicles to assess changes in relief and manifestations of cryogenic processes along lake shores. The results of the field observations were analyzed using both classical statistical methods and specialized software for processing orthophotoplans and digital terrain models obtained from unmanned surveys. These findings were subsequently compared with satellite images. Several climatic and landscape factors affecting polygonal peatlands in the peatland-lake interaction zone were identified. Thus, the accumulated monitoring data from multiple sites within this zone, combined with results from key peatlands in the research area, allowed us to draw preliminary conclusions regarding the general dependence of polygonal peatland degradation along lake shores on the wave action of lake water, which is influenced by the wind rose of the research area. This degradation occurs against the background of contemporary climatic fluctuations and the differentiation of other contributing factors, including the landscape-geomorphological conditions of the monitoring sites.

Keywords: polygonal peatlands, thaw depth, relief changes, cryogenic processes, Pur-Taz interfluvium, lakes

Funding. This study was conducted by the Earth Cryosphere Institute of the Tyumen Scientific Centre SB RAS within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. FWRZ-2021-0012).

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the staff of the Institute of the Earth's Cryosphere at the Tyumen Scientific Centre, SB RAS: E.M. Babkin, E.A. Babkina, N.A. Zadorozhnaya, V.I. Ivanov, A.O. Kuznetsova, V.A. Mareev, and N.Yu. Fakashuk for their invaluable assistance in conducting this research.

For citation: Danko M. M., Khomutov A. V. The first results of monitoring the development of polygonal relief in the peatland-lake interaction zone in the Northern Pur-Taz interfluvium from 2021 to 2023. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(1):49–60. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-49-60>

Введение

С середины XX века многие исследователи отмечали распространение торфяных массивов на севере Западной Сибири с хорошо прослеживаемым полигональным микрорельефом, который образуется в результате формирования повторно-жильных льдов (ПЖЛ) мощностью преимущественно до 5 м [1–6].

В Западной Сибири еще в 1985 г. П.И. Кашпирюк [6] определил пять главных типов торфя-

ных массивов: полигональные, бугристые, плоские, кочковатые и грядово-мочажинные. Типы торфяных массивов были выделены по морфологическим признакам: площади, внешней форме элементов микрорельефа, высоте, наличию полигонального микрорельефа, приуроченности к геоморфологическим уровням и их генезису.

А.П. Тыртиков [7] описал влияние растительного покрова не только на морфологическую структуру торфяника, но также и на морозобой-

ное растрескивание грунтов, на накопление и сохранение ПЖЛ.

Мониторинг состояния многолетнемерзлых пород (ММП), включающий наблюдения за динамикой глубины сезонного протаивания и температуры верхней части ММП, проводится достаточно давно и имеет значительный географический охват [8–10]. Однако экстремальные климатические события последних лет привели к значительным отклонениям от ранее выявленных закономерностей и резкой активизации криогенных процессов [11–14].

В начале прошлого столетия были написаны первые работы по районированию озерно-болотных геосистем севера части Западной Сибири [15–17] по изменению растительного покрова и микрорельефа болот. С развитием, а в дальнейшем с повышением качества свободно доступных данных дистанционного зондирования Земли из космоса появились новые методы изучения криогенных процессов. По этим снимкам разного пространственного разрешения и охвата анализировались изменения и прогнозировалось дальнейшее развитие ландшафтов. По территории Западной Сибири опубликовано значительное число работ по изучению термокарстовых процессов [18–22; и др.], но результаты противоречат друг другу в контексте динамики изменений площадей озер в зависимости от типа распространения ММП.

С 2016 г. на территории Пур-Тазовского междуречья на северо-востоке Западной Сибири проводятся детальные комплексные исследования мерзлых полигональных торфяников [14, 23–25]. На современном этапе исследований оцениваются быстрые изменения (с частотой 1 год) рельефа торфяников, связанные с естественными и техногенными факторами [23, 24]. В этих работах описаны морфометрические изменения полигональных торфяников, которые находятся под влиянием климатических изменений и насыпей автодорог.

Работы, детально рассматривающие динамику рельефа в зоне взаимодействия торфянико-озеро в контексте современного развития многолетнемерзлых полигональных торфяников на южном пределе их распространения в Западной Сибири, отсутствуют. Вопрос современной динамики рельефа в прибрежной части полигональных торфяников под воздействием современных климатических колебаний актуален в связи с деградацией ММП и природоохранными про-

блемами. Целью исследования является оценка изменений, происходящих в приозерной части полигональных торфяников в результате проявления экзогенных процессов на фоне современных климатических колебаний.

Материалы и методы исследований

Северная часть Пур-Тазовского междуречья относится к зоне сплошного распространения ММП. Среднегодовая температура воздуха по данным метеостанции Тазовский в период с 2005 по 2023 г. составляет $-6,4^{\circ}\text{C}$ [26], что на $2,9^{\circ}\text{C}$ выше ранее опубликованных данных [27].

Среднегодовое количество осадков составляет около 400 мм, при этом большая их часть (от 250 до 300 мм) выпадает в теплый период (май–первая декада октября). Снежный покров по метеоданным метеостанции Тазовский в середине зимы составляет 14–16 см [26]. В период с 2005 по 2023 г. среднегодовое количество осадков составило 573 мм, что на 44 % больше средней многолетней нормы (1968–1989 гг.) [27].

Согласно карте природных комплексов севера Западной Сибири [28], территория северной части Пур-Тазовского междуречья представляет собой комплекс геоморфологических уровней: I и II морские террасы на севере, I и II надпойменные террасы, III и IV озерно-аллювиальные равнины в центральной и южной части территории исследований. В геоморфологическом отношении выделяются следующие элементы – лайды, поймы, террасы, равнины, озерные котловины, речные долины и хасыреи.

Среди криогенных процессов широко развиты термокарстовые. Такие процессы обуславливают формирование отрицательных форм рельефа (канал, котловин, термокарстовых озерков и озер). Широко распространены формы рельефа, связанные с полигональным растрескиванием грунтов: полигоны, валики и пятна-медальоны [26].

Полигональные торфяники юга Гыданского полуострова, в районе пос. Тазовский и долине р. Мессояха по характеру строения торфяной залежи близки к описанным на полуострове Ямал. Верхний слой (5–20 см) торфяной залежи представлен здесь дренированными лишайниково-кустарничковыми торфами слабой степени разложения. Локально непосредственно под дерниной залегают сфагновые и гипновые низинные торфа со значительной примесью вахты и хвоща. Ниже 20 см залежь состоит из низин-

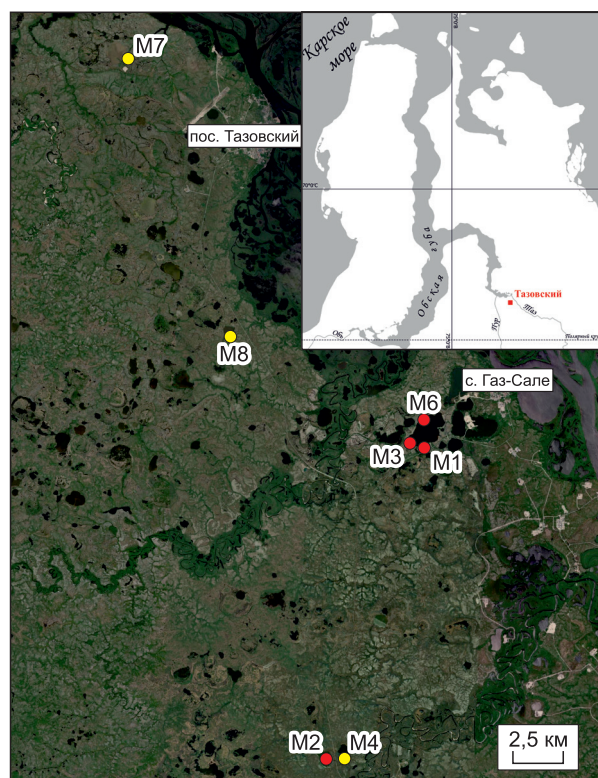


Рис. 1. Расположение участков исследования. Точками показано местоположение мониторинговых площадок. Красным цветом обозначены площадки, рассматриваемые в статье

Fig. 1. Location of research sites. The points indicate the locations of the grids. The sites referenced in this article are highlighted in red

ных преимущественно осоково-гипновых, гипновых, травяных и хвощевых торфов средней и хорошей степени разложения. Древесные торфа в торфяной залежи полигонов встречаются редко, несмотря на то что отдельные крупные остатки древесной растительности иногда обнаруживаются в нижней части залежи [6].

На Пур-Тазовском междуречье на мониторинговых площадках, расположенных в хасыряях с полигональными торфяниками, в период с 2016 по 2023 г. глубина протаивания варьировалась от 0,51 до 0,59 м на всех элементах рельефа. Здесь были характерны просадки торфа и частичное вытаивание подземных льдов [25]. Наименьшие значения температуры пород (от -3°C до $-3,3^{\circ}\text{C}$) зафиксированы в скважинах, заложенных в торфяниках. Самые высокие значения наблюдаются в скважине, заложенной в толще песчано-супесчаных пород, — от -1 до $-1,2^{\circ}\text{C}$.

С 2021 г. авторами организован мониторинг полигональных торфяников по берегам озер при-

уроченной к левобережью р. Таз части Пур-Тазовского междуречья от устья р. Таз на севере до долины р. Нуны-Яха на юге. В период 2021–2022 гг. заложено семь мониторинговых площадок (рис. 1). В данной статье приведены результаты мониторинга на четырех из них в связи с недостаточно длинным рядом наблюдений на трех других площадках.

Мониторинговые площадки располагаются на разных геоморфологических уровнях на полигональных торфяниках, приуроченных к хасыряям, сложенным с поверхности торфами разной мощности. Определено несколько климатических и ландшафтных факторов, оказывающих влияние на полигональные торфяники в зоне взаимодействия торфяник–озеро, которые могут быть охарактеризованы при проведении мониторинга: роза ветров, регулирующая волновую деятельность водной поверхности озера, распределение снежного покрова, мозаичность растительного покрова. Для установления характера влияния этих факторов на полигонально-жильные структуры торфяников в 2021–2023 гг. выполнены следующие инструментальные наблюдения:

- в конце холодного периода в апреле на части площадок проведено измерение высоты снежного покрова для определения его влияния на глубину сезонного протаивания;

- в конце каждого теплого периода (сентябрь) проводили съемку с беспилотного летательного аппарата (БПЛА), измеряли глубину сезонного протаивания и проводили наземные наблюдения (описание разреза торфяника, ландшафтные и ботанические описания).

По результатам БПЛА-съемки в программе Agisoft Metashape были построены цифровые модели рельефа и ортофотопланы с пространственным разрешением 0,02–0,03 м, с помощью которых определены изменения береговой линии торфяников, а также пространственная неоднородность рельефа (контуры и площадь полигонов) и растительного покрова.

Мониторинговые площадки заложили на берегах озер, где отмечается активное таяние ПЖЛ. Самая южная площадка М2 размером 5×13 м находится в 30 км южнее пос. Тазовский (см. рис. 1), приурочена к IV озерно-аллювиальной равнине с абсолютными отметками 16–17 м [28]. В 5 км западнее с. Газ-Сале находятся три площадки (М1, М3, М6, см. рис. 1), приуроченные к III озерно-аллювиальной равнине с абсолютными отметками 7–8 м [28]. Размеры площадок

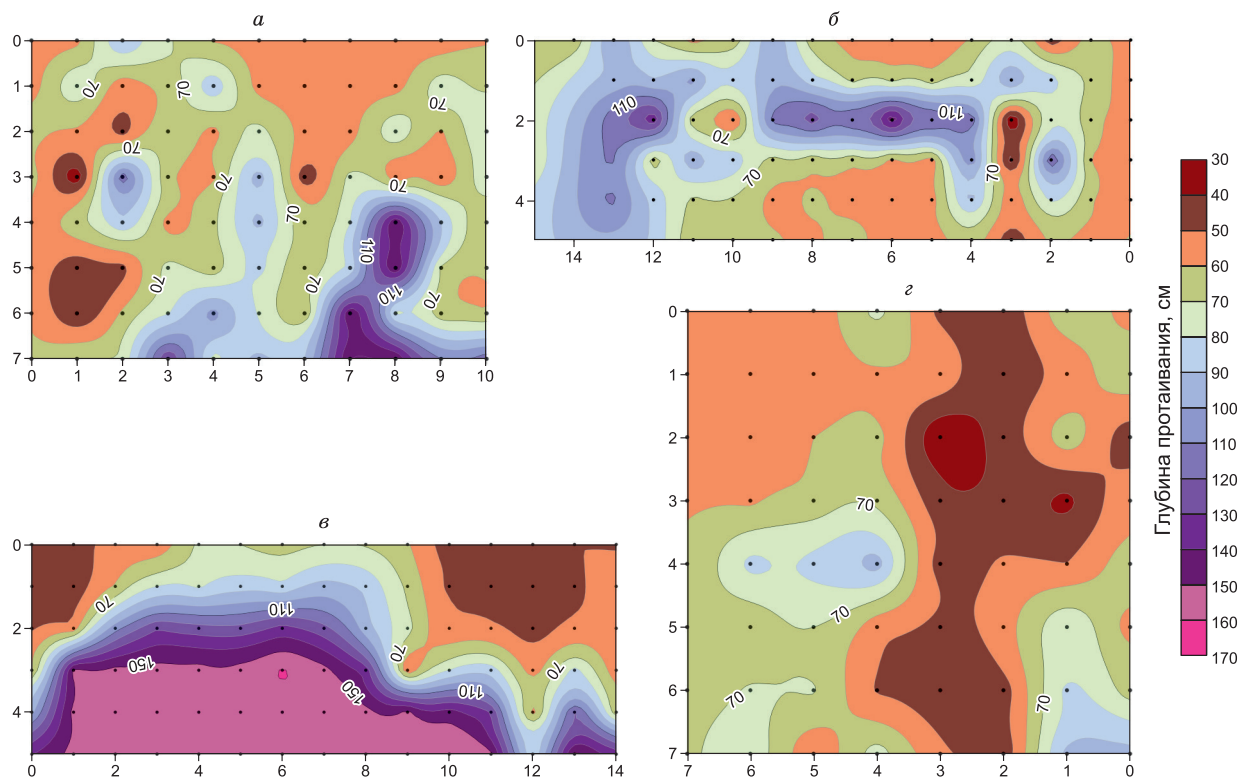


Рис. 2. Модели распределения глубины сезонного протаивания на площадках мониторинга М1 (а), М2 (б), М3 (в), М6 (з) по данным 2022 г.

Fig. 2. Models of seasonal thaw depth distribution at monitoring sites M1 (a), M2 (b), M3 (v), and M6 (z) based on data from 2022

10 × 7, 14 × 5 и 7 × 7 м соответственно. В растительном покрове полигонов преобладают багульник (*Ledum decumbens*) высотой до 0,3 м и морошка (*Rubus chamaemorus*), а также лишайники, встречаются гипновые мхи (*Hypnales* sp.), в межполигональных понижениях сосредоточены багульник (*Ledum decumbens*) высотой до 0,6 м и сфагновые мхи (*Sphagnum* sp.). Две площадки располагаются на южном (М1 и М3), одна площадка – на восточном (М2) и одна площадка – на северном берегу озера (М6). Все площадки заложены на полигональных торфяниках с разной (0,3–5,5 м) мощностью торфяных отложений.

Для пространственного сопоставления динамики глубины сезонного протаивания и изменения рельефа поверхности методом изолиний были построены модели глубины протаивания на всех площадках. На рис. 2 показаны такие модели за 2022 г.

Для построения модели по результатам полевого измерения глубины протаивания и толщины снежного покрова составлены таблицы по ка-

ждой площадке, включающие следующие данные: номер точки, координаты, глубина протаивания и высота снежного покрова за прошедшую зиму. В программе Surfer табличные данные преобразованы в двухмерную модель с точками и выделенными изолиниями по глубинам анализируемых параметров. Такая модель наглядно показывает пространственное распределение значений глубины протаивания на исследуемых площадках.

Результаты исследований

Волновое воздействие озера на торфяники. Анализ розы ветров, построенной по данным метеостанции Тазовский за теплый период (1–2 декада мая – 3 декада октября) 2021–2023 гг., показывает, что преобладающими являются ветра северо-западного фронта – 60 % дней в теплом периоде. Волновому воздействию подвержены восточные и южные берега озер, из-за чего глубина сезонного протаивания здесь увеличивается, а впоследствии происходят разрушение торфяника и отступление береговой линии.

Площадки М1, М3 и М6 располагаются на одном озере, но на разных его берегах. Отметка уреза воды в озере ежегодно находится на 2–3 м ниже уровня дневной поверхности берегов, поэтому волновое воздействие наблюдается только в нижней части берегового уступа, где происходит оттаивание многолетнемерзлых пород при увеличении глубины сезонного протаивания.

За три года наблюдений на площадке М1 глубина сезонного протаивания увеличилась на 37 %, а на площадке М3 – всего на 2 % (рис. 3, а, в). Такое различие связано с различиями в литологическом составе пород. Площадка М1 расположена на торфянике с мощностью торфяной залежи около 5,5 м, а площадка М3 – на торфянике с мощностью торфяной залежи около 0,3 м, подстилаемой мелко-/среднезернистыми песками (по данным изучения разреза в скважинах в пределах этих же торфяников). На площадке М6 наблюдения проводятся с 2022 г., но уже заметно что без сильного волнового воздействия глубина протаивания будет оставаться как минимум неизменной или будет незначительно уменьшаться (ветра южных румбов не являются преобладающими и составляют около 20 % в теплый период). На площадке М6 глубина сезонного протаивания уменьшилась на 27 см (на 6 %) по всей береговой линии площадки (рис. 3, г).

Площадка М2 находится на другом озере, мощность торфяной залежи составляет около 1–1,5 м, а отметка уреза воды в озере находится ниже уровня дневной поверхности всего лишь на 0,2–0,3 м, что делает условия этой площадки схожими с условиями площадки М1. Кроме того, волновое воздействие на береговой уступ усилено и проявляется вплоть до дневной поверхности и растительного покрова, в отличие от других анализируемых площадок. За три года наблюдений на площадке М2 произошло увеличение глубины сезонного протаивания на 55 % (рис. 3, б).

Таким образом, эрозия береговой линии приводит к увеличению температуры ММП и глубины сезонного протаивания в торфяных почвах, что ведет к разрушению полигонов и отступанию берегов. На площадке М1 за счет этого произошло отступление 3,77 м² площади, на М2 – 1,67, на М3 – 5,03, на М6 – 0,03 м² за 2021–2023 гг. Согласно данным изменения глубины протаивания, приведенным на рис. 3, для площадок, на которые происходит ежегодное влияние волновой деятельности озера, прослеживается тенденция к увеличению глубины протаивания и от-

ступанию берегов. На площадках, остающихся без сильного волнового воздействия озера, глубина протаивания уменьшается или не изменяется, а берега остаются более стабильными.

Пространственная дифференциация снежного покрова. Снежный покров играет одну из важнейших ролей в формировании глубины сезонного протаивания [29]. На рис. 4 представлены диаграммы изменений высоты снежного покрова (апрель) и глубины сезонного протаивания (сентябрь) на полигональной и межполигональной частях площадки за 2022 и 2023 гг. на примере площадок М1 и М2. Результаты показывают, что на полигональной части площадок наблюдается прямая зависимость между мощностью снежной толщи и последующей глубиной протаивания, и, соответственно, большие значения высоты снежного покрова соотносятся с высокими показателями глубины протаивания. Такие участки расположены на контакте полигона и межполигонального понижения, и высокие значения параметров снежного покрова и глубины протаивания связаны, скорее всего, с неравномерным накоплением и дальнейшим таянием снега. До того момента, пока понижение и краевая часть полигона в холодный период не покрыты снегом, происходит воздействие отрицательной температуры воздуха на породы сезонно-талого слоя (СТС), а как только снегом полностью заносит понижение и на краевой части полигона накапливается достаточное его количество, проявляется изолирующий эффект, так как атмосферный холод слабее проникает сквозь снежную толщу (см. рис. 4, а).

Анализ данных по межполигональным частям площадок показывает, что большие значения глубины протаивания характерны для межполигональных понижений с густым кустарничковым покровом, который способствует снегозадержанию на своих кронах, не давая снегу заполнить понижение полностью, из-за чего проявляется утепляющий эффект в зимний период, это подтверждает результаты других исследователей [29].

В теплый период после снеготаяния кустарнички поглощают солнечную радиацию, вследствие чего происходит повышение температуры ММП и увеличение глубины протаивания. Непосредственно в межполигональных понижениях малые значения глубины протаивания соответствуют участкам с большими значениями высоты снежного покрова. На таких участках снег полностью заполняет межполигональные

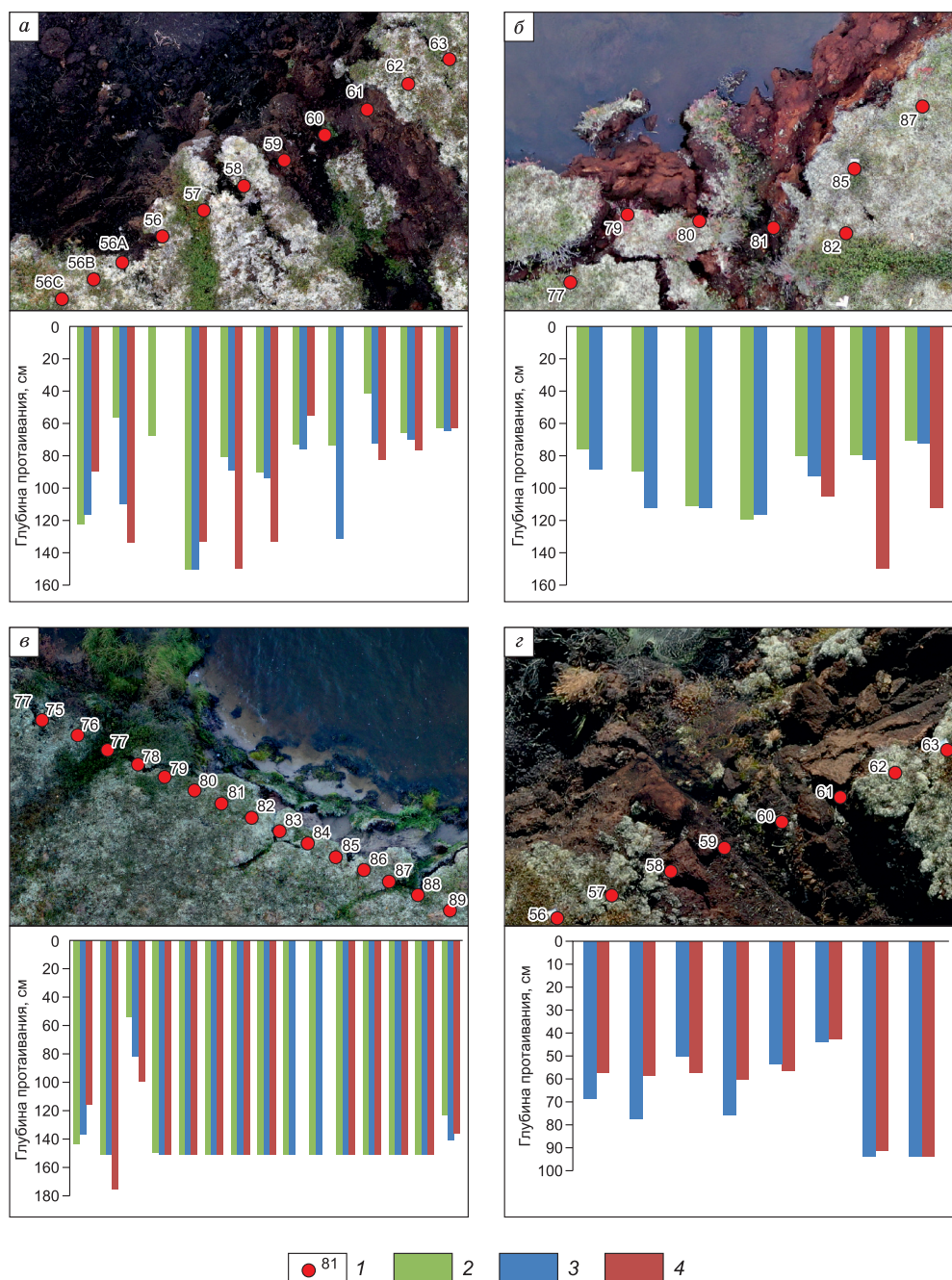


Рис. 3. Ортофотопланы и диаграммы изменения глубины протаивания в береговой части на площадках мониторинга М1 (а), М2 (б), М3 (в), М6 (г).

1 – точки измерения глубины сезонного протаивания и их индекс; глубина протаивания: 2 – в 2021, 3 – в 2022, 4 – в 2023 гг.

Fig. 3. Orthophotoplans and diagrams illustrating the changes in the seasonal thaw depth in the coastal part at monitoring sites M1 (a), M2 (б), M3 (в), and M6 (г).

Symbols: 1 – measuring points for the seasonal thaw depth and their corresponding index; thaw depth: 2 – in 2021, 3 – in 2022, 4 – in 2023

понижения. В холодный период мощная снежная толща является теплоизолятором и не позволяет СТС промерзнуть сверху. С другой стороны, во время снеготаяния в теплый период мощная

снежная толща протаивает медленнее, чем на полигональной части торфяника, что в свою очередь оказывает изолирующее влияние от потока солнечной радиации (рис. 4, б).

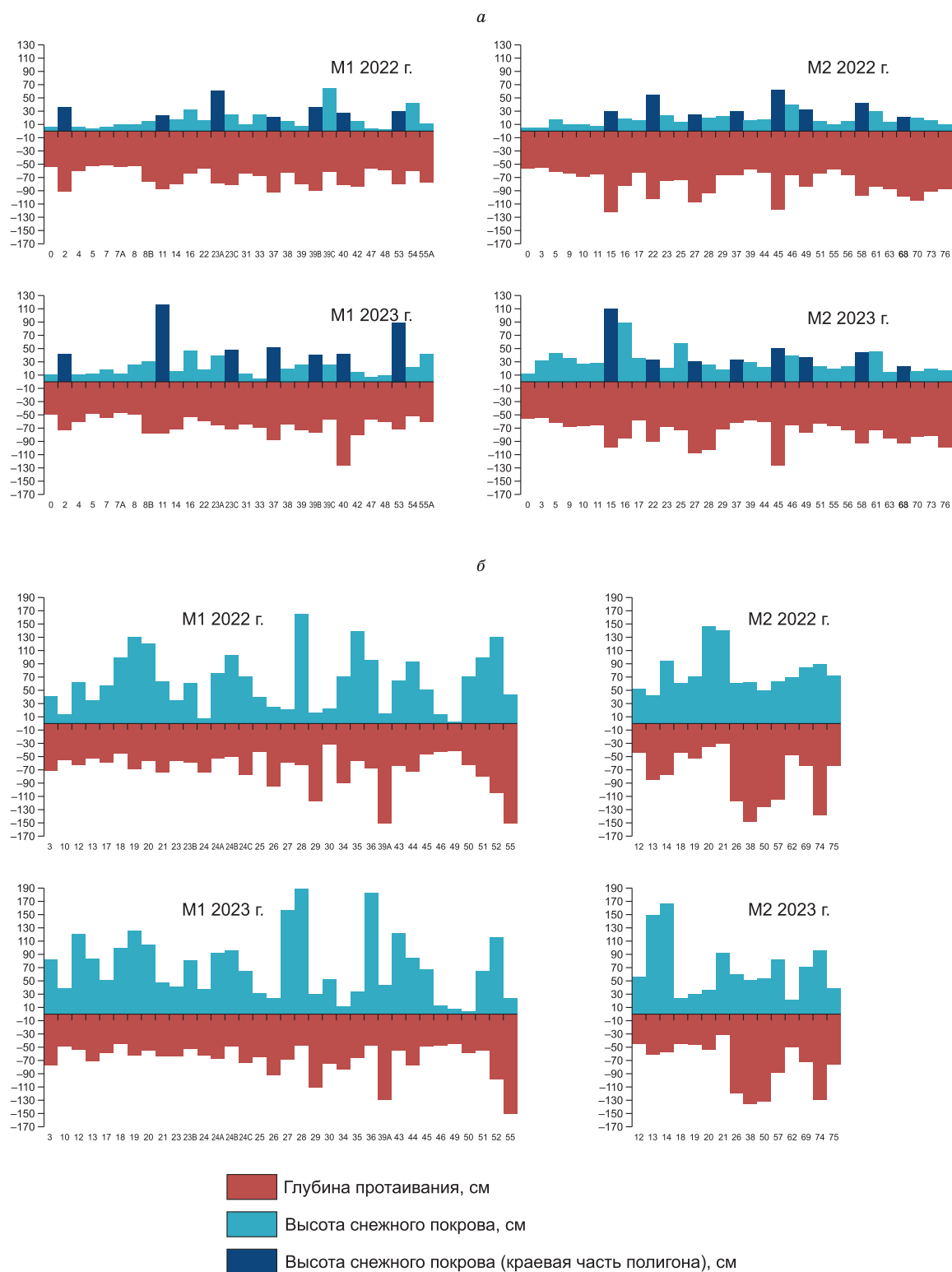


Рис. 4. Диаграммы изменения высоты снежного и глубины протаивания на площадках мониторинга М1 и М2 в 2022 и 2023 гг. *а* – полигональная часть; *б* – межполигональные понижения.

Fig. 4. Diagrams illustrating the changes in snow cover thickness and the seasonal thaw depth at monitoring sites M1 and M2 for the years 2022 and 2023. *a* – polygonal area, *b* – inter-polygonal depression

Таким образом, глубина протаивания на полигонах прямо пропорциональна высоте снежного покрова и имеет неоднозначную зависимость в межполигональных понижениях, различающихся характером растительного покрова.

Характер растительного покрова. Для оценки влияния растительного покрова использованы ортофотопланы, построенные по результатам БПЛА-съемки с учетом наземных наблюдений и описаний. Разные типы растительности, их проективное покрытие и видовое обилие на площадке оказывают как обогревающий, так и охлаждающий эффект [29].

Глубина протаивания на участках с развитым кустарничковым ярусом больше, чем на участках с преимущественно лишайниковым покровом, как на площадках М1–М3, поскольку кустарнички обеспечивают снегозадержание в холодный период и поглощают большое количество солнечной радиации в теплый период, в результате чего способствуют более глубокому сезонному протаиванию ММП. На площадке М6 глубина протаивания на участках с преимущественно мохово-лишайниковым покровом больше, чем на участках с преобладанием кустарничков. Это связано с уменьшением проективного покрытия мохово-лишайникового покрова и суммарной фитомассы, вследствие чего уменьшается теплоизолированность ММП, что ведет к увеличению их температуры и глубины сезонного протаивания [29].

Обсуждение результатов

Как показали предыдущие исследования на севере Пур-Тазовского междуречья [14, 23; и некоторые другие работы] полигонально-жильные структуры могут деградировать в результате: 1) вытаивания ПЖЛ и 2) разрушения окружающих полигонов.

В работе [23] описано разрушение полигонов и вытаивание ПЖЛ на полигональном торфянике, где в понижениях находится вода. Изменения на торфянике происходят из-за перераспределения поверхностного стока и смен режимов затопления и дренирования канав. Поэтому на торфянике происходят разрушение полигонов, блокирование стока и развитие термокарста. Также из-за значительного количества атмосферных осадков начинает преобладать проточный режим в понижениях, из-за чего происходят активизация термоэрозии, увеличение глубины и площади межполигональных понижений.

В случае деградации полигонально-жильных структур по берегам озер наиболее существен-

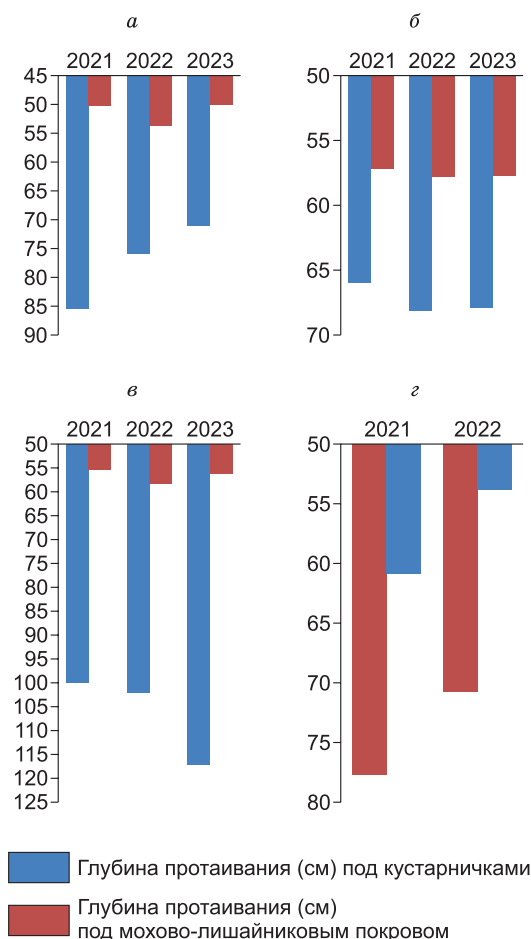


Рис. 5. Диаграммы изменения глубины протаивания под разными типами растительного покрова на площадках мониторинга М1 (а), М2 (б), М3 (в), М6 (г)

Fig. 5. Diagrams illustrating the changes in the seasonal thaw depth under different types of vegetation cover at monitoring sites M1 (a), M2 (b), M3 (v), and M6 (z).

ным фактором является волновое воздействие озерной воды. На мониторинговых площадках М1 и М2 общая потеря площади полигональной части торфяников за период наблюдений составила 7,68 м² (10 %) и 4,34 м² (6,6 %), за счет отступления берега – 3,77 м² и 1,67 м² соответственно. На площадке М6 происходят затухание процессов и стабилизация, наблюдения здесь показывают, что потеря площади полигонов составляет всего 0,04 м² (менее 1 %), за счет отступления берега – 0,03 м². На площадке М3 криогенные процессы более активны, чем на других, по-видимому, из-за незначительной мощности (0,3 м) торфяной залежи торфяника, на которой расположена эта площадка. Большие значения глубины протаивания от 110 до 160 см наблюдаются повсеместно как в центральной части, так

и вблизи береговой линии. Уменьшение полигональной части произошло на 6 м^2 (10 %), за счет отступления берега – $5,03 \text{ м}^2$.

Активизацию криогенных процессов в последнее время связывают с повышением среднегодовой температуры воздуха, ростом продолжительности теплого периода и суммы положительных температур, ведущими к деградации ПЖЛ и полигонального рельефа в целом [23]. Наблюдения авторов показали, что наибольшее развитие термоабразионных и термоэрозионных процессов после 2020 г. происходит на восточном и южных берегах озер, на которые активно оказывается волновое воздействие озерной воды. Кроме того, на этих же площадках глубина сезонного протаивания под кустарничками на 15–30 % больше, чем под преимущественно лишайниковым покровом. При этом средняя глубина протаивания на площадках, расположенных на торфяниках с более мощной торфяной залежью на южном и восточном берегах, уменьшилась на 2–5 % в связи с потерей части наиболее близко расположенных к берегу точек измерения за счет отступления берега, а на площадке на маломощном торфянике средняя глубина протаивания, наоборот, увеличилась на 6 %. На площадке, расположенной на северном берегу, развития каких-либо экзогенных процессов за время мониторинга не наблюдалось, глубина протаивания под кустарничками меньше, чем под преимущественно лишайниковым покровом. Средняя глубина протаивания на этой площадке не изменилась.

Заключение

В настоящее время мониторинг развития полигональных торфяников в зоне взаимодействия торфяник–озеро на севере Пур-Тазовского междуречья имеет довольно короткий ряд наблюдений. Однако, по мнению авторов, этих данных достаточно для предварительной оценки динамики развития полигонально-жильных структур на берегах озер.

На фоне современных климатических изменений волновое воздействие озерной воды, напрямую зависящее от розы ветров района исследований, является основным фактором активизации термоэрозионных и термоабразионных процессов, в свою очередь являющихся причиной деградации полигонального рельефа по берегам озер.

Влияние характера распределения снежного и растительного покровов определяется как ландшафтно-геоморфологическими условиями, в которых располагаются площадки наблюдений,

так и изменениями этих условий внутри каждой площадки. На полигонах глубина сезонного протаивания напрямую соотносится с высотой снежного покрова и зависит от типа и проективного покрытия растительного покрова, а в межполигональных понижениях с разным растительным покровом зависимость неоднозначна и определяется характером распределения снега в разных частях понижений.

Список литературы / References

1. Городков Б.К. Крупнобугристые торфяники и их географическое распространение. *Природа*. 1928;(6): 22–26.
2. Gorodkov B.K. Hilly peatlands and their geographical distribution. *Priroda*. 1928;(6):22–26. (In Russ.)
3. Кузнецова Т.П. Подземные льды молодых прибрежно-морских террас Тазовского полуострова. *Проблемы криолитологии*. 1969;(1):44–49.
4. Kuznetsova T.P. Underground ice of young coastal-marine terraces of the Taz Peninsula. *Problemy kriolitologii = Problems of cryolithology*. 1969;(1):44–49. (In Russ.)
5. Шполянская Н.А., Евсеев В.П. Выпуклобугристые торфяники северной тайги Западной Сибири. *Природные условия Западной Сибири*. 1972(1):134–146.
6. Shpolyanskaya N.A., Evseev V.P. Hilly peatlands of the northern taiga of Western Siberia. *Prirodnye usloviya Zapadnoy Sibiri*. 1972(1):134–146. (In Russ.)
7. Васильчук Ю.К., Васильчук А.К. Мощные полигональные торфяники в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород Западной Сибири. *Криосфера Земли*. 2016;20(4):3–15. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2016-4\(3-15\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2016-4(3-15)).
8. Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A.C. Thick polygonal peatlands in continuous permafrost zone of West Siberia. *Earth's Cryosphere*. 2016;20(4):3–15. (In Russ.) [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2016-4\(3-15\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2016-4(3-15)).
9. Фотиев С.М. Арктические торфяники Ямало-Гыданской провинции Западной Сибири. *Криосфера Земли*. 2017;21(5):3–15. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-5\(3-15\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-5(3-15)).
10. Fotiev S.M. Arctic peatlands of the Yamal-Gydan province of Western Siberia. *Earth's Cryosphere*. 2017; 21(5):3–15. (In Russ.) [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-5\(3-15\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-5(3-15)).
11. Кашперюк П.И. Типы и инженерно-геологические особенности многолетнемерзлых торфяных массивов севера Западно-Сибирской плиты: Дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.; 1985. 291 с.
12. Kashperyuk P.I. Types and engineering-geological features of permafrost peat massifs of the north of the West Siberian plate: Diss. ... Cand. Sci, Moscow; 1985. 291 p. (In Russ.)
13. Тыртиков А.П. Динамика растительного покрова и развитие мерзлотных форм рельефа. М.: Наука; 1979. 116 с.

Tyrtikov A.P. *Dynamics of vegetation cover and development of permafrost forms of relief*. Moscow: Nauka; 1979. 116 p. (In Russ.)

8. Мельников Е.С., Васильев А.А., Лейбман М.О., Москаленко Н.Г. Динамика сезонноталого слоя в Западной Сибири. *Криосфера Земли*. 2005;9(2):23–32.

Melnikov E.S., Vasiliev A.A., Leibman M.O., Moskalenko N.G. Active-layer dynamics in West Siberia. *Earth's Cryosphere*. 2005;9(2):23–32. (In Russ.)

9. Romanovsky V.E., Drozdov D.S., Oberman N.G., et al. Thermal state of permafrost in Russia. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2010;21(2):136–155.

10. Васильев А.А., 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 depth of seasonal rock thawing in typical tundras of Western Yamal. *Earth's Cryosphere*. 2023;27(4):3–13. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/KZ20230401>.

11. Liljedahl A.K., Boike J., Daanen R.P., et al. Pan-Arctic ice-wedge degradation in warming permafrost and its influence on tundra hydrology. *Nature Geoscience*. 2016;9(4):312–318. <http://dx.doi.org/10.1038/ngeo2674>

12. Kanevskiy M., Shur Y., Jorgenson T., et al. Degradation and stabilization of ice wedges: Implications for assessing risk of thermokarst in northern Alaska. *Geomorphology*. 2017;(297):20–42. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.09.001>

13. Babkina E.A., Leibman M.O., Dvornikov Yu.A., et al. Activation of cryogenic processes in Central Yamal as a result of Regional and Local change in climate and thermal state of permafrost. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2019;44(4):283–290. <http://dx.doi.org/10.3103/S1068373919040083>

14. Хомутов А.В., Бабкин Е.М., Тихонравова Я.В. и др. Комплексные исследования криолитозоны северо-восточной части Пур-Тазовского междуречья. *Научный вестник Ямало-Ненецкого АО*. 2019;1(102):53–64. <https://doi.org/10.26110/ARCTIC.2019.102.1.008>.

Khomutov A.V., Babkin E.M., Tikhonravova Y.V., et al. Complex studies of the cryolithozone of the north-eastern part of the Pur-Taz interfluvium. *Nauchny vestnik Yamalo-Nenetskogo AO = Scientific bulletin of the Yamal-Nenets autonomous district*. 2019;1(102):53–64. (In Russ.) <https://doi.org/10.26110/ARCTIC.2019.102.1.008>

15. Бронзов А.Я. Верховые болота Нарымского края (бассейн р. Васюган). *Труды Научно-исследовательского торфяного института*. 1930;(3):100.

Bronzov A.Ya. Upland swamps of the Narym region (basin of the Vasyugan river). *Trudy Nauchnogo issledovatel'skogo torfyanogo instituta*. 1930;(3):100. (In Russ.)

16. Кац Н.Я. О типах болот Западно-Сибирской низменности и их географической зональности. *Торфяное дело*. 1929;(3):3–14.

Katz N.Ya. Types of swamps of the West Siberian lowland and their geographical zonation. *Torfyanoe delo*. 1929;(3):3–14. (In Russ.)

17. Нейштадт М.И. Торфяные запасы Азиатской части СССР. *Труды ЦТОС*. 1938;(4):5–10.

Neishtadt M.I. Peat reserves of the Asian part of the USSR. *Trudy TSTOS*. 1938;(4):5–10. (In Russ.)

18. Smith L.C., Sheng Y., Macdonald G.M., Hinzman L.D. Disappearing Arctic Lakes. *Science*. 2005;308(3):14. <https://doi.org/10.1126/science.1108142>.

19. Кирпотин С.Н., Полищук Ю.М., Брыксина Н.А. Динамика площадей термокарстовых озер в сплошной и прерывистой криолитозонах Западной Сибири в условиях глобального потепления. *Вестник ТГУ*. 2008;(311):185–189.

Kirpotin S.N., Polishchuk Yu.M., Bryksina N.A. Dynamics of the areas of thermokarst lakes in continuous and intermittent cryolithozones of Western Siberia under global warming conditions. *Vestnik of TGU*. 2008;(311):185–189. (In Russ.)

20. Санников Г.С. Картометрические исследования термокарстовых озер на территории Бованенковского месторождения, полуостров Ямал. *Криосфера Земли*. 2012;16(2):30–37.

Sannikov G.S. Cartometric researches of thermokarst lakes within the Bovanenkovo gas field territory, Yamal peninsula. *Earth's Cryosphere*. 2012;16(2):30–37. (In Russ.)

21. Родионова Т.В. Исследование динамики термокарстовых озер в различных районах криолитозоны России по космическим снимкам: Дис. ... канд. геогр. наук. М.; 2013. 196 с.

Rodionova T.V. Investigation of the dynamics of thermokarst lakes in various regions of the cryolithozone of Russia based on satellite images: Diss. ... Cand. Sci., M.; 2013. 196 p. (In Russ.)

22. Капралова В.Н. Закономерности развития термокарстовых процессов в пределах озерно-термокарстовых равнин (на основе подходов математической морфологии ландшафта): Дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.; 2014. 109 с.

Kapralova V.N. Patterns of thermokarst processes development within lake-thermokarst plains (based on approaches of mathematical morphology of landscape): Diss. ... Cand. Sci., M.; 2014. 109 p. (In Russ.)

23. Бабкин Е.М., Бабкина Е.А., Лейбман М.О. и др. Мониторинг изменений полигональных торфяников, примыкающих к автодороге Заполярное – Тазовский. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2022;68(4):384–405. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-384-405>.

Babkin E.M., Babkina E.A., Leibman M.O., et al. Monitoring of the relief changes in polygonal peat plateaus adjacent to the highway Zapolyarnoe — Tazovsky. *Arctic and Antarctic research*. 2022;68(4):384–405. (In Russ.) <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-384-405>.

24. Бабкин Е.М., Хомутов А.В., Дворников Ю.А. и др. Изменение торфяника с вытравившим полигонально-жильным льдом в северной части Пур-Тазов-

ского междуречья. *Проблемы региональной экологии*. 2018;(4):115–119. <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2018-14115>.

Babkin E.M., Khomutov A.V., Dvornikov Yu.A., et al. Relief changes of the peat plateau with melting of polygonal-wedge ice in the northern part of the pur-taz interfluv. *Regional environmental issues*. 2018;(4):115–119. (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2018-14115>.

25. Королева Е.С., Слагода Е.А., Мельников В.П. и др. Идентификационные признаки переходного и промежуточного слоев в полигональных торфяниках севера Западной Сибири. *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. 2021;498(2):131–137. <https://doi.org/10.31857/S2686739721060098>.

Koroleva E.S., Slagoda E.A., Melnikov V.P., et al. Identification features of the transition and intermediate layers in polygonal peatlands of the north of West Siberia. *Doklady Rossiyskoy akademii nauk. Nauki o Zemle*. = *Doklady Earth Sciences*. 2021;498(2):131–137. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S2686739721060098>.

26. Архив погоды в Тазовском. Расписание погоды rp5.ru. Режим доступа: http://rp5.ru/Архив_погоды_в_Тазовском (дата обращения: 2023 г.).

Weather archive in Tazovsky. Weather schedule rp5.ru. Available at: http://rp5.ru/Weather_archive_Tazovsky (accessed: 2023). (In Russ.)

27. Ершов Э.Д. *Геокриология СССР*. М.: Недра; 1989. 454 с.

Ershov E.D. *Geocryology of the USSR*. Moscow: Nedra; 1989. 454 p. (In Russ.)

28. Карта «Природных комплексов севера Западной Сибири». М.: Госгеодезия СССР; 1991

Map of the “Natural complexes of the Northern Western Siberia”. Moscow: Gosgeodeziya USSR; 1991. (In Russ.)

29. Анисимов О.А., Шерстюков А.Б. Оценка роли природно-климатических факторов в изменениях криолитозоны России. *Криосфера Земли*. 2016;20(2):90–99.

Anisimov O.A., Sherstiukov A.B. Evaluating the effect of climatic and environmental factors on permafrost in Russia. *Earth's Cryosphere*. 2016;20(2):90–99. (In Russ.)

Об авторах

ДАНЬКО Михаил Михайлович, младший научный сотрудник, Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, г. Тюмень, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-3178-1535>, ResearcherID: LXU-5022-2024, Scopus Author ID: 57225089658, SPIN: 8075-6933, e-mail: mdanko1996@mail.ru

ХОМУТОВ Артем Валерьевич, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, г. Тюмень, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-8855-3483>, ResearcherID: M-6490-2017, Scopus Author ID: 35975192500, SPIN: 1152-4030, e-mail: artcryo@yandex.ru

Вклад авторов

Данько М.М. – разработка концепции, методология, проведение исследования, проведение статистического анализа, администрирование данных, создание черновика рукописи, визуализация; **Хомутов А.В.** – разработка концепции, методология, ресурсное обеспечение исследования, редактирование рукописи, руководство исследованием

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

DANKO, Michael Mikhailovich, Junior Researcher, Earth Cryosphere Institute Tyumen Scientific Centre, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tyumen, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-3178-1535>, ResearcherID: LXU-5022-2024, Scopus Author ID: 57225089658, SPIN: 8075-6933, e-mail: mdanko1996@mail.ru

KHOMUTOV, Artem Valerevich, Cand. Sci. (Geol.-Mineral.), Leading Researcher, Earth Cryosphere Institute Tyumen Scientific Centre, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tyumen, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-8855-3483>, ResearcherID: M-6490-2017, Scopus Author ID: 35975192500, SPIN: 1152-4030, e-mail: artcryo@yandex.ru

Authors' contribution

Danko M.M. – conceptualization, methodology, investigation, formal analysis, data curation, writing – original draft, visualization; **Khomutov A.V.** – conceptualization, methodology, resources, writing – review & editing, supervision

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 29.01.2025

Поступила после рецензирования / Revised 25.02.2025

Принята к публикации / Accepted 27.02.2025



Оригинальная статья

Подбор оптимальной модели климатического реанализа по годовой сумме осадков для территории Республики Саха (Якутия)

Н. И. Тананаев^{1,2}

¹Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация

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

tanni@s-vfu.ru

Аннотация

Региональные сценарные климатические прогнозы требуют знания исходного «базового климата», в частности, пространственного распределения годовой суммы осадков в современных климатических условиях в пределах региона. Данные о годовой сумме осадков за период с 1961 по 2020 г. по 40 метеостанциям на территории Республики Саха (Якутия) использованы для оценки точности моделей реанализа CRU TS, ERA5-Land, GPCC, NCEP-NCAR, PREC/L и JRA55 и выбора оптимальной модели реанализа. Оценка точности реанализа выполнялась сравнением данных наблюдений со значением поля реанализа в пикселе, в котором расположена метеостанция. В статистическом анализе использовались метрики сходства: коэффициент конкордации Лина, индекс согласия Вильмота, тау-критерий Кендалла, среднеквадратичная ошибка. Интерполяционные модели реанализа (CRU TS, GPCC, PREC/L) точнее воспроизводят наблюдаемые данные, тогда как модельные реанализы завышают сумму осадков на 100 мм/год и более (от 30 до 50 %), а также недооценивают изменение суммы осадков. Модель GPCC наиболее точно воспроизводит наблюдения, однако при этом имеет признаки «переподгонки», наиболее значимый из которых – отрицательная пространственная корреляция среднесезонных полей годовой суммы осадков за разные климатические периоды. В результате оптимальной для территории РС(Я) по годовой сумме осадков признана модель CRU TS 4, точнее прочих воспроизводящая изменение суммы осадков. Модель CRU TS 4 допустимо использовать в качестве модели «базового климата». По данным CRU TS 4, среднегодовая сумма осадков на территории РС(Я) в 1991–2020 гг. составляет 293 ± 92 мм; в 1961–1990 гг. она была равна 285 ± 81 мм. Между двумя климатическими периодами, следовательно, годовая сумма осадков в РС(Я) выросла на 8 ± 18 мм, что не является статистически значимой величиной.

Ключевые слова: годовая сумма осадков, региональный климат, климатические изменения, метеонаблюдения, климатический реанализ, пространственная скоррелированность

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект № 22-27-00344 «Климатические изменения и деградация криолитозоны в северных регионах Российской Федерации: Регионально-специфические стратегии адаптации».

Для цитирования: Тананаев Н.И. Подбор оптимальной модели климатического реанализа по годовой сумме осадков для территории Республики Саха (Якутия). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(1):61–72. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-1-61-72>

Original article

Selection of the best-performing climate reanalysis model for the Republic of Sakha (Yakutia) based on mean annual precipitation

Nikita I. Tananaev^{1,2}

¹Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

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

tanni@s-vfu.ru

Abstract

Regional scenario-based projections require a comprehensive understanding of baseline climatic conditions, particularly the spatial distribution of total mean annual precipitation within the region. Precipitation data from 40 meteorological stations across the Republic of Sakha (Yakutia) for the period from 1961 to 2020 were used to evaluate the

performance of modern reanalyses: CRU TS, ERA5-Land, GPCC, NCEP-NCAR, PREC/L, and JRA55. The performance of each model was assessed by comparing the observed mean annual precipitation to the reanalysis field values in pixels corresponding to the locations of the observation points. The statistical assessment employed Lin's coefficient of concordance, Wilmott's index of agreement, Kendall's tau, and the root mean square error. Interpolation-based models (CRU TS, GPCC, PREC/L) demonstrated a superior ability to reproduce observed total precipitation, whereas modeling-based reanalyses tended to overestimate it by more than 100 mm/year, or by 30% to 50%. The GPCC reanalysis exhibited the best performance when compared to observations; however, it appeared to be significantly overfitted, as evidenced by a substantial negative spatial correlation between total precipitation coverages for the periods from 1961 to 1990 and 1991 to 2020. Consequently, the interpolation uncertainty associated with overfitting precludes the use of GPCC data as a reliable benchmark. Ultimately, the CRU TS 4 reanalysis was determined to be optimal as a baseline for total precipitation coverage. According to CRU TS 4 data, the mean annual precipitation across the Republic of Sakha (Yakutia) was 285 ± 81 mm for the period from 1961 to 1990 and 293 ± 92 mm for 1991 to 2020, indicating an insignificant change of 8 ± 18 mm. Thus, between the two climatic periods, the annual precipitation in the Republic of Sakha (Yakutia) increased by 8 ± 18 mm, a change that is not statistically significant.

Keywords: mean annual precipitation, regional climate, climate change, meteorological data, climate reanalyses, spatial correlation

Funding. This study was funded by the Russian Science Foundation, project No. 22-27-00344 "Climate change and permafrost degradation in the northern regions of the Russian Federation: Regionally-specific adaptation strategies".

For citation: Tananaev N.I. Selection of the best-performing climate reanalysis model for the Republic of Sakha (Yakutia) based on mean annual precipitation. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(1):61–72. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-61-72>

Введение

Увлажненность территории – одна из основных характеристик климата, которая определяет региональные особенности гидрологического цикла, условия формирования экосистем, включая почвы и растительность, устойчивость водных ресурсов [1]. Суммарный годовой слой осадков входит в перечень важнейших климатических переменных, опубликованный Всемирной метеорологической организацией (ВМО). Основным источником данных об атмосферных осадках – материалы сетевых точечных наблюдений на метеостанциях, однако их однородность и достоверность в современной литературе обсуждаются. Возможная неоднородность рядов осадков связана с переносом станций либо со сменой стандартных измерительных приборов. В СССР таким моментом считается переход от дождемеров с защитой Нифера к осадкомерам Третьякова, для компенсации которого были разработаны методы приведения рядов к однородности [2]. Достоверность данных снижается под влиянием ветрового переноса осадков, в первую очередь – зимнего периода, когда во время метелей часть осадков из осадкомера выдувается [3] либо же осадкомер заполняется занесенными в него «ложными» осадками [4, 5]. Для коррекции данных также разрабатывались и применялись различные поправки [6]. По данным работ [7, 8], суммарная величина поправок может достигать 40 %, а в среднем для северных регионов составляет 28 %. В результате, для атмосферных осадков не существует

единого референсного массива данных [9, 10]. Большинство исследований, в том числе национальный Оценочный доклад по изменениям климата [10], используют массив ВНИИГМИ-МЦД, в котором в наблюдения введены поправки на смачивание, а в данные до 1966 г. – также поправки на приведение данных дождемера к показаниям осадкомера.

Климатический реанализ создает осредненные поля осадков, используя методы ассимиляции и интерполяции дискретных наблюдений метеостанций, методы краткосрочного прогноза и гидродинамического моделирования, а в последние десятилетия – также данные спутниковых наблюдений [11]. Построение полей осадков – сложная задача, поскольку в моменте поле осадков никогда не непрерывно, в отличие от поля температуры воздуха или атмосферного давления. Радиус пространственной корреляции в полях осадков намного меньше, чем температуры воздуха, 450 км и 1200 км соответственно [12]; с увеличением расстояния корреляция быстро затухает. В результате в моделях реанализа, построенных только на ассимиляции станционных наблюдений, на участках, удаленных от метеостанций, могут возникать интерполяционные артефакты; кроме того, количество станций может меняться, и возможны ситуации, когда поле осадков на некоторой территории в разные периоды определяется интерполяцией разных станций, расположенных на различном расстоянии [12].

В моделях реанализа, использующих элементы гидродинамического моделирования, точность интерполяции на недостаточно изученных территориях будет определяться в основном точностью использованной модели. В моделях реанализа, использующих также спутниковые данные, неоднородность рядов может быть связана с различной точностью спутниковых инструментов, данные которых использованы в расчетах [7]. В связи с такой неоднородностью не каждая модель реанализа: (а) имеет одинаковую точность во все климатические интервалы, причем разные модели могут иметь разные характеристики точности; (б) пригодна для оценок направленных изменений, поскольку есть вероятность, что часть выделенного тренда связана с погрешностями интерполяции, а не с реальными тенденциями [12].

Модели реанализа различаются по пространственному и временному охвату и разрешению, и, как следствие, по решаемым с их помощью задачам. Данная работа посвящена подбору оптимальной модели реанализа по годовой сумме осадков для территории Республики Саха (Якутия). Основные направления, в которых могут быть использованы полученные результаты: (1) количественная оценка исторических изменений годовой суммы осадков на территории РС(Я); (2) сравнение точности климатических моделей в этом регионе с точки зрения воспроизведения исторических изменений (эксперимент CMIP6 ‘historical’); (3) использование в качестве «базового климата» для ансамблевого прогноза по основным климатическим сценариям.

Материалы и методы

Исходными материалами для работы послужила база данных ГГО и ВНИИГМИ-МЦД, содержащая сведения о годовой и месячной сумме осадков на 457 станциях на территории России и сопредельных государств [13, 14]. На территории РС(Я) расположено 40 станций, для которых доступны указанные данные. Из полного массива были выбраны только значения наблюдаемых месячных сумм осадков. В период до 1965 г. (включительно) эти значения представляют собой данные дождемеров, приведенные к показаниям осадкомеров согласно [2], в 1966 г. – данные наблюдений плюс постоянная поправка на смачивание, равная 0,2, с 1967 г. – данные наблюдений с поправкой на смачивание в соответствии с [15].

В работе использованы данные основных климатических реанализов за период с 1961 по 2020 г. Данный временной интервал необходим для расчета годовой суммы осадков за базовый климатический период 1961–1990 г., утвержденный ВМО, и сравнения с данными глобальных климатических моделей. Использованы реанализы:

1. CRU TS (Climate Research Unit Time Series), Университет Восточной Англии, Великобритания, версии 4.05, 4.06 и 4.07; реанализ полей месячных сумм осадков на сетке разрешением $0,5 \times 0,5^\circ$ [12, 16–18].

2. ERA5-Land, Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF), Великобритания; реанализ полей месячных сумм осадков на сетке разрешением $0,1 \times 0,1^\circ$ [19].

3. GPCC (Global Precipitation Climatology Centre), Немецкая служба погоды (DWD), версия 2022; реанализ полей месячных сумм осадков на сетке разрешением $0,25 \times 0,25^\circ$ [20, 21].

4. NCEP-NCAR Reanalysis 1, Национальная администрация по изучению атмосферы и океана (NOAA), США; реанализ полей суточных сумм осадков, пересчитанных из четырехсрочных данных на сетке разрешением $2,5 \times 2,5^\circ$ [22, 23].

5. PREC/L (Precipitation Reconstruction over Land), Национальная администрация по изучению атмосферы и океана (NOAA), США; реанализ полей месячных сумм осадков на сетке разрешением $0,5 \times 0,5^\circ$ [24, 25].

6. JRA-55 (Japanese 55-year Reanalysis), Японское метеорологическое агентство (JMA); реанализ полей месячных сумм осадков, пересчитанных из четырехсрочных данных на сетке разрешением $0,5625 \times 0,5625^\circ$ [26, 27].

Статистическая обработка данных выполнялась в RStudio [28], графическом интерфейсе пользователя для языка R [29], с помощью набора авторских скриптов на основе библиотек ‘tidync’ и ‘ncmeta’. Табличные данные климатических реанализов осреднялись для репрезентативных климатических периодов (1961–1990, 1971–2000, 1981–2010, 1991–2020 гг.) и преобразовывались в растровый формат с исходным пространственным разрешением каждой модели, а затем при необходимости приводились к единому пространственному разрешению $0,5 \times 0,5^\circ$ в QGIS 3.22.11 [30], ГИС с открытым исходным кодом. В QGIS также рассчитывалось ΔP , мм, изменение годовой суммы осадков между периодами 1961–1990 и 1991–2020 гг. С полученных растровых покрытий снимались значения годово-

вой суммы осадков в пикселях, соответствующих координатам метеостанций; эти значения затем использовались в корреляционном анализе и анализе качества моделей.

В расчете показателей описательной статистики использовались встроенные функции *mean()* и *median()*, пакет **'base'** для расчета среднего и медианы, а также *skewness()* и *kurtosis()*, пакет **'e1072'** для расчета коэффициентов асимметрии и эксцесса соответственно. Оценка точности реанализов относительно наблюдений выполнялась с помощью следующих показателей: τ , ранговый тау-критерий Кендалла (функция *cor.test()*, пакет **'stats'**); CCC, коэффициент конкордации Лина (функция *CCC()*, пакет **'DescTools'**); d , индекс согласия Вильмотта (функция *dr()*, пакет **'ie2misc'**); *RMSE*, среднеквадратичная ошибка, СКО (функция *rmse()*, пакет **'ie2misc'**). Пространственная корреляция между разновременными растрами оценивалась с помощью коэффициента пространственной корреляции Пирсона (функция *rasterCorrelation()*, пакет **'spatialEco'**), в скользящем окне размером 3×3 пикселя.

Результаты и обсуждение

Описательная статистика. Реанализы осадков заметно различаются по средним значениям годовой суммы осадков и другим статистическим характеристикам (табл. 1). Реанализы, основанные на ассимиляции данных наблюдений (CRU TS, GPCC, PREC/L), очевидно, ближе к данным наблюдений, чем реанализы, основанные на моделировании (ERA5-Land, NCEP-NCAR, JRA55), по факту интерполяционного подхода к их созданию. Отметим, что высокая точность реанализов определяется только относительно метеостанций и не характеризует точность интерполяции в пространство между точками их расположения.

Модельные реанализы имеют тенденцию завышать годовую сумму осадков и имеют, как следствие большее среднеквадратичное отклонение (см. табл. 1). Интерполяционные реанализы имеют меньшую асимметрию и эксцесс, чем данные наблюдений; из этого ряда выбивается реанализ GPCC, по этим показателям приближающийся к статистикам наблюдаемых данных. На данном этапе анализа это уже позволяет предположить, что модель GPCC имеет признаки *overfitted model*, т. е. переподогнанной модели, излишне зависящей от исходных данных.

Как и в случае со среднегодовой температурой воздуха [31], наибольший интерес представ-

ляет то, как реанализы воспроизводят изменение годовой суммы осадков между периодами. Все модели, кроме NCEP-NCAR, воспроизводят увеличение средней по массиву годовой суммы осадков между периодами 1961–1990 и 1991–2020 гг. В случае NCEP-NCAR решающее значение имеет пространственное разрешение модели, $2,5 \times 2,5^\circ$, недостаточное для учета небольшого радиуса корреляции полей осадков.

Модельные реанализы, даже с высоким пространственным разрешением, занижают прирост годовой суммы осадков; прирост медианного значения близок к нулю (ERA5) или меньше нуля (NCEP-NCAR, JRA55). С этим связано и сохранение положительной асимметрии в их распределении, тогда как в данных наблюдений и интерполяционных моделей она близка к нулю или отрицательна, что приближает распределение ΔP к нормальному. Положительная асимметрия, в свою очередь, «утяжеляет» левый хвост распределения, вследствие чего эксцесс близок к нулю (ERA5, JRA55).

Точность моделей реанализа. Интерполяционные модели реанализа точнее воспроизводят данные наблюдений на метеостанциях, чем основанные на гидродинамическом моделировании (табл. 2), что в целом для территории РФ было ранее показано по данным предыдущих поколений реанализов и на их более узком наборе [7]. При выборе оптимальной модели реанализа, следовательно, следует обращать внимание на другие аспекты: (1) точность воспроизведения ΔP между периодами и (2) точность пространственной интерполяции, описания поля осадков между пунктами наблюдений.

Интерполяционные реанализы точнее, чем модельные, воспроизводят также и изменение годовой суммы осадков между периодами (см. табл. 2). Здесь отметим низкую точность реанализа NCEP-NCAR с околонулевыми значениями критериев точности. Значения СКО, нормированные на медианное значение ΔP по данным наблюдений (28,5), меньше единицы для интерполяционных реанализов и больше – для модельных, что указывает на значительный разброс в данных последних. В итоге, задача подбора оптимального реанализа для описания годовой суммы осадков на территории РС(Я) сводится к выбору среди интерполяционных моделей реанализа: CRU TS, GPCC, PREC/L, в котором предпочтение должно быть отдано той модели, которая имеет наиболее адекватный интерполяционный механизм.

Таблица 1

**Основные статистические характеристики наборов данных метеостанций и реанализов
(в соответствующих пикселях)**

Table 1

Descriptive statistics of total precipitation datasets obtained from meteorological stations and reanalyses (data derived from the corresponding pixels)								
Период	M/c	CRU4.05	CRU4.06	ERA5	GPCC	NCEP	PREC/L	JRA55
Среднее								
1961–1990	305	308	314	417	310	464	309	423
1971–2000	314	308	313	422	314	458	307	429
1981–2010	324	316	321	423	324	463	314	434
1991–2020	329	322	327	420	330	448	324	430
ΔP	24,5	13,2	13,2	2,9	19,6	–16,4	15,2	6,5
Медиана								
1961–1990	280	282	280	372	286	420	282	388
1971–2000	287	286	284	374	290	432	290	386
1981–2010	294	293	290	376	294	418	294	391
1991–2020	300	302	300	370	302	386	302	378
ΔP	28,5	12,5	12,5	1,0	23	–12,5	19,0	–3,0
Среднеквадратичное отклонение								
1961–1990	109	107	103	140	108	247	115	124
1971–2000	121	114	110	149	119	234	121	132
1981–2010	127	117	113	150	127	238	123	138
1991–2020	133	122	118	148	132	240	125	136
ΔP	35,5	22,5	22,8	17,5	34,5	35,3	17,8	32,6
Коэффициент асимметрии								
1961–1990	1,30	0,98	1,06	1,23	1,29	1,22	1,12	1,17
1971–2000	1,26	0,94	1,02	1,26	1,19	1,17	1,11	1,21
1981–2010	1,29	0,93	1,02	1,31	1,27	1,16	1,09	1,20
1991–2020	1,21	0,88	0,96	1,31	1,19	1,31	1,02	1,14
ΔP	–0,12	0,11	0,08	0,68	–0,01	0,26	–0,32	0,57
Коэффициент эксцесса								
1961–1990	1,16	0,22	0,35	0,25	1,05	2,39	0,74	0,27
1971–2000	1,10	0,21	0,41	0,40	0,91	2,31	0,74	0,33
1981–2010	1,28	0,31	0,54	0,60	1,27	1,89	0,78	0,29
1991–2020	1,26	0,28	0,40	0,56	1,22	2,39	0,67	0,09
ΔP	–0,32	–0,55	–0,66	0,05	–0,33	–0,44	–0,76	0,00

Точность реанализов, в особенности модельных, возрастает со временем (см. табл. 2). Действительно, годовая сумма осадков в среднем по набору данных наблюдений увеличивается быстрее, чем в модельных реанализах, что автоматически приближает данные последних к наблюдаемой реальности и повышает оценки их точности.

Показатели точности моделей реанализа (см. табл. 2) отдают предпочтение модели GPCC, затем CRU TS и PREC/L, в порядке убывания точ-

ности. Однако, как уже отмечалось выше, модель GPCC имеет признаки переподгонки, что видно также в значениях коэффициента корреляции Лина, равных 1, и значениях других метрик. Проблема переподогнанных моделей, в случае поля годовых осадков, заключается в их зависимости от данных метеостанций и исключительной чувствительности к их пространственной конфигурации. В результате, если количество ассимилируемых моделью станций или их расположение меняется со временем, качест-

Таблица 2

**Показатели точности моделей реанализа
(относительно данных наблюдений на метеостанциях на территории РС(Я))**

Table 2

**Precision metrics of reanalyses compared to observations
at meteorological stations across the Republic of Sakha (Yakutia)**

Период	CRU4.05	CRU4.06	ERA5	GPCC	NCEP	PREC/L	JRA55
Коэффициент конкордации Лина							
1961–1990	0,92	0,88	0,65	1,00	0,25	0,95	0,56
1971–2000	0,92	0,90	0,70	1,00	0,28	0,96	0,61
1981–2010	0,92	0,90	0,75	1,00	0,32	0,97	0,63
1991–2020	0,93	0,90	0,78	1,00	0,38	0,97	0,66
ΔP	0,74	0,74	0,35	0,95	–0,06	0,57	0,32
Индекс согласия Вильмота							
1961–1990	0,80	0,80	0,31	0,96	–0,17	0,86	0,26
1971–2000	0,82	0,83	0,39	0,97	–0,04	0,89	0,34
1981–2010	0,81	0,83	0,46	0,98	0,01	0,89	0,37
1991–2020	0,82	0,84	0,53	0,98	0,14	0,88	0,44
ΔP	0,68	0,68	0,42	0,85	–0,03	0,62	0,40
Тау-критерий Кендалла							
1961–1990	0,69	0,72	0,78	0,95	0,34	0,81	0,67
1971–2000	0,70	0,72	0,77	0,97	0,31	0,84	0,66
1981–2010	0,73	0,73	0,78	0,99	0,35	0,83	0,62
1991–2020	0,74	0,74	0,79	0,98	0,37	0,84	0,65
ΔP	0,71	0,71	0,38	0,83	–0,02	0,56	0,28
Среднеквадратичная ошибка							
1961–1990	44,0	50,4	123	9,6	268	33,3	133
1971–2000	46,2	48,1	119	7,9	253	32,2	132
1981–2010	47,7	53,1	110	4,3	248	31,2	131
1991–2020	48,4	54,5	102	5,5	234	32,1	125
ΔP	21,8	21,9	36,1	11,1	65,9	26,5	41,9

во интерполяции модели также неоднородно во времени, и его сложно контролировать.

Пространственная корреляция в данных реанализа. Оценить влияние подгонки реанализа под данные наблюдений и возможное присутствие эффекта переподгонки позволяет анализ пространственной корреляции. Предполагается, что между двумя растрами, содержащими данные о годовой сумме осадков, осредненной за различные периоды, пространственная корреляция, оцененная методом скользящего окна, будет в основном устойчиво положительной, если влияние других локальных факторов невелико. В противном случае, когда картину пространственной корреляции определяют, помимо естественной изменчивости, другие факторы, например расположение метеостанций, следует ожидать на-

личия областей отрицательной пространственной корреляции.

Отрицательная пространственная корреляция между разновременными полями годовой суммы осадков для территории РС(Я) реанализам не присуща (рис. 1), независимо от их типа. В интерполяционных реанализах она представляет артефакт интерполяции и отмечается чаще всего в небольшом радиусе вблизи пунктов наблюдений (см. рис. 1, а, д). На этом фоне выделяется реанализ GPCC, для которого области отрицательной пространственной корреляции (ОПК) занимают значительную часть территории РС(Я).

Как обсуждалось выше, это следствие «переподгонки» модели и также влияния интерполяционной модели, создающей артефакты на

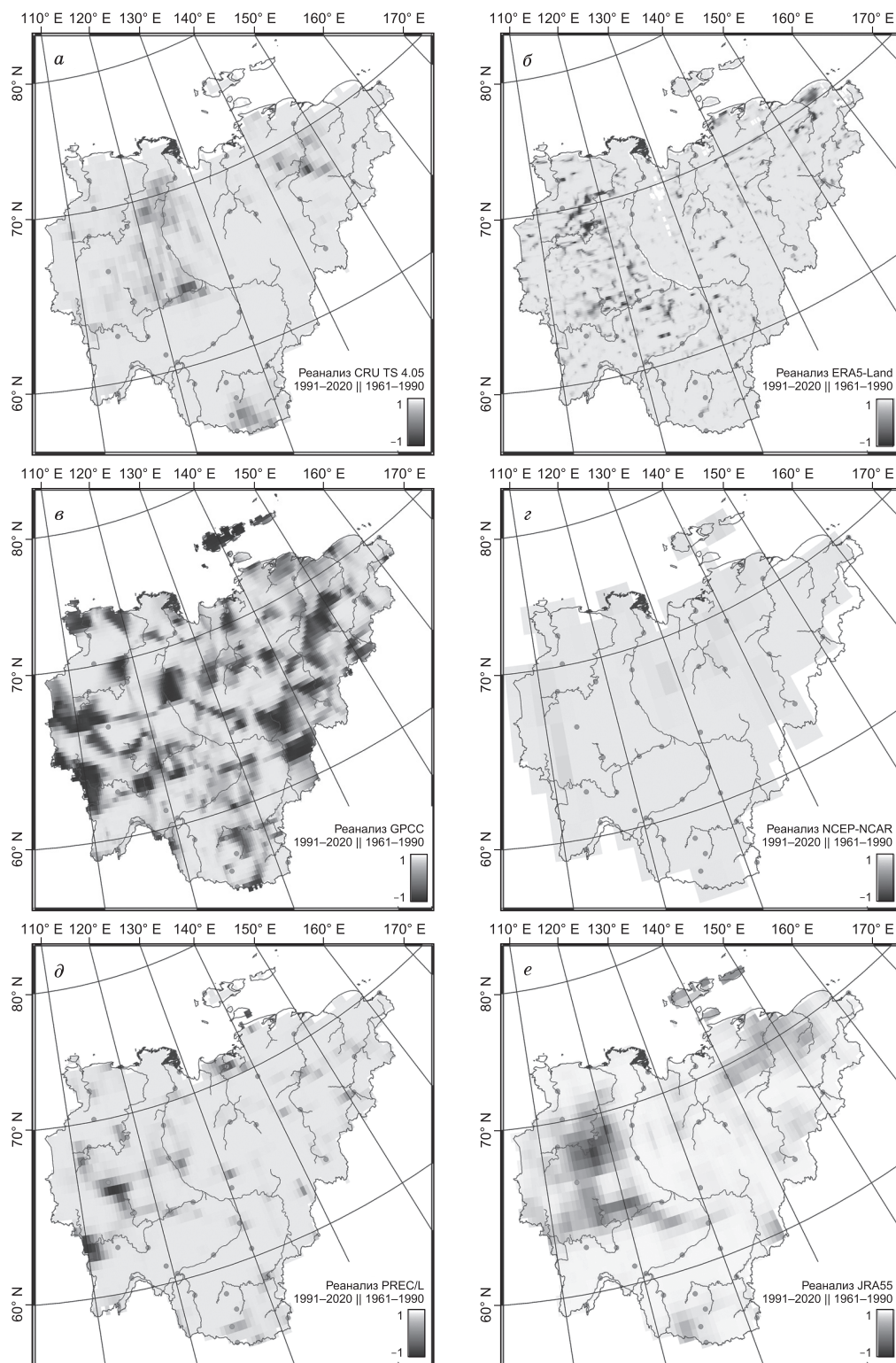


Рис. 1. Пространственная корреляция между полями годовой суммы осадков в 1961–1990 и 1991–2020 гг. в реанализах: а – CRU TS 4.05; б – ERA5; в – GPCC; г – NCEP-NCAR; д – PREC/L; е – JRA55

Fig. 1. Spatial correlation between total precipitation coverages for the periods 1961–1990 and 1991–2020 in reanalyses: а) CRU TS 4.05; б) ERA5; в) GPCC; г) NCEP-NCAR; д) PREC/L; е) JRA55

значительном удалении от метеостанций. В модельных реанализах, где влияние интерполяции незначительно, ОПК возникает в локациях, где в пределах узкого скользящего окна, т. е. примерно в радиусе от 30 до 150 км (в зависимости от разрешения модели), наблюдается синхронное разнонаправленное изменение увлажненности: более влажные пиксели (относительно среднего в скользящем окне) становятся сухими, а более сухие – влажными. Такая тенденция характерна для западной и северо-западной Якутии, а также нижнего течения р. Индигирка, причем отмечается в данных не только модельных (см. рис. 1, б, д), но и интерполяционных реанализов (см. рис. 1, а, з).

Причина изменений, приводящих к появлению ОПК в данных о годовой сумме осадков, неясна, и относительно нее можно только выдвигать предположения. Поскольку область возникновения ОПК одинакова в моделях обоих типов, допустимо предположить, что основная причина не относится к особенностям моделей и связана с объективными факторами, например изменением характера атмосферной циркуляции и частоты прохождения циклонов, однако этот вопрос требует дополнительных исследований. Западная и северо-западная Якутия – регион интенсивного промышленного освоения, в том числе связанного с необходимостью обеспечения безопасности гидротехнических сооружений, и такие исследования могут иметь значимый прикладной аспект.

Модельные реанализы значительно завышают величины годовой суммы осадков на территории РС(Я), что было ранее показано в работе [7] относительно более ранних версий этих же реанализов. Реанализ ERA5-Land, по литературным данным, на территории высокогорной Азии завышает годовую сумму осадков от 30 до 270 % [32]. Глобальный анализ ошибок ERA5-Land также указывает на завышение слоя осадков этим реанализом, в особенности в летний период во внутритропической области, тогда как зимние осадки внутритропической зоны воспроизводятся более точно [33]. Аналогичные результаты для отдельных регионов мира также получены для реанализа JRA55 [34]. В качестве причин такого завышения можно предположить особенности разрешения модельными реанализами теплообмена на поверхности почвы и конвективных потоков тепла и влаги и, как следствие, завышение суммы конвективных осадков, что также отмеча-

лось в литературе [35, 36]. Континентальные условия Северной Евразии в летний период предполагают значимую роль дневной конвекции в местной циркуляции, с которой, действительно, может быть частично связано завышение летних осадков в модельных реанализах.

Необходимо снова отметить важный момент: точность измерения количества осадков, в особенности осадков зимнего периода, остается в настоящее время приблизительной и сильно зависит от положения станции, типа осадкомера. Существуют методики расчета поправок осадкомеров, отличающиеся от принятых в используемом наборе данных [6]; учет таких поправок приводит к увеличению годовой суммы осадков на 25–40 % на метеостанциях к северу от Полярного круга и в пределах 10–20 % к югу от него, в основном вследствие роста слоя зимних осадков. С учетом таких поправок точность реанализов относительно данных наблюдений заметно изменится, и, возможно, преимущество получат модельные реанализы. Остается констатировать, что на настоящий момент для территории РФ не существует единого источника данных об осадках: ни точечного (данные метеостанций), ни секционного (реанализа).

На территории Республики Саха (Якутия) оптимальной моделью реанализа, на основании изложенных выше результатов, следует считать модель CRU TS 4.05 и, в меньшей степени, ее старшие версии, CRU TS 4.06 и 4.07. Выбор сделан на основании более высокой точности этого реанализа относительно изменения годовой суммы осадков между климатическими периодами.

Годовая сумма осадков на территории РС(Я) и ее изменение. По данным оптимального реанализа CRU TS 4.05 построены схемы распределения годовой суммы осадков на территории РС(Я) в актуальный период (1991–2020), отражающие современное состояние климатической системы (рис. 2, а), а также изменение годовой суммы осадков между климатическими периодами 1961–1990 и 1991–2020 гг. (рис. 2, б).

Среднегодовая сумма осадков на территории РС(Я) в 1991–2020 гг. составляет, по данным реанализа, 293 ± 92 мм; в 1961–1990 гг. она была равна 285 ± 81 мм; между двумя климатическими периодами, следовательно, годовая сумма осадков в РС(Я) выросла на 8 ± 18 мм. Наибольшая сумма осадков, более 550–650 мм/год, отмечается в Южной Якутии, в пределах Алданского нагорья, а также в Верхоянском массиве: от 350

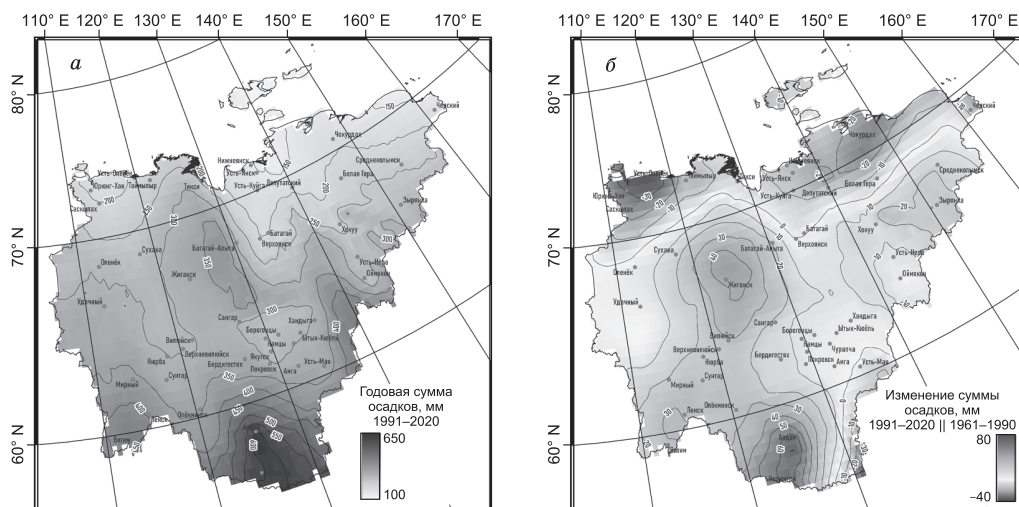


Рис. 2. Данные реанализа CRU TS 4.05 для территории РС(Я): *a* – годовая сумма осадков за период 1991–2020 гг.; *б* – изменение годовой суммы осадков между периодами 1991–2020 и 1961–1990 гг.

Fig. 2. CRU TS 4.05 reanalysis data for the Republic of Sakha (Yakutia): *a*) total precipitation distribution for the period 1991–2020; *b*) total precipitation change between the periods 1991–2020 and 1961–1990

до 400 мм/год – в субмеридиональной части (хребет Орулган) и от 400 до 450 мм – на хребте Сетте-Дабан и в западной части хребта Сунтар-Хаята. Наименьшее количество осадков, менее 200 мм/год, выпадает вдоль побережья Северного Ледовитого океана, на Приморских низменностях и в нижних течениях рек Анабар и Оленёк. В этих же районах отмечается уменьшение годовой суммы осадков, от 20 до 30 мм/год, что сходится с опубликованными тенденциями, установленными по данным наблюдений: уменьшение годовой суммы осадков на 2,4 % в Восточно-Сибирском секторе Арктики, и на 14,3 % – в Чукотском секторе [37]. Увеличение годовой суммы осадков отмечается на Алданском нагорье – от 60 до 80 мм/год, в Юго-Западной Якутии и далее к северу до широты Полярного круга – от 20 до 40 мм/год и на верхней Колыме в восточных отрогах Момского хребта – до 20 мм/год. На территории Лено-Алданского междуречья изменение количества осадков за последние статистически не значимо; вкупе с увеличением среднегодовой температуры воздуха это увеличивает засушливость территории, приводит к уменьшению влажности почвы, угнетению растительности и деградации верхних горизонтов криолитозоны.

Заклучение

В данной работе выполнена оценка точности интерполяционных и модельных реанализов го-

довой суммы осадков для территории РС(Я). Преимущество первых – более высокая точность относительно данных наблюдений, наиболее значимый недостаток – недостаточная физическая обоснованность механизма интерполяции. Этот недостаток не присущ модельным реанализам, однако в пунктах метеостанций они недостаточно точно воспроизводят как средние для периодов поля годовых осадков, так и их изменение между периодами. Оптимальная модель реанализа по годовой сумме осадков для территории РС(Я) – CRU TS 4; с помощью этой модели средняя для региона годовая сумма осадков оценивается в 293 мм (1991–2020), среднее изменение – в +8 мм между 1991–2020 и 1961–1990 гг. Различия в точности между ее версиями CRU TS 4.05 и 4.06 незначительны, а между версиями 4.06 и 4.07 – отсутствуют. Данные этого реанализа могут быть использованы в качестве «базового климата» для региональных сценарных климатических прогнозов для территории РС(Я) с использованием климатических моделей CMIP6, а также для любых других расчетов, опирающихся на значения сумм осадков (ландшафтное моделирование, оценки пожарной опасности, и т. д.).

Список литературы / References

1. Alessa L., Kliskey A., Lammers R., et al. The Arctic Water Resources Vulnerability Index: An integrated assessment tool for community resilience and vulnerability with respect to freshwater. *Environmental Manage-*

ment. 2008;42:523–541. <https://doi.org/10.1007/s00267-008-9152-0>

2. Богданова Э.Г., Гаврилова С.Ю. Устранение неоднородности временных рядов осадков, вызванной заменой дождемера с защитой Нифера на осадкомер Третьякова. *Метеорология и гидрология*. 2008;(8): 87–102.

Bogdanova E.G. Elimination of heterogeneity of precipitation time series caused by replacing the Niefer-protected rain gauge with the Tretiakov gauge. *Meteorology and Hydrology*. 2008;(8):87–102. (In Russ.)

3. Rasmussen R., Baker B., Kochendorfer J., et al. How well we are measuring snow? The NOAA/FAA/NCAR Precipitation Test Bed. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2012;93:811–829. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00052.1>

4. Струзер Л.Р., Брызгин Н.Н. Методика вычисления поправок к измеренным величинам атмосферных осадков в полярных районах. *Труды ГГО им. А.И. Воейкова*. 1971;260:61–76.

Struzer L.R., Bryazgin N.N. Methodology for calculating corrections to measured precipitation values in polar regions. *Proceedings of the A.I. Voeikov State Geophysical Observatory*. 1971;260:61–76. (In Russ.)

5. Goodison B.E. Accuracy of the Canadian snow gauge measurements. *Journal of Applied Meteorology*. 1978;17:1542–1548.

6. Богданова Э.Г., Голубев В.С., Ильин Б.М. и др. Новая модель корректировки измеренных осадков и ее применение в полярных районах. *Метеорология и гидрология*. 2002;(10):68–93.

Bogdanova E.G., Golubev V.S., Ilyin B.M., et al. A new model for correcting measured precipitation and its application in polar regions. *Meteorology and Hydrology*. 2002;(10):68–93. (In Russ.)

7. Жильцова Е.Л., Анисимов О.А. О точности воспроизведения температуры и осадков на территории России глобальными климатическими архивами. *Метеорология и гидрология*. 2009;(10):79–89.

Zhiltsova Ye.L., Anisimov O.A. On the accuracy of reproduction of temperature and precipitation on the territory of Russia by global climate archives. *Meteorology and Hydrology*. 2009;(10):79–89. (In Russ.)

8. Гройсман П.Я., Богданова Э.Г., Алексеев В.А. и др. Влияние погрешности в измерениях снегопадов на суммы атмосферных осадков и их тренды по Северной Евразии. *Лед и снег*. 2014;54(2):29–43. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2014-2-29-43>

Groisman P.Ya., Bogdanova E.G., Alekseev V.A., et al. Influence of error in snowfall measurements on precipitation totals and their trends over Northern Eurasia. *Snow and Ice*. 2014;54(2):29–43. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2014-2-29-43>.

9. Кокорев В.А., Шерстюков А.Б. О метеорологических данных для изучения современных и будущих изменений климата на территории России. *Арктика. XXI век. Естественные науки*. 2015(2);5–23.

Kokorev V.A., Sherstyukov A.B. On meteorological data for studying current and future climate changes on the territory of Russia. *Arktika. XXI century. Natural Sciences*. 2015(2);5–23. (In Russ.)

10. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (Катцов В.М., ред.). СПб.: Научно-технические технологии; 2022. 676 с.

Third assessment report on climate change and its consequences over the territory of the Russian Federation (Kattsov V.M., ed.). Saint-Petersburg: Naukoemkie tehnologii; 2022. 676 p.

11. Kidd C., Huffman G., Maggioni V., et al. The global satellite precipitation constellation: current status and future requirements. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2021;102:E1844–E1861. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-00299.1>

12. Harris I., Osborn T.J., Jones P., et al. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Scientific Data*. 2020;7:109. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>

13. Месячные суммы осадков с устранением систематических погрешностей осадкомерных приборов (месячные данные). 2021. Режим доступа: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/select.xhtml> (дата обращения: 17.10.2023).

Monthly totals of precipitation with elimination of systematic errors of precipitation gauges (monthly data). 2021. Available at: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/select.xhtml> (accessed: 17.10.2023).

14. Ильин Б.М., Булыгина О.Н., Богданова Э.Г. Описание массива месячных сумм осадков, с устранением систематических погрешностей осадкомерных приборов. 2021. Режим доступа: <http://meteo.ru/data/506-mesyachnye-summy-osadkov-s-ustraneniem-sistematicheskikh-pogreshnostej-osadkomernykh-priborov#описание-массива-данных> (дата обращения: 12.10.2023).

Ilyin B.M., Bulygina O.N., Bogdanova E.G. Description of the dataset of monthly precipitation totals, with elimination of systematic errors of precipitation gauges. 2021. Available at: <http://meteo.ru/data/506-mesyachnye-summy-osadkov-s-ustraneniem-sistematicheskikh-pogreshnostej-osadkomernykh-priborov#описание-массива-данных> (accessed: 12.10.2023).

15. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3. Ч. 1. Метеорологические наблюдения на станциях. Л.: Гидрометеоиздат; 1985. 301 с.

Guidance for hydrometeorological stations and gauges. Issue 3, Part 1. Meteorological observations at stations. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1985. 301 p.

16. CRU TS v. 4.05. 2021. Available at: https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.05/cruts.2103051243.v4.05/pre/ (accessed: 10.10.2023).

17. CRU TS v. 4.06. 2022. Available at: https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.06/cruts.2205201912.v4.06/pre/ (accessed: 10.10.2023).

18. CRU TS v. 4.07. 2023. Available at: https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.07/cruts.2304141047.v4.07/pre/ (accessed: 10.10.2023).
19. Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agusti-Panareda A., et al. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*. 2021;13:4349–4383. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>
20. Rustemeier E., Hänsel S., Finger P., et al. GPCP Climatology Version 2022 at 0.25°: Monthly land-surface precipitation climatology for every month and the total year from rain-gauges built on GTS-based and historical data. 2022. https://doi.org/10.5676/DWD_GPCP/CLIM_M_V2022_025.
21. Becker A., Finger P., Meyer-Christoffer A., et al. A description of the global land-surface precipitation data products of the Global Precipitation Climatology Centre with sample applications including centennial (trend) analysis from 1901–present. *Earth System Science Data*. 2013;5(1):71–99. <https://doi.org/10.5194/essd-5-71-2013>.
22. NCEP-NCAR Reanalysis 1. 2023. Available at: <ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/wd51we/reanalysis-1/6hr/rotating/> (accessed: 12.12.2023).
23. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., et al. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1996;77(3):437–472. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYP>2.0.CO;2)
24. NOAA's Precipitation Reconstruction over Land (PREC/L). 2023. Available at: <https://downloads.psl.noaa.gov/Datasets/prec1/0.5deg/precip.mon.mean.0.5x0.5.nc> (accessed: 14.12.2003).
25. Chen M., Xie P., Jankowiak J.E., et al. Global Land Precipitation: A 50-yr Monthly Analysis Based on Gauge Observations. *Journal of Hydrometeorology*. 2002;(3): 249–266. DOI: 10.1175/1525-7541(2002)003<0249:GLPAYM>2.0.CO;2.
26. JRA-55: Japanese 55-year Reanalysis. 2023. Available at: <https://doi.org/10.5065/D60G3H5B> (accessed: 13.12.2023).
27. Kobayashi S., Ota Y., Harada Y., et al. The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*. 2015;93(1):5–48. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2015-001>.
28. RStudio: Integrated Development for R, v.2023.09.01 Build 494. 2023. RStudio, Inc., Boston, MA, USA. Available at: <https://posit.co/products/open-source/rstudio/> (accessed: 17.10.2023).
29. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2023. Available at: <https://www.R-project.org/> (accessed: 17.10.2023).
30. QGIS Development Team. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. 2023. Available at: <http://qgis.osgeo.org> (accessed: 12.12.2023).
31. Тананаев Н.И. Подбор оптимальной модели климатического реанализа по среднегодовой температуре воздуха для территории Республики Саха (Якутия). *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия «Науки о Земле»*. 2023;(2):88–101. <https://doi.org/10.25587/SVFU.2023.30.2.008>
- Tananaev N.I. Selection of the best-performing climate reanalysis model for the Sakha (Yakutia) Republic, based on mean annual air temperature. *Vestnik of North-Eastern Federal University Series «Earth Sciences»*. 2023;(2):88–101. (In Russ.) <https://doi.org/10.25587/SVFU.2023.30.2.008>
32. Sun H., Su F., Yao T., et al. General overestimation of ERA5 precipitation in flow simulations for High Mountain Asia basins. *Environmental Research Communications*. 2021;3(12):121003. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ac40f0>
33. Lavers D.A., Simmons A., Vamborg F., et al. An evaluation of ERA5 precipitation for climate monitoring. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2022;148(748):3152–3165. <https://doi.org/10.1002/qj.4351>
34. Xu X., Frey S.K., Boluwade A., et al. Evaluation of variability among different precipitation products in the Northern Great Plains. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2019;24:100608. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100608>
35. Serra Y.L., Rutledge S.A., Chudler K., et al. Rain-fall and convection in ERA5 and MERRA-2 over the Northern Equatorial Western Pacific during PISTON. *Journal of Climate*. 2023;36(3):845–863. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-22-0203.1>
36. Hassler B., Lauer A. Comparison of reanalysis and observational precipitation datasets including ERA5 and WFDE5. *Atmosphere*. 2021;12:1462. <https://doi.org/10.3390/atmos12111462>
37. Палеоклимат полярных областей Земли в голоцене. Большианов Д.Ю., Веркулич С.Р. (ред.). СПб.: ААНИИ, 2018. 204 с.
- Paleoclimate of the Earth polar regions in the Holocene*. Bolshiyanov D.Yu., Verkulich S.R. (eds.). Saint-Petersburg: Arctic and Antarctic Research Institute; 2018. 204 p.

Об авторе

ТАНАНАЕВ Никита Иванович, кандидат географических наук, заведующий лабораторией, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация; ведущий научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-2997-0169>, ResearcherID: J-3471-2012, Scopus Author ID: 12782200000, SPIN: 1859-8831, e-mail: tanni@s-vfu.ru

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

About the author

TANANAEV, Nikita Ivanovich, Cand. Sci. (Geogr.), Laboratory Head, Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation; Leading Researcher, Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-2997-0169>, ResearcherID: J-3471-2012, Scopus Author ID: 12782200000, SPIN: 1859-8831, e-mail: tanni@s-vfu.ru

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 05.02.2025

Поступила после рецензирования / Revised 10.02.2025

Принята к публикации / Accepted 20.02.2025



Оригинальная статья

Изменение геокриологических условий межаласий Центральной Якутии при прогнозируемом потеплении климата

В. А. Новоприезжая✉, А. Н. Федоров

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

✉schwarz999@mail.ru

Аннотация

В Центральной Якутии широко распространен ледовый комплекс, приуроченный к межаласному типу местности, формирование которого произошло в плейстоцене. В условиях глобального потепления климата актуально изучение реакции и устойчивости мерзлотных ландшафтов к климатическим изменениям в будущем. При нарушении условий теплообмена происходят разрушительные криогенные процессы, такие как термокарст и термоэрозия, в особенности при техногенных воздействиях. На территории исследования распространены аласы, образовавшиеся в основном в голоценовом оптимуме при протаивании ледового комплекса. Для составления прогнозных моделей и карты распространения температур грунтов при прогнозируемом потеплении климата проанализированы климатические данные семи метеостанций и теплофизические характеристики пород типичного для исследуемого района криолитологического разреза межаласья, произведена верификация моделей. Исследуемая область – хорошо дренируемые приводораздельные пространства лесных межаласий. Результаты моделирования отражают динамику температур и глубины протаивания ледового комплекса при потеплении климата по известным климатическим сценариям: при повышении средней годовой температуры воздуха на +2 °C/100 лет, +3 °C/100 лет, +4 °C/100 лет с учетом увеличения снежного покрова на 10 и 30 %, также без учета изменения количества осадков. По результатам моделирования, протаивание ледового комплекса может начаться при повышении средней годовой температуры воздуха на 4 °C с неизменным количеством осадков, при повышении на 3 °C с увеличением осадков на 10 % и при повышении на 2 °C с увеличением осадков на 30 %. Выделены два типа территорий по устойчивости к протаиванию ледового комплекса при климатических изменениях: неустойчивые и устойчивые. На участках неустойчивого типа протаивание ледового комплекса может начаться при увеличении средней годовой температуры воздуха на +3 °C.

Ключевые слова: межаласье, многолетнемерзлые грунты, ледовый комплекс, прогноз, моделирование, изменение климата

Финансирование. Работа выполнена в рамках проекта СО РАН «Криогенные процессы и формирование природных рисков освоения мерзлотных ландшафтов Восточной Сибири» (№ 122011400152-7).

Для цитирования: Новоприезжая В.А., Федоров А.Н. Изменение геокриологических условий межаласий Центральной Якутии при прогнозируемом потеплении климата. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(1):73–84. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-1-73-84>

Original article

Changes in geocryological conditions in interalas terrain under predicted climate warming, Central Yakutia

Varvara A. Novopriezzhaia✉, Alexander N. Fedorov

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

✉schwarz999@mail.ru

Abstract

Central Yakutia is distinguished by the widespread presence of highly ice-rich permafrost dating back to the Pleistocene epoch, commonly known as the Ice Complex. In the context of global climate warming, it is essential to evaluate the sensitivity and response of permafrost-dominated landscapes to projected climatic changes. The Ice Complex

sediments are primarily found in the interalas terrain type. Disruptions to the surface energy balance, particularly those associated with human activities, often lead to destructive cryogenic processes, such as thermokarst and thermal erosion. Alases are prevalent in the region, most of which formed during the Holocene Optimum as a result of the thawing of the Ice Complex. In this study, we analyzed climatic data from weather stations and the thermophysical characteristics of soil samples collected from interalas sites to develop predictive models and compile maps of future soil temperatures under projected climate warming scenarios. Moreover, we conducted model verification. The simulations were based on climatic data from seven meteorological stations and a cryolithological profile representative of the interalas terrain. The study area is a well-drained, forest-covered upland. The simulation results project the dynamics of ground temperatures and active layer thickness in the Ice Complex under three climate warming scenarios for the year 2100: an increase of +2 °C, +3 °C, and +4 °C per century, along with increases in snow cover of 10% and 30%, with no change in precipitation. The findings indicate that thawing of the Ice Complex will commence at a warming of 4 °C with no change in precipitation, at 3 °C with a 10% increase in precipitation, and at 2 °C with a 30% increase in precipitation. Additionally, we classified the terrain into two categories based on susceptibility to Ice Complex degradation due to climate change: unstable and stable. In unstable areas, thawing of the Ice Complex is projected to begin with a +3°C increase in mean annual air temperature.

Keywords: interalas terrain, permafrost, ice complex, prediction, modeling, climate change

Funding. This study was conducted within the framework of the SB RAS project “Cryogenic processes and the formation of natural risks in the development of permafrost landscapes in Eastern Siberia” (No. 122011400152-7).

For citation: Novopriyazhaya V.A., Fedorov A.N. Changes in geocryological conditions in interalas terrain under predicted climate warming, Central Yakutia. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(1):73–84. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-73-84>

Введение

Центральная Якутия представляет собой самую густонаселенную часть Республики Саха (Якутия). В районе сосредоточены многие важные центры промышленности и половина посевных площадей республики. Район находится в зоне сплошного распространения мерзлоты. По карте льдистости поверхностных отложений, в регионе развиты сильнольдистые грунты (объемная льдистость 0,40–0,60 д. ед.) [1], мощность ледового комплекса изменяется от 2–5 до 20–40 м, местами до 70 м [2, 3]. На территории исследования развиты аласы, представляющие собой замкнутые термокарстовые котловины, образовавшиеся в основном в голоцене при вытаивании подземных льдов и просадке грунтов межаласья. В настоящее время в Центральной Якутии аласами местами занято до 20 % всей площади [4]. На межаласье преобладают лиственничные леса с мохово-брусничным покровом.

Актуальность работы обусловлена необходимостью изучения устойчивости ледового комплекса и инженерных сооружений, расположенных в зоне их распространения, при современном потеплении климата. Под устойчивостью ландшафтов мы понимаем свойство сохранять свое состояние при внешнем воздействии, т. е. противостоять активизации экзогенных процессов и возвращаться в первоначальное состояние. С 1980-х годов наблюдается постоянное повышение средней годовой температуры воздуха Центральной Якутии. В настоящее время на нару-

шенных территориях и на безлесных участках в зоне средней тайги наблюдается образование просадочных термокарстовых форм рельефа. Также частыми явлениями становятся аварийные состояния линейных и площадных инженерных сооружений, что связано с деформациями грунтового основания при протаивании льдистых пород и снижением несущей способности грунтов, в первую очередь обусловленными изменением геокриологических условий, увеличением глубины сезонного протаивания и повышением температуры грунтов ледового комплекса, что безусловно влияет на инфраструктуру Центральной Якутии. Чуткий отклик мерзлоты на антропогенные нарушения и потепление климата предполагает постановку вопроса детального изучения устойчивости ледового комплекса. При деградации вечной мерзлоты парниковые газы, которые содержатся в плейстоценовых сильнольдистых породах, высвобождаясь в атмосферу, могут принести дополнительный вклад в потепление климата [5]. В последние годы потепление происходит за счет увеличения продолжительности периода положительных температур. Исследователи отмечают, что при теплом лете происходит более глубокое сезонное протаивание, а при холодном – соответственно глубина протаивания невелика [6, 7]. На основании анализа массива данных температур воздуха Центральной Якутии можно сказать, что средние месячные летние температуры практически не меняются, иногда наблюдаются превышения

июньских температур воздуха. Тепловое состояние ледового комплекса меняется только при многолетней тенденции повышения температур воздуха. Ранее авторами было произведено моделирование по теплым периодам в голоцене, которое показало, что климатические изменения в голоцене не являются прямой причиной возникновения аласов и образование последних обусловлено потеплением климата с дополнительными факторами [8].

Материалы и методы исследования

Тренд повышения средней годовой температуры воздуха в Центральной Якутии составляет 0,02–0,03 °C/год [9]. По предположениям М.И. Будыко [10] и М.К. Гавриловой [11], повышение средней годовой температуры воздуха в середине XXI века для Центральной Якутии и Сибири составит 1–4 °C. По мнению Климанова А.А. [12], повышение средней годовой температуры воздуха на этот период составит 1,5–4,5 °C. Годовое количество осадков в Сибири по сравнению с современными может увеличиться на 10–20 % [10]. Повышения средних годовых температур воздуха по сценариям семейства RCP (Representative Concentration Pathways) основаны на концентрации парниковых газов в атмосфере к 2100 году, где по RCP 2.6 повышение средней годовой температуры воздуха составит 0,2–1,8 °C, RCP 4.5 – 1,0–2,6, RCP 6.0 – 1,3–3,2, RCP 8.5 – 2,6–4,8 °C.

Моделирование производилось программным обеспечением для теплотехнических расчетов QFrost, произведенным на кафедре геокриологии геологического факультета МГУ, и Frost 3d – продуктом ООО «Симмейкерс», Беларусь и основано на решении одномерной задачи Стефана. Климатическое воздействие в моделях учитывалось через средние месячные и годовые температуры воздуха, средние месячные мощности и плотности снежного покрова, приведенные в научно-прикладном справочнике [13]. Высота и плотность снежного покрова пересчитаны в среднемесечные по среднедекадным значениям (рис. 1), по температурам воздуха произведена выборка характерных средних месячных температур по метеостанциям по общедоступным данным с сайта meteo.ru [14], по скорости ветра определен коэффициент теплообмена приземного воздуха на основе данных справочника [13]. Типичный литологический разрез сложен в верхней части покровными супесями и суглинками

до глубины 2,1–2,2 м, ниже вскрываются сильнольдистые грунты и повторно-жильные льды до глубины 15 м. Для каждого слоя были в зависимости от его плотности и влажности подобраны теплофизические характеристики: теплопроводность и теплоемкость в талом и мерзлом состояниях, теплота фазовых переходов, температура замерзания грунта. Современная температура грунтов межаласий Центральной Якутии около –2...–3 °C, глубина протаивания составляет 1,2–1,6 м.

Прогноз геокриологических условий производился до 2100 г., так как в основном циклы похолодания-потеплений прослеживались в голоцене продолжительностью 50–200 лет [12]. По Мельникову Е.С. [15], сильные дожди в середине лета способствует оттаиванию через конвективное потепление проницаемых почв, тогда как осенние дожди являются охлаждающим фактором, который подавляет сезонное оттаивание в течение следующего лета путем увеличения содержания льда в сезонно-талом слое. Однако влияние летних осадков относительно температуры грунтов незначительно в силу высокой инсоляции, характерной для Якутии [16], и не играет большую роль при долгосрочном прогнозе, потому что при моделировании летние осадки не учитывались. Основываясь на предположении М.И. Будыко [10] об увеличении осадков до 20 % и палеорекострукции Андреева А.А. [17] с увеличением осадков до 30 % в периоды потеплений голоцена, прогноз производился с учетом приращения по высоте снежного покрова на 10 и 30 %.

В силу того, что с 1980-х годов в Центральной Якутии наблюдается значимый тренд на потепление климата, то исходным годом начала моделирования был взят 1980-й. Это позволит верифицировать динамику изменения температур грунтов на настоящий момент времени. Для верификации прогноза были сопоставлены фактические и прогнозные расчеты на 2020 г. по данным мониторинговых полигонов Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН Юкэчи и Умайбыт. Расчетные модели показали сходимость с замеренными температурами грунтов и глубинами сезонного оттаивания [18].

Результаты и обсуждение

При тренде в +2 °C/100 лет протаивание кровли подземного льда, который вскрывается на глубине 2,1 м, происходит в Верхоянском Пере-

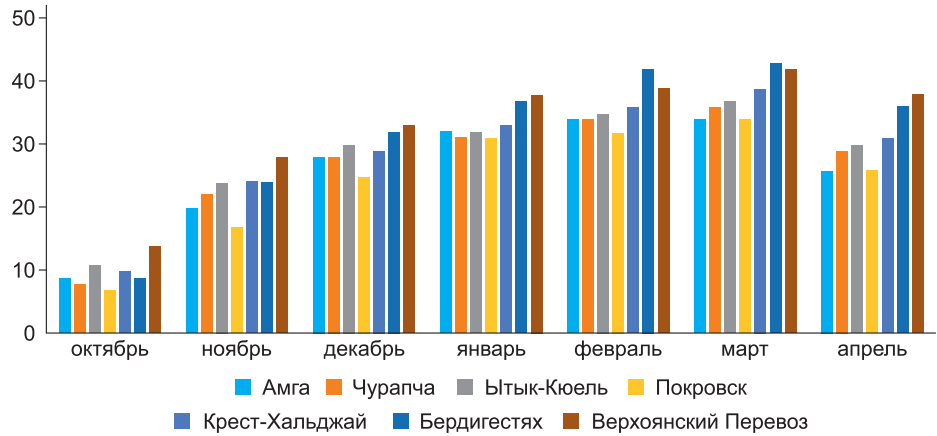


Рис. 1. График среднего многолетнего распределения снежного покрова (см) по месяцам

Fig. 1. Graph depicting the average long-term distribution of snow cover in centimeters by month

возе и Бердигестяхе приблизительно к 2093 г., в Крест-Хальджай при тренде +3 °C/100 лет в 2083 г., а в Покровске, Чурапче, Амге при тренде +4 °C/100 лет в 2085–2095 годах (табл. 1).

В условиях увеличения снежного покрова на 10 % протаивание кровли ледового комплекса на многоснежных участках Бердигестях и Верхоянский Перевоз при тренде +2 °C/100 лет начнется в 2068–2064 гг., на участках Покровск, Чурапча и Крест-Хальджай таяние подземного льда с трендом +3 °C/100 лет ожидается к 2083–2093 гг. При тренде +4 °C/100 лет и увеличении снежного покрова на 10 % таяние начнется в Верхоянском Перевозе и Бердигестяхе в 2051–2056 гг., в Крест-

Хальджай в 2071 г., в Покровске, Чурапче, Амге в 2076–2078 гг., в Ытык-Кюеле и Амге в районе 2085–2087 гг.

При тренде +4 °C/100 лет и приращении снега на 30 % глубина протаивания достигнет горизонта подземного льда к 2036–2041 гг. в многоснежных районах, как Бердигестях, Верхоянский Перевоз, Крест-Хальджай, а на остальных участках к 2050–2061 гг.

Результаты моделирования в виде температуры грунтов на глубине подошвы слоя годовых колебаний 15 м и глубине протаивания при различных трендах изменения средней годовой температуры воздуха и увеличении мощности

Таблица 1

Год достижения глубиной протаивания кровли ледового комплекса

Table 1

The year when the active layer depth reaches the top of the Ice Complex

Условия, °C	Покровск	Чурапча	Амга	Ытык-Кюель	Крест-Хальджай	Верхоянский Перевоз	Бердигестях
При изменении средней годовой температуры воздуха без снега							
При +2	–	–	–	–	–	2093	2093
При +3	–	–	–	–	2083	2076	2075
При +4	2088	2095	2085	–	2071	2067	2065
При росте +10 % снежного покрова							
При +2	–	–	–	–	–	2068	2064
При +3	2089	2093	–	–	2083	2060	2056
При +4	2076	2078	2085	2087	2071	2056	2051
При росте +30 % снежного покрова							
При +2	2067	2070	2061	2083	2045	2044	2039
При +3	2058	2061	2054	2069	2043	2041	2037
При +4	2053	2055	2050	2061	2041	2040	2036

Таблица 2

Прогнозные геокриологические условия

Table 2

Predicted geocryological conditions

Условия, °С	Амга		Бердигестях		Верхоянский Перевоз		Крест-Хальджай		Покровск		Чурапча		Ытык-Кюель	
	t ₀	ξ	t ₀	ξ	t ₀	Ξ	t ₀	ξ	t ₀	ξ	t ₀	ξ	t ₀	ξ
	-3,0	1,4	-2,5	1,6	-2,9	1,5	-2,7	1,6	-2,5	1,6	-2,9	1,4	-3,0	1,4
При изменении средней годовой температуры воздуха без снега														
При +2	-2,4	1,6	-1,8	2,3	-1,9	2,3	-1,9	2,0	-2,1	1,6	-2,2	1,5	-2,3	1,6
При +3	-2,1	1,8	-1,5	4,5	-1,8	3,3	-1,8	2,6	-2,0	2,0	-2,1	1,9	-2,1	1,8
При +4	-1,8	2,6	-1,4	5,0	-1,6	4,3	-1,7	3,5	-1,9	2,5	-2,0	2,8	-1,8	2,7
При росте +10 % снежного покрова														
При +2	-2,0	1,8	-1,6	3,0	-1,8	2,5	-1,9	1,9	-2,0	1,8	-2,1	1,8	-2,0	1,7
При +3	-1,7	2,8	-1,5	4,8	-1,7	4,4	-1,7	3,2	-1,7	2,5	-1,8	2,5	-1,7	2,3
При +4	-1,6	4,9	-1,4	6,0	-1,5	5,2	-1,5	5,3	-1,4	4,8	-1,6	4,6	-1,6	4,1
При росте +30 % снежного покрова														
При +2	-1,8	3,7	-1,4	5,1	-1,6	5,4	-1,6	4,8	-1,4	3,2	-1,7	3,7	-1,8	2,8
При +3	-1,7	5,3	-1,4	6,4	-1,5	6,1	-1,5	5,6	-1,4	4,8	-1,6	5,3	-1,7	4,9
При +4	-1,5	6,7	-1,3	7,2	-1,4	6,7	-1,4	6,3	-1,3	6,3	-1,5	6,7	-1,5	6,2

Примечание. t₀ – температура грунтов на глубине нулевых теплооборотов, 15 м, °С, ξ – глубина протаивания, м.

Note. t₀ – temperature of the soil at a depth of zero heat rotations, 15 m, °C, ξ – depth of thawing, m.

снежного покрова приведены в табл. 2, пространственное распределение прогнозных температур грунтов в Центральной Якутии показано на картах (рис. 2–4). При определении изменения средней годовой температуры воздуха без учета повышения количества осадков достижение протаиванием произойдет к 2100 г. при тренде +3 °С/100 лет на участках Крест-Хальджай, Покровск, Верхоянский Перевоз, Бердигестях. При повышении средней годовой температуры воздуха на +4 °С протаивание льдистых пород прогнозируется повсеместно по всем участкам, температуры пород на глубине годовых теплооборотов составят -1,4...-1,8 °С.

При приращении снежного покрова на 10 % и при повышении средней годовой температуры воздуха на 2 градуса начнется протаивание льдистых грунтов в Покровске, Верхоянском Перевозе и Бердигестях. По всем участкам вероятное протаивание прогнозируется при повышении на 3 градуса, температуры пород на глубине 15 м составят -1,5...-1,8 °С.

При увеличении снежного покрова на 30 % протаивание льдистых грунтов предположительно ожидается при повышении средней годовой температуры на 2 градуса по всем участкам, температуры грунтов на глубине годовых теплооборотов (15 м) составят -1,4...-1,7 °С. Резуль-

таты моделирования подтверждают заключение М.К. Гавриловой [19] о границе распространения сплошной мерзлоты по границе средней годовой температуры воздуха выше -8 °С.

Выделены два типа зон по вероятной устойчивости ледового комплекса. Первая зона – это участки, где глубина протаивания достигает кровли льдистых грунтов, – Бердигестях, Покровск, Крест-Хальджай, Верхоянский Перевоз. Более устойчивые районы к потеплению и сопровождающему увеличению осадков – Чурапча, Амга и Ытык-Кюель с маломощным снежным покровом и низкими средними годовыми температурами воздуха. Максимальные изменения глубины протаивания при всех сценариях – на участках Верхоянский Перевоз и Бердигестях.

По прогнозным моделям наибольшее протаивание предполагается в Бердигестях, что объясняется большей мощностью снежного покрова и теплой зимой. Бердигестях обладает средней годовой температурой воздуха -11,0 °С, а снежный покров в начале зимы в декабре составляет 32 см, что превышает средние значения по Центральной Якутии. Его зимние температуры воздуха выше температур Верхоянского Перевоза.

Верхоянский Перевоз расположен близ Предверхоянского краевого прогиба, что обуславливает большее количество осадков по сравнению

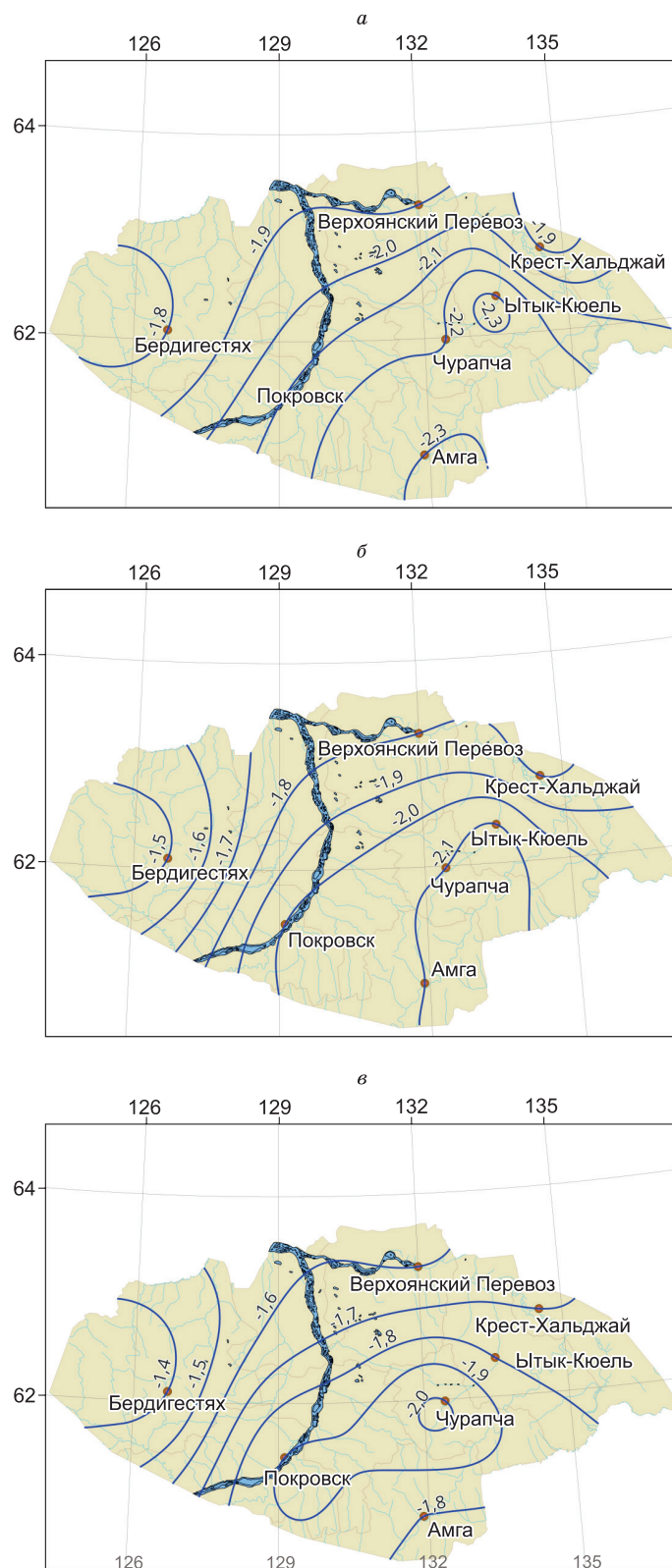


Рис. 2. Карта-схема температур грунтов межаласий на 2100 год при трендах: а – +2 °C/100 лет, б – +3 °C/100 лет, в – +4 °C/100 лет

Fig. 2. Schematic maps of soil temperatures in interalas terrain for the year 2100, illustrating trends: а) +2 °C/100 years, б) +3 °C/100 years, в) +4 °C/100 years

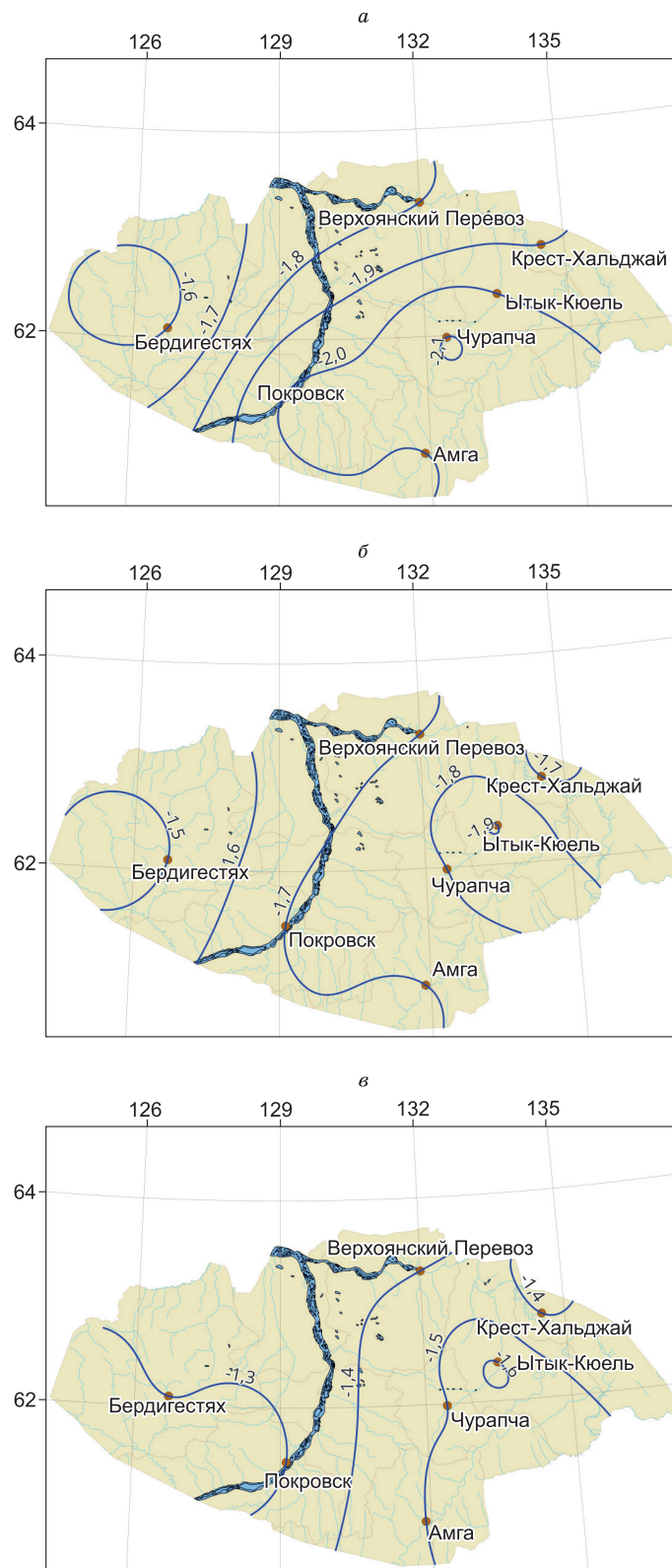


Рис. 3. Карта-схема температур грунтов межаласий на 2100 год с увеличением снежного покрова на 10 % при трендах: а – +2 °C/100 лет, б – +3 °C/100 лет, в – +4 °C/100 лет

Fig. 3. Schematic maps of soil temperatures in interalas terrain for the year 2100, reflecting 10% increase in snow cover along with trends: а) +2 °C/100 years б) +3 °C/100 years в) +4 °C/100 years

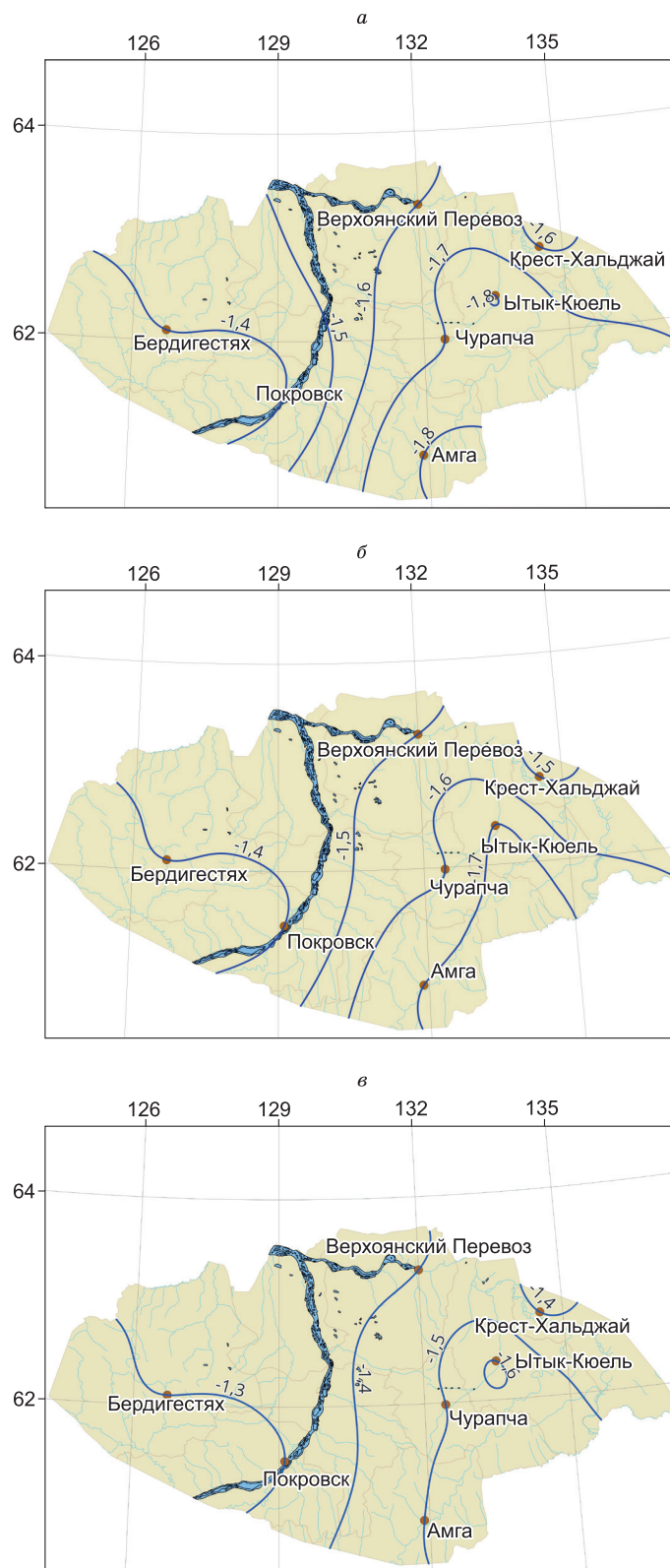


Рис. 4. Карта-схема температур грунтов межлассий на 2100 год с увеличением снежного покрова на 30 % при трендах: *а* – +2 °C/100 лет, *б* – +3 °C/100 лет *в* – +4 °C/100 лет

Fig. 4. Schematic maps of soil temperatures in inter-lake terrain for the year 2100, reflecting 30% increase in snow cover along with trends: *a*) +2 °C/100 years *б*) +3 °C/100 years *в*) +4 °C/100 years

с другими районами Центральной Якутии. Участок Покровск обладает наиболее высокой средней температурой воздуха $-10,2^{\circ}\text{C}$ по сравнению с другими и протаивание кровли ледового комплекса начинается при потеплении на $+3^{\circ}\text{C}$, т. е. при средней годовой температуре $-7,2^{\circ}\text{C}$.

Зоны вероятно неустойчивых участков – Покровск Хангаласского улуса, Верхоянский Перевоз Усть-Алданского улуса и Бердигестях Горного улуса районы обладают рельефом с уклоном, т. е. имеется естественный дренаж, и вода, образующаяся при протаивании льдистых грунтов, будет стекать вниз по склону. Для развития термокарста более подходят плоские и слабонаклонные участки [4], и можно предположить фрагментарное развитие термопросадочных процессов на неустойчивых участках с расчлененным рельефом.

С.М. Фотиев [20] произвел районирование криолитозоны России по степени возможных изменений температурного поля грунтов к 2050 году при повышении средней годовой температуры воздуха на 2 и 4°C . Он сделал вывод, что смещения сплошного типа распространения мерзлоты не произойдет и для этого требуются сотни и тысячи лет, для северных областей криолитозоны могут повыситься абсолютные значения средней годовой температуры грунтов без заметной перестройки температурного поля мерзлой толщи.

Прогнозные модели в данном исследовании показывают более значительные изменения геокриологических условий, чем модели деградации многолетнемерзлых пород Центральной Якутии при потеплении климата В.А. Иванова и И.И. Рожина [21]. В их расчетах через 50 лет глубина сезонно-талого слоя при темпе потепления климата $2^{\circ}\text{C}/100$ лет увеличится на 30 см, $4^{\circ}\text{C}/100$ лет – на 50 см, далее начинает формироваться надмерзлотная таликовая зона, и при темпе $2^{\circ}\text{C}/100$ лет деградация многолетнемерзлой толщи начнется через 120 лет и будет иметь скорость 12 м/100 лет, а при $4^{\circ}\text{C}/100$ лет деградация многолетнемерзлой толщи начнется через 60 лет со скоростью 15 м/100 лет. При этом температура грунтов на глубине 15 м не меняется через 100 лет при тренде $2^{\circ}\text{C}/100$ лет, но при тренде $4^{\circ}\text{C}/100$ лет за 100 лет примерно повышается на $0,5^{\circ}\text{C}$.

В.Т. Балобаев и др. [22] произвели прогноз изменения температурного поля в районе г. Якутск на период 1960–2200 гг. В этой работе они предположили, что температура пород на 20 м достиг-

нет в 2025 г. $-1,3^{\circ}\text{C}$, 2050 г. $-1,9^{\circ}\text{C}$, 2105 г. $-1,5^{\circ}\text{C}$, 2150 г. $-1,5^{\circ}\text{C}$ и в 2190 г. $-1,4^{\circ}\text{C}$. Разница результатов их прогноза и приведенного в нашей работе объясняется различием исходных данных и граничных условий, и на 2024 год прогноз не действителен, фактические температуры грунтов ниже прогнозных.

По Мелешко В.П. [23], в Средней Сибири максимальные отклонения глубины протаивания от современных составят 100–120 см в середине XXI века.

При повышении средней годовой температуры воздуха на 4°C по оценкам А.В. Павлова и Г.Ф. Грависа [24], В.Е. Романовского и др. [25] прогнозируются существенные изменения геокриологических условий верхней границы многолетнемерзлой толщи, что согласуется с полученными результатами моделирования.

При расчетах не учитывалось возникновение термоэрозионных процессов за счет фильтрационных процессов и механического воздействия воды. В основном суглинки обладают водоупорными свойствами. Но в низинах, где застаиваются поверхностные воды, неизбежно развитие термокарста, дальнейший расчет возможен только при подробном рассмотрении условий накопления воды. Прогноз с учетом накопления вод возможен только на локальных участках, так как рельеф и скорость накопления для каждого случая индивидуальны.

При потеплении климата и протаивании льдистых грунтов не исключается саморегуляция ландшафтов, обусловленная защитной реакцией на изменения климатических условий в виде увеличения продуктивности растительного покрова в коренных фациях и восстановительных сукцессиях из-за увеличения влажности верхних горизонтов, что является трудновыполнимой задачей моделирования при подборе теплофизических характеристик напочвенных покровов и периода их смены. О.А. Анисимов и др. [26] указывал на недостаточную изученность климатообусловленной динамики растительного покрова.

На основании анализа проведенных исследований мы резюмируем следующее:

1. Протаивание льдистых грунтов на лесных межаласях начнется к 2093 году в многоснежных Бердигестях и Верхоянском Перевозе, а в Покровске, Амге, Чурапче, Ытык-Кюеле и Крест-Хальджае в 2085–2093 гг. при тренде повышения средней годовой температуры воздуха $+3^{\circ}\text{C}/100$ лет

и +4 °C/100 лет без изменения высоты снежного покрова. В случае роста средней годовой температуры воздуха +4 °C/100 лет и увеличения высоты снежного покрова на 30 % протаивание льдистых грунтов ожидается к 2036–2041 гг. в Бердигестях и Верхоянском Перевозе, а в Покровске, Амге, Чурапче, Ытык-Кюеле и Крест-Хальджай в 2050–2061 гг.

2. При самом негативном рассматриваемом в работе тренде повышения средней годовой температуры воздуха +4 °C/100 лет с увеличением высоты снежного покрова на 30 % прогнозная глубина протаивания в Центральной Якутии составит к 2100 году 5,8–6,6 м, а температуры грунтов –1,3...–1,5 °C.

Заключение

На основании анализа результатов, полученных при математическом моделировании, выявлено, что при повышении средней годовой температуры воздуха на 4 °C без изменения количества осадков, при повышении на 3 °C с увеличением снежного покрова на 10 % и при повышении средней годовой температуры на 2 °C с увеличением снежного покрова на 30 % ледовый комплекс предположительно будет повсеместно деградировать. В неустойчивой зоне (Покровск, Бердигестях, Верхоянский Перевоз) поверхностные воды хорошо дренируются, но в низинах, где скапливаются воды, вероятность развития термокарста весьма высокая. Развитию термокарстового рельефа способствуют плоские поверхности, которые относятся в основном к выделенному устойчивому типу. Возрастание биомассы при увлажнении приповерхностного слоя, что меняет снегонакопление и играет теплоизоляционную роль, достаточно не оценено. В дальнейших работах планируется производить расчеты с учетом образования нового защитного слоя при промерзании протаявших переувлажненных пород сезонно-талого слоя в период малоснежных холодных зим. Но задача осложняется тем, что малоснежные зимы в Центральной Якутии не повторяются циклично, по архивным данным за последние 90 лет, они могут повторяться через 3–7 либо через 9–20 лет. При этом с начала потепления 1980-х годов подобные условия редкое явление, что вероятней всего связано с ослаблением влияния Азиатского антициклона. Результаты прогнозного моделирования могут использоваться при строительстве инженерных сооружений и сельскохозяйственном освоении

района для предупреждения возникновения опасных криогенных процессов.

Список литературы / References

1. Shestakova A.A., Fedorov A.N., Torgovkin Y.I., et al. Mapping the main characteristics of permafrost on the basis of a permafrost-landscape map of Yakutia using GIS. *LAND*. 2021;10(5):462; <https://doi.org/10.3390/land10050462>
2. Соловьев П.А. *Криолитозона северной части Лено-Алданского междуречья*. М.: Изд-во АН СССР; 1959. 144 с.
3. Solovyov P.A. *Cryolithozone of the northern part of the Lena-Aldan interfluvium*. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1959. 144 p.
4. Иванов М.С. *Криогенное строение четвертичных отложений Лено-Алданской впадины*. Новосибирск: Наука; 1984. 132 с.
5. Ivanov M.S. *Cryogenic structure of quaternary sediments of the Lena-Aldan depression*. Novosibirsk: Nauka, 1984. 132 p. (In Russ.)
6. Босиков Н.П. Аласность Центральной Якутии. В кн.: Некрасов И.А., Климовский И.В. (ред.). *Геокриологические условия в горах и на равнинах Азии*. Якутск: Институт мерзлотоведения; 1978. С. 113–118.
7. Bosikov N.P. Alasnost of Central Yakutia. In: Nekrasov I.A., Klimovskiy I.V. (eds.) *Geocryological conditions in the mountains and plains of Asia*. Yakutsk: Permafrost Institute; 1978, pp. 113–118. (In Russ.)
8. Брушков А.В. Глобальные изменения окружающей среды, реакция криолитозоны и устойчивость инженерных сооружений. *Инженерные изыскания*. 2015;(14):14–26.
9. Brushkov A.V. Global environmental changes, cryolithozone reaction and sustainability of engineering structures. *Engineering survey*. 2015;(14):14–26. (In Russ.)
10. Hinkel K.M., Nelson F.E., Klene A.E., Bell J.H. The urban heat island in winter at Barrow, Alaska. *International Journal of Climatology*. 2003;23(15). <https://doi.org/10.1002/joc.971>.
11. Romanovsky V. E., Osterkamp T.E. Thawing of the active layer on the Coastal Plain of the Alaskan Arctic. *Permafrost and Periglacial Processes*. 1997;(8):1–22.
12. Новоприезжая В.А., Федоров А.Н. Реконструкция палеотемператур грунтов ледового комплекса Центральной Якутии в голоцене. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(2):224–234. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-224-234>.
13. Novopriezzaya V.A., Fedorov A.N. Reconstruction of the paleotemperature of the Central Yakutia Ice Complex during the Holocene period. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(2):224–234. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-224-234>.
14. Скачков Ю.Б. Динамика изменения среднегодовой температуры воздуха в Республике Саха Якутия за последние 50 лет. В кн.: *Труды IX международного симпозиума «Баланс углерода, воды и энергии и кли-*

мат бореальных и арктических регионов с особым акцентом на восточную Евразию», г. Якутск, 1–4 ноября 2016 года. Нагоя: Изд-во Университета Нагоя; 2016. С. 208–211.

Skachkov Yu.B. Dynamics of change in average annual air temperature in the Republic of Sakha-Yakutia over the past 50 years. In: *Proceedings of the 9th International Symposium "Carbon, Water, and Energy Balance and Climate of Boreal and Arctic Regions with Special Emphasis on Eastern Eurasia"*, Yakutsk, November 1–4, 2016. Nagoya: Nagoya University Press; 2016, pp. 208–211. (In Russ.)

10. Будыко М.И. Климат конца XX века. *Метеорология и гидрология*. 1988;(10):5–15.

Budyko M.I. Climate of the late 20th century. *Meteorology and hydrology*. 1988;(10):5–15. (In Russ.)

11. Гаврилова М.К. Предстоящие изменения климата и вечная мерзлота. В кн.: *Рациональное природопользование в криолитозоне*. М.: Наука; 1992. С. 8–12.

Gavrilova M.K. Upcoming climate changes and permafrost. In: *Rational Nature Management in the Cryolithozone*. Moscow: Nauka; 1992, pp. 8–12. (In Russ.)

12. Климанов В.А. Палеоклимат Северной Евразии при повышении среднеглобальной температуры на 0,6–0,8 °C и менее. В кн.: Величко А.А. (ред.) *Климаты и ландшафты Северной Евразии в условиях глобального климата. Ретроспективный анализ и сценарии*. Вып. III. М.: ГЕОС; 2010. С. 70–86.

Klimanov V.A. Paleoclimate of Northern Eurasia with an increase in the average global temperature by 0.6–0.8°C. In: Velichko A.A. (ed.) *Climates and landscapes of Northern Eurasia under conditions of global warming. Retrospective analysis and scenarios. Issue 3*. Moscow: GEOS; 2010, pp. 70–86. (In Russ.)

13. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Выпуск 24, часть II, IV. Ленинград: Гидрометеониздат; 1989. 607 с.

Scientific and applied handbook on the climate of the USSR. Issue 24, part II, IV. Leningrad: Hydrometeorological Publishing House; 1989. 607 p. (In Russ.)

14. Веселов В.М., Прибыльская И.Р., Мирзеабасов О.А. Специализированные массивы для климатических исследований. Режим доступа: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index1.xhtml>

Veselov V.M., Pribylskaya I.R., Mirzeabasov O.A. Specialized arrays for climate research. Available at: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index1.xhtml>

15. Melnikov E.S., Leibman M.O., Moskalenko N.G., Vasiliev A.A. Active-layer monitoring in the Cryolithozone of West Siberia. *Polar Geography*. 2004;28(4):267–285. <https://doi.org/10.1080/789610206>

16. Павлов А.В., Малкова Г.В. Мелкомасштабное картографирование трендов современных изменений температуры грунтов на Севере России. *Криосфера Земли*. 2009;13(4):32–39.

Pavlov A.V., Malkova G.V. Small-scale mapping of trends in modern soil temperature changes in the North of Russia. *Earth's Cryosphere*. 2009;13(4):32–39. (In Russ.)

17. Андреев А.А. История растительности и климата Центральной Якутии в голоцене и позднеледниковье. В кн.: *Материалы международной конференции «Озера холодных регионов». Ч.4: Вопросы палеоклиматологии, палеолимнологии и палеоэкологии*. Якутск: ЯГУ им. М.К. Аммосова; 2000. С. 15–19.

Andreev A.A. History of vegetation and climate of Central Yakutia in the Holocene and Late Glacial period. In: *Proceedings of the international conference "Lakes of cold regions". Part 4: Issues of paleoclimatology, paleolimnology and paleoecology*. Yakutsk, Yakut State University; 2000, pp. 15–19. (In Russ.)

18. Новоприезжая В.А., Федоров Н.А. Моделирование температурного режима грунтов межальсы Центральной Якутии на примере полигона Умайбыт. В кн.: *Материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 60-летию образования Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН «Устойчивость природных и технических систем в криолитозоне, г. Якутск, 28–30 сентября 2020 года»*. Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН; 2020. С. 142–145.

Novopriezzaya V.A., Fedorov N.A. Modeling of the soil temperature regime in the Central Yakutia interfluvium using the Umaibyt landfill as an example. In: *Proceedings of the All-Russian conference with international participation dedicated to the 60th anniversary of the formation of the P.I. Melnikov Permafrost Institute SB RAS "Sustainability of natural and technical systems in the cryolithozone, September 28–30, 2020"*. Yakutsk: Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2020, pp. 142–145.

19. Гаврилова М.К. *Современный климат и вечная мерзлота на континентах*. Новосибирск: Наука; 1981. 112 с.

Gavrilova M.K. *Modern climate and permafrost on continents*. Novosibirsk: Nauka; 1981. 112 p.

20. Фотиев С.М. Возможные изменения геотемпературного поля криогенной области России при глобальном изменении климата. *Криосфера Земли*. 2000;4(3):14–29.

Fotiev S.M. Possible changes in the geotemperature field of the cryogenic region of Russia under global climate change. *Earth's Cryosphere*. 2000;4(3):14–29.

21. Иванов В.А., Рожин И.И. Моделирование деградации многолетнемерзлых пород при потеплении климата в условиях Центральной Якутии на ближайшие 300 лет. *Современные наукоемкие технологии*. 2021;(10):41–47.

Ivanov V.A., Rozhin I.I. Modeling of permafrost degradation during climate warming in Central Yakutia for the next 300 years. *Modern Scientific Technologies*. 2021;(10):41–47. (In Russ.)

22. Балобаев В.Т., Скачков Ю.Б., Шендер Н.И. Прогноз изменения климата и мощности мерзлых пород Центральной Якутии до 2200 года. *География и природные ресурсы*. 2009;(2):50–56.

Balobaev V.T., Skachkov Yu.B., Shender N.I. Forecast of climate change and thickness of frozen rocks in Central Yakutia up to 2200. *Geography and Natural Resources*. 2009;(2):50–56. (In Russ.)

23. Мелешко В.П., Катцов В.М., Говоркова В.А. и др. Антропогенные изменения климата в XXI веке в Северной Евразии. *Метеорология и гидрология*. 2004;(7):5–26.

Meleshko V.P., Kattsov V.M., Govorkova V.A., et al. Anthropogenic climate change in the 21st century in Northern Eurasia. *Meteorology and hydrology*. 2004;(7):5–26. (In Russ.)

24. Павлов А.В., Гравис Г.Ф. Вечная мерзлота и современный климат. *Природа*. 2000;(4):10–18.

Pavlov A.V., Gravis G.F. Permafrost and modern climate. *Priroda*. 2000;(4):10–18. (In Russ.)

25. Romanovsky V.E., Kholodov A.L., Marchenko S.S., et al. Thermal state and fate of permafrost in Russia: first results of IPY. In: Kane D.L., Hinkel K.M. (eds.) *Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost, Vol. 2, Fairbanks, Alaska, 28 June–3 July 2008*. Fairbanks: Institute of Northern Engineering, University of Alaska Fairbanks; 2008, pp. 1511–1518.

26. Анисимов О.А., Жирков А.Ф., Шерстюков А.Б. Современные изменения криосферы и природной среды в Арктике. *Арктика XXI век*. Естественные науки. 2015;(2):24–47.

Anisimov O.A., Zhirkov A.F., Sherstyukov A.B. Current changes in cryosphere and environment in the Arctic. *Arctic XXI century*. *Natural sciences*. 2015;(2):24–47. (In Russ.)

Об авторах

НОВОПРИЕЗЖАЯ Варвара Андреевна, младший научный сотрудник, аспирант, Институт мерзлотоведения им П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-4632-9840>, ResearcherID: AER-2270-2022, Scopus Author ID: 57219963224, SPIN: 4245-5312, e-mail: schwarz999@mail.ru

ФЕДОРОВ Александр Николаевич, доктор географических наук, главный научный сотрудник, заместитель директора по науке, Институт мерзлотоведения им П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-4016-2149>, ResearcherID: K-2478-2016, Scopus Author ID: 22957332600, SPIN: 6083-1651, e-mail: fedorov@mpi.ysn.ru

Вклад авторов

Новоприезжая В.А. – разработка концепции, методология, верификация данных, проведение исследования, администрирование данных, создание черновика рукописи, редактирование рукописи, визуализация; **Федоров А.Н.** – разработка концепции, редактирование рукописи, руководство исследованием, администрирование проекта, получение финансирования

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

NOVOPRIEZZHAYA, Varvara Andreevna, Junior Researcher, Post-Graduate Student, Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-4632-9840>, ResearcherID: AER-2270-2022, Scopus Author ID: 57219963224, SPIN: 4245-5312, e-mail: schwarz999@mail.ru

FEDOROV, Alexander Nikolaevich, Dr. Sci. (Geogr.), Chief Researcher, Deputy Director for Science, Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-4016-2149>, ResearcherID: K-2478-2016, Scopus Author ID: 22957332600, SPIN: 6083-1651, e-mail: fedorov@mpi.ysn.ru

Authors' contribution

Novopriezzhaya V.A. – conceptualization, methodology, validation, investigation, data curation, writing original draft, writing – review & editing, visualization; **Fedorov A.N.** – conceptualization, writing – review & editing, supervision, project administration, funding acquisition

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 12.02.2025

Поступила после рецензирования / Revised 14.03.2025

Принята к публикации / Accepted 20.03.2025

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Экология

УДК 581.54

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-1-85-96>



Оригинальная статья

Климатический отклик радиального роста лиственницы Каяндера и сосны обыкновенной в Центральной Якутии

Чжан Сяохун^{✉,1}, А. Н. Николаев¹, А. Арсак², А. И. Колмогоров^{1,2},
М. С. Васильев³, Л. А. Пестрякова¹

¹Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация

²Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация

³Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

✉z461306425@gmail.com

Аннотация

Изменение климата, выражающееся в росте температурных колебаний, динамике в условиях выпадения осадков и увлажнения почв, может существенно повлиять на экосистемы, которые испытывают как недостаток, так и избыток влаги. Даже небольшие изменения сумм осадков и температуры воздуха способны значительно сказаться на росте деревьев. В данной работе рассматриваются статистические параметры ширины годовичных колец и результаты дендроклиматического анализа лиственницы (*Larix cajanderi* Mayr.) и сосны (*Pinus sylvestris* L.), произрастающих в зоне распространения сплошной многолетней мерзлоты. Лесные участки, на которых собраны образцы лиственницы и сосны, находятся вблизи села Маган и поселка городского типа Нижний Бестях в центральной части Республики Саха (Якутия). Древесные растения отличаются продолжительным жизненным циклом, годовичные кольца способны сохранять информацию об их росте. Этот важный ресурс позволяет получать ценные сведения о климате и экологических изменениях в данной местности. Чтобы понять, как деревья реагируют на изменения климата, были рассчитаны коэффициенты корреляции Пирсона между шириной годовичных колец деревьев и среднемесячными значениями температуры воздуха, суммой осадков за год, а также индексом засушливости SPEI при использовании данных метеостанции Якутск. Для выявления реакции различных древесных пород на изменения климата за последние 30 лет каждый год рассматривался как отдельный период. Предполагаем, что температура воздуха, которая имеет тенденцию к повышению, является одним из ограничивающих факторов, влияя на осадки и засушливые периоды. Из-за недостатка влаги в виде дождей древесные породы испытывают трудности. В основном они получают влагу из активного слоя многолетнемерзлых пород, который аккумулирует осенние осадки предыдущего года. В целом наблюдается отрицательный отклик на повышение температуры воздуха в приземном слое атмосферы. С одной стороны, это свидетельствует о том, что радиальный рост лиственницы и сосны снижается, с другой – древесные виды адаптируются к изменяющимся климатическим условиям в центральной части Якутии.

Ключевые слова: лиственница Каяндера, сосна обыкновенная, хронология ширины годовичных колец, климатический отклик, Восточная Сибирь, Якутия

Финансирование. Работа выполнена в рамках научного проекта государственного задания Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова (№ FSRG-2023-0027) и базового бюджетного проекта Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН (№ FUFU-2021-0003).

Благодарности. Авторы выражают глубокую благодарность аспирантам К.В. Акулининой и В.В. Агаповой из лаборатории комплексных исследований динамики лесов Евразии Сибирского федерального университета (г. Красноярск; FSRZ-2020-0014) за научную и экспериментальную помощь, а также китайскому коллеге Сунь Юнлуну за помощь в полевых работах.

Для цитирования: Чжан С., Николаев А.Н., Арсак А., Колмогоров А.И., Васильев М.С., Пестрякова Л.А. Климатический отклик радиального роста лиственницы Каяндера и сосны обыкновенной в Центральной Якутии. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(1):85–96. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-1-85-96>

Original article

Climate response in radial growth of *Larix cajanderi* and *Pinus sylvestris* in Central Yakutia

Zhang Xiaohong^{✉1}, Anatoly N. Nikolaev¹, Alberto Arzac², Alexey I. Kolmogorov^{1,2},
Mikhail S. Vasiliev³, Ludmila A. Pestryakova¹

¹Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

²Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

³Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

[✉]z461306425@gmail.com

Abstract

Climate change, characterized by increased temperature fluctuations and alterations in precipitation and soil moisture conditions, can significantly impact ecosystems that experience both moisture deficits and excesses. Even small changes in precipitation and air temperature can significantly affect tree growth. This paper examines the statistical parameters of the width of annual rings and the results of dendroclimatic analysis of larch (*Larix cajanderi* Mayr.) and pine (*Pinus sylvestris* L.) growing in the zone of continuous permafrost. The forest areas where larch and pine samples were collected are located near the village of Magan and the urban-type settlement of Nizhny Bestyakh in the central part of the Republic of Sakha (Yakutia). Woody plants are characterized by a long-life cycle, the annual rings of which are able to store information about their growth. This important resource allows obtaining valuable information about the climate and environmental changes in a given area. To understand how trees respond to climate change, Pearson correlation coefficients were calculated between the width of tree rings and average monthly air temperature, annual precipitation, and the SPEI aridity index using data from the Yakutsk weather station. To identify the response of different tree species to climate change over the past 30 years, each year was considered as a separate period. We assume that air temperature, which tends to increase, is one of the limiting factors that affects precipitation and dry periods. Due to the lack of moisture in the form of rain, tree species experience difficulties. They mainly receive moisture from the active layer of permafrost, which accumulates autumn precipitation of the previous year. Overall, we observe a negative response to the increase in air temperature in the surface layer of the atmosphere. On one hand, this suggests a decline in the radial growth of larch and pine; on the other hand, tree species are adapting to the changing climatic conditions in the central region of Yakutia.

Keywords: *Larix cajanderi*, *Pinus sylvestris*, tree-ring width chronology, climate response, East Siberia, Yakutia

Funding. This study was conducted within the framework of the scientific project associated with the state assignment of Ammosov North-Eastern Federal University (No. FSRG-2023-0027) and the basic budgeted project of the Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (No. FUFU-2021-0003).

Acknowledgements. The authors express their sincere gratitude to student K.V. Akuliniina and V.V. Agapova from the Laboratory of Complex Studies of Eurasian Forest Dynamics at the Siberian Federal University (Krasnoyarsk; FSRZ-2020-0014) for their invaluable scientific and experimental contributions. Additionally, they acknowledge the support of their Chinese colleague, Sun Yunlong, for his assistance in fieldwork.

For citation: Zhang X., Nikolaev A.N., Arzac A., Kolmogorov A.I., Vasiliev M.S., Pestryakova L.A. Climate response in radial growth of *Larix cajanderi* and *Pinus sylvestris* in Central Yakutia. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(1):85–96. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-85-96>

Введение

В Арктической зоне Российской Федерации и Республики Саха (Якутия) в целом наблюдается потепление климата с высокими темпами роста приземной температуры воздуха [1–3]. Представляют интерес научные исследования, в которых используется индикатор ширины годовых колец деревьев в качестве «накопленной» информации о климате и его воздействии на экосистемы в средних и высоких широтах Северного полушария [4–9].

Годичные кольца деревьев могут быть источником ценной информации о климате за определенный период времени [10–18]. Древесные кольца играют ключевую роль в понимании климатических сдвигов и эволюции экосистемы в целом. Анализ радиального роста древесных видов позволяет выявить их тесную связь с изменениями климата и их влиянием на окружающую среду [19, 20]. Исследования в этой области могут внести значительный вклад в прогнозирование климата, стать основой для разработки обоснованных стратегий экологической безопасности и т. п.

В настоящее время накоплен обширный научный материал, посвященный влиянию погодных условий и климата на радиальный рост деревьев. Эти исследования проводились в субарктических и высоких широтах с целью реконструкции климата и составления долгосрочных хронологий. Различные древесные виды, обладают высокой чувствительностью и используются как тест-объекты. Радиальный рост деревьев в летние месяцы ограничивается температурой воздуха [21–23]. Кроме того, были выявлены зависимости от особенностей рельефа и связанного с ним перераспределения почвенной влаги в экосистемах.

Цель данной работы – изучить влияние климатических факторов (температура воздуха, осадки) на радиальный рост лиственницы (*Larix cajanderi* Mayr.) и сосны (*Pinus sylvestris* L.) в окрестностях села Маган и поселка городского типа Нижний Бестях, расположенных в центральной части Республики Саха (Якутия).

Материалы и методы

Для исследования были выбраны два участка с лесной растительностью, расположенные вблизи населенных пунктов (рис. 1): село Маган, находящееся на левом берегу р. Лена (62°09' с.ш.; 129°34' в.д.) [24], поселок городского типа Ниж-

ний Бестях, расположенный на правом берегу р. Лена (61°55' с.ш.; 129°58' в.д.) (в дальнейшем по тексту населенные пункты будут упоминаться без указания их статуса). Расстояние от Магана и Нижнего Бестяха до метеостанции Якутск составляет примерно 17 и 18 км, а до р. Лена – около 16 и 5 км соответственно. Расстояние между двумя исследовательскими участками с древесной растительностью составляет примерно 35 км. Высота над уровнем моря на обоих участках примерно одинаковая – около 145 м.

Климат в районе исследования резко-континентальный. Наблюдаются значительные температурные колебания в течение года и небольшое количество осадков, выпадающих преимущественно в теплое время года. Летний сезон теплый и засушливый (см. рис. 1). Согласно данным метеорологической станции Якутск, среднегодовая температура воздуха за период 1929–2018 гг. составила –9,4 °С. Общее количество осадков за год достигает ~250 мм с максимумом в летний сезон.

На лесных участках нами классифицированы толокнянково-лишайниковые леса, сочетающиеся с лиственничными брусничными. В районе Нижнего Бестяха на деревьях присутствуют следы лесных пожаров. В целом преобладают палевые карбонатные и палевые осолоделые суглинистые почвы.

В течение летнего сезона 2023 г. были собраны образцы лиственницы (*Larix cajanderi* Mayr.) и сосны (*Pinus sylvestris* L.), которые представлены в табл. 1. Для анализа температурных условий и количества осадков за период 1929–2018 гг. использованы данные метеорологической станции Якутск (62°1' с.ш.; 129°43' в.д.). Проведен дендрохронологический анализ более 20 кернов древесины с каждого лесного участка (всего 94 керна), которые были собраны на высоте 1,3 м.

Древесные керны, собранные на участке Маган, высушены при комнатной температуре, закреплены на специальной деревянной подложке и аккуратно очищены с помощью скальпеля. Для измерения ширины годовых колец использовалось устройство LINTAB-6 (Rinntech, Германия) и программное обеспечение TSAPWin, обеспечивающее высокую точность – до 0,01 мм [25]. В лабораторных условиях образцы с участка Нижний Бестях прошли процесс полировки с использованием наждачной бумаги (№ 400–1000). Затем они были отсканированы с помощью планшетного сканера, который работал под управлением программного обеспечения SilverFast



Рис. 1. Карта-схема расположения метеорологической станции Якутск (а) и лесных участков вблизи населенных пунктов Маган и Нижний Бестях (б), а также график среднемесячных значений осадков и температуры воздуха за период 1929–2018 гг. (в)

Fig. 1. Location of the “Yakutsk” meteorological station (a) and forest areas in the vicinity of the settlements of Magan and Nizhny Bestyakh (b), as well as a graph of average monthly precipitation and air temperature for the period 1929–2018 (c)

с разрешением 64bit и 3200 DPI. Полученные цифровые изображения каждого образца были импортированы в программу CooRecorder (вер-

сия 9.3.1), где границы кольцевых меток были размещены вручную и/или автоматически [26]. Качество датирования образцов двух участков было проверено с использованием профессионального программного обеспечения COFESHA (компьютерная программа, написанная на языке ANSI Fortran-77 Ричардом Л. Холмсом – Университет штата Аризона, США) [27].

В исследовании был использован метод стандартизации (экспонирования), который основывается на отрицательной экспоненциальной функции для выявления климатических сигналов, влияющих на ширину годовичных колец. Образцы древесных колец были обработаны и проанализированы с помощью специализированных пакетов программ «dplR» и «treeclim», входящих в состав программного обеспечения R (версия 4.2.2) [28–30]. Чтобы оценить реакцию лиственницы и сосны на изменения климата, был применен метод корреляции Пирсона (r). Он позволяет рассчитать взаимосвязь между хронологическими рядами ширины годовичных колец и среднемесячными значениями температуры воздуха, общим количеством осадков, а также индексом SPEI (Standardised Precipitation Evapotranspiration Index) [31]. SPEI – это индекс засушливости, который позволяет выявить периоды засухи и увлажнения. Он включает в себя не только осадки, но и температуру воздуха, что позволяет оценить влияние температуры на развитие засухи на основе базовых расчетов водного баланса. Корреляционный анализ проводился с учетом различных периодов предыдущего и текущего года, а также их комбинаций по месяцам и сезонам. Для анализа различий и реакций древесных пород на климат был рассчитан скользящий коэффициент корреляции с временным окном в 30 лет с шагом в один год.

Результаты и обсуждение

Общие сведения и статистические параметры хронологий ширины годовичных колец. В табл. 1 представлены общие сведения и статистические параметры, характеризующие ширину годовичных колец деревьев на исследуемых участках в различные периоды времени, где МА-Л – Маган-лиственница, МА-С – Маган-сосна, НБ-Л – Нижний Бестях-лиственница и НБ-С – Нижний Бестях-сосна.

Средняя ширина годовичных колец МА-Л составляет $1,01 \pm 0,55$ мм за период 1907–2022 гг., НБ-Л – $0,91 \pm 0,54$ мм за период 1867–2022 гг.,

Таблица 1

Общие сведения и статистические параметры хронологий ширины годичных колец

Table 1

General information and statistical parameters of tree-ring width chronologies

Общие сведения и статистические параметры	МА-Л 1907–2022 гг.	МА-С 1929–2022 гг.	НБ-Л 1867–2022 гг.	НБ-С 1808–2022 гг.
Общие сведения				
Расстояние до метеостанции Якутск, км	~17		~18	
Расстояние до р. Лена, км	~16		~5	
Статистические параметры				
Количество индивидуальных серий, шт.	27	21	20	26
Длительность хронологий, годы	115	93	155	214
Средняя ширина годичных колец ± стандартное отклонение, мм	1,01 ± 0,55	1,7 ± 0,83	0,91 ± 0,54	0,8 ± 0,39
Коэффициент автокорреляции 1-го порядка	0,63	0,68	0,75	0,78
Межсерийный коэффициент корреляции	0,51	0,68	0,24	0,33
Коэффициент чувствительности	0,37	0,28	0,35	0,35
Выраженный сигнал популяции	0,97	0,98	0,87	0,87
Отношение сигнала к шуму	32,95	60,44	6,49	6,95

МА-С – $1,7 \pm 0,83$ мм за период 1929–2022 гг.,
НБ-С – $0,8 \pm 0,39$ мм за период 1808–2022 гг.

Коэффициенты автокорреляции 1-го порядка для НБ-Л и НБ-С оказались выше, чем для МА-Л и МА-С. Это может свидетельствовать о том, что на участке вблизи Нижнего Бестяха рост деревьев, таких как лиственница и сосна, происходит более плавно, чем МА-Л и МА-С.

Коэффициент чувствительности исследуемых лесных участков в диапазоне 0,35–0,37, за исключением МА-С, где этот коэффициент оказался равным 0,28. В целом это может указывать на то, что различные виды деревьев реагируют на изменения климата схожим образом с учетом иных процессов.

Межсерийный коэффициент корреляции для МА-С – 0,68 и НБ-С – 0,33 выше, чем для МА-Л – 0,51 и НБ-Л – 0,24. Возможно, для сосны на исследуемых участках проявляются межсерийная коррелятивная связь между индивидуальными сериями и схожая реакция на изменения климата.

На исследуемых участках уровень сигнала (выраженный сигнал популяции), который характеризует популяцию древесных видов, превышает общепринятый порог – 0,85. Это свидетельствует о достоверности хронологии образцов и возможности дальнейшего проведения дендроклиматического анализа.

Значения отношений сигнала к шуму на участках вблизи Магана выше, чем Нижнего

Бестяха. Это указывает на то, что климатический отклик лиственницы и сосны в районе Магана более согласован.

Сравнительный анализ статистических параметров (см. табл. 1) различных видов древостоя на исследуемых участках подтверждает достоверность хронологии образцов и согласованность статистических показателей.

Проведены расчеты стандартизированного индекса ширины годичных колец, в результате получены следующие значения: МА-Л – среднее значение – 0,99, максимальное – 1,69; МА-С – среднее значение – 0,98; НБ-Л – среднее значение – 0,95, максимальное – 1,55 и НБ-С – среднее значение – 1,007. Максимальные значения данного индекса для сосны на обоих участках относительно близки. В целом средние и максимальные значения стандартизированного индекса ширины годичных колец для МА-Л оказались выше, чем НБ-Л. Это может свидетельствовать о более благоприятных условиях роста для лиственницы вблизи Магана. Разница между средними значениями МА-С (0,98) и НБ-С (1,007) невелика и может указывать на схожую адаптацию сосны на исследуемых участках к условиям окружающей среды. Однако данный факт требует подтверждения или опровержения при проведении статистического анализа данных с абиотическими факторами неживой природы.

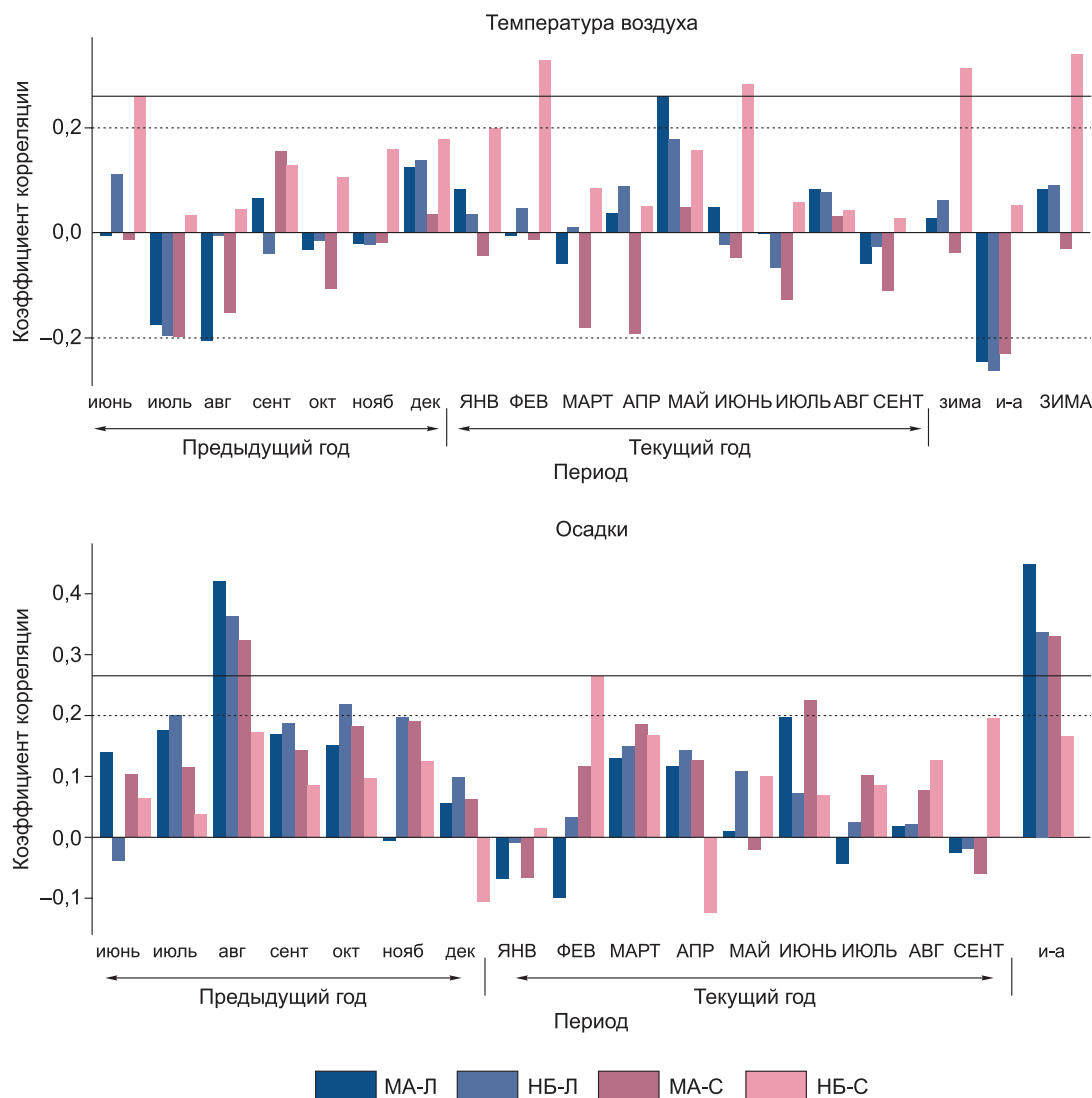


Рис. 2. Коэффициенты корреляции Пирсона между шириной годичных колец и температурой воздуха с осадками на исследуемых участках: МА-Л – Маган-лиственница, МА-С – Маган-сосна, НБ-Л – Нижний Бестях-лиственница, НБ-С – Нижний Бестях-сосна. Строчные буквы – предыдущий год, прописные – текущий, где и-а – июнь–август предыдущего года. Штриховой линией указан уровень достоверности при $p < 0,01$, сплошной линией – $p < 0,05$

Fig. 2. Pearson correlation coefficients between tree-ring width chronologies and air temperature and precipitation for the study areas: МА-Л – Magan-larch, МА-С – Magan-pine, НБ-Л – Nizhniy Bestyakh-larch, НБ-С – Nizhniy Bestyakh-pine. Lowercase letters represent previous year, and uppercase letters the current year, with и-а is June–August of the previous year. The dashed line indicates the level of significance at $p < 0.01$, the solid line – $p < 0.05$

Корреляционный анализ Пирсона. На рис. 2 представлены графики корреляционного анализа за период 1929–2018 гг. связи между шириной годичных колец и температурой воздуха и осадками. С учетом различных периодов предыдущего и текущего годов, а также различных комбинаций по месяцам и сезонам при проведении прямого корреляционного анализа видно, что связь с температурой воздуха находится в диапазоне от $-0,2$ до $0,2$ при $p < 0,01$. Данный факт

указывает на практическое отсутствие прямого влияния температуры воздуха на рост древесных видов на исследуемых участках. Можно лишь выделить небольшие всплески откликов НБ-С на температуру воздуха в зимний период предыдущего и текущего годов на уровне $0,3$ при $p < 0,05$.

Отклик лиственницы и сосны на осадки (участки МА-Л, НБ-Л и МА-С) с r от $0,3$ до $0,45$ при $p < 0,05$ проявляется в августе и июне–авгу-

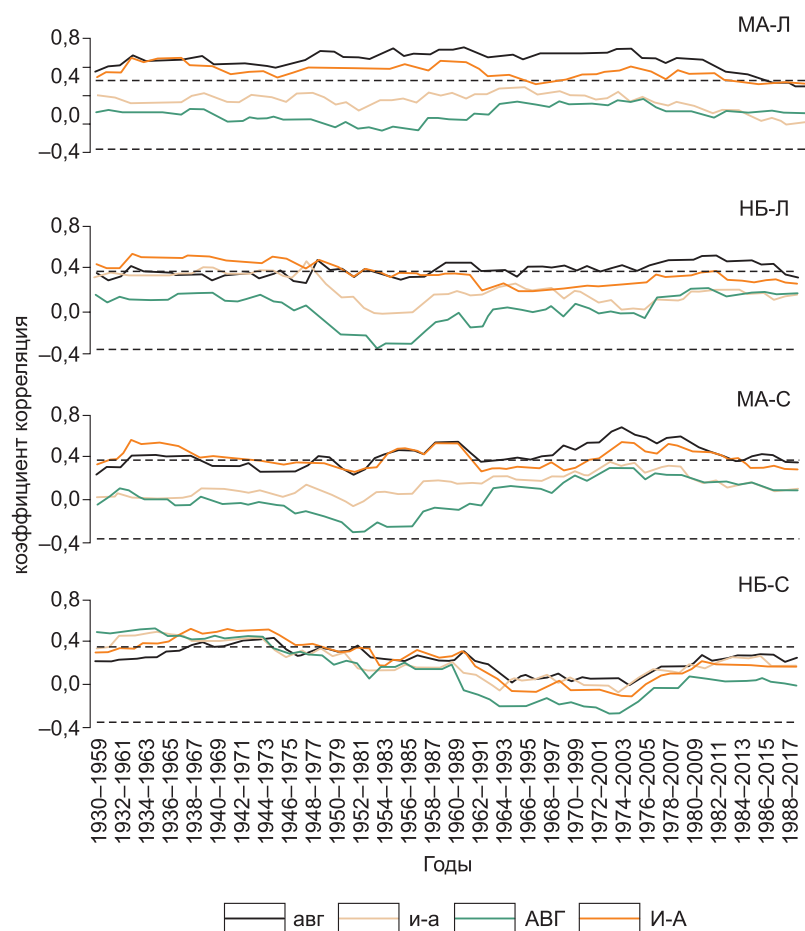


Рис. 3. Скользящий коэффициент корреляции (временное окно – 30 лет) между осадками и шириной годичных колец (лиственница, сосна). Усл. обозн. см. рис. 2. Штриховая линия – уровень достоверности при $p < 0,01$

Fig. 3. Moving correlation coefficient (30-year time window) between precipitation and tree-ring width chronologies for larch and pine at the study sites. Legend see fig. 2. Lowercase letters represent the previous year, and uppercase the current year. The dashed line indicates the level of significance at $p < 0.01$

сте предыдущего года (сезон максимума средне-месячных осадков – см. рис. 1).

Вышеописанные результаты в целом согласуются с исследованием, проведенным на левом берегу р. Лена вблизи села Табага [32]. В работе [32] также не была выявлена прямая корреляция между температурой воздуха и радиальным ростом лиственницы за период 1929–2018 гг. В этой работе были использованы иные методы статистического анализа данных с привлечением гидро-термического коэффициента Селянинова.

Расчет скользящих коэффициентов корреляции. На рис. 3 представлена общая динамика скользящих коэффициентов корреляции (временное окно – 30 лет) между осадками и шириной годичных колец на исследуемых участках. График скользящих коэффициентов корреляции между температурой воздуха и шириной годичных колец

не представлен, так как их значения не превышают 0,3 при $p < 0,01$ на всех исследуемых участках.

В данном случае (см. рис. 3) можно выделить отклик древесных видов на осадки (участки МА-Л, МА-С и НБ-Л) в августе и июне–августе предыдущего года со значениями скользящих коэффициентов корреляции на уровне 0,4 и выше (до 0,7) при $p < 0,01$. Практически на всем рассматриваемом периоде на участке МА-Л скользящие коэффициенты корреляции выше 0,4 при $p < 0,01$. В качестве исключения можно отметить участок НБ-С, когда отклик сосны на осадки (на уровне 0,4 и выше (до 0,6) при $p < 0,01$) наблюдался с 1930-х до середины 1970-х гг. в августе предыдущего, августе и июне–августе текущего годов.

Прослеживается полиномиальный ход скользящих коэффициентов корреляции с ложбинами

Таблица 2

Сухие и влажные годы по данным метеостанции Якутск за период 1929–2018 гг.

Table 2

Dry and wet years according to the “Yakutsk” weather station for the period 1929–2018

Классификация	Сухие года	Классификация	Влажные года
Легкая	1929, 1930, 1934, 1939, 1942, 1944, 1950, 1973, 1992, 1996, 2003, 2012, 2018	Легкая	1932, 1938, 1954, 1959, 1960, 1961, 1966, 1967, 1968, 1975, 1976, 1980, 1982, 1994, 2006
Умеренная	1945, 1948, 1986, 2009, 2010, 2011	Умеренная	1951, 1952, 1989, 2007
Сильная	1949, 2001, 2002	Сильная	1979
	Всего: 22		Всего: 20

и гребнями в различные временные отрезки за рассматриваемый период. Динамика может быть связана с эндогенными и экзогенными факторами (например, почвенная влага и снегонакопление), данные по которым на территории исследуемых участков отсутствуют, что требует дополнительного научного изыскания. В целом осадки в июне–августе предыдущего года играют важную роль в радиальном росте лиственницы и сосны исследуемых участков.

Расчет сухих и влажных годов – индекс SPEI: связь с шириной годичных колец. Количество сухих годов (табл. 2) составило 22 (25 %) и влажных – 20 (22 %) за период 1929–2018 гг.

На рис. 4 представлены коэффициенты корреляции между шириной годичных колец и индексом SPEI. С июля предыдущего по июль текущего года наблюдается корреляционная связь от 0,3 до 0,5 при $p < 0,05$ на участках МА-Л, НБ-Л

и МА-С, что может быть связано с инфильтрацией осенних осадков предыдущего года в почву.

Можно отметить (см. рис. 4), что практически отсутствует корреляционная связь на участке НБ-С – отрицательный отклик на положительную тенденцию роста температуры воздуха, оказывающего влияние на засушливые периоды (см. табл. 2). Данный факт может указывать на большую устойчивость (адаптацию) сосны к климатическим изменениям в районе Нижнего Бестяха.

Предполагаем, что на исследуемых лесных участках температура воздуха с положительной тенденцией роста является лимитирующим ростовые процессы фактором, который может негативно влиять на осадки и вести к возникновению засушливых периодов. В результате древесные виды испытывают недостаток влаги. В основном деревья получают почвенную влагу за счет ее инфильтрации в результате осадков июня–августа предыдущего года (см. рис. 2) и аккумуляции в сезонно-талом слое мерзлоты. Полученные результаты подтверждают исследование в районе села Табага [32], что в целом указывает на отрицательный отклик (снижение) радиального роста лиственницы и сосны на повышение температуры приземного слоя атмосферы. С другой стороны, это свидетельствует об адаптации древесных видов к изменяющемуся климату в центральной части Якутии.

Заключение

В работе приведены статистические параметры хронологий ширины годичных колец на участках вблизи населенных пунктов Маган и Нижний Бестях. Мы опровергаем, что небольшая разница между средними значениями стандартизированного индекса ширины годичных колец МА-С – 0,98 и НБ-С – 1,007 может указывать на схожую адаптацию сосны к условиям окру-

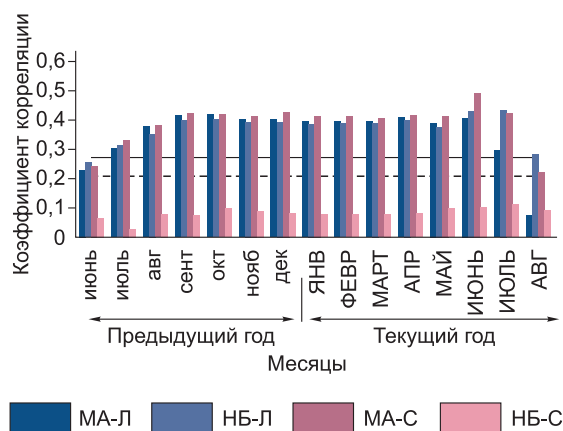


Рис. 4. Коэффициенты корреляции Пирсона между шириной годичных колец и индексом SPEI. Поясн. см. рис. 2. Штриховой линией указан уровень достоверности при $p < 0,01$, сплошной – $p < 0,05$.

Fig. 4. Pearson correlation between tree-ring width chronologies and the index SPEI. Legend see fig. 2. The dashed line indicates the level of significance at $p < 0.01$, the solid – $p < 0.05$

жающей среды. Статистический анализ связей между шириной годичных колец и индексом SPEI указывает, что с июля предыдущего по июль текущего года наблюдается корреляционная связь от 0,3 до 0,5 при $p < 0,05$ на участках МА-Л, НБ-Л и МА-С. В то же время на участке НБ-С наблюдается отрицательный отклик радиального прироста деревьев на повышение температуры воздуха, оказывающее влияние на формирование засушливых периодов. Данный факт может указывать на большую устойчивость (адаптацию) сосны к климатическим изменениям в районе Нижнего Бестяха.

Показано, что за период 1929–2018 гг. при проведении прямого корреляционного анализа связь между шириной годичных колец и температурой воздуха находится в диапазоне от $-0,2$ до $0,2$ при $p < 0,01$. Можно лишь выделить небольшие всплески откликов НБ-С на температуру воздуха в зимний период предыдущего и текущего годов на уровне 0,3 при $p < 0,05$. Отклик лиственницы и сосны на осадки (МА-Л, НБ-Л и МА-С) с r от 0,3 до 0,45 при $p < 0,05$ проявляется в августе и июне–августе предыдущего года (сезон максимума среднемесячных осадков). Количество сухих годов составило 22 (25 %) и влажных – 20 (22 %) за период 1929–2018 гг.

Предполагаем, что на исследуемых лесных территориях температура воздуха может стать ограничивающим фактором, способным влиять негативно влиять на сумму осадков, вызывая засушливые периоды. В результате древесные виды могут испытывать недостаток влаги. В основном деревья получают почвенную влагу за счет ее инфильтрации из осадков, которые выпадают в июне–августе предыдущего года, и аккумуляции в сезонно-талом слое мерзлоты. В целом наблюдается снижение радиального роста лиственницы и сосны в ответ на повышение температуры воздуха у поверхности земли. С одной стороны, это свидетельствует о том, что радиальный рост лиственницы и сосны снижается, с другой – древесные виды адаптируются к изменяющимся климатическим условиям в центральной части Якутии.

В будущем авторы планируют провести комплексное исследование, в котором сравнят влияние климата на радиальный рост различных видов деревьев, произрастающих на разных участках (в разных районах). В ходе исследования будут учитываться не только биотические, но и абиотические факторы под влиянием эндогенных и экзогенных процессов.

Список литературы / References

1. Doloisio N., Vanderlinden J.-P. The perception of permafrost thaw in the Sakha Republic (Russia): Narratives, culture and risk in the face of climate change. *Polar Science*. 2020;26:100589. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2020.100589>.
2. Ford J.D., Pearce T., Canosa I.V., et al. The rapidly changing Arctic and its societal implications. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*. 2021;12(6):e735. <https://doi.org/10.1002/wcc.735>.
3. Gustafson T. *Klimat: Russia in the Age of Climate Change*. Harvard University Press; 2021:336. <https://doi.org/10.1080/09644016.2022.2123968>.
4. Pearl J.K., Keck J.R., Tintor W., et al. New frontiers in tree-ring research. *Holocene*. 2020;30(6):923–941. <https://doi.org/10.1177/0959683620902230>.
5. Lehmann M.M., Vitali V., Schuler P., et al. More than climate: Hydrogen isotope ratios in tree rings as novel plant physiological indicator for stress conditions. *Dendrochronologia*. 2021;65:125788. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125788>.
6. Decuyper M., Chavez R.O., Cufar K., et al. Spatiotemporal assessment of beech growth in relation to climate extremes in Slovenia—An integrated approach using remote sensing and tree-ring data. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2020;287:107925. <https://doi.org/10.1016/j.agrfor.2020.107925>.
7. Szejner P., Belmecheri S., Ehleringer J.R., et al. Recent increases in drought frequency cause observed multi-year drought legacies in the tree rings of semi-arid forests. *Oecologia*. 2020;192(1):241–259. <https://doi.org/10.1007/s00442-019-04550-6>.
8. Buntgen U., Allen K., Anchukaitis K.J., et al. The influence of decision-making in tree ring-based climate reconstructions. *Nature communications*. 2021;12(1):3411. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23627-6>.
9. Devi N.M., Kukarskih V.V., Galimova A.A., et al. Climate change evidence in tree growth and stand productivity at the upper treeline ecotone in the Polar Ural Mountains. *Forest Ecosystems*. 2020;7(1):1–16. <https://doi.org/10.1186/s40663-020-0216-9>.
10. Федоров П.П., Десяткин А.Р. Связь температурного режима мерзлотных почв и радиального прироста лиственницы в Центральной Якутии. *Успехи современного естествознания*. 2016;(7):185–189.
11. Fedorov P.P., Desyatkin A.R. Relationship Between Temperature Regime of Permafrost Soils and Radial Growth of Larch in Central Yakutia. *Advances in Current Natural Sciences*. 2016;(7):185–189. (In Russ.)
12. Kirilyanov A.V., Saurer M., Siegwolf R., et al. Long-term ecological consequences of forest fires in the continuous permafrost zone of Siberia. *Environmental Research Letters*. 2020;15(3):034061. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab7469>.
12. Николаев А.Н., Федоров П.П. Влияние климатических факторов и термического режима мерзлотных

почв Центральной Якутии на радиальный прирост лиственницы и сосны. *Лесоведение*. 2004;(6):3–13.

Nikolaev A.N., Fedorov P.P. Influence of Climate Factors and Thermal Regime of Permafrost Soils in Central Yakutia on the Radial Growth of Larch and Pine. *Forestry Studies*. 2004;(6):3–13. (In Russ.)

13. Nikolaev A.N., Fedorov P.P., Desyatkin A.R. Influence of climate and soil hydrothermal regime on radial growth of *Larix cajanderi* and *Pinus sylvestris* in central Yakutia, Russia. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2009;24(3):217–226. <https://doi.org/10.1080/02827580902971181>.

14. Nikolaev A.N., Fedorov P.P., Desyatkin A.R. Effect of Hydrothermal Conditions of Permafrost Soil on Radial Growth of Larch and Pine in Central Yakutia. *Contemporary Problems of Ecology*. 2011;4(2):140–149. <https://doi.org/10.1134/S1995425511020044>.

15. Колмогоров А.И., Крузе Ш., Николаев А.Н. и др. Дендроклиматические исследования лиственницы Каяндера на территории бассейна реки Омолой. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(4):584–594. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-4-584-594>.

Kolmogorov A.I., Kruse S., Nikolaev A.N., et al. Dendroclimatic studies of *Larix cajanderi* Mayr. in the Omoloy River Basin. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(4):584–594. (In Russ.). <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-4-584-594>.

16. Arzac A., Tychkov I.I., Rubtsov A., et al. Phenological shifts compensate warming-induced drought stress in southern Siberian Scots pines. *European Journal of Forest Research*. 2021;140:1487–1498. <https://doi.org/10.1007/s10342-021-01412-w>.

17. Arzac A., de Quijano D.D., Khotcinskaia K.I., et al. The buffering effect of the Lake Baikal on climate impact on *Pinus sylvestris* L. radial growth. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2022;313:108764. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108764>.

18. Arzac A., Tabakova M.A., Khotcinskaia K., et al. Linking tree growth and intra-annual density fluctuations to climate in suppressed and dominant *Pinus sylvestris* L. trees in the forest-steppe of Southern Siberia. *Dendrochronologia*. 2021;67:125842. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2021.125842>.

19. Николаев А.Н., Исаев А.П., Федоров П.П. Радиальный прирост лиственницы в Центральной Якутии в связи с изменением климата за последние 120 лет. *Экология*. 2011;(4):243–250.

Nikolaev A.N., Isaev A.P., Fedorov P.P. Radial Growth of Larch in Central Yakutia in Relation to Climate Change Over the Last 120 Years. *Ecology*. 2011;(4):243–250. (In Russ.)

20. Zhirnova D.F., Belokopytova L.V., Meko D.M., et al. Climate change and tree growth in the Khakass-Minusinsk Depression (South Siberia) impacted by large water reservoirs. *Scientific reports*. 2021;11(1):14266. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93745-0>.

21. Khotcinskaia K.I., Sergeeva O.V., Kirdeyanov A.V., et al. Climatic Response of Radial Growth of *Larix cajanderi* in Northern and Central Yakutia. *Moscow University Biological Sciences Bulletin*. 2024;79(2): 94–100.

22. Arzac A., Popkova M., Anarbekova A., et al. Increasing radial and latewood growth rates of *Larix cajanderi* Mayr. and *Pinus sylvestris* L. in the continuous permafrost zone in Central Yakutia (Russia). *Annals of Forest Science*. 2019;76: 1–15.

23. Esper J., Frank D.C., Buntgen U., et al. Trends and uncertainties in Siberian indicators of 20th century warming. *Global Change Biology*. 2010;16:386–398. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01913.x>.

24. Чжан С. Характеристики и реакция радиального прироста деревьев в Центральной Якутии на изменения климата. *Проблемы региональной экологии*. 2024;(3):16–21. <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2024-3-16-21>.

Zhang X. Characteristics and response of radial growth of trees in Central Yakutia to climate change. *Regional Environmental Issues*. 2024;(3):16–21. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2024-3-16-21>.

25. Rinn F. TSAP-Win: Time series analysis and presentation for dendrochronology and 409 related applications. *User reference, Heidelberg*. 2003. Available at: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1572543024876591616> (accessed: 10.11.2024).

26. Heeter K.J., Harley G.L., Maxwell J.T., et al. Summer temperature variability since 1730 CE across the low-to-mid latitudes of western North America from a tree ring blue intensity network. *Quaternary Science Reviews*. 2021;267:107064. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.107064>.

27. Grissino-Mayer H.D. Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-ring Research*. 2001;57(2):205–221.

28. R Core Team (2022) R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. Available at: <https://www.R-project.org> (accessed 10.11.2024).

29. Bunn A.G. A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia*. 2008;26(2):115–124. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2008.01.002>.

30. Zang C., Blomdi F. Treeclim: An R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships. *Ecography*. 2015;38(4):431–436. <https://doi.org/10.1111/ecog.01335>.

31. Vicente-Serrano S.M., Begueria S., Lorez-Moreno J.I. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*. 2010;23:1696–1718.

32. Zhang X.H., Nikolaev A.N., Kolmogorov A.I., et al. The Influence of Hydrothermal Moistening on the Radial Growth of Larch in Central Yakutia. *Moscow University Biological Sciences Bulletin*. 2024;79(2):101–106. <https://doi.org/10.3103/S0096392524600911>.

Об авторах

ЧЖАН Сяохун, ведущий инженер, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0003-9957-0002>, SPIN: 7479-2722, e-mail: z461306425@gmail.com

НИКОЛАЕВ Анатолий Николаевич, доктор биологических наук, ректор, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-2270-2049>, ResearcherID: ABI-1877-2020, Scopus Author ID: 24074502400, SPIN: 1395-4360, e-mail: rector@s-vfu.ru

АРСАК Альберто, кандидат биологических наук, доцент, руководитель лаборатории, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-3361-5349>, ResearcherID: F-1400-2016, Scopus Author ID: 55550541400, SPIN: 6023-6939, e-mail: aarzak@sfu-kras.ru

КОЛМОГОРОВ Алексей Иванович, научный сотрудник, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация; младший научный сотрудник, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-3688-7753>, Scopus Author ID: 1032714, e-mail: ai.kolmogorov@s-vfu.ru

ВАСИЛЬЕВ Михаил Семенович, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-0542-9813>, ResearcherID: AAY-5159-2020, Scopus Author ID: 56513537700, SPIN: 3954-6428, e-mail: vms_1984@mail.ru

ПЕСТРЯКОВА Людмила Агафьевна, доктор географических наук, главный научный сотрудник, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-5347-4478>, ResearcherID: Q-9900-2016, Scopus Author ID: 18434936500, SPIN: 8323-7283, e-mail: lapest@mail.ru

Вклад авторов

Чжан Сяохун – разработка концепции, методология, проведение исследования, верификация данных, создание черновика и редактирование рукописи; **Николаев А.Н.** – руководство исследованием, администрирование проекта, получение финансирования; **Арсак А.** – разработка концепции, редактирование рукописи; **Колмогоров А.И.** – проведение статистического анализа и редактирование рукописи; **Васильев М.С.** – редактирование рукописи, методология, визуализация; **Пестрякова Л.А.** – руководство исследованием, администрирование проекта, получение финансирования, разработка концепции, методология, проведение исследования, верификация данных, создание черновика и редактирование рукописи

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

ZHANG, Xiaohong, Leading Engineer, Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0003-9957-0002>, SPIN: 7479-2722, e-mail: z461306425@gmail.com

NIKOLAEV, Anatoly Nikolaevich, Dr. Sci. (Biol.), Rector, Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-2270-2049>, ResearcherID: ABI-1877-2020, Scopus Author ID: 24074502400, SPIN: 1395-4360, e-mail: rector@s-vfu.ru

ARZAC, Alberto, Cand. Sci. (Biol.), Associate Professor, Head of Laboratory, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-3361-5349>, ResearcherID: F-1400-2016, Scopus Author ID: 55550541400, SPIN: 6023-6939, e-mail: aarzak@sfu-kras.ru

KOLMOGOROV, Alexey Ivanovich, Researcher, Institute of Natural Sciences, Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation; Junior Researcher, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-3688-7753>, Scopus Author ID: 1032714, e-mail: ai.kolmogorov@s-vfu.ru

VASILIEV, Mikhail Semenovich, Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher, Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-0542-9813>, ResearcherID: AAY-5159-2020, Scopus Author ID: 56513537700, SPIN: 3954-6428, e-mail: vms_1984@mail.ru

PESTRYAKOVA, Lyudmila Agafyevna, Dr. Sci. (Geogr.), Chief Researcher, Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-5347-4478>, ResearcherID: Q-9900-2016, Scopus Author ID: 18434936500, SPIN: 8323-7283, e-mail: lapest@mail.ru

Authors' contribution

Zhang Xiaohong – conceptualization, methodology, investigation, validation, writing – original draft, writing – review & editing; **Nikolaev A.N.** – supervision, project administration, funding acquisition; **Arzac A.** – conceptualization, writing –

Чжан Сяохун и др. ♦ Климатический отклик радиального роста лиственницы Каяндера и сосны обыкновенной...

review & editing; **Kolmogorov A.I.** – formal analysis, writing – review & editing; **Vasiliev M.S.** – writing – review & editing, methodology, visualization; **Pestryakova L.A.** – supervision, project administration, funding acquisition, conceptualization, methodology, investigation, validation, writing – original draft, writing – review & editing.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 04.01.2025

Поступила после рецензирования / Revised 27.01.2025

Принята к публикации / Accepted 04.02.2025



Оригинальная статья

Микроорганизмы мерзлотных лугово-степных почв Центральной Якутии

Н. П. Кузьмина[✉], С. В. Ермолаева, А. П. Чевычелов

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН г. Якутск, Российская Федерация
[✉]erel1982@mail.ru

Аннотация

Мерзлотные лугово-степные почвы, развитые на охраняемой природной территории Якутского ботанического сада, являются ценными природными эталонами почв Центральной Якутии, но при этом они ранее не были исследованы в отношении микробиологической активности. Приведены результаты комплексных исследований свойств почв, состава сформированных в них микробных сообществ, количества и внутрипрофильного распределения последних. Исследования проведены на пяти почвенных педонах с применением комплекса почвенных и микробиологических методов совокупно со стандартными методиками лабораторных аналитических работ. Установлено, что количество исследуемых групп микроорганизмов изменялось от $8,2 \pm 3,3 \times 10^1$ до $2,4 \pm 0,8 \times 10^6$ КОЕ/г почвы. По росту общей численности микроорганизмов (ОЧМ) данные почвы представляют следующую последовательность: солончак солонцеватый, затем лугово-черноземная и чернозем обыкновенный, далее черноземно-луговая, затем лугово-черноземная. Максимальное содержание азотобактера было отмечено в черноземе – в единственной незасоленной почве из всех исследованных. Доминирование определенных групп микроорганизмов в изученных почвенных микробных сообществах зависело от химического состава и гидротермических показателей почв. Установлена высокая корреляция численности микроорганизмов с содержанием гумуса и азота, а также с температурой почвы, что ведет к уменьшению их количества с глубиной. Полученные результаты могут быть использованы для биоиндикации почвенного плодородия и определения степени антропогенной и агрогенной трансформаций криогенных почв Центральной Якутии.

Ключевые слова: мерзлотные почвы, свойства, микробоценозы, состав и численность микроорганизмов

Финансирование. Статья подготовлена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0297-2021-0027, ЕГИСУ НИОКТР № АААА-А21-121012190033-5).

Для цитирования: Кузьмина Н.П., Ермолаева С.В., Чевычелов А.П. Микроорганизмы мерзлотных лугово-степных почв Центральной Якутии. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(1):97–108. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-1-97-108>

Original article

Microorganisms in the cryogenic meadow-steppe soils of Central Yakutia

Nadezhda P. Kuzmina[✉], Svetlana V. Ermolaeva, Aleksandr P. Chevychelov

Institute for Biological Problems of Cryolithozone,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation
[✉]erel1982@mail.ru

Abstract

The microbial communities of cryogenic meadow-steppe soils in Central Yakutia, developed within the Yakut Botanical Garden (YBG), have not been previously investigated. This study aimed to analyze soil properties, the composition of microbial communities, their abundance, and their distribution within soil profiles. Data were collected from five soil profiles of the examined cryogenic soils using a combination of soil and microbiological methods, along with standard laboratory analytical techniques. The abundance of microorganism groups studied ranged from $8.2 \pm 3.3 \times 10^1$ to $2.4 \pm 0.8 \times 10^6$ CFU/g of soil. The soils exhibited an increasing sequence of total microorganisms: saline solonetz, meadow-chnozem, ordinary chnozem, chnozem-meadow, and meadow-chnozem. The highest concentration

of azotobacter was identified in the chernozem, which was the only unsalted soil among those studied. The dominance of specific microbial groups was found to be influenced by the chemical composition of the soils and their hydrothermal parameters. A strong correlation was established between the number of microorganism and the content of humus and nitrogen, as well as soil temperature, which decreased with depth. The microbiological findings of cryogenic meadow-steppe soils in the cryolithozone region can be utilized to bioindicate soil fertility and assess anthropogenic and agrogenic transformations of cryogenic soils.

Keywords: cryogenic soils, properties, microbiocenoses, composition and abundance of microorganisms

Funding. This study was conducted within the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. 0297-2021-0027, EGISU R&D No. AAAA21-121012190033-5).

For citation: Kuzmina N.P., Ermolaeva S.V., Chevychelov A.P. Microorganisms in the cryogenic meadow-steppe soils of Central Yakutia. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(1):97–108. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-97-108>

Введение

Территория Якутского ботанического сада расположена в пределах долины Туймаада и приурочена ко второй надпойменной террасе р. Лена. На небольшой площади ЯБС (около 100 га) распространены почти все типы мерзлотных почв, встречающиеся на территории Центральной Якутии. Первые работы по изучению почв Якутского ботанического сада были проведены в далеком 1954 г. Л.Г. Еловской, которая впервые привела данные по выделению и описанию основных типов почв [1, 2]. В настоящее время на изучаемой территории ЯБС выделено 14 типов и 16 подтипов мерзлотных почв, а также достаточно полно исследованы их состав и физико-химические свойства. Почвы ЯБС представлены лесными, лугово-степными и интразональными типами почв [3]. Как известно, продуктивность и плодородие почв напрямую зависят от состава и численности их микробиоты. До последнего времени мерзлотные почвы ЯБС не изучались микробиологическими методами.

Целью работы являлось комплексное исследование свойств мерзлотных лугово-степных почв Центральной Якутии, состава сформированных в них микробных сообществ, количества и внутрипрофильного распределения последних.

Полученные результаты микробиологических исследований мерзлотных лугово-степных почв исследуемого региона криолитозоны могут быть использованы для биоиндикации их плодородия, а также для определения степени антропогенной и агрогенной трансформаций криогенных почв.

Материалы и методы

Исследуемые мерзлотные почвы представлены черноземами, черноземовидными и засоленными почвами. Всего было заложено и исследовано пять почвенных разрезов данных мерзлотных почв: 2БС-09, 3БС-18, 4БС-18, 7БС-18

и 12БС-18 (табл. 1). Почвенные разрезы были заложены в третьей декаде июля 2019 г.

Почвенные и микробиологические исследования солончака солонцеватого разреза 7БС-18 представлены в нашей работе, опубликованной ранее [4]. В обсуждении результатов представленной статьи эти сведения также будут приведены.

Изучение данных мерзлотных почв проводилось с применением общепринятых почвенных методов исследования: сравнительно-географического, сравнительно-аналитического [5] и профильно-генетического [6], а их состав и физико-химические свойства – с использованием стандартных методик лабораторных аналитических работ [7, 8]. Классификация и диагностика исследуемых мерзлотных почв проводились согласно известным положениям, изложенным в работе Л.Г. Еловской [9].

Почвенные пробы для микробиологического анализа отбирали по принятой в почвенной микробиологии методике, с разных глубин по генетическим горизонтам. Для определения численности микроорганизмов применяли метод посева на плотные питательные среды [10]. При посеве использовали следующие селективные среды: мясо-пептонный агар (МПА) для аммонифицирующих бактерий; среда Эшби – для олигонитрофильных бактерий; крахмало-аммиачный агар (КАА) – для актиномицетов и среда Чапека – для мицелиальных грибов (микромикетов).

Для выявления аэробных целлюлозоразлагающих микроорганизмов использовали среду Гетчинсона и Клейтона. Азотфиксирующие бактерии определяли методом обрастания почвенных комочков на безазотистой среде Эшби. Инкубирование засеянных чашек проводили в термостате при 30 °С. Колонии выросших бактерий подсчитывали на 3–4-е сутки, грибов – на 7–10-е сутки. Полученные данные по количеству микроорганизмов выражали в колониеобразующих

**Географические и морфологические характеристики
изучаемых мерзлотных почв Центральной Якутии**

Table 1

Geographical and morphological characteristics of the studied cryogenic soils of Central Yakutia

Почва, номер разреза	Географические координаты	Место заложения	Морфологическое строение
Чернозем, 2БС-09	62°01'12,4"N, 129°36'35,8"E, Н – 100,3 м	На вершине приозерного гривного повышения, на пашне (черный пар)	Aa(0–26) – AB(26–52) – B(52–67) – BCca(67–100) – Cca(100–146 см)
Черноземно-луговая, 3БС-18	62°01'22,4"N, 129°37'24,1"E, Н – 97,2 м	В проточном понижении, злаково-разнотравный луг с пятнами солончаковой растительности (целина)	Av(0–3) – A(3–30) – AB(30–54/62) – BC(54/62–80) – C ₁ (80–96 см)
Лугово-черноземная, 4БС-18	62°01'28,5"N, 129°37'18,1"E, Н – 99,1 м	На ровной поверхности приозерного повышения, пашня (черный пар)	Aa(0–23) – ABca(23–42) – Bca(42–61) – BC(61–84) – C(84–115 см)
Лугово-черноземная, 12БС-18	62°01'20,2"N, 129°37'19,5"E, Н – 98,2 м	На ровной поверхности приозерного повышения, разнотравно-злаковый луг (целина)	Av,ca(0–2) – Aca(2–20) – ABca(20–41) – Bca(41–57) – BCca(57–81) – C(81–123 см)

единицах (далее КОЕ) на 1 г почвы [10]. ОЧМ в исследуемых микробоценозах криогенных почв определяли с выводом средних значений данных по численности микроорганизмов. Морфологию клеток исследуемых культур микроорганизмов изучали посредством световой микроскопии на микроскопе Levenhuk D40T med ($\times 1000$). Математическая обработка полученных материалов осуществлялась при помощи стандартных статистических методов при 95%-й достоверительной вероятности.

Результаты и обсуждение

Мерзлотные черноземы – это зональные почвы степной зоны Центральной Якутии, приуроченной к нижней части аллювиальной равнины с абсолютными высотами 100–140 м. Они формируются под лугово-степями и настоящими степями на гривных повышениях второй надпойменной террасы р. Лена, в условиях криоаридного климата [11]. Эти автоморфные почвы являются наименее увлажненными и наиболее теплыми мерзлотными почвами данной зоны. Глубина сезонного протаивания в них составляет на целине 160–170 см, а на пашне – 180–200 см [9].

Мерзлотные черноземы обыкновенные занимают по рельефу автоморфные позиции, т. е. вершины грив и увалов, по склонам которых обычно развиты полугидроморфные черноземовидные почвы, т. е. лугово-черноземные и черноземно-луговые, получающие дополнительное увлажнение за счет вод склонового и надмерзлот-

ного стока в периоды увлажнения. В межгривных понижениях формируются интразональные мерзлотные почвы – засоленные (солонцы и солончаки) и болотные (лугово-болотные).

В изучаемых мерзлотных почвах максимальная мощность профиля, равная 146 см, выявляется в мерзлотном черноземе, а чуть меньшая, составляющая 115–136 см, отмечается в лугово-черноземных, тогда как минимальная, равная 96–118 см, наблюдается в черноземно-луговых почвах (см. табл. 1). Необходимо также отметить, что средняя мощность гумусового профиля (гор. А + гор. АВ), максимально составляющая 47 см, фиксируется в мерзлотных черноземно-луговых почвах, а в лугово-черноземных почвах и черноземе таковая примерно равна 40 см.

Определение pH водной вытяжки изучаемых почв позволяет утверждать, что значения данного показателя их верхних горизонтов характеризуют обычно как слабощелочные, а нижних – как щелочные и сильнощелочные (табл. 2). Количество гумуса в верхних горизонтах исследуемых почв (А, Аа) изменяется очень вариабельно и соответственно составляет в черноземно-луговых почвах 3,2–9,2 %, лугово-черноземных – 2,6–9,5, черноземе – 4,2 % [12]. Сопоставление средних значений данных величин с принятыми грациями известной шкалы [13] позволяет оценить содержание гумуса в данных горизонтах изучаемых мерзлотных черноземно-луговых почв как высокое, чернозема и лугово-черноземных почв – в основном как среднее. Общее количество азота

в гумусово-аккумулятивном горизонте мерзлотно-го чернозема разреза 2БС-09 равно 0,09 %, а в лугово-черноземных и черноземно-луговых почвах изменяется соответственно в пределах 0,05–0,21 и 0,13–0,86 %.

Содержание общего азота в гумусовых горизонтах изучаемых мерзлотных почв изменяется значительно – до 17 раз. Профильное распределение общего азота в данных мерзлотных почвах, как правило, резко убывающее, в нижних горизонтах содержание его составляет всего 0,02–0,04 %, за исключением черноземно-луговой почвы разреза 3БС-18, в которой таковое увеличивается до 0,07–0,09 % (табл. 2). Исследуемые мерзлотные лугово-степные почвы характеризуются в общем низким содержанием общего

азота, а также низкой и очень низкой обогащенностью гумуса азотом, согласно принятым критериям [13].

Почвенно-поглощающий комплекс (ППК) данных мерзлотных почв насыщен обменными основаниями, в составе которых абсолютно преобладают катионы Ca^{+2} и Mg^{+2} . Однако в ППК отдельных почв, таких как чернозем (разрез 2БС-09) и солончак солонцеватый (разрез 7БС-18), также наблюдается значительное количество обменного Na^{+} , которое, согласно принятым подходам [4, 9], позволяет определять данные почвы как среднесолонцеватые и даже как солонцы (см. табл. 2). Все изучаемые мерзлотные почвы криолитозоны Центральной Якутии обычно отличаются разной солонцеватостью, вследствие

Таблица 2

Химический состав и гидротермические показатели изучаемых мерзлотных почв Центральной Якутии

Table 2

Chemical composition and hydrothermal parameters of the studied cryogenic soils of Central Yakutia

Горизонт	Глубина, см	Температура, °С	Влажность, %	pH _{H₂O}	Гумус, %	N, %	C:N	Обменные катионы, ммоль(экв)/100 г почвы			CO ₂ карбонатов, %
								Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	
Чернозем, разрез 2БС-09											
Aa	8–18	19,8	13,8	7,9	4,2	0,09	27	9,1	4,6	1,8	Н.о.
AB	30–40	17,5	11,4	8,0	3,7	0,08	26	9,1	4,1	2,1	–/–
B	55–65	15,2	13,0	8,7	1,7	0,02	50	6,6	4,6	2,0	–/–
BCca	80–90	12,3	14,0	8,7	1,3	0,03	23	8,7	5,1	2,3	5,3
Cca	101–107	9,1	6,8	9,0	–	–	–	–	–	–	3,5
Cca	110–120	Н.о.	Н.о.	8,9	–	–	–	–	–	–	3,2
Черноземно–луговая, разрез 3БС-18											
Av	0–3	20,6	18,5	8,0	29,0*	1,11	15	58,1	33,2	–	Н.о.
A	10–20	16,7	22,3	8,1	9,2	0,86	6	21,5	17,2	–	–/–
AB	40–50	14,6	18,0	8,5	3,7	0,10	21	9,5	10,5	–	–/–
BC	60–70	11,1	17,9	8,6	1,2	0,07	10	7,9	9,9	–	–/–
C	80–90	7,0	19,1	8,4	1,9	0,09	12	7,3	9,4	–	–/–
Лугово–черноземная, разрез 4БС-18											
Aa	5–15	19,1	11,7	8,2	2,6	0,11	14	14,3	7,2	0,3	Н.о.
ABca	30–40	16,7	12,3	9,3	1,5	0,04	22	9,1	6,1	1,0	5,6
Bca	45–55	14,6	11,5	9,5	0,4	0,02	10	6,1	5,0	1,7	2,8
BC	70–80	11,2	11,0	9,1	0,4	0,01	20	6,0	4,0	1,3	–/–
C	90–100	8,6	11,3	9,4	0,2	–	–	8,1	5,0	–	–/–
Лугово–черноземная, разрез 12БС-18											
Av,ca	0–2	13,8	23,3	8,0	18,1*	0,21	50	14,5	16,5	1,6	4,0
Aca	10–20	9,4	15,1	9,0	9,5	0,13	42	8,2	17,4	1,4	5,7
ABca	26–36	8,6	15,5	9,4	2,9	0,02	85	7,1	9,1	1,2	8,4
Bca	50–60	5,2	20,3	9,2	0,6	0,02	15	7,1	6,1	0,3	9,2
BCca	75–85	2,5	20,3	8,9	0,6	0,01	30	8,1	10,2	0,2	6,2
Cca	90–100			8,9	0,5	–	–	7,6	10,6	0,3	6,5

Примечание: Н.о. – не обнаружено, прочерк – не определено. * – приведено значение потери при прокаливании.

Note: Н.о. – not detected, dash – not determined. * – the value of loss on ignition is given.

проявления солонцового процесса в условиях криоаридного климата исследуемого региона [14].

Количество CO_2 карбонатов в изучаемых мерзлотных лугово-степных почвах изменяется от 1,7 до 9,2 %, при этом в лугово-черноземной почве разреза 12 БС-18 они обнаруживаются с поверхности во всех горизонтах почвенного профиля. В других почвах максимальное содержание CO_2 карбонатов обычно приурочено к горизонтам АВса и Вса. Исключением из этого является черноземно-луговая почва разреза 3БС-18, расположенного в проточном понижении, где данные карбонаты отмыты на всю глубину почвенного профиля (см. табл. 2).

Согласно принятым грациям содержания частиц физической глины [12, 15], минеральные горизонты данных мерзлотных почв в основном характеризуются как супесчано-легко- и средне-суглинистые (разрезы 2БС-09, 3БС-18, 4БС-18,

12БС-18) либо как супесчано-средне- и тяжело-суглинистые (разрез 7БС-18).

По результатам микробиологического исследования, численность микроорганизмов в мерзлотных лугово-степных почвах ЯБС в июле 2019 г., изменялась от $8,2 \pm 3,3 \times 10^1$ до $2,4 \pm 0,8 \times 10^6$ КОЕ/г почвы (табл. 3). Полученная численность микроорганизмов оказалась незначительной, что можно объяснить чрезвычайно жаркими и засушливыми летними месяцами 2019 г., что подтверждают данные метеослужбы Республики Саха (Якутия) [16]. Нехарактерные природные условия сказались на состоянии микробиоты исследуемых почв. Тем не менее, максимальное количество микроорганизмов (актиномицеты $-2,4 \pm 0,8 \times 10^6$ КОЕ/г) было отмечено в горизонте А (10–20 см) черноземно-луговой почвы разреза 3БС-18 злаково-разнотравного луга. По химическим данным, на этой глубине отмечено наибольшее содержание

Таблица 3
Количественный состав микробиоценозов мерзлотных почв Центральной Якутии, июль 2019 г.

Table 3

Quantitative composition of microbiocenoses in cryogenic soils of Central Yakutia, July 2019

Горизонт	Бактерии на МПА	Бактерии на среде Эшби	Актиномицеты	Микромицеты	Целлюлозолитики	Азотфиксаторы
	КОЕ/г					%
Чернозем, разрез 2БС-09						
Aa	$6,4 \pm 1,7 \times 10^5$	$6,8 \pm 2,0 \times 10^5$	$4,2 \pm 0,4 \times 10^5$	$5,9 \pm 0,6 \times 10^5$	$1,0 \pm 0,1 \times 10^2$	96,0
AB	$1,1 \pm 0,1 \times 10^5$	$1,5 \pm 0,3 \times 10^5$	$1,1 \pm 0,5 \times 10^4$	$7,8 \pm 1,5 \times 10^4$	$8,2 \pm 3,3 \times 10^1$	4,0
B	$2,8 \pm 1,5 \times 10^4$	$1,0 \pm 0,2 \times 10^5$	$1,1 \pm 0,6 \times 10^4$	$2,3 \pm 0,6 \times 10^4$	$1,1 \pm 0,2 \times 10^2$	0,6
BCca	$1,7 \pm 1,0 \times 10^4$	$2,9 \pm 0,6 \times 10^4$	0	0	—	—
Cca	0	0	0	0	—	—
Черноземно-луговая, разрез 3БС-18						
Av	$4,3 \pm 2,7 \times 10^4$	$4,9 \pm 3,2 \times 10^4$	$4,3 \pm 2,7 \times 10^4$	$4,3 \pm 2,4 \times 10^4$	$5,7 \pm 2,5 \times 10^3$	6,6
A	$3,6 \pm 0,9 \times 10^5$	$5,8 \pm 1,4 \times 10^5$	$2,4 \pm 0,8 \times 10^6$	$6,4 \pm 3,8 \times 10^4$	$3,9 \pm 0,8 \times 10^3$	1,3
AB	$2,7 \pm 0,4 \times 10^5$	$2,3 \pm 1,2 \times 10^5$	$3,1 \pm 1,6 \times 10^4$	$4,8 \pm 2,1 \times 10^4$	$3,4 \pm 0,6 \times 10^3$	0,6
BC	$5,9 \pm 2,9 \times 10^5$	$2,9 \pm 1,1 \times 10^5$	$1,2 \pm 0,6 \times 10^4$	$2,4 \pm 1,1 \times 10^4$	—	—
C	$1,2 \pm 0,9 \times 10^5$	$5,4 \pm 1,9 \times 10^5$	$3,7 \pm 1,6 \times 10^4$	$3,1 \pm 1,8 \times 10^4$	—	—
Лугово-черноземная, разрез 4БС-18						
Aa	$9,9 \pm 3,8 \times 10^5$	$1,4 \pm 0,3 \times 10^6$	$5,6 \pm 0,3 \times 10^5$	$1,0 \pm 0,1 \times 10^6$	$1,7 \pm 0,1 \times 10^4$	9,3
ABca	$3,2 \pm 0,2 \times 10^5$	$4,3 \pm 0,7 \times 10^5$	$5,0 \pm 0,9 \times 10^4$	$5,6 \pm 1,5 \times 10^4$	$7,5 \pm 0,8 \times 10^3$	6,6
Bca	$3,5 \pm 0,3 \times 10^5$	$9,7 \pm 1,6 \times 10^5$	$2,2 \pm 0,4 \times 10^5$	$3,4 \pm 1,9 \times 10^4$	$7,2 \pm 0,7 \times 10^3$	0
BC	$1,9 \pm 0,3 \times 10^5$	$3,0 \pm 0,2 \times 10^5$	$1,8 \pm 0,3 \times 10^5$	$2,8 \pm 1,5 \times 10^4$	—	—
C	$3,9 \pm 0,5 \times 10^4$	$5,1 \pm 0,9 \times 10^4$	$1,1 \pm 0,5 \times 10^4$	0	—	—
Лугово-черноземная, разрез 12БС-18						
Av,ca	$5,5 \pm 0,1 \times 10^5$	$7,1 \pm 0,2 \times 10^5$	$2,1 \pm 0,8 \times 10^5$	$3,6 \pm 0,8 \times 10^5$	$2,3 \pm 0,8 \times 10^3$	2,6
Aca	$7,6 \pm 0,6 \times 10^4$	$1,2 \pm 0,3 \times 10^5$	$1,7 \pm 0,9 \times 10^5$	$1,7 \pm 1,0 \times 10^4$	$1,3 \pm 0,1 \times 10^3$	10,6
ABca	$4,1 \pm 3,3 \times 10^4$	$6,5 \pm 1,2 \times 10^4$	$2,3 \pm 0,6 \times 10^4$	$4,7 \pm 0,6 \times 10^4$	$6,7 \pm 0,8 \times 10^2$	1,3
Bca	$6,9 \pm 1,6 \times 10^4$	$1,2 \pm 0,3 \times 10^5$	$1,2 \pm 0,6 \times 10^4$	$7,5 \pm 1,1 \times 10^4$	—	—
BCca	$4,4 \pm 1,2 \times 10^4$	$8,1 \pm 4,1 \times 10^4$	$8,1 \pm 2,7 \times 10^4$	$6,3 \pm 2,3 \times 10^4$	—	—

Примечание. «0» – не обнаружено, прочерк – не определено.

Note. «0» – not detected, dash – not determined. * – the value of loss on ignition is given.

гумуса (9,2 %), азота (0,86 %) и обменных катионов Ca^{+2} , Mg^{+2} (38,7 ммоль(экв)/100 г), также следует отметить отсутствие карбонатов CO_2 (см. табл. 2). Как уже было отмечено, черноземно-луговые почвы относятся к полугидроморфным типам почв, поэтому данная почва оказалась на более увлажненной из всех исследованных (18,0–22,3 %).

Преобладание актиномицетов в микробоценозе данной почвы объясняется высоким содержанием гумуса. Ведь как известно, актиномицеты встречаются в почвах, богатых растительными остатками, принимают активное участие в их разложении и в процессах минерализации гумуса в почвах. Наименьшее количество актиномицетов ($1,1 \pm 0,5 \times 10^4$ КОЕ/г) было обнаружено в черноземе разреза 2БС-18, где содержание гумуса оказалось средним (см. табл. 2, 3) [13].

Максимальное количество аммонифицирующих бактерий ($9,9 \pm 3,8 \times 10^5$ КОЕ/г) было отмечено в лугово-черноземной почве разреза 4БС-18, в поверхностном горизонте почвы Аа, а минимальное количество этих бактерий ($1,2 \pm 0,6 \times 10^4$ КОЕ/г) – в солончаке солонцеватом разреза 7БС-18, на глубине 80–90 см [4]. Наибольшее содержание бактерий на среде Эшби (олигонитрофилы – $1,4 \pm 0,3 \times 10^6$ КОЕ/г) было обнаружено в лугово-черноземной почве разреза 4БС-18, в том же горизонте Аа, где было выявлено максимальное содержание аммонификаторов. Наименьшее количество олигонитрофилов ($1,2 \pm 0,6 \times 10^4$ КОЕ/г) наблюдалось также в солончаке солонцеватом разреза 7БС-18 на глубине 80–90 см [4]. Больше всего мицелиальных грибов (микромикетов) ($1,0 \pm 0,1 \times 10^6$ КОЕ/г) было выявлено в вышеназванной почве разреза 4БС-18, в том же горизонте Аа (см. табл. 3). Минимальное количество мицелиальных грибов ($1,2 \pm 0,6 \times 10^4$ КОЕ/г) отмечено в солончаке солонцеватом разреза 7БС-18 в верхнем горизонте А [4]. Исходя из этих данных, была подсчитана общая численность микроорганизмов для каждой почвы. Наиболее богатой ($1,5 \pm 0,7 \times 10^6$ КОЕ/г) оказалась мерзлотная лугово-черноземная почва разреза 4БС-18, заложенного на пашне. Чуть меньшее значение ($1,2 \pm 0,6 \times 10^6$ КОЕ/г) общей численности микроорганизмов было определено в микробоценозе черноземно-луговой почвы разреза 3БС-18, заложенного на злаково-разнотравном лугу. Второе место по ОЧМ заняли два разреза – 2БС-09 и 12БС-18 с соответствующими значениями $5,8 \pm 4,4 \times 10^5$ и $5,8 \pm 3,1 \times 10^5$ КОЕ/г.

Общая численность микроорганизмов в микробоценозе солончака солонцеватого оказалась минимальной и составляла $5,0 \pm 0,1 \times 10^4$ КОЕ/г [4].

В микробоценозе лугово-черноземной почвы разреза 4БС-18 были выявлены максимальные содержания четырех групп исследуемых микроорганизмов, а именно аммонифицирующих ($9,9 \pm 3,8 \times 10^5$ КОЕ/г), олигонитрофильных ($1,4 \pm 0,3 \times 10^6$), мицелиальных грибов ($1,0 \pm 0,1 \times 10^6$) и целлюлозолитиков ($1,7 \pm 0,1 \times 10^4$ КОЕ/г). Пул бактерий был локализован в поверхностном горизонте Аа, на глубине 0–23 см (см. табл. 3).

Исходя из вышеизложенного, ОЧМ в микробных сообществах изучаемых мерзлотных почв возрастала в следующей последовательности: солончак солонцеватый (разрез 7БС-18) $5,0 \pm 0,1 \times 10^4$, лугово-черноземная (разрез 12БС-18) $5,8 \pm 3,1 \times 10^5$ и чернозем (разрез 2БС-09) $5,8 \pm 4,4 \times 10^5$, черноземно-луговая (разрез 3БС-18) $1,2 \pm 0,6 \times 10^6$, лугово-черноземная (разрез 4БС-18) $1,5 \pm 0,7 \times 10^6$.

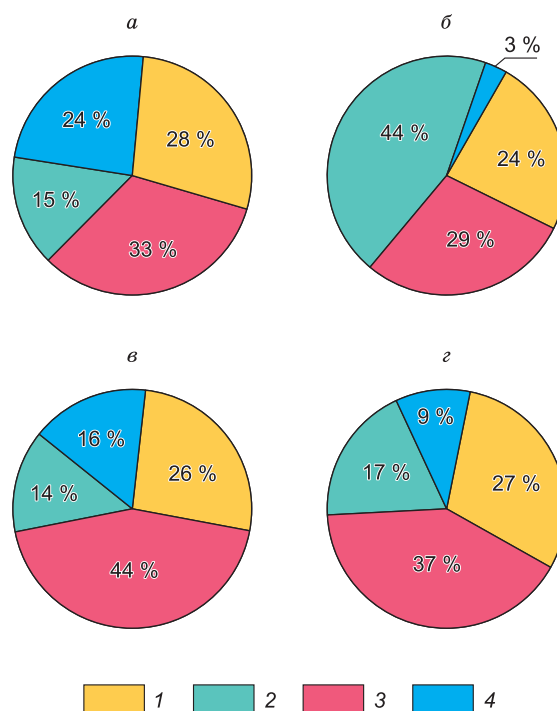
Если сравнить две лугово-черноземные почвы разрезов 4БС-18 и 12БС-18, то можно проследить их различия не только по химическому составу и гидротермическим параметрам, но и по содержанию микроорганизмов. Разрез 4БС-18 заложен на пашне, а разрез 12БС-18 – на разнотравно-злаковом лугу (целина). По гидротермическим условиям данные почвы различались. Так, в лугово-черноземной почве разреза 4БС-18 влажность почвы была низкой и держалась на одном уровне по всей глубине почвенного профиля 11,0–12,3 %, а температура почвы (8,6–19,1 °С) падала с глубиной (см. табл. 2). В лугово-черноземной почве разреза 12БС-18 влажность была выше (15,1–23,3 %), чем в почве разреза 4БС-18, а температура, наоборот, была пониженной (2,5–13,8 °С) и также падала с глубиной. Лугово-черноземная почва разреза 12БС-18 оказалась наиболее увлажненной среди всех исследуемых почв и наименее прогретой. Лугово-черноземная почва разреза 4БС-18 оказалась менее увлажненной, но более теплой. По химическим данным, почвы различались по количеству гумуса, N и обменных катионов. В почве разреза 4БС-18 содержание последних оказалось чуть пониженным, чем в почве разреза 12БС-18, но содержание обменного катиона Ca^{+2} у обеих почв было практически равным. По показаниям pH обе лугово-черноземные почвы оказались (8,0–9,4) щелочными и сильнощелочными. В лугово-черноземной почве разреза 12БС-18 свободных карбонатов было больше, чем в почве разреза

4БС-18, при этом первая почва была более засоленной. По общей численности микроорганизмов микробоценоз лугово-черноземной почвы разреза 4БС-18 ($1,5 \pm 0,7 \times 10^6$ КОЕ/г) оказался более насыщенным микроорганизмами, чем микробоценоз лугово-черноземной почвы разреза 12БС-18 ($5,8 \pm 3,1 \times 10^5$ КОЕ/г), при этом разница в ОЧМ составила почти 3 раза. Таким образом, здесь основными отличительными признаками являлись содержание карбонатов и засоленность почв. Засоленность почв негативно влияет на жизнедеятельность почвенных микроорганизмов, что может привести к ухудшению свойств почв. Следовательно, по химическим и гидротермическим показателям почва разреза 4БС-18 оказалась наиболее благоприятной для развития почвенных микроорганизмов.

Для оценки биологической активности изучаемых мерзлотных почв был проведен анализ на наличие аэробных целлюлозолитических и азотфиксирующих микроорганизмов. Содержание целлюлозолитических микроорганизмов варьировало в пределах $8,2 \pm 3,3 \times 10^1$ – $1,7 \pm 0,1 \times 10^4$ КОЕ/г, а их максимальное количество было зафиксировано в мерзлотной лугово-черноземной почве разреза 4БС-18 (см. табл. 3).

Азотфиксирующие бактерии были определены почти во всех изучаемых мерзлотных почвах, за исключением солончака солонцеватого [4], а их максимальное количество (96,0 %) отмечалось в черноземе разреза 2БС-09, в единственной незасоленной почве из всех исследованных (см. табл. 3). Известно, что азотобактер обитает в плодородных почвах, а засоленность, как было указано выше, считается одним из факторов, отрицательно влияющих на качество и плодородие почвы. Остальные исследуемые почвы оказались в разной степени засоленными и характеризовались наличием различных солевых профилей, но тем не менее, азотфиксаторы в них были обнаружены – в наименьшем содержании, равном 1,3–10,3 %. В целом, изучаемые мерзлотные почвы имели низкую биологическую активность, так как согласно вышеупомянутой шкале их обогащенность гумусом и азотом считалась низкой и очень низкой [13].

Исходя из данных по ОЧМ, было рассчитано процентное соотношение исследуемых групп микроорганизмов в каждой почве (см. рисунок). Результаты по содержанию эколого-физиологических групп микроорганизмов показали разные процентные соотношения в микробных сообще-



Соотношение состава функциональных групп в микробоценозах исследуемых почв, 2019 г.

а – чернозем (разр. 2БС-09); б – черноземно-луговая (разр. 3БС-18); в – лугово-черноземная (разр. 4БС-18); г – лугово-черноземная (разр. 12БС-18). 1 – бактерии на МПА; 2 – актиномицеты; 3 – бактерии на среде Эшби; 4 – грибы (микромикеты)

The ratio of the composition of functional groups (%) in the microbiocenoses of the studied soils, 2019.

а – chernozem; б – chernozemic-meadow; в – meadow-chernozem; г – meadow-chernozem. 1 – Bacteria on MPA; 2 – Actinomycetes; 3 – Bacteria on Ashby; 4 – Micromycetes

ствах изучаемых почв. Так в микробном сообществе чернозема (разрез 2БС-09) доминировали бактерии на среде Эшби (олигонитрофильные бактерии – 33 %), затем бактерии на МПА (аммонификаторы – 28), мицелиальные грибы (24) и актиномицеты (15 %) (см. рисунок, а).

В микробоценозе черноземно-луговой почвы (разрез 3БС-18) преобладали актиномицеты (44 %), бактерии на среде Эшби (олигонитрофилы – 29), бактерии на МПА (аммонификаторы – 24) и мицелиальные грибы (3 %) (см. рисунок, б). В наиболее насыщенной микроорганизмами лугово-черноземной почве (разрез 4БС-18) больше всего обнаружено бактерий на среде Эшби (олигонитрофилов – 44 %), затем бактерии на МПА (аммонификаторы – 26), грибы (16) и актиномицеты (14 %) (см. рисунок, в).

В составе микробного сообщества мерзлотной лугово-черноземной почвы разреза 12БС-18 было выявлено больше всего олигонитрофилов

(37 %), аммонификаторов (27), актиномицетов (17) и мицелиальных грибов (9 %) (см. рисунок, з). В микробном пуле солончака разреза 7БС-18, группа аммонифицирующих бактерий превосходила остальные – 35 %, второе место занимали олигонитрофилы (30), затем актиномицеты (25), и подавляющее меньшинство – мицелиальные грибы (10 %) [4].

Таким образом, в микробных комплексах исследуемых мерзлотных почв в основном доминировали олигонитрофильные бактерии, которые способны обитать в почвах с низким количеством азота. Следовательно, количество этих микроорганизмов в данных почвах подтверждает низкое содержание в них гумуса и общего азота.

Обнаружение в микробных сообществах исследуемых почв мицелиальных микроорганизмов позволяет судить об интенсивности протекания процессов, влияющих на биологическую активность почв. Так в наиболее обогащенной гумусом и увлажненной черноземно-луговой почве разреза 3БС-18 содержание почвенного органического вещества максимально составляло 29 %, и здесь было отмечено наибольшее количество актиномицетов – $2,4 \pm 0,8 \times 10^6$ КОЕ/г. Максимальное содержание мицелиальных грибов (24 %) отмечено в микробоценозе чернозема (разр. 2БС-09). Значимость мицелиальных грибов в почвах несомненна, так как они активно участвуют в деградации органики, круговороте веществ, поэтому их присутствие подтверждает биогенность данной почвы. Таким образом, соотношение определенных групп микроорганизмов в микробоценозах изучаемых почв зависело от содержания гумуса и общего азота.

Для установления зависимости количества почвенных микроорганизмов от гидротермических и химических показателей почв был проведен корреляционный анализ по каждой исследуемой почве. В черноземе разреза 2БС-09 достоверных для данного уровня доверительной вероятности коэффициентов корреляции между количеством микроорганизмов, гидротермическими и химическими почвенными показателями обнаружено не было. Однако, здесь наблюдались более значительные положительные корреляционные связи между количеством исследуемых групп микроорганизмов и другими параметрами ($r = 0,740-0,806$), за исключением влажности ($r = 0,380-0,404$). Существенную корреляционную зависимость ($r = 0,770-0,833$) отмечали у численности олигонитрофильных бактерий

от температуры. Корреляционная связь количества микроорганизмов и pH почвы носила незначительный и отрицательный характер. В микробоценозе данной почвы численность микроорганизмов зависела в большей степени от содержания гумуса и температуры почвы (табл. 4).

Высокое статистически достоверное значение коэффициента корреляции ($r = 0,967$) было обнаружено между численностью актиномицетов и влажностью почвы в мерзлотной черноземно-луговой почве разреза 3БС-18. В данной почве был отмечен значительный положительный коэффициент корреляции между численностью аммонификаторов и pH ($r = 0,845$). Количество актиномицетов здесь также зависело от pH, но связь была отрицательной ($r = -0,855$). В микробоценозе черноземно-луговой почвы разреза 3БС-18 численность микроорганизмов не зависела от температуры почвы и содержания азота (см. табл. 4).

Высокие коэффициенты корреляции, как положительные, так и отрицательные с pH почвы (r от $-0,886$ до $0,960$), гумусом ($r = 0,884-0,910$) и содержанием азота ($r = 0,800-0,975$) были обнаружены у аммонифицирующих бактерий, актиномицетов и микромицетов в микробоценозе лугово-черноземной почвы разреза 4БС-18. Также были выявлены статистически значимые коэффициенты корреляции ($r = 0,920-0,993$) в лугово-черноземной почве разреза 12БС-18, которые отмечались у трех групп микроорганизмов (аммонификаторов, олигонитрофилов и микромицетов) с содержанием гумуса и азота (см. табл. 4).

Летом 2019 г. для всех исследуемых мерзлотных почв ЯБС, кроме черноземно-луговой почвы разреза 3БС-18, не отмечались значимые корреляционные связи между численностью микроорганизмов и изучаемыми параметрами данных почв. В то время как проведенный корреляционный анализ для почвы вышеназванного разреза показал, что здесь отмечалась положительная статистически значимая корреляционная связь ($r = 0,967$) между влажностью этой почвы и количеством актиномицетов. В микробоценозах четырех почв, кроме черноземно-луговой почвы разреза 3БС-18, численность микроорганизмов находилась в сильной зависимости от температуры. Коэффициенты корреляции численности микроорганизмов и pH почвы были отрицательными. В микробных сообществах исследуемых мерзлотных почв численность микроорганизмов, как правило, коррелировала с содержаниями гу-

Таблица 4

Коэффициенты корреляции (r) между численностью микроорганизмов и физико-химическими параметрами в исследуемых почвах

Table 4

Correlation coefficients (r) between the number of microorganisms and the physicochemical parameters in the studied soils

Фактор	Бактерии на МПА	Бактерии на среде Эшби	Актиномицеты	Микромицеты
Разрез 2БС-09, мерзлотный чернозем				
Температура	0,760	0,806	0,675	0,741
Влажность	0,404	0,450	0,380	0,388
pH _{H₂O}	-0,761	-0,780	-0,656	-0,734
Гумус	0,781	0,783	0,690	0,763
N	0,761	0,743	0,670	0,740
Разрез 3БС-18, мерзлотная черноземно-луговая почва				
Температура	-0,256	-0,567	0,294	0,611
Влажность	0,030	0,691	0,967	0,742
pH _{H₂O}	0,845	0,520	-0,855	-0,434
Гумус	-0,673	-0,810	0,704	0,624
N	-0,611	-0,760	0,633	0,400
Разрез 4БС-18, мерзлотная лугово-черноземная почва				
Температура	0,866	0,833	0,690	0,704
Влажность	0,330	0,258	-0,003	0,193
pH _{H₂O}	-0,886	-0,680	-0,890	-0,960
Гумус	0,910	0,720	0,740	0,884
N	0,975	0,800	0,830	0,970
Разрез 12БС-18, мерзлотная лугово-черноземная почва				
Температура	0,781	0,770	0,680	0,681
Влажность	0,693	0,710	0,240	0,789
pH _{H₂O}	-0,182	-0,200	0,335	-0,350
Гумус	0,976	0,974	0,830	0,920
N	0,993	0,990	0,710	0,975

Примечание. Жирным шрифтом обозначены статистически значимые коэффициенты корреляции (p = 0,95).
Note. Statistically significant correlation coefficients (p = 0,95) are shown in bold.

муса и общего азота. В мерзлотной лугово-черноземной почве разреза 4БС-18, которая отличалась максимальной общей численностью микроорганизмов, наблюдались значимые положительные корреляционные зависимости между количеством микроорганизмов и почвенными параметрами, такими как температура, содержание гумуса и общего азота.

Заключение

Проведено комплексное исследование свойств, состава и микробиологической активности мерзлотных лугово-степных почв ЯБС на территории Центральной Якутии. Оценка данных по гидро-термическим показателям всех изученных почв позволила констатировать, что мерзлотный со-

лончак солонцеватый разреза 7БС-18 оказался наиболее теплой из всех изученных почв, здесь температура на глубине 90 см составляла 14 °С. Повышенной увлажненностью (15,1–23,3 %) выделялись почвы разрезов 3БС-18 и 12БС-18. Основными физико-химическими показателями, влияющими на численность и внутрипрофильное распределение микроорганизмов, являлись pH, содержание гумуса и общего азота. При этом необходимо отметить, что реакция среды этих мерзлотных почв, как правило, изменялась по их профилям сверху вниз от слабощелочной (pH 7,9–8,1) до сильнощелочной (pH 8,9–9,5). Внутрипрофильное распределение гумуса и азота в исследуемых мерзлотных почвах обычно характеризовалось как резко убывающее с мак-

симумами, отмечаемыми в верхних гумусовых горизонтах, и минимумами – в нижних минеральных.

Проведенные микробиологические исследования показали, что численность отдельных эколого-физиологических групп микроорганизмов в изучаемых мерзлотных почвах колебалась значительно от $8,2 \pm 3,3 \times 10^1$ до $2,4 \pm 0,8 \times 10^6$ КОЕ/г почвы. По возрастанию микробиологической активности исследуемые почвы можно выстроить в ряд: солончак солонцеватый (разрез 7БС-18) → лугово-черноземная (разрез 12БС-18) и чернозем (разрез 2БС-09) → черноземно-луговая (разрез 3БС-18) → лугово-черноземная (разрез 4БС-18). Наибольшее количество микроорганизмов по ОЧМ было обнаружено в мерзлотной лугово-черноземной почве разреза 4БС-18.

В микробоценозах данных мерзлотных почв отмечалось различное относительное содержание основных эколого-физиологических групп микроорганизмов в зависимости от типов почв, особенностей их свойств и состава. Так в микробоценозе чернозема разреза 2БС-09 доминировали олигонитрофильные бактерии, в черноземно-луговой почве разреза 3БС-18 – актиномицеты, в лугово-черноземной почве разреза 4БС-18 – олигонитрофилы, в солончаке солонцеватом разреза 7БС-18 – аммонификаторы. Доминирование определенных групп микроорганизмов зависело от химического состава и гидротермических показателей почв. В изучаемых почвах количество обнаруженных аэробных целлюлозолитических микроорганизмов было незначительно и его максимальное значение ($1,7 \pm 0,1 \times 10^4$ КОЕ/г) было отмечено в лугово-черноземной почве разреза 4БС-18. Азотфиксаторы обнаружены в четырех исследуемых почвах, за исключением солончака солонцеватого. Наибольшее содержание азотфиксаторов отмечено в черноземе, в единственной незасоленной почве из всех исследуемых. В пределах почвенных профилей максимальное количество изучаемых микроорганизмов отмечалось в органо-аккумулятивных горизонтах, затем вниз по профилю наблюдался спад их численности.

Оценка корреляционной зависимости численности микроорганизмов от параметров исследуемых почв показала, что количества микроорганизмов в основном следовали за изменениями содержания гумуса и азота. В микробоценозах исследуемых мерзлотных почв численность микро-

организмов также больше зависела от температуры, нежели от влажности почвы. Коэффициенты корреляции связей численности микроорганизмов со значениями pH почв оказались отрицательными для всех исследованных почв.

Полученные результаты микробиологических исследований мерзлотных лугово-степных почв исследуемого региона криолитозоны могут быть использованы для биоиндикации их почвенного плодородия, а также для определения степени антропогенной и агрогенной трансформаций криогенных почв.

Список литературы / References

1. Еловская Л.Г. Почвы территории Чочур-Муранской опытно-биологической лаборатории. *Научные сообщения*. 1961;(5):3–11.
2. Yelovskaya L.G. Soils of the territory of the Chochur-Muransk experimental biological laboratory. *Scientific reports*. 1961;(5):3–11. (In Russ.)
3. Горохов А.Н., Чевычелов А.П., Николаева О.А. Особенности природных условий ботанического сада Института биологических проблем криолитозоны. *Проблемы региональной экологии*. 2020;(2):15–19. <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2020-12015>.
4. Gorokhov A.N., Chevychelov A.P., Nikolaeva O.A. Features of natural conditions of the Botanical Garden Institute of Biological Problems of the Cryolithozone. *Regional Environmental Issues*. 2020;(2):15–19. (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2020-12015>.
5. Чевычелов А.П., Горохов А.Н., Николаева О.А. и др. Почвенно-растительный покров Якутского ботанического сада. Новосибирск: Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние РАН; 2022. 164 с. <https://doi.org/10.53954/9785604782408>
6. Chevychelov A.P., Gorokhov A.N., Nikolaeva O.A., et al. *Soil and vegetation cover of the Yakut Botanical Garden*. Novosibirsk: Russian Academy of Sciences, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2022. 164 p. (In Russ.) <https://doi.org/10.53954/9785604782408>.
7. Кузьмина Н.П., Ермолаева С.В., Чевычелов А.П. Микробоценозы мерзлотных лугово-степных почв Центральной Якутии в экстремальных условиях засоления. В кн.: *Почвы и окружающая среда: Сборник научных трудов Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 55-летию Института почвоведения и агрохимии СО РАН, г. Новосибирск, 2–6 октября 2023 г.* Новосибирск: ИПА СО РАН; 2023. С. 297–301. <https://doi.org/10.31251/conf1-2023>
8. Kuzmina N.P., Ermolaeva S.V., Chevychelov A.P. Microbiocenoses of cryogenic meadow-steppe soils of Central Yakutia in extreme salinity conditions. In: *Soils and the Environment: Collection of scientific papers of the Russian Scientific Conference with international par-*

icipation dedicated to the 55th anniversary of the Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS, Novosibirsk, October 2-6, 2023. Novosibirsk: IPA SB RAS; 2023, pp. 297–301. (In Russ.) <https://doi.org/10.31251/conf1-2023>

5. Роде А.А. Система методов исследования в почвоведении. Новосибирск: Наука; 1971. 92 с.

Rode A. A. A system of research methods in soil science. Novosibirsk: Nauka, 1971. 92 p. (In Russ.)

6. Розанов Б.Г. Морфология почв. М.: Изд-во Моск. ун-та; 1983. 320 с.

Rozanov B.G. Morphology of soils. Moscow: Publishing House of Moscow University; 1983. 320 p. (In Russ.)

7. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во Московского университета; 1970. 487 с.

Arinushkina E.V. Manual on chemical analysis of soils. Moscow: Publishing House of Moscow University; 1970. 487 p.

8. Воробьева Л.А. Химический анализ почв. М.: Изд-во Московского университета; 1989. 272 с.

Vorobyeva L.A. Chemical analysis of soils. Moscow: Publishing House of Moscow University; 1989. 272 p.

9. Еловская Л.Г. Классификация и диагностика мерзлотных почв Якутии. Якутск: Якутский филиал СО АН СССР; 1987. 172 с.

Yelovskaya L.G. Classification and diagnostics of cryogenic soils in Yakutia. Yakutsk: Yakut Branch of the Siberian Branch of the Academy of Sciences of the USSR; 1987. 172 p. (In Russ.)

10. Методы почвенной микробиологии и биохимии. Звягинцев Д.Г. (ред.) М.: Изд-во Московского университета; 1991. 304 с.

Methods of soil microbiology and biochemistry. Zvyagintsev D.G. (ed). Moscow: Publishing House University; 1991. 304 p. (In Russ.)

11. Коноровский А.К. Зональность и мерзлотность почв Якутии. Якутск; 1990. 43 с.

Konorovsky A.K. Zonality and cryogenic of soils of Yakutia. Yakutsk; 1990. 43 p. (In Russ.)

12. Мякина Н.Б., Аринушкина Е.В. Методическое пособие для чтения результатов химических анализов почв. М.: Изд-во Московского университета; 1979. 63 с.

Myakina N.B., Arinushkina E.V. Methodological guide for interpreting the results of soil chemical analyses. Moscow: Publishing House of Moscow University; 1979. 63 p. (In Russ.)

13. Орлов Д.С., Лозанская И.Н., Попов П.Д. Органическое вещество почв и органические удобрения. М.: Изд-во Московского университета; 1985. 98 с.

Orlov D.S., Lozanskaya I.N., Popov P.D. Organic matter of soils and organic fertilizers. Moscow: Publishing House of Moscow University; 1985. 98 p. (In Russ.)

14. Чевычелов А.П., Скрыбыкина В.П., Васильева Т.И. Географо-генетические особенности формирования свойств и состава мерзлотных почв Центральной Якутии. Почвоведение. 2009;(6):648–657. <https://doi.org/10.1134/S1064229309060039>

Chevychelov A.P., Skrybykina V.P., Vasil'eva T.I. Geographic and genetic specificity of permafrost-affected soils in central Yakutia. Eurasian Soil Science. 2009;42(6): 600–608. <https://doi.org/10.1134/S1064229309060039>

15. Практикум по почвоведению. Кауричев И.С. (ред.) М.: Колос; 1980. 272 с.

Soil science workshop. Kaurichev I.S. (ed.) Moscow: Kolos Publ.; 1980. 272 p. (In Russ.)

16. Якутское УГМС – гидрометеорологическая информация в Республике Саха (Якутия). Режим доступа: <https://ykuthydromet.ru>

Yakut UGMS – hydrometeorological information in the Republic of Sakha (Yakutia). Available at: <https://ykuthydromet.ru>

Об авторах

КУЗЬМИНА Надежда Петровна, кандидат биологических наук, научный сотрудник, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0009-4581-7085>, ResearcherID: ABT-0098-2022, Scopus Author ID: 55237081500, SPIN: 2067-0172, e-mail: erel1982@mail.ru

ЕРМОЛАЕВА Светлана Валерьевна, инженер-исследователь, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-4173-4970>, ResearcherID: ANH-9453-2022, Scopus Author ID: 57322414800, SPIN: 5171-4571, e-mail: sveta_efa@mail.ru

ЧЕВЫЧЕЛОВ Александр Павлович, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, <http://orcid.org/0000-0002-2668-9745>, ResearcherID: D-7565-2018, Scopus Author ID: 6602651664, SPIN: 6088-1487, e-mail: chev.soil@list.ru

Вклад авторов

Кузьмина Н.П. – разработка концепции, методология, верификация данных, проведение статистического анализа, создание черновика рукописи, редактирование рукописи, руководство исследованием; **Ермолаева С.В.** – проведение исследования, ресурсное обеспечение исследования, визуализация; **Чевычелов А.П.** – разработка концепции, методология, верификация данных, ресурсное обеспечение исследования, руководство исследованием

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

KUZMINA, Nadezhda Petrovna, Cand. Sci. (Biol.), Scientific Researcher, Institute for Biological Problems of Cryolithozone, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0009-4581-7085>, ResearcherID: ABT-0098-2022, Scopus Author ID: 55237081500, SPIN: 2067-0172, e-mail: ere11982@mail.ru

ERMOLAEVA, Svetlana Valeryevna, Research Engineer, Institute for Biological Problems of Cryolithozone, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-4173-4970>, ResearcherID: AHH-9453-2022, Scopus Author ID: 57322414800, SPIN: 5171-4571, e-mail: sveta_efa@mail.ru

CHEVYCHELOV, Aleksandr Pavlovich, Dr. Sci. (Biol.), Chief Researcher, Institute for Biological Problems of Cryolithozone, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-2668-9745>, ResearcherID: D-7565-2018, Scopus Author ID: 6602651664, SPIN: 6088-1487, e-mail: chev.soil@list.ru

Authors' contribution

Kuzmina N.P. – conceptualization, methodology, validation, formal analysis, writing – original draft, writing – review & editing, supervision; **Ermolaeva S.V.** – investigation, resources, visualization; **Chevychelov A.P.** – conceptualization, methodology, validation, resources, supervision

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 22.05.2024

Поступила после рецензирования / Revised 21.11.2024

Принята к публикации / Accepted 10.12.2025



Оригинальная статья

Почвы на лёссовидных суглинках в сезонномерзлотных ландшафтах Селенгинского среднегорья (Западное Забайкалье)

Д. П. Сымпилова[✉], А. Б. Гынинова, Е. Ю. Шахматова

Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН, г. Улан-Удэ, Российская Федерация
[✉]darimasp@mail.ru

Аннотация

Лёссовидные суглинки Селенгинского среднегорья развиваются в слое длительно сезонно-промерзающих грунтов, для которых характерна малольдистая, «сухая» мерзлота. Цель работы – изучить генетические особенности почв на лёссовидных суглинках, формирующихся в условиях длительной сезонной мерзлоты Селенгинского среднегорья. Объектами исследования послужили дерново-палево-подзолистые грубогумусовые и палевые грубогумусированные оподзоленные остаточно-карбонатные почвы, которые расположены в элювиальных и трансэлювиальных позициях водоразделов основных хребтов Селенгинского среднегорья. В работе применен профилно-генетический метод. Изучение физических и химических свойств почв проведено с использованием ряда методов: общий органический углерод (C_{org}) определяли методом Тюрина; железо оксалат-растворимое – методом Тамма; гранулометрический состав определялся пипеточным методом. Типы почв были определены согласно Классификации и диагностике почв России и World Reference Base for Soil Resources. Ведущая роль в генезисе и свойствах исследованных почв принадлежит криогенным процессам. Установлено, что для дерново-палево-подзолистых грубогумусовых почв – дифференциация по элювиально-иллювиальному типу, для подзолистых горизонтов свойственна тонкопластинчатая структура со скелетаной на поверхности педов. Впервые изучена палевая грубогумусированная оподзоленная остаточно-карбонатная почва, которая слабо дифференцирована по цвету, структуре, гранулометрическому и валовому химическому составу. В связи с наличием в почвенном профиле углистых частиц, свидетельствующих о частых низовых пожарах, необходимо проводить мониторинг лесных пожаров и природоохранные мероприятия по сохранению природных ресурсов в условиях криолитозоны Селенгинского среднегорья.

Ключевые слова: лёссовидные суглинки, мерзлотное почвообразование, химические свойства, криогенное оструктуривание

Финансирование. Работа выполнена в рамках бюджетной темы (№ FWSM-2021-0004).

Для цитирования: Сымпилова Д.П., Гынинова А.Б., Шахматова Е.Ю. Почвы на лёссовидных суглинках в сезонномерзлотных ландшафтах Селенгинского среднегорья (Западное Забайкалье). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(1):109–118. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-1-109-118>

Original article

Soils in loess-like loams within the seasonally frozen landscapes of the Selenga Middle Mountains (Western Transbaikial Region)

Darima P. Sympilova[✉], Ayur B. Gyninova, Ekaterina Yu. Shakhmatova

Institute of General and Experimental Biology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Ulan-Ude, Russian Federation
[✉]darimasp@mail.ru

Abstract

Loess-like loams in the Selenga Middle Mountains are formed within a layer of soils that experience prolonged seasonal freezing. The permafrost in this area is characterized by a low ice content. This study aims to explore the genetic characteristics of soils derived from loess-like loams under the long-term seasonal permafrost conditions prevalent in the Selenga Middle Mountains. The research focuses on Eutric Retisol and Eutric Cryosol, which are located

in eluvial and transeluvial positions on the watersheds of the primary ridges in the region. A profile-genetic approach was employed, and the physical and chemical characteristics of the soils were evaluated using standardized methodologies. The total organic carbon (C_{org}) content was measured in accordance with the Tyurin method, while the analysis of oxalate-extractable iron was conducted utilizing the Tamm method. The particle-size distribution was assessed through the pipette method. Soil classification adhered to the standards set forth in the Classification and Diagnostics of Soils of Russia and the World Reference Base for Soil Resources. The genesis and characteristics of the soils under investigation are predominantly influenced by cryogenic processes. Eutric Retisol exhibits a differentiation consistent with eluvial-illuvial processes, while the podzolic horizons are characterized by a thin-plate structure with a skeletal surface on the peds. This research represents the first examination of Eutric Cryosol, which displays minimal differentiation in terms of color, structure, soil texture, and elemental composition. The practical implications of this study are significant for the sustainable management of soil resources within the permafrost zone of the Selenga Middle Mountains. The presence of charcoal particles within the soil profile suggests a history of frequent ground fires, highlighting the necessity for monitoring forest fires and implementing environmental protection measures to safeguard natural resources.

Keywords: loess-like loams, permafrost soil formation, chemical characteristics, cryogenic structuring

Funding. This study was conducted within the framework of the budgeted topic (No. FWSM-2021-0004).

For citation: Sympilova D.P., Gyninova A.B., Shakhmatova E.Yu. Soils in loess-like loams within the seasonally frozen landscapes of the Selenga Middle Mountains (Western Transbaikial Region). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(1):109–118. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-109-118>

Введение

Исследования влияния мерзлоты на почвообразование в ландшафтах Западного Забайкалья начались с работ Переселенческого управления, проводившихся под управлением К.Д. Глинки. В работах Л.И. Прасолова [1], Н.А. Ногиной [2], В.А. Вторушина [3], А.И. Куликова и др. [4], Н.Б. Бадмаева и др. [5], Г.Д. Чимитдоржиевой [6] и других исследователей показана специфика почвообразования в условиях вечной мерзлоты и длительно-сезоннопромерзающих грунтов Забайкалья.

Почвы, формирующиеся под влиянием мерзлотного фактора, А.О. Макеев предлагает объединить в криогенные почвы [7]. Такие почвы развиваются в периодически изменяющихся климатических условиях. Эти изменения проявляются в гидротермическом режиме, биологических процессах, физико-химических свойствах и морфологическом облике почв.

Ранее в отчетах экспедиций Переселенческого управления таежные почвы Южного Забайкалья объединялись с почвами подзолистого типа и выделялись как «слабоподзолистые» и «скрытоподзолистые», подчеркивалась слабая степень их оподзоленности или ее отсутствие [1]. Мерзлотно-таежные почвы со слабодифференцированным профилем описаны Н.А. Ногиной [2]. Подзолистые почвы плакорных водоразделов Восточного Забайкалья изучены Т.А. Соколовой и И.А. Соколовым [8]. В.А. Вторушиным в почвенном покрове верхней и средней тайги Южного Забайкалья выделены криоземы, в южной

тайге – дерновые таежные и дерново-подзолистые почвы [3]. При исследовании дерновых почв Усть-Селенгинской впадины установлено их сходство с палево-бурыми почвами Якутии [9]. Изучены дерново-подзолистые почвы на северном макросклоне хр. Цаган-Дабан в Селенгинском среднегорье [10].

В настоящее время в условиях изменения климата изучение физико-химических свойств мерзлотных почв, уточнение их классификационного положения являются актуальным.

Цель работы – изучить генетические особенности почв на лёссовидных суглинках, формирующиеся в условиях длительной сезонной мерзлоты Селенгинского среднегорья.

Материалы и методы

Селенгинское среднегорье расположено в переходной климатической зоне между прохладным континентальным климатом (Dwc) и холодным полуаридным климатом (Bsk) (обновленная карта мира климатической классификации Кёппена–Гейгера) [11]. В Селенгинском среднегорье в зимнее время устанавливается антициклональная атмосферная циркуляция воздушных масс, происходят сильное похолодание и иссушение почв. Низкие зимние температуры воздуха с малой высотой снежного покрова способствуют длительному сезонному промерзанию почв. Годовое количество осадков на водоразделах основных хребтов может достигать 300–400 мм.

Согласно геоэкологическому районированию, Селенгинское среднегорье находится в Забай-

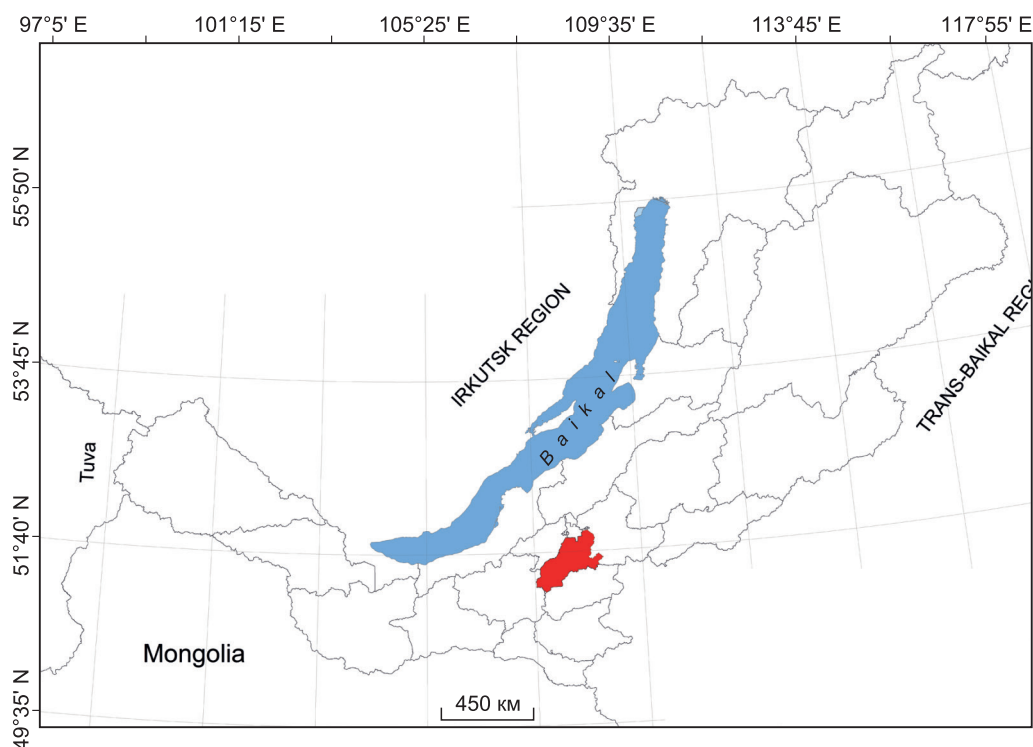


Рис. 1. Карта-схема территории исследования

Fig. 1. Schematic map of the study area

кальской геокриологической области южной геокриологической зоны. Криолитозона здесь имеет островное распространение и занимает до ~30 % территории [12].

Объектами исследования послужили дерново-палево-подзолистые грубогумусовые почвы, которые формируются на лёссовидных суглинках под лиственнично-березово-разнотравными с примесью кедра лесами, и палевые грубогумусированные оподзоленные остаточнo-карбонатные почвы, которые формируются на лёссовидных суглинках под сосново-лиственнично-березовыми с богатым разнотравьем лесами (рис. 1). В ландшафтно-геохимической катене северного склона хр. Цаган-Дабан Селенгинского среднегорья эти почвы расположены в наиболее гумидной части хр. Цаган-Дабан (рис. 2). Здесь в центральной части хребта с отметкой более 1000 м встречаются циркообразные водосборы, в которых концентрируются значительные массы воды. В осевой части хребта на выположенных вершинах элювий состоит из лёссовидных суглинков, имеет суглинистый гранулометрический состав с преобладанием фракции крупной пыли и мелкого песка. Суглинки характеризуются желтовато-бурой окраской, однородным строением,

комковато-ореховатой структурой. Мощность их может достигать 2–3 м [13]. На склонах в результате денудации (дефлюкции, солифлюкции) формируются на месте и поступают с водораздельной части лёссовидные суглинки с включением щебня и хряща.

В формировании лёссовидных суглинков на водоразделах и склонах Селенгинского среднегорья ведущая роль принадлежит криогенным процессам. Многолетнемерзлые породы здесь представлены малольдистой, «сухой» мерзлотой.

В работе использовались сравнительно-географический и профильно-генетический методы. Морфологическое описание почвенных горизонтов проведено согласно Б.Г. Розанову [13]. Для определения физико-химических свойств почв были применены общепринятые исследования: рН водной суспензии определялся потенциометрическим методом, содержание органического углерода – спектрофотометрическим методом, гидролитическая кислотность – по методу Каппена в модификации ЦИНАО, гранулометрический состав определялся пипеточным методом по Н.А. Качинскому, железо – в вытяжках Тамма [15, 16]. Валовой химический состав почв определялся с использованием титриметриче-

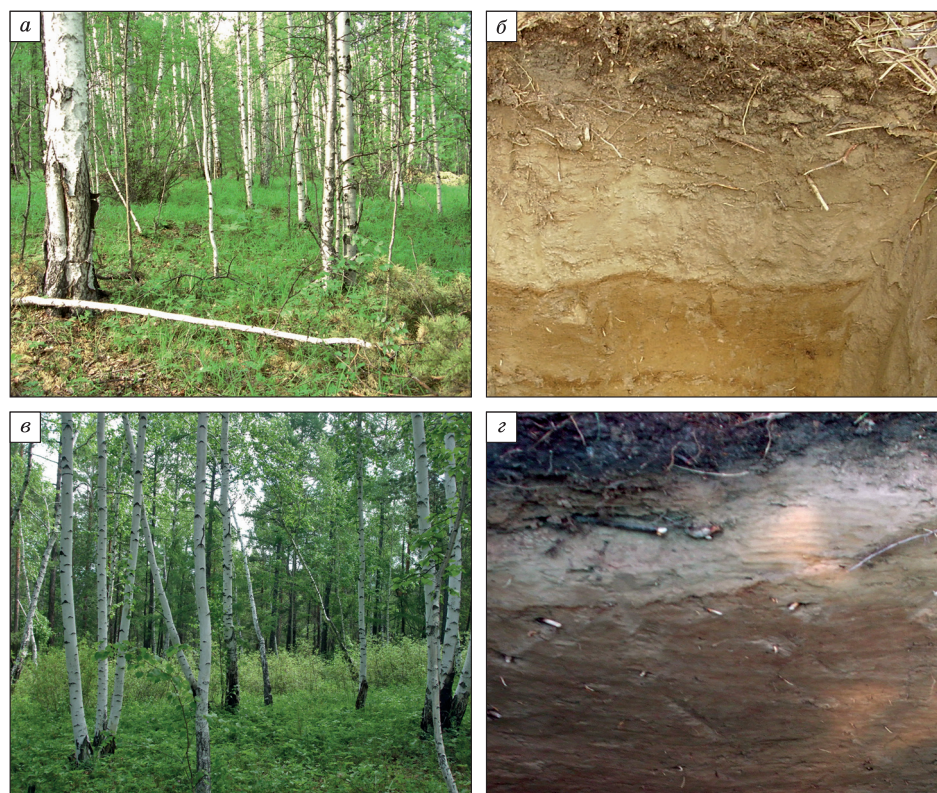


Рис. 2. Почвы на лёссовидных суглинках северного склона хр. Цаган-Дабан Селенгинского среднегорья (а, б – разрез 18А-11; в, г – разрез 1А-10)

Fig. 2. The soils found in the loess-like loams situated on the northern slope of the Tsagan-Daban ridge within the Selenga middle mountains. (а, б – pit 18А-11; в, г – pit 1А-10)

ского, гравиметрического, пламенно-фотометрического, спектрофотометрического методов и предварительной подготовкой образцов методом кислотного разложения и спекания с содой. Индексы цвета почвенных горизонтов определялись в сухом состоянии по шкале Манселла. Типы почв определены согласно Классификации и диагностике почв России и Полевому определителю [17, 18], WRB [19]. Почвенные разрезы были заложены в июне 2010 и июле 2011 гг., обработано 40 образцов.

Результаты

Разрез 18А-11 (51°28'27,2" N и 107°54'26,9" E) заложен на водоразделе хр. Цаган-Дабан, элювиальная позиция. Крутизна – 1°. Абсолютная высота – 960 м над ур. м. Растительность – березово-кустарниково-разнотравный лес. Доминанты – *Carex pediformis* С.А. Meyer, *Maianthemum bifolium* (L.). Содоминанты – *Rhododendron dauricum* L., *Vaccinium vitis-idaea* subsp., *Pyrola rotundifolia* L., *Rubus saxalitis* L., *Cotoneaster melanocarpus* Fischer ex Blytt, *Paris quadrifo-*

lia L., *Ledum palustre* L. s. str. Проективное покрытие – 60 %. Почва – дерново-палево-подзолистая грубогумусовая на лёссовидном суглинке. Согласно WRB данная почва классифицируется как Eutric Albic Retisol (Folic, Cutanic, Lamellic, Siltic).

Формула профиля: АО (0–14 см) – АУ (14–21/25 см) – ЕLf (21/25–40 см) – ВТ1 (40–59 см) – ВТ2 (59–85 см) – ↓ВС (>85 см). Грубогумусовый горизонт буровато-темно-серый, состоит из органических остатков разной степени разложения. Гумусовый горизонт серовато-бурый, свежий, рыхлый, легкосуглинистый, пористый. Структура комковатая, включения корней, граница волнистая, переход по цвету. Подзолистый горизонт палево-белесый, свежий, легкосуглинистый, пористый, включения немногочисленных корней. Структура тонкопластинчатая, светлая скелетана на поверхности пластин. В нижней части горизонта охристый прослой толщиной 1 см. Граница слабоволнистая, переход по цвету. Горизонт ВТ1 буровато-охристый, свежий, плотный, тяжелосуглинистый, пористый, включения единич-

Таблица 1

Гранулометрический состав почв

Table 1

Grain size distribution in soils

Горизонт, глубина, см /	Содержание фракций в %, размер частиц в мм					
	1,0–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	<0,001
Дерново-палево-подзолистая грубогумусовая почва (разр. 18А-11)						
AY (14–21/25)	0	21	54	9	12	4
Elf (21/25–40)	0	19	56	10	10	5
BT1 (40–59)	0	16	43	7	11	23
BT2 (59–85)	0	23	42	7	9	19
↓BC (> 85)	0	29	46	4	11	10
Палевая грубогумусированная оподзоленная остаточного-карбонатная почва (разр. 1А-10)						
AYao (0–9)	0	58	16	5	12	9
EL/BPL (9–20/25)	0	29	42	6	7	16
BPLc (20/25–76)	0	45	30	5	8	12
↓BCca (76/110)	0	52	23	4	7	14

ных корней. Структура комковато-ореховатая, на поверхности педов скелетаны и кутаны. В нижней части горизонта охристый прослой толщиной 2 см. Граница слабоволнистая, переход по цвету и плотности. Горизонт BT2 палево-бурый, свежий, плотный, среднесуглинистый, пористый. Структура ореховатая, на поверхности агрегатов обильные кутаны кофейного цвета, скелетан меньше. Граница слабоволнистая, переход по цвету и плотности. Горизонт ↓BC палево-белесый, свежий, легкосуглинистый, очень плотный. На поверхности агрегатов тонкие скелетаны и кутаны.

Исследованная дерново-палево-подзолистая грубогумусовая почва характеризуется поверхностным поступлением органического вещества с разной степенью разложения. Почва имеет легко- и тяжелосуглинистый гранулометрический состав, преобладают фракции крупной пыли и мелкого песка (табл. 1). В горизонте AY содержание гумуса низкое и резко падает вниз по профилю (табл. 2). Реакция среды слабокислая во всех горизонтах и нейтральная в почвообразующей породе. Высокая насыщенность основаниями всего профиля. Содержание железа в вытяжке Тамма по всему профилю невысокое. Данные валового химического состава указывают на дифференциацию профиля по элювиально-иллювиальному типу (табл. 3).

Разрез 1А-10 (51°35'05,2" N и 107°43'29,7" E) заложен на склоне северо-западной экспозиции хр. Цаган-Дабан, трансэлювиальная позиция. Крутизна – 2°. Абсолютная высота – 720 м над ур. м. Растительность – лиственнично-березово-разно-

травно-кустарниковый лес. Старая гарь. Доминанты – *Rhododendron dauricum* L., *Vaccinium vitis-idaea* subsp., *Carex pediformis* C.A. Meyer, *Bromopsis inermis* (Leysser) Holub. Содоминанты – *Rosa acicularis* Lindley, *Rubus saxatilis* L., *Fragaria vesca* L., *Pyrola rotundifolia* L., *P. asarifolia* Michaux [*P. incarnata* (DC.) Freyn], *Ledum palustre* L.s.str., *Maianthemum bifolium* (L.) F.W. Schmidt. *Galium boreale* L. Проективное покрытие – 60 %. Почва – палевая грубогумусированная оподзоленная остаточного-карбонатная почва на лёссовидном суглинке. Согласно WRB данная почва классифицируется как Eutric Cambic Cryosol (Folic, Nechic, Lamellic, Siltic, Protocalcic).

Организация профиля: AYao (0–9 см) – EL/BPL (9–20/25) – BPLc (20/25–76) – ↓BCca (76–110). Гумусово-аккумулятивный горизонт AYao буровато-темно-серый до черного, свежий, легкосуглинистый, в верхней части грубогумусовый, в нижней – сизовато-серый. Уплотнен корнями травянистых растений, в нижней части скреплен корнями. Структура порошисто-комковатая. В верхней части, на контакте с подстилкой, включения грибного мицелия, угольков. Граница волнистая, переход по цвету. Горизонт EL/BPL палево-белесый, свежий, плотный, пористый, легкосуглинистый, комковато-пластинчатый, на контакте пластин – отсортированная светлая пылеватая фракция. Включения древесных и травянистых корней. В нижней части горизонта наблюдается кайма надмерзлотной верховодки шириной 1 см, буро-охристого цвета.

Таблица 2

Некоторые химические свойства почв
(± среднее значение, стандартное отклонение, n = 4)

Table 2

Selected chemical features of soils (± mean, standard deviation, n = 4)

Горизонт, глубина, см /	pH _{H₂O}	C _{орг} , г / 100 г / C _{org} , g/100 g	Поглощенные катионы		Hr*	Fe ₂ O ₃ по Тамму
			Ca ²⁺	Mg ²⁺		
			ммоль(+) / 100 г почвы / cmol × kg ⁻¹			
Дерново-палево-подзолистая грубогумусовая почва						
АО (0–14)	6,6 ± 0,08	40,03** ± 3,80	45,2 ± 2,34	20,1 ± 1,00	9,0 ± 0,13	0,36 ± 0,01
AY (14–21/25)	5,4 ± 0,09	1,45 ± 0,06	13,5 ± 0,87	5,1 ± 0,48	2,8 ± 0,18	0,56 ± 0,03
Elf (21/25–40)	5,5 ± 0,13	0,31 ± 0,01	11,1 ± 1,08	4,0 ± 0,28	1,75 ± 0,13	0,41 ± 0,02
BT1 (40–59)	6,0 ± 0,13	0,29 ± 0,02	16,0 ± 1,00	7,0 ± 0,38	1,76 ± 0,13	0,68 ± 0,03
BT2 (59–85)	6,0 ± 0,08	0,13 ± 0,03	18,1 ± 1,01	7,8 ± 0,25	1,44 ± 0,12	0,46 ± 0,03
↓BC (> 85)	6,6 ± 0,08	0,08 ± 0,01	14,4 ± 0,59	7,7 ± 0,32	0,97 ± 0,07	0,30 ± 0,02
Палевая грубогумусированная оподзоленная остаточно-карбонатная почва						
AYao (0–9)	6,5 ± 0,28	27,97** ± 6,39	31,4 ± 6,09	7,9 ± 0,34	4,2 ± 0,77	0,57 ± 0,07
EL/BPL (9–20/25)	5,9 ± 0,13	0,46 ± 0,14	8,1 ± 0,73	5,7 ± 0,40	1,4 ± 0,40	0,60 ± 0,03
BPLc (20/25–76)	6,5 ± 0,16	0,30 ± 0,06	8,1 ± 0,71	4,6 ± 0,42	0,9 ± 0,13	0,46 ± 0,11
↓BCca (76–110)	7,9 ± 0,14	0,48 ± 0,08	14,0*** ± 13,00***		–	0,16 ± 0,04

Примечание / Note: прочерк – не определялось / dash – not defined, * – гидролитическая кислотность / exchangeable acidity, cmol kg⁻¹, ** – потеря при прокаливании / loss on ignition, *** – емкость поглощения / adsorption capacity.

Таблица 3

Валовой химический состав почв, % от прокаленной навески

Table 3

Gross chemical composition of soils, % of the calcined sample

Горизонт, глубина, см /	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	Na ₂ O	MgO	TiO ₂	MnO	SiO ₂ / Al ₂ O ₃	SiO ₂ / Fe ₂ O ₃	SiO ₂ / R ₂ O ₃
Дерново-палево-подзолистая грубогумусовая почва (разр. 18A-11)												
AY (15–21/25)	68,75	13,05	4,53	2,01	2,45	2,41	1,08	0,33	0,29	8,94	40,88	7,34
Elf (21/25–40)	64,98	15,23	5,71	1,48	2,36	2,68	1,25	0,49	0,08	7,24	30,06	5,84
BT1 (40–59)	65,03	16,41	6,98	1,98	2,75	3,77	1,38	0,41	0,11	6,73	24,61	5,28
BT2 (59–85)	64,75	16,27	6,12	2,54	2,04	3,29	1,27	0,37	0,10	6,74	28,37	5,44
↓BC (> 85)	65,13	16,01	5,28	1,89	3,18	3,12	0,87	0,31	0,14	6,90	32,85	5,71
Палевая грубогумусированная оподзоленная остаточно-карбонатная почва (разр. 1A-10)												
AYao (0–9)	51,90	12,21	3,98	2,48	3,01	2,65	1,32	0,68	0,30	7,21	34,56	5,97
EL/BPL (9–20/25)	65,28	14,98	5,22	2,01	2,04	2,09	1,60	0,79	0,11	7,39	32,94	6,04
BPLc (20/25–76)	64,90	15,01	5,04	2,78	2,81	3,12	1,69	0,80	0,09	7,35	33,78	6,04
↓BCca (76–110)	58,73	14,12	4,65	2,34	2,47	2,97	1,61	0,71	0,07	7,05	32,67	5,80

Граница кармановидная, переход постепенный по цвету. Горизонт BPLc палево-бурый, свежий, менее плотный, пористый, легкосуглинистый. Структура сложная – мелко- и крупнокомковатая. Крупные структурные отдельности представляют плиты, мелкие – комочки. Между слоями отсортированная более светлая пыль, но в

меньшем количестве. Включения корней. Граница волнистая, переход по цвету. Горизонт ↓BCca неоднородный по цвету, чередуются палево-белесые и буровато-белесые слои, свежий, очень плотный, легкосуглинистый, структура комковатая до порошистости, слабовыраженная слоистость. Карбонаты равномерно пропитывают почвенную

массу, бурное вскипание от 10%-й HCl. Включения единичных корней.

Палевая грубогумусированная оподзоленная остаточно-карбонатная почва характеризуется следующими показателями. Высокое содержание органического вещества с дальнейшим резким падением гумуса вниз по профилю. Реакция среды гумусово-аккумулятивного горизонта нейтральная, переходных горизонтов EL/BPL и BPLc слабокислая, горизонта \downarrow BCca щелочная. Почвенный профиль насыщен основаниями. Гранулометрический состав всех почвенных горизонтов, где преобладают фракции мелкого песка и крупной пыли, легкосуглинистый. Содержание железа в вытяжке Тамма по всему профилю невысокое. В валовом составе наблюдается небольшое накопление R_2O_3 в горизонте EL/BPL.

Обсуждение

Лёссовидные суглинки северо-западного склона хр. Цаган-Дабан Селенгинского среднегорья формируются в условиях криогенеза, где процессы выветривания протекают в слое длительно-носезонно-промерзающих грунтов. По составу и свойствам они близки к лёссам, в них преобладают пылеватые частицы, высокая макропористость. Имеют однородное строение, палево-бурю окраску, комковато-плитчатую структуру.

Дерново-палево-подзолистые грубогумусовые почвы формируются на плоских водоразделах хр. Цаган-Дабан, на высотах 920–960 м над ур. моря на лёссовидных суглинках под березово-кустарниково-разнотравными с примесью лиственницы и кедра лесами. В почвенном профиле общая мощность аккумулятивной толщи составляет 20–25 см. Подзолистый горизонт палево-белесого цвета, легкосуглинистый, имеет тонкопластинчатую структуру со скелетаной на поверхности педов. Эти признаки свидетельствуют о выносе веществ из горизонта, однако механизм элювирования связан не с кислотным гидролизом, а с периодическим переувлажнением и мягкой пульсацией окислительно-восстановительного режима, определяющей палевость окраски. Здесь имеет место аккумуляция влаги не только атмосферных осадков, но и восходящая криогенная с формированием тонких ледяных шпиров. Это усиливает эффект элювирования. Скелетана на поверхности пластинок является продуктом криогенной дифференциации (выдавливание из плазмы пылеватых зерен первичных минералов). Наибольшее скопление скелетан вы-

явлено в горизонте ELf, также они наблюдаются во всех горизонтах профиля, кроме гумусового.

Текстурные горизонты буровато-охристого и палево-бурого цвета, тяжело- и среднесуглинистые, комковато-ореховатая и ореховатая структура. Обильные кутаны кофейного цвета на поверхности агрегатов и охристые прослои свидетельствуют о периодическом застое влаги в нижней части профиля и развитии современного иллювиально-глинисто-железистого процесса.

Характерными особенностями исследованной почвы является наличие признаков миграции веществ по всему профилю, включая горизонт \downarrow BC, участие в процессе элювирования и агрегирования криогенных процессов.

Дерново-палево-подзолистые почвы в Селенгинском среднегорье имеют ограниченное распространение, что является следствием биоклиматических условий территории (сухость климата) и богатства пород основаниями.

Ранее дерново-подзолистые почвы в Селенгинском среднегорье были изучены на Заганском хребте, развивающиеся на маломощных (до 1 м) лёссовидных суглинках, подстилаемых щебнем [8].

Палевые грубогумусированные оподзоленные остаточно-карбонатные почвы формируются на лёссовидных суглинках в трансэлювиальных позициях водораздела хр. Цаган-Дабан на высотах от 720–860 м над ур. моря под березово-разнотравно-кустарниковыми с примесью лиственницы лесами. Для этих почв характерно поверхностное поступление органического вещества с формированием темного грубогумусированного материала разной степени разложения. Признаки оподзоливания морфологически диагностируются в виде осветленного материала, рассеянного в массе горизонта. Осветленные горизонты имеют палево-белесый цвет, легкосуглинистый гранулометрический состав, тонкопластинчатую структуру со скелетаной на поверхности агрегатов. Палево-метаморфические горизонты имеют палево-бурый цвет, мелко- и крупнокомковатую структуру. В горизонтах \downarrow BCca аккумуляция карбонатов морфологически не выражена и диагностируется по вскипанию от 10%-й HCl.

Спецификой палевых грубогумусированных оподзоленных остаточно-карбонатных почв, формирующихся на лёссовидных суглинках, является отсутствие признаков миграции веществ. При высвобождении из кристаллической решетки минералов незначительное количество железа

остается на месте, образуя пленки на поверхности зерен минералов, что придает невыразительные светло-бурые и палевые тона окраски палево-метаморфическим горизонтам [9].

В морфологическом строении рассмотренных почв повсеместно присутствуют углистые частицы, что свидетельствует о влиянии частых низовых пожаров на почвенный покров исследуемой территории [20]. В условиях криолитозоны исследования влияния пожаров на свойства и режимы почв являются актуальными, необходима разработка научной основы рационального использования лесных ресурсов и их охраны [21–23].

Ранее в области распространения сплошной мерзлоты Восточного Забайкалья были изучены палевые темногумусовые почвы [24, 25]. При исследовании микростроения этих почв были выявлены следующие генетические особенности: криогенное агрегирование почвенной массы, железистый метаморфизм с образованием гидрооксидов железа, аккумуляция карбонатов.

Палевые почвы широко распространены в почвенном покрове Среднесибирского плоскогорья [26], в Центральной Якутии эти почвы были изучены как мерзлотные палево-бурые [27–29]. В работах Р.В. Десяткина и др. [30] было обосновано выделение типа дерново-палевых почв.

Ранее палевые почвы в Селенгинском среднегорье с позиции субстантивно-генетической классификации почв России не исследовались. Подобные почвы с бурым слабодифференцированным профилем, формирующиеся в условиях сезонной мерзлоты, классифицировались как дернотазежные в типе мерзлотно-таежных почв [2]. Эти почвы как типоморфное образование южно-таежного пояса непосредственно граничат с котловинными ландшафтами.

Заключение

Впервые представлены дерново-палево-подзолистые грубогумусовые и палевые грубогумусированные оподзоленные остаточного-карбонатные почвы на лёссовидных суглинках, которые формируются в слое длительно-сезоннопромерзающих грунтов Селенгинского среднегорья и периодического надмерзлотного переувлажнения профилей. Определяющую роль в формировании этих почв играют криогенные процессы.

Дерново-палево-подзолистые почвы строго приурочены к элювиальным позициям водоразделов Селенгинского среднегорья с листовеннично-березовыми с примесью кедра богаторазнотравными

сообществами. Эти почвы дифференцированы по элювиально-иллювиальному типу. Спецификой исследованных дерново-палево-подзолистых почв является наличие признаков миграции веществ по всему профилю, участие в процессе элювиирования и агрегирования криогенных процессов.

Палевые грубогумусированные оподзоленные остаточного-карбонатные почвы формируются в приводораздельных позициях Селенгинского среднегорья под сосново-лиственнично-березовыми кустарничково-разнотравными сообществами. Особенности исследованных палевых грубогумусированных оподзоленных остаточного-карбонатных почв являются слабая выраженность морфологических признаков, заторможенность почвообразовательных процессов. Палево-метаморфические горизонты представлены монотонной палевой, светло-бурой окраской, характеризуются слабой оструктуренностью.

Список литературы / References

1. Прасолов Л.И. *Южное Забайкалье (почвенно-географический очерк)*. Л.: Изд-во АН СССР; 1927. 422 с.
2. Prasolov L.I. *Southern Transbaikalia (soil and geographical description)*. Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1927. 422 p. (In Russ.)
3. Ногина Н.А. *Почвы Забайкалья*. М.: Наука; 1964. 314 с.
4. Nogina N.A. *Soils of Transbaikalia*. Moscow: Nauka; 1964. 314 p. (In Russ.)
5. Вторушин В.А. *Автоморфные почвы горной тайги Южного Забайкалья*. Новосибирск: Наука; 1982. 176 с.
6. Vtorushin V.A. *The automorphic soils of the mountain taiga in Southern Transbaikalia*. Novosibirsk: Nauka; 1982. 176 p. (In Russ.)
7. Куликов А.И., Дугаров В.И., Корсунов В.М. *Мерзлотные почвы: экология, теплоэнергетика и прогноз продуктивности*. Улан-Удэ: БНЦ СО РАН; 1997. 312 с.
8. Kulikov A.I., Dugarov V.I., Korsunov V.M. *Permafrost soils: ecology, thermal energy, and productivity forecasting*. Ulan-Ude: Publishing House of the Buryat Scientific Center, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences; 1997. 312 p. (In Russ.)
9. Бадмаев Н.Б., Куликов А.И., Корсунов В.М. *Разнообразие почв криолитозоны Забайкалья*. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН; 2006. 165 с.
10. Badmaev N.B., Kulikov A.I., Korsunov V.M. *Diversity of soils in the permafrost zone of Transbaikalia*. Ulan-Ude: Publishing House of the Buryat Scientific Center, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences; 2006. 165 p. (In Russ.)
11. Чимитдоржиева Г.Д. *Органическое вещество холмных почв*. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН; 2016. 387 с.

- Chimitdorzhieva G.D. *Organic matter in cold soils*. Ulan-Ude: Publishing House of the Buryat Scientific Center, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences; 2016. 387 p. (In Russ.)
7. Makeev O.B. *Криология почв*. М.; 2019. 463 с.
Makeev O.V. *Soil Cryology*. Moscow; 2019. 463 p. (In Russ.)
8. Соколова Т.А., Соколов И.А. О горно-таежных почвах Восточного Забайкалья. В кн.: *О почвах Восточной Сибири*. М.: Изд-во АН СССР; 1963. С. 3–5.
- Sokolova T.A., Sokolov I.A. About the mountain taiga soils of Eastern Transbaikalia. In: *About of Eastern Siberia soils*. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1963. P. 3–5. (In Russ.)
9. Гынинова А.Б., Балсанова Л.Д. О сходстве дерновых серых лесных почв Усть-Селенгинской впадины Восточного Прибайкалья с палево-бурными почвами Якутии. *Наука и образование*. 2009; 3:77–82.
- Gyninova A.B., Balsanova L.D. On the similarity of soddy gray forest soils of the Ust-Selenginsk depression of the Eastern Baikal region with the pale-brown soils of Yakutia. *Nauka i obrazovanie*. 2009; 3:77–82. (In Russ.)
10. Sympilova D.P., Badmaev N.B. Soil formation in the taiga-steppe ecotone of the Selenga middle mountains, Western Transbaikalia region. *Eurasian Soil Science*; 2019; 52(2):122–132. <http://doi.org/10.1134/S1064229319020145>
11. Peel M.C., Finlayson B.L., McMahon T.A. Updated world map of the Köppen–Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2007; 4(2):439–473. <http://doi.org/10.5194/HESS-11-1633-2007>
12. *Экологический атлас бассейна озера Байкал*. Иркутск: Изд-во Ин-та географии им. В.Б. Сочавы СО РАН; 2015. 145 с.
- Ecological atlas of the Lake Baikal basin*. Irkutsk: Publishing House of the Institute of Geography, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences; 2015. 145 p. (In Russ.)
13. Базаров Д.Б. *Четвертичные отложения и основные этапы развития рельефа Селенгинского среднегорья*. Улан-Удэ: Бур. кн. изд-во; 1968. 166 с.
- Bazarov D.B. *Quaternary deposits and the main stages of development of the relief of the Selenga middle mountains*. Ulan-Ude: Buryatskoe Knizhnoe Izdatelstvo; 1968. 166 p. (In Russ.)
14. Розанов Б.Г. *Морфология почв*. М.: Академический проект; 2004. 431 с.
- Rozanov B.G. *Soil morphology*. Moscow: Akademicheskii projekt Publ.; 2004. 431 p. (In Russ.)
15. Воробьева Л.А. *Теория и практика химического анализа почв*. М.: ГЕОС; 2006. 400 с.
- Vorob'eva L.A. *Theory and practice of chemical analysis of soils*. Moscow: GEOS; 2006. 400 p. (In Russ.)
16. *Полевые и лабораторные методы исследования физических свойств и режимов почв*. Шеин Е.В. (ред.). М.: Изд-во МГУ; 2001. 208 с.
- Field and laboratory methods for studying the physical properties and regimes of soils*. Shein E.V. (ed.). Moscow: Publishing House of the Moscow University; 2001. 208 p. (In Russ.)
17. *Классификация и диагностика почв России*. Смоленск: Ойкумена; 2004. 341 с.
- Classification and diagnostics of soils in Russia*. Smolensk: Oikumena; 2004. 341 p. (In Russ.)
18. *Полевой определитель почв России*. М.: Изд-во Почвенный ин-т В.В. Докучаева; 2008. 182 с.
- Field guide to soils in Russia*. Moscow: Publishing House of Dokuchaev Soil Science Institute; 2008. 182 p. (In Russ.)
19. IUSS Working Group WRB. 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No.106. FAO. Rome.
20. Shakhmatova E.Yu., Ubugunov L.L., Sympilova D.P. Postfire transformations in pine forests in the midmountain pad of the Selenga River basin (Western Transbaikalia). *Geography and Natural Resources*. 2021; 42(1):44–50. <http://doi.org/10.1134/S1875372821010133>
21. Тарабукина В.Г., Саввинов Д.Д. *Влияние пожаров на мерзлотные почвы*. Новосибирск: Наука; 1990. 120 с.
- Tarabukina V.G., Savvinov D.D. *Fire impacts on permafrost soils*. Novosibirsk: Nauka; 1990. 120 p. (In Russ.)
22. Desyatkin R.V., Nikolaeva M.Kh., 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. <http://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-118-231-275>
23. Chevychelov A.P., Shakhmatova E.Yu. Postpyrogenic polycyclic soils in the forest of Yakutia and Transbaikalia Region. *Eurasian Soil Science*. 2018;51(2):243–252. <http://doi.org/10.1134/S1064229318020023>
24. Gyninova A.B., Badmaev N.B., Tsybenov Yu.B., et al. Soils of the Darkhitui catena in the southern Vitim Plateau and their micromorphological features. *Proceedings of the IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2021;862(1):12068. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/862/1/012068>
25. Гынинова А.Б., Бадмаев Н.Б. Микроморфологическая диагностика почвообразовательных процессов в почвах Еравнинской котловины Забайкалья. *Вестник Бурятского государственного университета. Биология. География*. 2021;(2):15–30. <http://doi.org/10.18101/2587-7143-2021-2-15-30>
- Gyninova A.B., Badmaev N.B. Micromorphological diagnostics of soil-forming processes in the soils of the Eravinskaya depression of Transbaikalia. *Bulletin of Buryat State University. Biology. Geography*. 2021;(2):15–30. (In Russ.)
26. Соколов И.А. Палеовые почвы Среднесибирского плоскогорья. *Почвоведение*. 1986;8:5–18.
- Sokolov I.A. Pale soils of the Central Siberian Plateau. *Pochvovedenie*. 1986;8:5–18. (In Russ.)

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

Elovskaya L.G. *Classification and diagnostics of frozen soils in Yakutia*. Yakutsk: Yakut Branch, Siberian Branch, the USSR Academy of Sciences; 1987. 172 p. (In Russ.)

28. Морозова Т.Д. Микроморфологические особенности палевых почв Центральной Якутии. *Почвоведение*. 1965;11:79–88.

Morozova T.D. Micromorphological features of pale-yellow soils of Central Yakutia. *Pochvovedenie*. 1965;11: 79–88. (In Russ.)

29. Чевычелов А.П., Захарова О.Г., Бурнашева М.П. Фосфатное состояние мерзлотных почв Центральной Якутии. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(1):104–116. <http://doi.org/10.31242/2618/-9712-2023-28-1-104-116>

Chevychelov A.P., Zakharova O.G., Burnasheva M.P. Phosphate state of permafrost soils in Central Yakutia. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(1):104–116. (In Russ.)

30. Desyatkin R.V., Okoneshnikova M.V., Ivanova A.Z., Lessovala S.N. Cryosols from tundra and taiga zones of Yakutia: properties, clay mineralogy, and problems of classification. *Eurasian Soil Science*. 2021;54(12):1783–1794. <http://doi.org/10.1134/S1064229321120048>

Об авторах

СЫМПИЛОВА Дарима Паламовна, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН, г. Улан-Удэ, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-6769-8851>, ResearcherID: K-5033-2018, Scopus Author ID: 6505572601, SPIN: 5838-8956, e-mail: darimasp@mail.ru

ГЫНИНОВА Аюр Базаровна, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН, г. Улан-Удэ, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-7897-7848>, ResearcherID: C-5559-2018, Scopus Author ID: 6504796482, SPIN: 3031-7518, e-mail: ayur.gyninova@mail.ru

ШАХМАТОВА Екатерина Юрьевна, кандидат биологических наук, младший научный сотрудник, Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН, г. Улан-Удэ, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-1975-8773>, ResearcherID: K-5029-2018, Scopus Author ID: 8882783300, SPIN: 7369-2918, e-mail: ekashakhmat@mail.ru

Вклад авторов

Сымпилова Д.П. – разработка концепции, создание и редактирование рукописи; **Гынинова А.Б.** – разработка концепции, проведение исследования; **Шахматова Е.Ю.** – проведение исследования, редактирование рукописи

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

SYMPILOVA, Darima Palamovna, Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher, Institute of General and Experimental Biology SB RAS, Ulan-Ude, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-6769-8851>, ResearcherID: K-5033-2018, Scopus Author ID: 6505572601, SPIN: 5838-8956, e-mail: darimasp@mail.ru

GYNINOVA, Ayur Bazarovna, Dr. Sci. (Biol.), Leading Researcher, Institute of General and Experimental Biology SB RAS, Ulan-Ude, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-7897-7848>, ResearcherID: C-5559-2018, Scopus Author ID: 6504796482, SPIN: 3031-7518, e-mail: ayur.gyninova@mail.ru

SHAKHMATOVA, Ekaterina Yurievna, Cand. Sci. (Biol.), Junior Researcher, Institute of General and Experimental Biology SB RAS, Ulan-Ude, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-1975-8773>, ResearcherID: K-5029-2018, Scopus Author ID: 8882783300, SPIN: 7369-2918, e-mail: ekashakhmat@mail.ru

Authors' contribution

Sympilova D.P. – conceptualization, writing – review & editing; **Gyninova A.B.** – conceptualization, investigation; **Shakhmatova E.Yu.** – investigation, writing – review & editing

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 15.11.2023

Поступила после рецензирования / Revised 25.09.2024

Принята к публикации / Accepted 12.02.2025



Оригинальная статья

Устойчивость ландшафтов и современное состояние фитопланктона водотоков Куларского золотоносного района

Л. И. Копырина^{✉,1}, Н. А. Николаева²

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

²Институт физико-технических проблем Севера имени В.П. Ларионова СО РАН,
г. Якутск, Российская Федерация

✉ l.i.kopyrina@mail.ru

Аннотация

Приведены результаты оценки устойчивости ландшафтов и гидробиологических исследований водотоков, видового состава и структуры водорослей фитопланктона и фитоперифитона, проведенных впервые на территории Куларского золотоносного района в бассейне р. Яна Республики Саха (Якутия). Работы продиктованы возросшим интересом к возобновлению добычи россыпного золота на месторождениях района, что неизбежно приведет к негативному воздействию на природную среду и обострению экологических проблем. Для минимизации негативных последствий следует предусмотреть природоохранные мероприятия, необходимым этапом которых является оценка современного состояния компонентов природной среды этой территории. Практическое значение имеет изучение современного гидробиологического состояния водотоков, в частности, водорослей фитопланктона и фитоперифитона, которые являются надежными биоиндикаторами качества воды. Кроме того, низкая устойчивость ландшафтов к техногенной нагрузке, замедленность процессов их самоочищения и самовосстановления вызывают необходимость учета степени устойчивости природных комплексов. Материалом для гидробиологических исследований послужили количественные и качественные пробы, собранные в ручьях на р. Суор-Уйалаах. Устойчивость ландшафтов исследуемой территории оценена согласно методике по определению влияния основных факторов на снижение устойчивости ландшафтов криолитозоны. Результаты натурных и лабораторных исследований водорослей по определению показателей видового состава, численности и биомассы в водотоках р. Суор-Уйалаах в пределах золотоносного участка Куларского района показали бедность и низкий уровень развития водорослей. В таксономическом спектре основа фитопланктонных и фитоперифитонных сообществ сформирована диатомовыми водорослями, менее разнообразны зеленые, желтозеленые и эвгленовые. Определена крайне низкая и низкая степень устойчивости ландшафтных комплексов к техногенному воздействию в зависимости от соотношения мерзлотных и биоклиматических показателей. Полученные данные могут явиться основой для создания базы биомониторинга в условиях нарастания техногенных нагрузок на водные экосистемы реки Суор-Уйалаах северо-востока Якутии. Оценка устойчивости ландшафтов золотоносных месторождений Куларского района может иметь практическую значимость для разработок экологического нормирования территории и природоохранных мероприятий по снижению негативных последствий на природную среду.

Ключевые слова: фитопланктон, фитоперифитон, видовой состав водорослей, ландшафты, устойчивость

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки РФ по проектам «Растительный покров криолитозоны таежной Якутии: биоразнообразие, средообразующие функции, охрана и рациональное использование» (№ FWRS-2021-0023; ЕГИСУ НИОКТР № AAAA-A21-121012190038-0) с применением оборудования ЦКП ФИЦ «ЯНЦ СО РАН» (грант № 13. ЦКП.21.0016) и «Комплексные исследования приоритетов развития энергетики Республики Саха (Якутия) с учетом влияния на окружающую среду и разработка способов, методов повышения энергетической эффективности и надежности локальных электроэнергетических систем труднодоступных, изолированных территорий Севера и Арктики» (№ FWRS-2024-0031).

Для цитирования: Копырина Л.И., Николаева Н.А. Устойчивость ландшафтов и современное состояние фитопланктона водотоков Куларского золотоносного района. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(1):119–129. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-1-119-129>

Landscape resilience and the modern state of phytoplankton in the streams of the Kularsky gold-bearing region

Lyubov I. Kopyrina^{✉1}, Nadezhda A. Nikolaeva²

¹*Institute for Biological Problems of Cryolithozone,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation*

²*Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation*

[✉]*l.i.kopyrina@mail.ru*

Abstract

An assessment of landscape resilience and hydrobiological research on watercourses was conducted for the first time in the Kular gold-bearing region within the Yana River basin of the Republic of Sakha (Yakutia). This study was prompted by the increasing interest in resuming placer gold mining in these areas, which could potentially harm the natural environment and exacerbate existing ecological issues. To address these potential negative impacts, it is essential to implement effective environmental protection strategies. A key component of this effort involves assessing the current state of the natural environment and thoroughly evaluating the resilience of its ecosystems. The hydrobiological research employed both quantitative and qualitative samples collected from the Suor-Uyalaakh River streams. We assessed landscape resilience using a methodology aimed at understanding how key factors affect landscape stability in the cryolithozone. Additionally, we conducted field and laboratory analyses of algae to identify indicators of species composition, abundance, and biomass in the watercourses of the Suor-Uyalaakh River. The findings revealed low diversity and underdevelopment of algal populations, with diatoms being the dominant group in the phytoplankton and phytoperiphyton communities. In contrast, green algae showed lower diversity, followed by yellow-green algae and Euglena. The evaluation of landscape stability in the region indicated extremely low to low resistance to human impacts, which varied based on the ratio of permafrost to bioclimatic factors. The data collected can serve as a basis for creating a biomonitoring database, particularly in light of the increasing human pressures on the aquatic ecosystems of the Suor-Uyalaakh River in Northeast Yakutia. Assessing the resilience of landscapes in the Kular gold-bearing deposits may be practically significant for formulating ecological regulations and implementing environmental protection measures to mitigate adverse effects on the natural environment.

Keywords: phytoplankton, phytoperiphyton species composition, algae, landscapes, resilience

Funding. This study was conducted within the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, specifically within the framework of the project “Vegetation cover of the cryolithozone in the taiga of Yakutia: biodiversity, environmental functions, protection, and rational use” (theme No. FWRS-2021-0023; registration No. AAAA-A21-121012190038-0). The research used equipment from the Core Shared Research Facilities of the FRC “The Yakut Scientific Center SB RAS” (grant No. 13. CSRF.21.0016). Additionally, the study aligns with the project “Comprehensive studies on the priorities of the energy sector in the Republic of Sakha (Yakutia) considering environmental impacts and the development of methods to enhance energy efficiency and the reliability of local power systems in remote, isolated regions of the North and the Arctic” (No. FWRS-2024-0031).

For citation: Kopyrina L.I., Nikolaeva N.A. Landscape resilience and the modern state of phytoplankton in the streams of the Kularsky gold-bearing region. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(1):119–129. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-119-129>

Введение

Куларский золотonosный район, включающий многочисленные месторождения россыпного золота, располагается в арктической зоне в бассейне р. Яна и долгое время являлся самым северным и труднодоступным прииском страны. Его открытие и разработка начались в 1960-х годах, пика своей деятельности он достиг в середине 1970-х годов. В конце 1990-х годов в связи с эко-

номической ситуацией ГОК «Куларзолото» был закрыт, хотя оставались значительные запасы полезного ископаемого. Так, в результате работ россыпных месторождений в бассейне р. Суор-Уйалаах, притока р. Яна, были оставлены тысячи гектаров техногенно-нарушенных и преобразованных земель [1], а также загрязненные и измененные природные компоненты литосферы, биосферы, криосферы, гидросферы.

В последние годы в связи с истощением минерально-сырьевой базы россыпей в РФ возрос интерес к возобновлению промышленных разработок месторождений Куларского золотоносного района [2]. Освоение территорий часто ведет к нарушению экологического равновесия, вызванному изъятием из цепи природных взаимосвязей определенных звеньев [3].

В связи с этим становится актуальным вопрос оценки воздействия промышленного освоения на состояние природной среды Куларского золотоносного района. Имеет значение как покомпонентное изучение природной среды, так и обобщенное – закономерных сочетаний взаимосвязанных компонентов, т. е. ландшафтов и современного гидробиологического состояния водной среды, в частности фитопланктона и фитоперифитона, которые являются одним из наиболее информативных и надежных биоиндикаторов качества воды и четко отражают степень техногенного загрязнения вод [4–7]. Низкая устойчивость северных ландшафтов к техногенной нагрузке, замедленность процессов их самоочищения и самовосстановления обуславливают необходимость оценки степени устойчивости природных комплексов.

Первые исследования альгофлоры Куларского золотоносного района были проведены в составе комплексного изучения техногенных ландшафтов в зонах тундры и притундровых редколесий Северо-Восточной Якутии и относились к наземным почвенным водорослям [8]. Были выявлены 32 вида из 4 отделов: синезеленых – 14 видов, зеленых – 9, желтозеленых – 6 и диатомовых – 3 вида. Видовой состав почвенных водорослей был изучен в естественных (мохово-лишайниковые, ивняк полевохвощовый и т. д.) и антропогенных (отстойники, отвалы) сообществах.

Целью работы является оценка устойчивости ландшафтов месторождений Куларского золотоносного района и изучение современного состояния водорослей фитопланктона, фитоперифитона в водных объектах в качестве биоиндикаторов техногенного загрязнения вод региона. Исследования водорослей водотоков реки Суор-Уйалаах ранее не проводились и приводятся впервые.

Район, материалы и методы исследования

Исследования проводились в южной подзоне субарктических тундр в предгорьях Яно-Индигирской низменности, характеризующейся суровым, резко-континентальным, субарктическим

климатом со среднемесячной температурой июля +12 °С, января – –34 °С, количеством осадков за год – 150–250 мм [2].

Рельеф представляет собой расчлененное плато, поверхность которого составляют низкие горы, холмы и увалы, переработанные системой мелких горных рек и ручьев. Большая часть территории района сложена осадочными породами триасового возраста, почвообразующими породами выступают делювиальные и элювиальные отложения выходов пород верхнего палеозоя и мезозоя. В северной части широко развиты четвертичные отложения, представленные аллювиальными, озерно-болотными, озерно-элювиальными, озерными и делювиальными фациями. Основная часть золотоносных россыпей приурочена к среднечетвертичным отложениям, залегающим на коренных породах террас и долинных водостоков. Территория лежит в зоне сплошного распространения вечной мерзлоты, мощность многолетнемерзлых пород достигает местами 600–800 м и более [9].

Ландшафты исследуемой территории относятся к Куларской низкогорной ландшафтной провинции физико-географической страны Горы Северо-Восточной Сибири. Природные комплексы представлены горносклоновыми горными тундрами и подгольцовыми кустарниковыми зарослями. В долине р. Яна распространены долинные ландшафты с подрусловыми таликами, произрастают лиственничные редины и редколесья зеленомошные. Ландшафтная структура состоит из следующих природных комплексов: типичных тундр кустарничково-лишайниковых моховых; предтундровых лиственничных редин кустарничково-лишайниково-моховых и ерниковых; горных тундр лишайниковых и кустарничково-моховых; горных редколесий лиственничных и редин кустарничково-лишайниковых моховых; комплекса северотаежной долинной растительности [10].

Материалом для гидробиологических исследований послужили количественные, качественные пробы фитопланктона и фитоперифитона (соскоб с каменистых субстратов, смыл со мхов), собранные в августе 2017 г. из восьми водных объектов золотоносного участка р. Суор-Уйалаах: ручьев Кристалл, Конечный, Суор-Уйалаах, Сдвиг, Кроткий, Мамонья, Улахан-Юрюйэ и Аленка. На всех точках отбора проб измерялась температура воды, определялись прозрачность, цвет, за-

пах. Сбор и обработка материалов проводились по общепринятым методикам [11, 12]. Камеральная работа выполнена нами в отделе ботанических исследований ИБПК СО РАН с применением микроскопа Микмед-6. Для идентификации водорослей использованы отечественные и зарубежные определители с учетом дополнений и уточнений последних отечественных и зарубежных выпусков. Для определения диатомовых водорослей изготовлено восемь постоянных препаратов путем прокалывания и заключения клеток (створок) в формальдегидную смолу. Подсчет численности водорослей фитопланктона осуществлен в счетной камере Нажотта объемами 0,01 и 0,05 см³ в трехкратной повторности. Экологическая и географическая характеристика водорослей приведена по литературным данным [4, 13, 14]. Для оценки степени загрязнения водных объектов применен метод Пантле–Бука [15] в модификации Сладечека [16].

Для оценки степени устойчивости природных комплексов исследуемой территории была применена методика по определению влияния основных ландшафтообразующих факторов на снижение устойчивости ландшафтов криолитозоны [17], а также использованы мерзлотно-ландшафтная и эколого-фитоценотическая карты [10, 18]. Были приняты такие мерзлотные показатели ландшафтов, как льдистость поверхностных отложений, температура мерзлых пород и мощность сезонно-талого и сезонно-мерзлого слоев, характер распространения многолетнемерзлых пород и биоклиматические характеристики – биологическая продуктивность, запасы фитомассы, показатели тепло- и влагообеспеченности. Оценка степени устойчивости проведена методом ранжирования мерзлотных и биоклиматических показателей по степени их влияния на снижение устойчивости ландшафтов в сочетании с методом непосредственной оценки [17].

Обсуждение и результаты

Оценка степени устойчивости ландшафтов. Оценка степени устойчивости ландшафтов Куларского золотоносного района проведена в отношении механического воздействия, т. е. нарушения и снятия поверхностного слоя грунтов и почвенно-растительного покрова – первичных последствий горнодобывающей деятельности на Севере. Основным ландшафтообразующим фактором в Арктике и Субарктике является криолитогенез. Устойчивость мерзлотных ландшафтов

во многом зависит от льдистости поверхностных отложений и температуры пород, которые влияют на изменение глубины процессов сезонного промерзания и протаивания, а также от характера распространения многолетнемерзлых пород. Кроме того, устойчивость фоновых ландшафтов во многом зависит от соотношения тепла и влаги, формирующих пространственную дифференциацию и тип ландшафтов, от которых зависит биологическая продуктивность и другие биоклиматические составляющие ландшафта. При этом прослеживается влияние широтной зональности и высотной поясности на распределение ландшафтов.

Для оценки устойчивости исследуемых ландшафтов приняты их мерзлотные (среднеголетняя температура мерзлых пород на подошве слоя годовых колебаний (0 °С), льдистость поверхностных отложений (%), мощность сезонно-мерзлого и сезонно-талого слоев (м), характер распространения многолетней мерзлоты) и биоклиматические (биологическая продуктивность (ц/га), запасы фитомассы (ц/га), условия теплообеспеченности, выраженные суммой среднесуточных температур выше 100 °С и условия увлажнения, выраженные значениями радиационного индекса сухости (ккал. см²/год)) показатели.

Согласно исходной методике [17], оценка устойчивости выполнена путем ранжирования этих показателей в каждом ландшафтном выделе в соответствии со значением присвоенных экспертным путем оценочных баллов, которые распределены на четыре группы по степени влияния каждого фактора на снижение устойчивости ландшафта от 1 балла (слабо влияет) до 4 баллов (нарушает). Суммарное значение каждого ландшафта характеризует степень его устойчивости.

В табл. 1 дана оценка влияния мерзлотных и биоклиматических факторов на снижение устойчивости ландшафтов. Показатели таблицы получены путем анализа данных различных источников [18–20].

В табл. 2 приведены значения принятых показателей и оценка их устойчивости. Показатели мерзлотных условий получены путем анализа данных Мерзлотно-ландшафтной карты Республики Саха (Якутия) под ред. М.Н. Железняк [10], биоклиматические показатели – на основе Эколого-фитоценотической карты Азиатской России, гл. ред. В.Б. Сочава, В.Н. Байбородин [18] и работ якутских мерзлотоведов [19, 20].

Выявлена различная степень устойчивости различных ландшафтных комплексов террито-

Таблица 1

Оценка влияния природных факторов на снижение устойчивости ландшафтов

Table 1

Assessing the impact of natural factors on reducing landscape resilience

Мерзлотные и биоклиматические показатели	Оценка влияния в баллах			
	1 балл относительно устойчивые	2 балла относительно неустойчивые	3 балла неустойчивые	4 балла крайне неустойчивые
Температура грунтов, °C	От -5 и ниже	От -5 до -2	От -2 до -1	От -1 до +1
Льдистость отложений (объемная), отн. ед.	0,1–0,2	0,2–0,4	0,4–0,6	0,6 и более
Мощность сезонно-талого (стс) и сезонно-мерзлого (смс) слоев, м	1,5 – 2,0	0,8 –1,8	0,2–0,8	до 0,15
Характер распространения многолетнемерзлых пород	Сплошной	Сплошной с подрусловыми таликами	Прерывистый	Островной
Запасы фитомассы, ц/га	1200–2000	400–1000	70–400	20–130
*Продуктивность, ц/га	40–60	20–40	< 20 и 20–40	<20
**Теплообеспеченность, °C	1200–1400; 1400–1600	800–1000; 1000–1200	600–800	<600
***Радиационный индекс сухости, ккал · м ² /год	0,5–1,0	1,0 – 1,5	1,5 – 2,0	<0,5

Примечание. * среднепродуктивные – 40–60; низкопродуктивные – 20–40; минимально- <20 и низкопродуктивные – 40–60; ** умеренно-теплые – 1200–1400, 1400–1600, умеренно-холодные – 800–1000, 1000–1200, холодные – 600–800, очень холодные – <600; *** влажные – 0,5–1,0, умеренно влажные – 1,0–1,5, недостаточно влажные – 1,5–2,0, избыточно влажные – <0,5.

Note. * medium-productive – 40–60; low-productive – 20–40; minimal – <20 and low-productive – 40–60; ** moderately warm – 1200–1400, 1400–1600; moderately cold – 800–1000, 1000–1200; cold – 600–800; very cold – <600; *** wet – 0.5–1.0; moderately wet – 1.0–1.5; insufficiently wet – 1.5–2.0; excessively wet – <0.5.

рии Куларского золотоносного района к любым антропогенным механическим воздействиям. Определено, что ландшафты типичных и горных тундр, а также предтундровых реди и редколесий с их высокой льдистостью, распространением на сплошных мерзлых породах, низкими запасами фитомассы и минимальной продуктивностью, а также очень холодными и недостаточно влажными условиями обладают их крайне низкой степенью устойчивости (21–22 балла). Немногим более благоприятные условия тепло- и влагообеспеченности, менее высокая льдистость и наличие таликов в долинах водотоков обусловили низкую устойчивость (17–18 баллов) ландшафтов горных лиственничных редколесий и реди, а также северотаежной растительности долин рек и ручьев.

Водоросли. По результатам исследований водорослей фитопланктона и фитоперифитона в 8 водных объектах выявлено 48 видов водорослей из 5 отделов, 7 классов, 15 порядков, 24 семейств, 29 родов (табл. 3).

В исследованных водных объектах основу фитопланктона и фитоперифитона составляют диатомовые (58,3 %) и зеленые (27,1 %) водоросли, что характерно для водоемов Якутии и в целом для регионов Голарктики [21, 22]. Видовой состав водорослей других систематических групп незначителен. Среди семейств первые ранговые места принадлежат семействам: Naviculaceae, Cymbellaceae и Closteriaceae по 5 видов, за ними следуют Diatomaceae, Gomphonemataceae по 4 вида, а также семейства Fragilariaceae, Zygnemataceae, Spirogyraceae по 3 вида соответственно. Среди родов наиболее разнообразно представлены: *Closterium* – 5 видов, *Cymbella* и *Gomphonema* по 4, затем *Diatoma*, *Pinnularia* по 3 вида, *Fragilaria*, *Tabellaria*, *Tribonema* и *Spirogyra* по 2 вида соответственно.

Среди исследованных водных объектов наиболее высокая численность фитопланктона оказалась в ручьях Сдвиг (825066,7 кл./л) и Кроткий (310924,0 кл./л), а биомасса – в руч. Кроткий (1,74 мг/л) (табл. 4).

Таблица 2

Мерзлотные и биоклиматические показатели ландшафтов Куларского золотоносного района и оценка их устойчивости

Table 2

Permafrost and bioclimatic indicators of landscapes in the Kular gold-bearing region and their resilience assessment

Ландшафтные комплексы	*Температура пород, °С **Сумма баллов	Объемная суммарная льдистость, доли ед. Сумма баллов	Мощность стл/смс, м Сумма баллов	Распространение многолетнемерзлых пород Сумма баллов	Запасы фитомассы, ц/га Сумма баллов	Продуктивность растительного покрова, ц/га / Сумма баллов	Условия теплообеспеченности, град. Сумма баллов	Радиационный индекс сухости, ккал.м ² /год Сумма баллов	Сумма баллов	Степень устойчивости
Типичные тундры кустарничково-лишайниковые моховые	$\frac{-8...-10}{1}$	$\frac{0,4-0,6 (0,8)}{3}$	$\frac{0,3-0,5}{3}$	$\frac{\text{Сплошное}}{1}$	$\frac{75}{3}$	$\frac{<20}{4}$	$\frac{<600}{4}$	$\frac{1,5-2,0}{3}$	22	Крайне низкая
Предтундровые листовничные редины кустарничково-лишайниково-моховые и ерниковые	$\frac{-6...-7}{1}$	$\frac{0,4-0,6 (0,8)}{3}$	$\frac{0,5-0,7}{3}$	$\frac{\text{Сплошное}}{1}$	$\frac{75}{3}$	$\frac{<20}{4}$	$\frac{<600}{4}$	$\frac{1,5-2,0}{3}$	22	Крайне низкая
Горные тундры лишайниковые и кустарничково-моховые	$\frac{-8...-11}{1}$	$\frac{0,2-0,4 (0,6)}{2}$	$\frac{0,5-0,8}{3}$	$\frac{\text{Сплошное}}{1}$	$\frac{75}{3}$	$\frac{<20}{4}$	$\frac{<600}{4}$	$\frac{1,5-2,0}{3}$	21	Крайне низкая
Горные редколесья листовничные и редины кустарничково-лишайниковые моховые	$\frac{-2...-4}{2}$	$\frac{0,2-0,4 (0,6)}{2}$	$\frac{1,0-2,0}{1}$	$\frac{\text{Сплошное}}{1}$	$\frac{300}{3}$	$\frac{20-40}{3}$	$\frac{600-800}{3}$	$\frac{1,0-1,5}{2}$	17	Низкая
Комплекс северотраежной долиной растительности	$\frac{-2...-6}{2}$	$\frac{0,2-0,4}{2}$	$\frac{0,5-1,0}{2}$	$\frac{\text{Сплошное с подозерными таликами}}{2}$	$\frac{300}{3}$	$\frac{20-40}{3}$	$\frac{600-800}{3}$	$\frac{0,5-1,0}{1}$	18	Низкая

Примечание. * – в числителе мерзлотные и биоклиматические показатели, ** – сумма баллов.

Note. * – in the numerator, permafrost and bioclimatic indicators, ** – total score.

Таблица 3

Таксономический состав водорослей в бассейне р. Суор-Уйалаах

Table 3

Taxonomic composition of algae in the Suor-Uyalaakh River Basin

Отдел	Число					% от общего числа видов (48)
	Класс	Порядок	Семейств	Родов	Видов	
Cyanophyta – синезеленые	1	2	2	2	2	4,2
Euglenophyta – Эвгленовые	1	1	1	1	2	4,2
Bacillariophyta – диатомовые	2	6	12	17	28	58,3
Xanthophyta – желтозеленые	1	2	2	2	3	6,2
Chlorophyta – зеленые	2	4	7	7	13	27,1
Всего	7	15	24	29	48	100

Таблица 4

Показатели численности, биомассы водорослей и индекса сапробности

Table 4

Indicators of abundance, biomass, and saprobicity index

Показатель	Водные объекты							
	Кристалл	Конечный	Суор-Уйалаах	Сдвиг	Кроткий	Мамонья	Улахан-Юрюйэ	Аленка
Численность, кл.	32844,0	43792,0	9250,0	825066,7	310924,0	1846,8	1377,0	10675,8
Биомасса, мг/л	0,14	0,11	0,03	1,74	0,14	0,007	0,007	0,008
Индекс сапробности	1,2	1,76	1,7	1,82	2,0	1,2	1,5	1,6

По числу видов наиболее разнообразно представлены р. Суор-Уйалаах, ручьи Кроткий, Аленка и Улахан-Юрюйэ. В остальных исследованных водных объектах число видов невелико.

1. Ручей Кристалл образован в результате слияния р. Суор-Уйалаах и ручья Улахан-Юрюйэ. Протекает по территории отработанного горного участка «Кристалл». Ширина ручья до 15 м. Дно каменисто-илистое. Глубина до 0,5 м, берега образованы техногенными отвалами прошлых лет.

В результате исследований видового состава водорослей руч. Кристалл обнаружены 6 видов из 3 отделов водорослей. В таксономическом спектре ведущая роль принадлежит диатомовым (66,0 % от общего числа обнаруженных видов в данном ручье). Наименьшим числом видов представлены синезеленые и зеленые отделы водорослей по 16,0 % соответственно. Средние показатели численности составляют 35844 кл./л при биомассе 0,14 мг/л (см. табл. 4). Основу численности и биомассы фитопланктона формируют синезеленые водоросли *Anabaena sphaerica* Bornet & Flahault и зеленая – *Spirogyra tenuissima* (Hassall) Kützing. Также в сложении участвуют планктонные виды из диатомовых – *Asterionella formosa* Hassall, *Aulacoseira islandica* (O. Müller)

Simonsen, *Planothidium lanceolatum* (Brébisson ex Kützing) Lange-Bertalot и *Cyclotella* sp.

Экологический анализ водорослей руч. Кристалл показал, что по местообитанию доминируют планктонно-бентосные виды. По отношению к содержанию солей в воде – индифференты. Географический анализ показал преобладание космополитов, что свойственно всей циркулярной области Голарктики. Индекс сапробности (S) по Пантле и Буку составляет 1,20.

2. Ручей Конечный, левый приток р. Суох-Уйалаах. Ширина до 2 м, дно илистое. В составе водорослей руч. Конечный обнаружено 7 видов из 2 отделов водорослей. В таксономическом спектре ведущая роль принадлежит диатомовым (57,1 % от общего числа обнаруженных видов в данном ручье) и зеленым (43,0 %). Средние показатели численности составляют 43792 кл./л при биомассе 0,11 мг/л (см. табл. 4). Основу численности и биомассы фитопланктона формируют диатомовые водоросли *Ulnaria ulna* (Nitzsch) Compère, *Tabellaria flocculosa* (Roth) Kützing, *Pinnularia gibba* (Ehrenberg) Ehrenberg и *Cymboplectra austriaca* (Grunow) Krammer и зеленые – *Closterium kuetzingii* Brébisson, *Closterium rostratum* Ehrenberg ex Ralfs. В экологиче-

ском спектре по местообитанию преобладают планктонно-бентосные виды. По отношению к содержанию солей в воде – индифференты. В географическом отношении – широко распространенные виды. Индекс сапробности (S) по Пантле и Буку – 1,76.

3. Река Суор-Уйалаах расположена в 209 км по левому берегу от устья р. Яна, Ленского бассейнового округа. Длина водотока 39 км, ширина русла варьирует от 2 до 6 м, глубина 0,8 м. Дно каменисто-илистое. Современная долина ручья Суор-Уйалаах V-образная, асимметричная. Берега пологие, произрастают хвои и ива.

Видовой состав фитопланктона реки включает 20 видов водорослей из 4 отделов: диатомовые – 11 видов, зеленые – 6, желтозеленые – 2, эвгленовые – 1. Количественные показатели водорослей составляют, в среднем, для реки 9250,0 кл./л при биомассе 0,03 мг/л (см. табл. 4) за счет желтозеленой водоросли *Microthamnion kuetzingianum* Nägeli ex Kützing, диатомовой – *Tabellaria flocculosa* и зеленых нитчатых – *Ulothrix zonata* (F. Weber & Mohr) Kützing и *Spirogyra tenuissima*, которыми обильно обрастают подводные камни и мхи. В экологическом спектре по местообитанию доминировали планктонно-бентосные виды. По отношению к содержанию солей в воде – индифференты. В географическом анализе – широко распространенные виды. Индекс сапробности (S) по Пантле и Буку – 1,70.

4. Ручей Сдвиг, левый приток р. Улахан-Юрюйэ. Ширина 1 м, глубина до 0,8 м, дно илистое. Берега представлены старыми техногенными отвалами.

В составе водорослей руч. Сдвиг обнаружено 7 видов из 3 отделов водорослей. В таксономическом спектре ведущая роль принадлежит диатомовым (71,4 % от общего числа обнаруженных видов в данном ручье). Средние показатели численности составляют 825066 кл./л при биомассе 1,74 мг/л (см. табл. 4). Основу численности и биомассы фитопланктона формируют диатомовые водоросли – *Tabellaria fenestrata* (Lyngbye) Kützing, *Tabellaria flocculosa*, *Pinnularia brevicostata* Cleve, *Pinnularia viridis* (Nitzsch) Ehrenberg, *Stauroneis anceps* Ehrenberg; желтозеленые – *Tribonema vulgare* Pascher; зеленые – *Closterium striolatum* Ehrenberg ex Ralfs. В экологическом спектре преобладают планктонно-бентосные виды. По отношению к содержанию солей в воде – индифференты. В географическом анализе – ши-

роко распространенные виды. Индекс сапробности (S) по Пантле и Буку – 1,82.

5. Ручей Кроткий (правый приток р. Суор-Уйалаах) находится на восточном склоне Улахан-Сисского хребта. Ширина 1 м, глубина 0,50 м.

В составе водорослей руч. Кроткий обнаружено 12 видов из 3 отделов. В таксономическом спектре ведущая роль принадлежит диатомовым (75,0 % от общего числа обнаруженных видов в данном ручье). Средние показатели численности составляют 310924 кл./л при биомассе 0,14 мг/л (см. табл. 4). Основу численности и биомассы фитопланктона формируют *Tabellaria fenestrata* (численность – 19449 кл./л, биомасса – 0,02 мг/л), *T. flocculosa* (численность – 77760 кл./л, биомасса – 0,01 мг/л) из диатомовых водорослей. В сложении также участвуют *Fragilaria intermedia* (Grunow) Grunow, *Gomphonema angustatum* (Kützing) Rabenhorst с вариацией *Gomphonema angustatum* var. *productum* Grunow, *Gomphonema truncatum* Ehrenberg, *Cymboplectra amphicephala* (Nägeli ex Kützing) Krammer, *Pinnularia viridis*, *Stauroneis anceps*; синезеленые – *Phormidium granulatum* (N.L.Gardner) Anagnostidis; зеленые – *Zygnema pectinatum* (Vaucher) C. Agardh, *Spirogyra tenuissima* и др. В экологическом анализе по местообитанию – планктонно-бентосные. По отношению к содержанию солей в воде – индифференты. В географическом анализе – широко распространенные виды. Индекс сапробности (S) по Пантле и Буку – 2,20.

6. Ручей Мамонья, левый приток руч. Этинээх. Ширина до 5 м, глубина до 0,5 м, дно илистое. Берега образованы техногенными отвалами прошлых лет.

В альгофлоре ручья выявлено 8 видов водорослей, из которых 5 видов относятся к диатомовым, 3 – к зеленым. Средние показатели численности составляют 1846,8 кл./л, биомассы 0,007 мг/л (см. табл. 4) за счет зеленых нитчатых – *Zygnema ralfsii* (Hassall) De Bary, *Spirogyra tenuissima* и колониальной *Sphaerocystis polycocca* Korshikov, диатомовых – *Aulacoseira islandica*, *Meridion circulare* (Greville) C. Agardh и *Tabellaria flocculosa*. В экологическом анализе по местообитанию – планктонно-бентосные. По отношению к содержанию солей в воде – индифференты. В географическом спектре – широко распространенные виды. Индекс сапробности (S) по Пантле и Буку – 1,20.

7. Река Улахан-Юрюйэ расположена в северной части Яно-Омолойского междуречья на ле-

вом берегу р. Суор-Уйалаах. Длина реки 16 км. Ширина русла небольшая – 3–4 м, глубина до 0,5 м, дно каменисто-илистое.

В видовом составе водорослей реки выявлено 11 видов из 3 отделов: диатомовые – 9 видов, желтозеленые и зеленые – по 1. Численность фитопланктона составила 1377,0 кл./л, биомасса 0,006 мг/л (см. табл. 4) за счет нитчатых – *Spirogyra tenuissima*, *Tribonema viride*, а также диатомовых – *Melosira varians* C. Agardh, *Fragilaria intermedia*, *Ulnaria ulna*, *Diatoma elongata* (Lyngbye) C. Agardh, *Eunotia pectinalis* (Kützinger) Rabenhorst, *Cymbella amphicephala*. В экологическом спектре по местообитанию – планктонно-бентосные. По отношению к содержанию солей в воде – индифференты. В географическом спектре – широко распространенные виды. Индекс сапробности (S) по Пантле и Буку – 1,51.

8. Ручей Аленка, левый приток р. Суор-Уйалаах. Длина 7 км, ширина до 2 м, глубина 0,30 м. Долина современного ручья имеет симметричную чашеобразную форму с очень пологими склонами, которые являются водораздельными участками реки Суор-Уйалаах и руч. Улахан-Юрюйэ. За время эксплуатации в долине ручья сформировано большое количество техногенных отвалов гали и эфелей, образующих часть техногенной россыпи. Отвалы состоят в основном из щебня, гальки глинистых, песчано-глинистых сланцев, песчаников, гравия и песка с незначительной примесью глинистого материала.

В видовом составе водорослей реки отмечено 12 видов из 4 отделов: диатомовые – 7 видов, зеленые – 3, эвгленовые и желтозеленые по 1 виду. Средняя численность фитопланктона составляют 10675,8 кл./л, биомасса 0,008 мг/л (см. табл. 4) за счет желтозеленой водоросли *Microthamnion kuetzingianum*, диатомовых – *Aulacoseira islandica*, *Diatoma hiemale* (Roth) Heiberg, *Tabellaria flocculosa* и зеленой нитчатой – *Mougeotia scalaris* Hassall и кустистой *Stigeoclonium fasciculare* Kützinger. В экологическом спектре по местообитанию – планктонно-бентосные. По отношению к содержанию солей в воде – индифференты. В географическом анализе – широко распространенные виды. Индекс сапробности (S) по Пантле и Буку – 1,60.

Закключение

Таким образом, оценка степени устойчивости показала, что в целом все ландшафтные комплексы территории и современный видовой состав

водорослей Куларского золотоносного района обладают низкой степенью устойчивости к техногенному воздействию водных объектов, что обусловлено сочетанием мерзлотных, биогидроклиматических факторов региона.

Проведенные исследования свидетельствуют о бедности видового состава и низком уровне развития водорослей фитопланктона и фитоперифитона в исследованных водных объектах. Среди исследованных водных объектов по числу видов наиболее разнообразно представлены р. Суор-Уйалаах, ручьи Кроткий, Аленка и Улахан-Юрюйэ. Показатели количественного развития водорослей составляют в среднем от 1377 (Улахан-Юрюйэ) до 825066,7 кл./л (руч. Сдвиг), биомасса от 0,007 (Улахан-Юрюйэ) до 1,74 мг/л (руч. Кроткий) (табл. 5).

Анализ экологической структуры показал, что в исследованных водотоках распространены планктонно-бентосные виды, по отношению к солености воды – индифференты. В географическом спектре доминируют широко распространенные виды. Индекс сапробности (S) по Пантле и Буку колеблется в пределах 1,20–2,20, что позволяет отнести воды изучаемых объектов к разряду от достаточно чистых до умеренно-загрязненных вод. Следует отметить, что водорослевые сообщества, развивающиеся в суровых климатических условиях, являются наиболее чувствительным компонентом водных экосистем и также чутко реагируют на изменение экологического состояния ландшафта.

Полученные данные о составе водорослей могут явиться основой для создания базы биомониторинга в условиях нарастания техногенных нагрузок на водные экосистемы реки Суор-Уйалаах северо-востока Якутии. Оценка устойчивости ландшафтов золотоносных месторождений Куларского района может иметь практическую значимость для разработок экологического нормирования территории и природоохранных мероприятий по снижению негативных последствий для природной среды.

Список литературы / References

1. Иванова А.З., Десяткин Р.В. Техногенные почвы Куларского золотоносного района. *Успехи современного естествознания*. 2018;(6):71–77.
2. Ivanova A.Z., Desyatkin R.V. Technogenic soils of the Kular gold-bearing region. *Advances of Current Natural Science*. 2018;(6):71–77. (In Russ.)
3. Лунышин П.Д. Куларские сокровища обретают наследников. Прошлое и будущее золотого Кулара. *Золото и технологии*. 2018;39(1):126–134.

- Lunyashin P.D. Kular treasures find heirs. The past and future of the golden Kular. *Gold and Technology*. 2018;39(1):1260134. (In Russ.)
3. Федоров А.Н. Эволюция и динамика мерзлотных ландшафтов Якутии: Автореф. дис. ...докт. геогр. наук. Якутск; 2020. 38 с.
- Fedorov A.N. Evolution and dynamics of permafrost landscapes of Yakutia: Abstr. ... Diss. Doct. Sci., Yakutsk; 2020. 38 p. (In Russ.).
4. Баринова С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В. Водоросли-индикаторы в оценке качества окружающей среды. М.: ВНИИприроды; 2000. 150 с.
- Barinova S.S., Medvedeva L.A., Anisimova O.V. *Algae-indicators in assessing environmental quality*. Moscow: VNIIPrirody Publ.; 2000. 150 p. (In Russ.).
5. Parmar T.K., Rawtani D., Agrawal Y.K. Agrawal. Bioindicators: the natural indicator of environmental pollution. *Frontiers in Life Science*. 2016;9(2):110–118. <https://doi.org/10.1080/21553769.2016.1162753>
6. Firsova A.D., Bessudova A.Y., Likhoshway Y.V., Kopyrina L.I. Chrysophycean stomatocysts from two unique lakes of Yakutia (Russia). *Phytotaxa*. 2020;474(3):197–217. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.474.3.1>.
7. Gökçe D. *Algae as an indicator of water quality*. London: IntechOpen; 2016. 342 p. <https://doi.org/10.5772/62916>.
8. Захарова В.И., Исаев А.П. Влияние горнодобывающей промышленности на экосистемы Северо-востока Якутии. Новосибирск: Наука; 2010. 208 с.
- Zakharova V.I., Isaev A.P. The impact of the mining industry on the ecosystems of North-East Yakutia. Novosibirsk: Nauka; 2010. 208 p. (In Russ.).
9. Петрова Л.В., Марков В.С. Горно-геологические особенности подземной разработки россыпных месторождений Кулара. *Евразийское научное объединение*. 2022;68(10-2):151–154. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4268771>.
- Petrova L.V., Markov V.S. Mining and geological features of underground mining of Kular placer deposits. *Eurasian Scientific Association*. 2022;68(10-2):151–154. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4268771>. (In Russ.).
10. Мерзлотно-ландшафтная карта Республики Саха (Якутия). Масштаб 1: 1 500 000 / Федоров А.Н., Торговкин Я.И., Шестакова А.А., Васильев Н.Ф., Макаров В.С. и др.; гл. ред. М.Н. Железняк. 2018. 2 л.
- Permafrost-landscape map of the Republic of Sakha (Yakutia). Scale 1: 1,500,000 / Fedorov A.N., Torgovkin Ya.I., Shestakova A.A., Vasilyev N.F., Makarov V.S. and etc.; Ch. ed. M.N. Zheleznyak. 2018. 2 L. (In Russ.).
11. Вассер С.П., Кондратьева Н.В., Масюк Н.П. Водоросли. *Справочник*. Киев: Наукова думка; 1989. 608 с.
- Wasser S.P., Kondratyeva N.V., Masyuk N.P. *Algae: Directory*. Kyiv: Naukova Dumka; 1989. 608 p. (In Russ.).
12. Абакумов В.А. Руководство по гидробиологическому мониторингу поверхностных экосистем. СПб.: Гидрометеоздат; 1992. 318 с.
- Abakumov V.A. *Guide to hydrobiological monitoring of surface ecosystems*. St. Petersburg: Gidrometeoizdat; 1992. 318 p. (In Russ.).
13. Харитонов В.Г. Диатомовые водоросли Колымы. Магадан: Кордис; 2014. 495 с.
- Kharitonov V. G. *Diatoms of Kolyma*. Magadan: Kordis; 2014. 495 p. (In Russ.).
14. Харитонов В.Г., Генкал С.И. Диатомовые водоросли озера Эльгыгитгын и его окрестностей (Чукотка). Магадан: СВНЦ ДВО РАН; 2012. 402 с.
- Kharitonov V.G., Genkal S.I. *Diatoms of Lake Elgygytyn and its environs (Chukotka)*. Magadan: NESCFEB RAS; 2012. 402 p. (In Russ.).
15. Pantle R., Buck H. Die biologische Überwachung der Gewässer und die Darstellung der Ergebnisse. *Gas und Wasserbach*. 1955; 96(18):1–604.
16. Sladeček V. System of water quality from the biological point of view. *Ergebnisse Limnologie*. 1973;(7):1–218.
17. Шполянская Н.А., Зотова Л.И. Карта устойчивости ландшафтов криолитозоны Западной Сибири. *Вестник МГУ*. 1994;1:56–65.
- Shpolyanskaya N.A., Zotova L.I. Map of the stability of landscapes in the permafrost zone of Western Siberia. *Bulletin of Moscow State University*. 1994;1: 56–65. (In Russ.).
18. Корреляционная эколого-фитоценотическая карта. Карты природы, населения и хозяйства Азиатской России. Масштаб 1:7 500 000 / Букс И.И., Байбородин В.Н., Тимирбаева Л.С.; гл. ред. В.Б. Сочава, В.Н. Байбородин. М.; 1977. 1 л.
- Correlation ecological-phytocenotic map. Maps of nature, population and economy of Asian Russia*. Scale 1:7 500 000 / Buks I.I., Bayborodin V.N., Timirbaeva L.S.; chief editor V.B. Sochava, V.N. Bayborodin. M.; 1977. 1 L. (In Russ.).
19. Федоров А.Н., Ботулу Т.А., Варламов С.П. и др. Мерзлотные ландшафты Якутии: Пояснительная записка к «Мерзлотно-ландшафтной карте Якутской АССР масштаба 1:2500000». Новосибирск: ГУГК; 1989. 70 с.
- Fedorov A.N., Botulu T.A., Varlamov S.P., et al. *Permafrost landscapes of Yakutia: Explanatory note to the "Permafrost-landscape map of the Yakut Autonomous Soviet Socialist Republic at a scale of 1:2500000"*. Novosibirsk: GUGK; 1989. 70 p. (In Russ.).
20. Васильев И.С., Федоров А.Н., Варламов С.П. и др. Устойчивость криогенных ландшафтов на северном участке трассы железной дороги Якутии. *Наука и образование*. 2009;(2):4–8.
- Vasilyev I.S., Fedorov A.N., Varlamov S.P., et al. Stability of cryogenic landscapes in the northern part of the railway line of Yakutia. *Nauka i obrazovanie*. 2009;(2):4–8. (In Russ.).
21. Васильева И.И. Анализ видового состава и динамики развития водорослей водоемов Якутии. Якутск: Изд-во Якут. науч. центр СО РАН СССР; 1989. 48 с.

Vasilyeva I.I. *Analysis of the species composition and dynamics of development of algae in water bodies of Yakutia*. Yakutsk: Publishing House of the Scientific Center SB RAS USSR; 1989. 48 p. (In Russ.).

22. *Разнообразие растительного мира Якутии*. Новосибирск: Изд. СО РАН; 2005. 328 с.

Diversity of the flora of Yakutia. Novosibirsk: Publishing House SB RAS; 2005. 328 p. (In Russ.).

Об авторах

КОПЫРИНА Любовь Иннокентьевна, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-0374-3323>, ResearcherID: S-7979-201, Scopus Author ID: 55225689300, SPIN: 8609-8506 e-mail: l.i.kopyrina@mail.ru

НИКОЛАЕВА Надежда Анисимовна, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-6831-6613>, ResearcherID: I-9615-2018, Scopus Author ID: 56909645200, SPIN: 6134-6433, e-mail: nna0848@mail.ru

Вклад авторов

Копырина Л.И. – разработка концепции, проведение исследования, проведение статистического анализа, ресурсное обеспечение исследования, создание черновика рукописи, редактирование рукописи; **Николаева Н.А.** – разработка концепции, проведение исследования; создание черновика рукописи; редактирование рукописи

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

KOPYRINA, Lyubov Innokentievna, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Institute for Biological Problems of Cryolithozone, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-0374-3323>, ResearcherID: S-7979-201, Scopus Author ID 55225689300, SPIN: 8609-8506, e-mail: l.i.kopyrina@mail.ru

NIKOLAEVA, Nadezhda Anisimovna, Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher, Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-6831-6613>, ResearcherID: I-9615-2018, Scopus Author ID: 56909645200, SPIN: 6134-6433, e-mail: nna0848@mail.ru

Authors' contribution

Kopyrina L.I. – conceptualization, investigation, formal analysis, resources, writing – original draft, writing – review & editing; **Nikolaeva N.A.** – conceptualization, investigation, writing – original draft, writing – review & editing

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 08.11.2023

Поступила после рецензирования / Revised 10.12.2024

Принята к публикации / Accepted 12.02.2025

Биологические ресурсы

УДК 599:574.34(571.56)

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-1-130-138>



Оригинальная статья

Динамика численности охотничьих видов млекопитающих Якутии в XX веке

И. И. Мордосов✉, Н. И. Мордосова

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

✉mordoson@yandex.ru

Аннотация

Антропогенный фактор в XX веке начал играть важную роль в существовании животных. Потепление климата и разрушение экологических преград способствовали проникновению новых видов птиц и млекопитающих в северном направлении. Наряду с этим, антропогенное воздействие имеет ряд негативных последствий. Проведено исследование динамики численности некоторых видов охотничьих млекопитающих Якутии. Сбор материала осуществлялся с 1962 г. по настоящее время. Исследования проводились общепринятыми экологическими методами: маршрутными и кратковременными наблюдениями, стационарные работы в большинстве случаев осуществлялись одновременно в 3–4 пунктах. Экологические наблюдения проведены во все сезоны года. Авиачеты численности лося, тундровых популяций дикого северного оленя и бурого медведя проведены на всей территории Якутии. Выполнено анкетирование охотников-промысловиков и проанализированы данные промысловой статистики за 1935–1985 гг. В XX веке произошли изменения уровня и динамики численности основных охотничьих видов млекопитающих – зайца-беляка, белки обыкновенной, волка, бурого медведя, лося, дикого северного оленя. Численность речной выдры очень низкая, обыкновенной лисицы, рыси и россомахи – низкая, но тенденции сокращения их ареалов не отмечено. Произошло нарушение половозрастной структуры популяции дикого северного оленя. Основным фактором, регулирующим численность зайца-беляка, хищников и копытных, является промысловый пресс. Причины снижения численности белки не выяснены. Работы позволили уточнить ареалы видов, в том числе северные границы проникновения бурого медведя. Отсутствие строгих природоохранных мероприятий представляет реальную угрозу для некоторых млекопитающих, таких как сундрунская популяция дикого северного оленя.

Ключевые слова: охотничьи виды, грызуны, заяц-беляк, копытные, глубина снежного покрова

Финансирование. Научно-исследовательская программа «Биоразнообразие растений и животных Якутии», выполняемая биолого-географическим факультетом ЯГУ (ныне Институт естественных наук СВФУ) им. М.К. Аммосова.

Благодарности. Авторы выражают благодарность студентам-биологам 3–4 курсов биолого-географического факультета ЯГУ (ныне СВФУ) им. М.К. Аммосова за участие в полевых работах.

Для цитирования: Мордосов И. И., Мордосова Н. И. Динамика численности охотничьих видов млекопитающих Якутии в XX веке. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(1):130–138. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-1-130-138>

Original article

The dynamics of hunting mammal species populations in Yakutia during the 20th century

Innokenty I. Mordosov✉, Nadejda I. Mordosova

Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

✉mordoson@yandex.ru

Abstract

Anthropogenic influences have emerged as significant ecological drivers affecting the survival of various animal species in the 20th century. Numerous researchers have demonstrated that climate warming and anthropogenic disturbances – including the degradation of ecological barriers – have facilitated the northward expansion of new avian and mamma-

lian species. Concurrently, these anthropogenic pressures exert several detrimental effects. We conducted a comprehensive study on the population trends of some game mammal species in Yakutia. Data collection has been ongoing since 1962 and employs standardized ecological methodologies, including transect surveys, short-term observational protocols, and stationary work, which are typically conducted simultaneously at three to four sites. Ecological monitoring encompassed all seasonal cycles. Aerial censuses of moose, tundra populations of wild reindeer, and brown bears were conducted throughout the entire territory of Yakutia. Furthermore, structured interviews with commercial hunters and analyses of hunting statistics spanning from 1935 to 1985 were undertaken. Throughout the 20th century, fluctuations in population abundance and demographic dynamics were observed among key game mammal species, including the mountain hare, Eurasian red squirrel, wolf, brown bear, moose, and wild reindeer. The population density of the river otter remains critically low, while the red fox, Eurasian lynx, and wolverine maintain low but stable populations, with no discernible contraction in their distribution ranges. A disturbance in the sex and age structure of the wild reindeer population has been identified. The primary factor regulating the population dynamics of the mountain hare, large carnivores, and ungulates has been determined to be hunting pressure. The underlying causes of the population decline of the Eurasian red squirrel remain unresolved. This research has facilitated the refinement of species distribution maps, including the northernmost range limits of the brown bear. The absence of rigorous conservation measures presents a significant threat to certain mammalian taxa, such as the Sundrun population of wild reindeer.

Keywords: hunting species, rodents, mountain hare, ungulates, depth of snow cover

Funding. This study was supported by the scientific program “Biodiversity of plants and animals of Yakutia,” conducted by the Faculty of Biology and Geography at Yakut State University, which is now known as the Institute of Natural Sciences of the M.K. Ammosov North-Eastern Federal University.

Acknowledgements. The authors express gratitude to the third- and fourth-year students of the Faculty of Biology and Geography at Yakutsk State University (now M.K. Ammosov North-Eastern Federal University) for their participation in fieldwork.

For citation: Mordosov I.I., Mordosova N.I. The dynamics of hunting mammal species populations in Yakutia during the 20th century. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(1):130–138. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-130-138>

Введение

Одной из важнейших задач экологии животных является изучение динамики их численности. Работы по изучению фауны млекопитающих Якутии были начаты в середине 19 в. и имели описательный характер. Основное накопление материала по динамике численности началось с работы Первой комплексной экспедиции АН СССР по изучению производительных сил Якутии (1925–1927 гг.) [1, 2 и др.]. В последующие годы исследованиями промысловых животных Северо-Западной Якутии занимался А.А. Романов [3]. Дальнейшее накопление материалов по фауне и динамике животных связано с работами В.Н. Скалона и др. [4, 5]. После открытия лаборатории зоологии ЯФ АН СССР в 1947 г. были начаты интенсивные исследования по изучению экологии позвоночных животных Якутии. В результате были установлены некоторые причины динамики численности многих видов животных [6, 7]. На кафедре зоологии Якутского госуниверситета проводились популяционные исследования зайца-беляка и мышевидных грызунов [8, 9].

Материал и методика исследований

Материалы для данной работы были собраны нами с 1962 г. по настоящее время. Полевые ра-

боты в Западной Якутии проводились на стационарах, расположенных в широтном направлении: «Джилинда» – 70°10' «Победа» – 68°30' с.ш., «Эйк» – 66° с.ш., «Егольджа» – 68°10' с.ш., «Хоро» – 62°30' с.ш., «Нюя» – 61° с.ш., «Лютенга» – 61° с.ш.; полустационарные (по 3–4 года) исследования по сходной программе осуществлялись на Лено-Вилуйском междуречье («Бай», «Баппагайцы» и «Тонулаах» – 63° с.ш.), на Лено-Амгинском междуречье (в Амгинском и Чурапчинском районах – 61° с.ш.), в долине Средней Лены («Тюбятцы» – 64° с.ш., «Булгунняхтах» – 61° с.ш.). Маршрутные и кратковременные наблюдения проводились в долине р. Чона до и после ее затопления Вилуйским водохранилищем, а также на отдельных пунктах водохранилища после его заполнения; в бассейнах рек Малая и Большая Ботуобуя; в бассейне р. Бирюк, левого притока р. Лена, от устья до истоков; в долине нижнего течения р. Лена от с. Бестях Жиганского района до острова Столб в дельте; в районе поселков Удачный и Айхал, вдоль трассы проектируемой железной дороги от г. Томмот до с. Павловск Мегино-Кангаласского района. С 1983 г. широкие полевые исследования проводились в Северо-Восточной Якутии. Основными исследованиями была охвачена Яно-Индигирская тундра. Авиачеты лося, дикого северного оленя

тундровых популяций и бурого медведя выполнялись на всей территории Якутии. Стационарные исследования в большинстве случаев проходили одновременно в 3–4 пунктах. Экологические наблюдения проведены во все сезоны года. Сбор и обработка материалов выполнялись по общепринятым методам экологических исследований. Авиачеты дикого северного оленя тундровых популяций проводились по методике, разработанной сотрудниками Института сельского хозяйства Крайнего Севера (г. Норильск). Для авиачета бурого медведя применялась методика, разработанная нами. Кроме того, было выслано охотникам-промысловикам 220 анкет, получено и обработано 98. Для оценки численности охотничьих видов млекопитающих использовали результаты отлова капканами, отстрела по лицензиям, а также данные охотничье-промысловой статистики.

Обсуждение

В возникновении годовых колебаний численности животных первостепенное значение имеют погодно-климатические экстремумы, состояние кормовых ресурсов и воздействие антропогенных факторов, в первую очередь влияющих на емкость угодий и определяющих потенциал размножения. По существующей концепции многовекового цикла климата в голоцене [8] последнее начало проявления теплого сухого периода приходится на отрезок со второй половины 19 в. и по настоящее время. Одновременно в этот же период происходили значительные сокращения лесных массивов в результате интенсификации их вырубок и обширных лесных пожаров. Это вызвало разрушение экологической преграды в виде обширных лесных массивов, препятствовавших проникновению южных видов на территорию Якутии. Эти два фактора – потепление климата и разрушение экологических преград – способствовали проникновению новых видов птиц и млекопитающих. Согласно Н.А. Находкину и др. [9], за последние десятилетия на территории Якутии обнаружено 30 новых видов птиц – пролетных, гнездящихся и залетных. В последние годы происходит продвижение на север домового и полевого воробьев. Они обнаружены в с. Казачье (71° с.ш.), несмотря на то что процесс их адаптации к условиям Якутии еще не завершен, о чем свидетельствует значительная гибель зимующих особей этих видов [10,11].

В отношении териофауны влияние этого процесса проявляется не так ярко. Тем не менее,

ареалы косули *Capreolus capreolus* L.(1758), кабарги *Moschus moschiferus* L.(1758) и изюбры *Cervus elaphus* L. (1758) расширяются в северо-восточном направлении. Пульсация ареала косули началась, по-видимому, в конце 19 в., о чем говорит ее якутское название – *турмас*, приведенное в работе А.Е Кулаковского [12]. Первые научные данные о находке косули в долине р. Марха (левый приток р. Вилюй) и в долине среднего течения р. Амга были получены участниками Первой комплексной научной экспедиции АН СССР [1].

Стабильные и изменяющиеся абиотические факторы среды, а также антропогенные факторы оказывают различное влияние на динамику численности млекопитающих [13–16]. Наибольшее воздействие на численность животных в условиях Якутии оказывают холодные и малоснежные зимы, весенние заморозки, а для пойменных обитателей – паводки. Массовые виды грызунов и заяц-беляк представляют основу питания хищных птиц и млекопитающих. Однако в период нарастания численности леммингов и других видов мелких млекопитающих пернатые хищники не в состоянии сдерживать этот процесс, хотя в местах наибольшей плотности грызунов, как мы наблюдали в 1986 г., имеет место их скопление в долине р. Индигирка. В начальном периоде падения численности мелких млекопитающих хищники ускоряют его, затем по мере сокращения плотности жертв пернатые хищники переселяются и изменяют кормовой спектр. Некоторые наземные хищники (песец *Alopex lagopus* L. (1758)) также совершают кочевки, однако большая часть популяции остается и продолжает кормиться в основном грызунами. Как показали наши исследования, к оценке воздействия хищников на состояние плотности популяции грызунов и зайца-беляка *Lepus timidus*, L. (1758) необходимо подходить дифференцированно.

Так, часть исследователей считает, что основным фактором снижения численности белки *Sciurus vulgaris* L. (1776) выступает соболь – *Martes zibellina* L. (1758) [17,18], а В.В. Тимофеев [19] и др. отрицают это. Наши специальные исследования взаимоотношений белки и соболя, проведенные в Олекминском районе в 1969 г., показали, что основным кормом соболя являются мышевидные грызуны и ягоды голубики [14]. В течение 3 месяцев полевых работ в этом районе мы не обнаружили следы преследования соболем белки. Подобное питание соболя было отмечено также в бассейне среднего течения

р. Колыма [20]. Возможно, в первые годы акклиматизации соболя в Якутии он мог питаться белкой, добывая ее в гайнах. За 300 лет отсутствия соболя рефлекс защиты белки от этого хищника, по-видимому, был практически утрачен. В процессе увеличения численности соболя и возможного его преследования белка стала приобретать утраченные защитные рефлексы. Находясь в гайне и услышав царапание когтей соболя по стволу дерева, белка выскакивает из гнезда и уходит верхом. Это подтверждается тем, что во второй половине дня охотники обследуют места устройства гайн белки и, царапая по стволу дерева палкой, выгоняют зверька из гнезда и добывают ее.

Снижение численности белки в Западной Якутии началось в 1950-е годы, когда соболь на большей части территории региона еще отсутствовал (рис. 1).

В эти годы численность белки была низкой в других регионах Сибири и Дальнего Востока. По-видимому, причины столь глобальной по площади и длительной во времени депрессии численности белки нельзя объяснить простым воздействием хищников, неурожаем кормовой базы, влиянием лесных пожаров и интенсификацией промыслового изъятия. Причины снижения численности белки, происходящего во временных интервалах, близких к вековым циклам климата, более сложны и пока неизвестны. Почти полное прекращение промысла белки в конце 1990-х гг. из-за относительно низкой заготовительной стоимости ее шкурки не оказало влияния на увеличение ее численности.

Взросший, особенно в последние десятилетия, промысловый пресс на зайца-беляка в районах Центрально-Якутской равнины изменил существовавшие ритмы и амплитуды колебания численности вида. Она приобрела характер плавного подъема и плавного снижения и далеко не достигает показателей прежних пиков численности (рис. 2) [13, 14]. Вероятно, на фоне интенсификации промысла во время роста ее численности сложившиеся низкие темпы воспроизводства популяции уже не обеспечивают резкого увеличения ее плотности. По амплитуде колебания численности центрально-якутская популяция стала приближаться к популяциям вида, где численность полностью регулируется прессом охоты. На северо-востоке промысловый пресс относительно слабый, и в движении численности вида еще сохранялась резкая амплитуда колебания (рис. 2). Подобное движение числен-



Рис. 1. Динамика заготовок шкурок белки (1) и соболя (2) в Западной Якутии (в % к максимальным) [13]

Fig. 1. Dynamics of Eurasian red squirrel (1) and sable (2) pelt harvesting in Western Yakutia (in % of the maximum) [13]

ности было установлено С.П. Наумовым [21], В.А.Тавровским и др. [7].

Наиболее низкая численность лося отмечена в середине 19 в. и в 1945–1970 гг. Снижение численности в 1945–1970 гг. было обусловлено интенсивным промыслом в годы Великой Отечественной войны и ростом численности волка. В послевоенные годы была организована интенсивная борьба с волками различными методами и в 1960–1970 г. популяция хищника существенно сократилась. Сокращение популяции волка и прекращение промысла лося способствовали

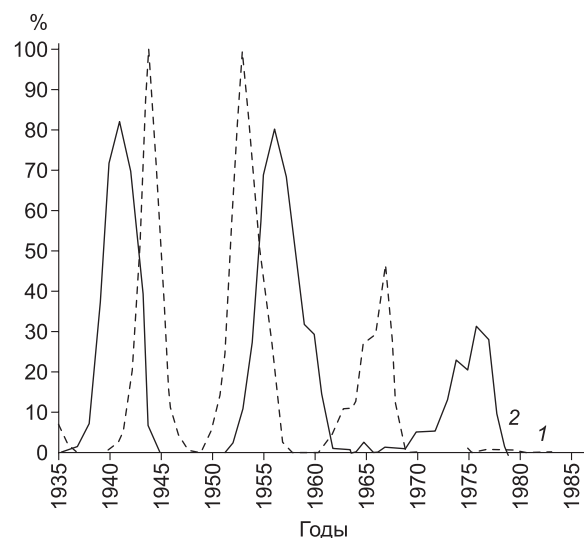


Рис. 2. Динамика заготовок шкурки зайца-беляка в Западной Якутии (1) и в Верхоянской впадине (2) (в % к максимальным) [13]

Fig. 2. Dynamics of mountain hare pelt harvesting in Western Yakutia (1) and the Verkhoyansk Depression (2) (in % of the maximum) [13]

Структура тундровых популяций дикого северного оленя, %

The population structure of wild reindeer in tundra, %

Популяция	Взрослые самцы	Взрослые самки	Телята-сеголетки	Молодняк 1–2 лет
Булунская	11,5	43	28,4	17,1
Яно-Индибирская	34,8	34,4	17,3	13,5
Сундруская	16,7	38,0	27,2	18,1

нарастанию численности последнего на всей территории Якутии достижению наибольшей плотности популяции в начале 1980-х гг. Антропогенный фактор стал одним из определяющих в регуляции численности этого вида. Чрезмерный промысел, отстрел с высокопроходимых автотранспортных средств, постоянное беспокойство в наиболее сложный период существования лося (с ноября по февраль) привели к катастрофическому сокращению его популяции в густонаселенных районах не только из-за прямого уничтожения, но и из-за изменения плодовитости самок и снижения выживаемости молодняка. В эти же годы происходило нарастание популяции волка, вызванное распространенным мнением о том, что «волк–санитар леса и уничтожает больных и ослабленных животных». Как следствие этого, в 1990-е г. численность лося резко сократилась. В начале 21 в. на основе проведенных нами учетных работ было предложено ввести мораторий на промысел лося в центральных районах сроком на 5 лет. Это определило нарастание плотности популяции вида, которое сохраняется и в настоящее время.

В 1920–1930-е гг. ареал дикого северного оленя *Rangifer tarandus* L. (1758) в тундровой зоне Советского Союза был сплошным [22]. Согласно этой публикации, в результате интенсивного промысла в 1940-е гг. во многих местах ареала этот вид исчез и образовались отдельные изолированные популяции. В пределах тундровой зоны Якутии сохранились три изолированные популяции: булунская, яно-индибирская и сундруская. Проведенные авиаучетные работы 1975 г. [23] показали, что половозрастная структура булунской популяции оказалась сильно нарушенной (см. таблицу). Это произошло в результате избирательного отстрела самцов на переправах через Оленекскую протоку в дельте Лены. По предложению ученых Якутского научно-исследовательского института сельского хозяйства в конце

1980-х гг. была построена изгородь из зверосетки, предназначенная для направления потоков мигрирующих оленей к месту переправы через Оленекскую протоку. Здесь же предлагалось строительство пункта обработки добытых оленей. Эта изгородь отпугнула оленей. Мигрирующие олени перестали переправляться на летние пастбища на острова дельты р. Лена, и их летовка переместилась на северные отроги хребта Чекановского. Постепенно олени стали использовать летние пастбища, прилегающие к р. Оленек. Осенние миграции этой популяции стали проходить по западным отрогам хребта Чекановского и по бассейну р. Оленек. На этой территории Оленекского района населенные пункты отсутствуют, что способствовало слабому промыслу и нарастанию численности этой популяции. По материалам Института биологических проблем криолитозоны, современная численность этой популяции оценивается около 90 тысяч особей.

Самая большая по численности яно-индибирская популяция в 1975 г. составляла 59,6 тыс. голов [23]. По предложению министра сельского хозяйства ЯАССР М.Е. Николаева для восстановления поголовья домашних оленей Аллайховского района Совет министров ЯАССР принял решение производить заготовку мяса дикого оленя в счет плана заготовки мяса домашних оленей этого района. Одновременно было разрешено производить отстрел оленей в весеннее время с применением вертолетов. Первыми в тундровую зону приходят стада беременных самок, которые попадали под отстрел. При преследовании во время отстрела вертолетом стада беременных самок не только уничтожались физически, но и у огромного количества самок были выкидыши. Как следствие, численность этой популяции резко сократилась, и по материалам наших авиаучетных работ 1980 г. было предложено прекратить весенний отстрел оленей. В последующие годы в результате отмены весеннего отстрела числен-

ность популяции начала возрастать, и в 1989 г. она составила уже 120000 голов. После развала Советского Союза и прекращения деятельности совхозов охранные мероприятия были ослаблены, началось интенсивное преследование данной популяции на путях зимних и весенних миграций населением пяти–шести районов. Они привели почти к полному уничтожению данной популяции. По материалам авиаучетных работ доцента кафедры зоологии ЯГУ А.А. Кривошапкина, в 2012 г. численность яно-индигирской популяции составила всего 1200 голов.

Сундрунская популяция дикого северного оленя с 1975 г. и по настоящее время практически остается на одном уровне – 27000 голов. По-видимому, в отсутствие промыслового изъятия у этой популяции происходит саморегуляция численности, которая соответствует емкости существующих пастбищ. Эта популяция не совершает дальних миграций. Отсутствие промыслового отстрела из этой популяции было связано с удаленностью от населенных пунктов Аллайховского и других районов. Появление быстроходных снегоходов у населения дает возможность начала промысла этой популяции. В отсутствие строгих охранных мероприятий существует реальная угроза исчезновения сундрунской популяции.

Островная популяция диких северных оленей на островах Новосибирского архипелага существовала за счет миграции яно-индигирской популяции. С уничтожением последней перестала существовать и островная популяция. Относительно небольшая по численности популяция оленей сохранилась на самом отдаленном острове Новая Сибирь. Олени постоянно обитают на этом острове, и до недавнего времени отстрел их никем не производился.

Численность бурого медведя *Ursus arctos* L. (1758) в 1960-х г. была определена В.А. Тавровским и др. [7] около 16 тыс. голов. Расчет численности вида был произведен для всей таежной зоны Якутии. Проведенные нами авиаучетные работы [13], сбор и обработка анкетных данных, а также наши длительные полевые работы позволили уточнить ареал вида, северная граница которого проходит по 66° с.ш. Единичные особи летом заходят в правобережье р. Оленек из бассейна р. Лена. Эти звери осенью уходят обратно, так как отсутствуют благоприятные места для устройства берлог. На всей территории Северо-Западной Якутии наблюдаются высокая льдистость, сильная увлажненность грунта, неболь-

шая толщина его деятельного слоя (20–30 см). Общая численность вида в Якутии была определена нами в 8–10 тысяч голов. Плотность популяций медведя по всей Якутии незначительная. Нами выделены по усредненным уровням плотности четыре района: высокой (0,08–0,09 особи на 1000 га) – горно-таежные районы Северо-Восточной и темнохвойная тайга Юго-Западной Якутии; средней (0,05–0,06) – Янское и Эльгинское плоскогорья и Мома-Селенняхская впадина; низкой (0,013–0,020) – Центральная Якутия и Колымская низменность; очень низкой (до 0,005) – бассейны левых притоков р. Вилюй и центральные районы республики с сильным антропогенным воздействием. Современное состояние численности вида зависит от степени промыслового изъятия и антропогенного воздействия на места его обитания. Есть сведения о некотором увеличении численности вида в связи с введением лицензионного отстрела. В отдельных районах наблюдаются заходы медведей в населенные пункты, к местам стоянок автотранспортных средств и туристов, в которых звери находят остатки пищевых отходов. Значительные лесные пожары 2021 г. в бассейнах левых притоков р. Вилюй привели к заходам медведя в бассейн р. Оленек. Осенью зашедшие звери откочевали в лесную зону.

Заключение

Грызуны и зайцеобразные. На состояние численности мышевидных грызунов оказывают влияние глубина снежного покрова, поздние весенние заморозки, а в поймах рек – высокие паводки, заливающие всю долину рек. Снижение численности белки началось в 50-е годы 20 в. Оно наблюдалось не только на территории Якутии, но и в других регионах, причины этого явления сложны и пока неизвестны. Почти полное прекращение промысла белки в конце 1990-х гг. связано с низкой заготовительной стоимостью и не оказало влияния на увеличение численности вида.

Динамика численности зайца-беляка на территории Якутии в XX в. претерпела изменения: промысловый пресс в районах Центрально-Якутской равнины изменил существовавшие ритмы и амплитуды колебания численности вида. Кривая динамики приобрела более плавный характер и не достигает прежних показателей численности, а на северо-востоке промысловый пресс относительно слабый. В конце 20 в. еще сохранялась резкая амплитуда колебаний численности.

Хищные. На флуктуации численности хищников большое влияние оказывает промысловый пресс. Ослабление промыслового пресса приводит к интенсивному нарастанию численности волка *Canis lupus* L. (1758). и за 2–3 года популяция дает прирост до численности, превышающей исходную в 3–4 раза. Это связано с тем, что в результате длительных преследований вида он выработал способность интенсивного размножения и быстрого восполнения изъятой части популяции. Весьма чувствителен к промысловому прессу соболь, что связано с его низким потенциалом воспроизводства. Повсеместно наблюдается чрезвычайно низкая численность речной выдры *Lutra lutra* L. (1758), низкая – лисы *Vulpes vulpes* L. (1758), росомахи *Gulo gulo* L. (1758) и рыси *Lynx lynx* L. (1758). Прекращение заготовок трех последних видов объясняется полным оседанием добываемых шкурок у населения. Тенденция сокращения ареала этих видов и снижения их численности не установлена. Состояние численности медведя зависит от степени промыслового изъятия и охранных мероприятий. В последние годы наблюдается некоторое увеличение численности бурого медведя.

Копытные. Основным регулятором численности копытных также выступает промысловый пресс. В динамике численности лося нами отмечены крупноволновые фазы – снижение численности в 1940–1950-е гг., следующее – в начале 90-х г. 20 в. Интенсивный промысловый пресс дикого северного оленя в 1990-е гг. привел к почти полному уничтожению яно-индигирской популяции. Отсутствие промыслового пресса сохранило сундрунскую популяцию этого вида почти без изменения в течение примерно 50 лет.

Список литературы / References

1. Ткаченко М.И. Предварительный отчет о работах зоологического отряда в Вилуйском округе в 1926 г. В кн.: *Материалы комиссии по изучению ЯАССР. Вып. 10.* Л.: Издательство Академии наук СССР; 1929. С. 281–296.

Tkachenko M.I. Preliminary report on the work of the zoological unit in the Vilyui district in 1926. In: *Materials from the YASSR Study Commission. Issue 10.* Leningrad: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR; 1929, pp. 281–296. (In Russ.)

2. Воробьева К. Краткий отчет зоологического подотряда Вилуйской экспедиции. В кн.: *Сборник трудов научно-исследовательского общества Саха-Кескиле. Вып. 5.* Якутск, 1928. С. 103–121.

Vorobyeva K. Brief report of the zoological sub-unit of the Vilyui expedition. In: *Collection of papers by the*

Scientific Research Society Sakha-Keskile. Issue 5. Yakutsk; 1928, pp. 103–121. (In Russ.)

3. Романов А.А. Пушные звери Лено-Хатангского края и их промысел. В кн.: *Труды Института полярного земледелия, животноводства и промыслового хозяйства. Серия «Промысловое хоз-во». Вып. 17.* Л.: Изд-во Главсевморпути; 1941. 139 с.

Romanov A.A. Fur animals of the Lena-Khatanga region and their trade. In: *Proceedings of the Research Institute of polar agriculture, livestock breeding and fisheries economy. Series "The Hunting economy". Issue 17.* Leningrad: Glavsevmorputi Publ.; 1941. 139 p. (In Russ.)

4. Скалон В.Н., Щербakov И.П., Базыкин М.А. Новые материалы по распространению промысловых млекопитающих Якутии. В кн.: *Природа и социалистическое хозяйство. Сб. VIII, Часть II.* М.: Всероссийское общество охраны природы; 1941. С. 266–285.

Skalon V.N., Shcherbakov I.P., Bazykin M.A. New data on the distribution of game mammals in Yakutia. In: *Priroda i Socialisticheskoe Hozyaistvo. Collection VIII, Part II.* Moscow: Vserossiyskoe obshchestvo okhrany prirody Publ.; 1941, pp. 266–285.

5. Скалон В.Н. Заметки о грызунах Центральной Якутии. В кн.: *Известия Иркутского государственного противочумного института Сибири и Дальнего Востока. Том VII.* Иркутск: Иркутское областное книжное издательство; 1949. С. 268–276.

Skalon V.N. Observations on rodents in Central Yakutia. In: *Proceedings of the Irkutsk State Anti-Plague Institute of Siberia and the Far East. Volume VII.* Irkutsk: Irkutskoe oblastnoe knizhnoe izdatelstvo Publ.; 1949, pp. 268–275. (In Russ.)

6. Соломонов Н.Г. Очерки популяционной экологии грызунов и зайца-беляка в Центральной Якутии. Якутск: Кн. изд-во; 1973. 248 с.

Solomonov N.G. *Essays on the population ecology of rodents and the Arctic hare in Central Yakutia.* Yakutsk: Yakutskoe Knizhnoe Izdatelstvo; 1973. 248 p.

7. Соломонов Н.Г. Экология водяной полевки Якутии. Новосибирск: Наука; 1980. 136 с.

Solomonov N.G. *Ecology of the water vole in Yakutia.* Novosibirsk: Nauka Publishing House; 1980. 136 p.

8. Наумов С.П. Общие закономерности численности вида и ее динамики. В кн.: *Исследования причин и закономерностей динамики численности зайца-беляка в Якутии.* М.: Изд-во АН СССР; 1960. С. 55–60.

Naumov S.P. General patterns of the number of species and its dynamics. In: *Studies on the Causes and Patterns of the Dynamics of the Snowshoe Hare Population in Yakutia.* Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1960, pp. 55–60. (In Russ.)

9. Шнитников А.В. Влияние внутривековой изменчивости увлажненности бассейнов озер на развитие их депрессий. В кн.: *Озера семиаридной зоны СССР.* Л.: Наука; 1970. С. 5–19.

Shnitnikov A.V. Influence of intra-century variability in the hydration of lake basins on the development of

their depressions. In: *Lakes of the Semiarid Zone in the USSR*. Leningrad: Nauka Publishing House; 1970, pp. 5–19. (In Russ.)

10. Находкин Н.А., Гермогенов Н.И., Сидоров Б.И. *Птицы Якутии: полевой справочник*. Якутск: Октаэдр; 2008. 384 с.

Nakhodkin N.A., Hermogenov N.I., Sidorov B.I. *Birds of Yakutia: field guide*. Yakutsk: Octaedr Publishing House; 2008. 384 p.

11. Мордосова Н.И. Материалы по активности домового воробья (*Passer domesticus* L.) в зимний период в Г. Якутске. *Вестник Якутского государственного университета*. 2006;3(3):145–148.

Mordosova N.I. Materials on house sparrow's activity (*Passer domesticus* L.) during winter period in Yakutsk. *Vestnik of Yakut State University*. 2006;3(3):145–148. (In Russ.)

12. Мордосова Н.И. *Экология и биоэнергетика некоторых зимующих видов птиц Якутии*. Автореф. дис ... канд. биол. наук. Якутск; 2009. 18 с.

Mordosova N.I. *Ecology and bioenergetics of some wintering species of birds in Yakutia*. Diss. ... Cand. Sci., Yakutsk; 2009. 18 p. (In Russ.)

13. Кулаковский А.Е. Виды животного и растительного царств, известные якутам. *Известия Якутского отдела государственного русского географического общества*. 1929;3:17–40.

Kulakovsky A.E. Species of animal and plant kingdoms known to Yakut. *Izvestiya Yakutskogo otdela gosudarstvennogo russkogo geograficheskogo obshchestva* = *Proceedings of the Yakut Department of the State Russian Geographical Society*. 1929;3:17–40. (In Russ.)

14. Мордосов И.И., Прокопьев Н.П. *Млекопитающие таежной части Западной Якутии*. Якутск: ГУП «Полиграфист» ЯНЦ СО РАН; 1997. 220 с.

Mordosov I.I., Prokopyev N.P. *Mammals of the taiga part of Western Yakutia*. Yakutsk: "Polygraphist" Yakut Scientific Center SB RAS; 1997. 220 p. (In Russ.)

15. Мордосов И.И., Прокопьев Н.П. *Млекопитающие Лено-Алданского междуречья*. Якутск: Издательский дом СВФУ; 2015. 268 с.

Mordosov I.I., Prokopyev N.P. *Mammals of the Lena-Aldan interfluve*. Yakutsk: Publishing House of NEFU; 2015. 268 p. (In Russ.)

16. Мордосов И.И., Прокопьев Н.П. *Популяционная экология грызунов Лено-Вилюйского междуречья*. Якутск: Издательский дом СВФУ; 2018. 264 с.

Mordosov I.I., Prokopyev N.P. *Population ecology of rodents of the Lena-Vilyui interfluve*. Yakutsk: Publishing House of NEFU; 2018. 264 p. (In Russ.)

17. Григорьев С.Е., Мордосов И.И. *Фауна и экология мелких млекопитающих бассейна нижнего течения реки Яны и прилегающих территорий в условиях антропогенного воздействия*. Якутск: Издательский дом СВФУ; 2024. 156 с.

Grigoriev S.E., Mordosov I.I. *Fauna and ecology of small mammals of the lower reaches of the Yana River*

basin and adjacent territories under anthropogenic impact. Yakutsk: Publishing House of NEFU; 2024. 156 p. (In Russ.)

18. Лавов М.А. Влияние соболя на численность белки в Восточной Сибири. *Известия СО АН СССР*. 1959;(1):136–142.

Lavov M.A. Influence of sable on the number of squirrels in Eastern Siberia. *Proceedings of the Siberian Branch of the Academy of Sciences of the USSR*. 1959;(1):136–142. (In Russ.)

19. Грязнухин А.Н. Материалы по питанию соболя в юго-западных отрогах Верхоянского хребта. *Научно-техническая информация ВНИИЖП*. Якутск: 1963. 5(8):14–16.

Gryaznukhin A.N. Materials on sable nutrition in the south-western spurs of the Verkhoyanskiy Range. *Scientific and technical information*. Yakutsk: 1963. 5(8):14–16 p. (In Russ.)

20. Тимофеев В.В. Соболи Восточной Сибири. *Материалы конференции по изучению производительных сил Восточной Сибири (Иркутское региональное совещание)*. Иркутск; 1958. С. 35–37.

Timofeev V.V. Sable of Eastern Siberia. *Proceedings of the conference on the study of productive resources of Eastern Siberia (Irkutsk regional meeting)*. Irkutsk; 1958, pp. 35–37. (In Russ.)

21. Чепрасов М.Ю., Мордосов И.И. *Экология соболя бассейна среднего течения реки Колымы*. Якутск: Издательский дом СВФУ; 2019. 143 с.

Cheprasov M.Y., Mordosov I.I. *Ecology of the sable in the middle reaches of the Kolyma River*. Yakutsk: Publishing House of NEFU; 2019. 143 p. (In Russ.)

22. Тавровский В.А., Егоров О.В., Кривошеев В.Г. и др. *Млекопитающие Якутии*. М.: Наука; 1971. 660 с.

Tavrovsky V.A., Egorov O.V., Krivosheev V.G., et al. *Mammals of Yakutia*. Moscow: Publishing House Nauka; 1971. 660 p. (In Russ.)

23. Наумов С.П. Общие особенности динамики численности зайца-беляка в Якутии. *Ученые записки Московского гос. пединститута имени В.И. Ленина*. 1956;96(6):5–21.

Naumov S.P. General peculiarities of the dynamics of the mountain hare population dynamics in Yakutia. *Scientific notes of the Moscow State Pedagogical Institute named after V.I. Lenin*. Moscow: 1956;96(6):5–21. (In Russ.)

24. Друри И.В. *Дикий северный олень Советской Арктики и Субарктики*. В кн.: Сдобников В.М. (ред.) *Труды Государственного научного центра Российской Федерации «Арктического и Антарктического научно-исследовательского института»*. Т. 200. Л.; 1949. С. 80.

Drury I.V. *Wild reindeer in the Soviet Arctic and Subarctic*. In: Sdobnikov V.M. (ed.) *Proceedings of the State Scientific Center of the Russian Federation "Arctic and Antarctic Research Institute"*. Vol. 200. Leningrad: 1949. P. 80. (In Russ.)

25. Павлов Б., Зырянов В., Колпашников Л. и др. Сколько оленей в тундрах Якутии? *Охота и охотничье хозяйство*. 1976;(10):12–14.

Pavlov B., Zyryanov V., Kolpashchikov L., et al. How many deer are there in the tundra of Yakutia? *Okhota i okhotnich'e khozyaistvo*. 1976;(10):12–14. (In Russ.)

Об авторах

МОРДОСОВ Иннокентий Иннокентьевич, доктор биологических наук, профессор, Институт естественных наук, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация, SPIN: 5684-1289, e-mail: mordoson@yandex.ru

МОРДОСОВА Надежда Иннокентьевна, кандидат биологических наук, доцент, Институт естественных наук, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация, SPIN: 1950-6576, e-mail: mordoson@yandex.ru

Вклад авторов

Мордосов И.И. – руководство исследованием, разработка концепции, проведение исследования; **Мордосова Н.И.** – разработка концепции, проведение исследования, редактирование рукописи

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

MORDOSOV, Innokenty Innokentievich, Dr. Sci. (Biol.), Professor, Institute of Natural Sciences, Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation, SPIN: 5684-1289, e-mail: mordoson@yandex.ru

MORDOSOVA, Nadejda Innokentievna, Cand. Sci. (Biol.), Associate Professor, Institute of Natural Sciences, Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation, SPIN: 1950-6576, e-mail: mordoson@yandex.ru

Authors' contribution

Mordosov I.I. – supervision, conceptualization, investigation; **Mordosova N.I.** – conceptualization, investigation, writing – review & editing

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 20.12.2023

Поступила после рецензирования / Revised 20.01.2024

Принята к публикации / Accepted 11.02.2025



Оригинальная статья

Структура и пространственное распределение сообществ прямокрылых (Orthoptera) таежно-аласных ландшафтов Лено-Амгинского междуречья (Центральная Якутия)

Ч. 2. Сообщества прямокрылых Абалахской террасы

Ю. В. Ермакова[✉], А. П. Бурнашева

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

[✉]yermakova68@mail.ru

Аннотация

Во второй части статьи¹ представлены результаты исследований видового разнообразия, структуры, биотопической приуроченности и пространственного распределения сообществ прямокрылых насекомых травянистых фитоценозов Абалахской террасы. Всего за время исследований было выявлено 18 видов прямокрылых из трех семейств. Биоценологические исследования показали, что по уровням видового богатства и общего разнообразия сообщества прямокрылых аласов Абалахской террасы в 2019 г. были близки к таковым Тюнгулонской террасы, но отличались от них по уровню суммарного обилия. Так, на средних поясах аласных лугов максимальные показатели суммарного обилия достигали 670 экз./100 взм., на остепненных – до 790 экз./100 взм. С помощью кластерного анализа в северо-восточной части Лено-Амгинского междуречья в 2019 г. выделено два основных класса сообществ прямокрылых насекомых. Первый – сообщества с абсолютным доминированием белополосой кобылки, где вклад вида в структуру варьировал от 70 до 100 %. Второй класс подразделяется на подкласс сообществ ксероморфных местообитаний, в структуре которых преобладает краснобрюхая травянка в сочетании с белополосой кобылкой и подкласс сообществ влажных лугов со специфическим комплексом гигромезофильных видов. Белополосая кобылка, наиболее вредоносный вид саранчовых в Центральной Якутии, была отмечена во всех гидротермических поясах аласов – от влажных лугов до опушек и степных склонов, в большинстве сообществ этот вид занимает господствующее положение или является субдоминантом. Условия криоаридного климата Центральной Якутии и широкое развитие таежно-аласных ландшафтов требуют особого подхода к борьбе против вредных саранчовых. По нашему мнению, наиболее приемлемым является метод СИМП (сниженный инсектицид на малой площади), при применении которого можно существенно снизить финансовые затраты и минимизировать ущерб, наносимый экосистемам при химической обработке сельхозугодий.

Ключевые слова: Абалахская терраса, прямокрылые, сообщества, белополосая кобылка, метод СИМП (сниженный инсектицид на малой площади)

Финансирование. Работа выполнена 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» (код научной темы: FWRS-2021-0044; номер гос. регистрации в ЕГИСУ: 121020500194-9).

Благодарности. Авторы благодарят А.С. Данилову, руководителя филиала ФГБУ «Россельхозцентр» по РС (Я) за предоставленную информацию по борьбе с вредными саранчовыми в Центральной Якутии.

Для цитирования: Ермакова Ю.В., Бурнашева А.П. Структура и пространственное распределение сообществ прямокрылых насекомых (Orthoptera) таежно-аласных ландшафтов Лено-Амгинского междуречья (Центральная Якутия). Ч. 2. Сообщества прямокрылых Абалахской террасы. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(1):139–147. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-1-139-147>

¹ Ермакова Ю.В., Бурнашева А.П. Структура и пространственное распределение сообществ прямокрылых насекомых (Orthoptera) в таежно-аласных ландшафтов Лено-Амгинского междуречья (Центральная Якутия). Ч. 1. Сообщества прямокрылых Тюнгулонской террасы. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;27(3):405–414.

Structure and spatial distribution of Orthoptera communities in the taiga-alas landscapes of the Lena-Amga interfluvium (Central Yakutia)

Part 2. Orthoptera communities on the Abalakh Terrace

Yulia V. Ermakova[✉], Albina P. Burnasheva

Institute for Biological Problems of Cryolithozone,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation
[✉]yermakova68@mail.ru

Abstract

The second part of the paper¹ presents the results of studies that examines species diversity, structure, biotopic occurrence, and spatial distribution of orthopteran communities in grasslands of the Abalakh terrace located in the Lena-Amga interfluvium. A total of 18 species from three families were identified throughout the research. Biocenological studies have shown that, in terms of species richness and general diversity, the Orthopteran communities on alas of the Abalakh terrace in 2019 exhibited similarities to those of the Tyungyulyun terrace; however, they were distinct in terms of total abundance. Thus, in the middle belt of the alas meadows, the maximum total abundance reached 670 specimens/100 sweeping, while in the steppe belts up to 790 specimens/100 sweeping. The cluster analysis of the data collected from the northeastern part of the Lena-Amga interfluvium in 2019 revealed two main classes of Orthopteran communities. The first class was characterized by the absolute dominance of *Chorthippus albomarginatus*, where the contribution of the species to the structure varied from 70 to 100%. The second class was subdivided into a subclass of xeromorphic habitat communities with the dominance of *Omocestus haemorrhoidalis* and *Chorthippus albomarginatus*, and a subclass of wet meadow communities that feature a specific complex of hygromesophilic species. *Chorthippus albomarginatus*, recognized as the most pest grasshopper species in Central Yakutia, was recorded in all alas hydrothermal belts, from wet meadows to forest edges and steppe slopes; in the majority of communities, this species dominated or was a subdominant. The cryoarid climate of Central Yakutia and the widespread taiga-alas landscapes necessitate a tailored approach to managing pest grasshoppers. In our opinion, the RAAT method (Reduced Agent and Area Treatments) represents the most viable strategy as its implementation could substantially decrease financial costs and mitigate damage caused to ecosystems during chemical treatment of farmland.

Keywords: Abalakh terrace, Orthoptera, communities, *Chorthippus albomarginatus*, RAATs

Funding. This study was conducted as part of the state assignment from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the project “Populations and communities of animals in aquatic and terrestrial ecosystems of the cryolithozone in the eastern sector of the Russian Arctic and Subarctic: diversity, structure, and stability under natural and anthropogenic impacts” (theme No.: FWRS-2021-0044; registration No.: 121020500194-9).

Acknowledgements. The authors would like to express their gratitude to A.S. Danilova, the Head of the Branch of the Federal State Budgetary Institution “Rosselkhoztsentr” in the Republic of Sakha (Yakutia), for the valuable information provided regarding efforts to combat harmful locusts in Central Yakutia.

For citation: Ermakova Yu.V., Burnasheva A.P. Structure and spatial distribution of Orthoptera communities in the taiga-alas landscapes of the Lena-Amga interfluvium (Central Yakutia). Part 2. Orthoptera communities on the Abalakh Terrace. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(1):139–147. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-139-147>

Введение

Прямокрылые насекомые играют важную биоценотическую роль в травянистых экосистемах Палеарктики. Периодические вспышки массового размножения саранчовых, нанося огромный вред сельскохозяйственной деятельности чело-

века, в то же время оказывают положительный эффект на функционирование травянистых фитоценозов. Многолетние исследования фитопродуктивности в различных гидротермических поясах модельных аласов Лено-Амгинского междуречья показали, что вслед за катастрофическим

¹ Ermakova Yu.V., Burnasheva A.P. Structure and spatial distribution of communities of Orthoptera in the taiga-alas landscapes of the Lena-Amga interfluvium (Central Yakutia). Part 1. Communities of Orthoptera on the Tyungyulyun Terrace. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(3):405–414. (In Russ.)

падением этого показателя во время вспышек массового размножения саранчовых в последующие несколько лет наблюдается резкий подъем, обусловленный обогащением почвы легкодоступными для растений питательными элементами из экскрементов и останков саранчовых [1–3]. Особенно сильное влияние вспышки массового размножения саранчовых оказывают на фитопродуктивность настоящих и остепненных лугов аласных котловин [4, 5].

Материалы и методы

Материалами для второй части публикации послужили биоценологические исследования А.П. Бурнашевой на аласных лугах Абалахской террасы в окрестностях сел Хомустах и Ус-Кюель в 2019 г. Также были использованы фаунистические материалы, собранные Ю.В. Ермаковой во время маршрутных исследований на северо-востоке Лено-Амгинского междуречья (1999 г.).

При проведении учетов использовался метод кошения энтомологическим сачком по травостой с последующим пересчетом результатов на 100 взмахов.

Система отряда и названия таксонов приводятся в соответствии с электронной базой данных Orthoptera Species File [6] и с учетом работ отечественных авторов [7–11]. Для каждого исследованного сообщества были рассчитаны основные показатели разнообразия, уровень сходства/различия сообществ оценивался при помощи евклидовых расстояний, дендрограмма построена методом Уорда, для расчетов использованы пакеты программ PAST и Microsoft Excel 2016 [12–15].

Абалахская терраса: аласы в окрестностях с. Хомустах: алас № 1 (N 62°42'03'', E 130°54'02''); алас № 2 (N 62°41'18'', E 130°49'45''); алас № 3 (N 62°44'04'', E 130°50'31''). Аласы в окрестностях с. Ус-Кюель, 110 км СВ г. Якутск: Диринг (N 62°44'60.76'', E 131°57'68.03''); Дюлюнгнях (N 62°44'26.44'', E 131°52'65.92''); Кердюген (N 62°42'53.78'', E 131°55'45.73''), Ат Баса (N 62°25'50'' E 131°33'03''), Ампардах (N 62°25'17'', E 131°31'49''), Битиэттини (N 62°26'36'' E 131°28'06'').

Описание района исследований

Абалахская терраса относится к средневысотным аккумулятивно-эрозионным террасам, высота 116–134 м, отметки 201–219 м. Для Абалахской террасы характерна аласно-котловинная

разновидность аласного рельефа. Часто группы аласов, тесно сближенных или соединенных между собой узкими промоинами и проходами, образуют «цепи аласов» или «полосу аласов» [16].

Результаты и обсуждение

Всего за время проведения исследований в травянистых биоценозах Абалахской террасы Лено-Амгинского междуречья выявлено 18 видов прямокрылых из 3 семейств: Tetigoniidae (5), Tetrigidae (1) и Acrididae (12). Четыре вида были собраны только во время фаунистических сборов: *Roeseliana roeselii* (Hagenbach, 1882) на мелкодолинных лугах, *Prumna primnoa* (Fischer-Waldheim, 1846), *Podismopsis genicularibus* (Shiraki, 1910) и *Podismopsis jacuta* Miram, 1928 на опушках по периферии аласных котловин. Наиболее высокий уровень видового богатства (9–14 видов) отмечен в сообществах, приуроченных к опушкам (табл. 1), которые относятся к категории своеобразных переходных местообитаний, так называемых экотонов, отличающихся от смежных ландшафтов микроклиматическими условиями и составом растительных ассоциаций.

В 2019 г. население прямокрылых аласных лугов Абалахской террасы отличалось низкими показателями общего разнообразия и видового богатства, на влажных лугах выявлено четыре вида – *Gampsocleis sedakovii*, *Omocestus viridulus*, *Chorthippus albomarginatus* и *Stethophyma grossum*, на настоящих и остепненных лугах от 1 до 5 видов (табл. 2, 3). Максимальное число видов (5) было зафиксировано на остепненном поясе аласа № 2 в окрестностях с. Хомустах (см. табл. 2) и на настоящем лугу аласа Битиэттини в окрестностях с. Ус-Кюель (см. табл. 3). Значения индекса Шеннона практически для всех исследованных сообществ, за небольшим исключением, были ниже или близки к 1. В 2019 г. схожая картина наблюдалась и на аласах Тюнгулюнской террасы [17].

В окрестностях с. Хомустах было выявлено семь видов, из них три представителя семейства кузнечиков. На влажных поясах прямокрылые обнаружены не были, на настоящих лугах преобладала белополосая кобылка (*Chorthippus albomarginatus*) в сочетании с краснобрюхой травянойкой (*Omocestus haemorrhoidalis*) или коньком восточносибирским (*Chorthippus fallax*). На среднем поясе аласа № 2 была отмечена довольно плотная локальная популяция мезоксерофильного кузнечика *Metrioptera brachyptera*. На остеп-

Таблица 1

Распределение прямокрылых насекомых на лугах Абалахской террасы

Table 1

The distribution of Orthoptera insects in the meadows of the Abalakh terrace

Вид	Аласные луга											Мелкодолинные луга	
	гигро		мезо			ксеро			опушки				
	1	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	3
<i>Gampsocleis sedakovii</i> (Fischer-Waldheim, 1846)	+	–	+	–	+	+	+	+	+	–	+	–	+
<i>Decticus verrucivorus</i> (Linnaeus, 1758)	+	–	–	–	+	–	–	–	+	–	+	–	–
<i>Montana montana</i> (Kollar, 1833)	–	–	+	–	–	+	+	+	+	–	+	–	–
<i>Metrioptera brahyptera</i> (Linneus, 1761)	–	–	–	+	+	–	–	–	+	–	+	–	+
<i>Roeseliana roeselii</i> (Hagenbach, 1882)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	+
<i>Tetrix subulata</i> (Linnaeus, 1761)	+	+	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	+
<i>Prumna primnoa</i> (Motschulsky, 1846)	–	–	–	–	–	–	–	+	–	–	+	–	–
<i>Euthystira brachyptera</i> (Ocskay, 1826)	–	–	–	–	–	–	–	+	–	–	+	+	–
<i>Podismopsis genicularibus</i> (Shiraki, 1910)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	+	–	–
<i>Podismopsis jacuta</i> Miram, 1928	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	+	–	–
<i>Arcyptera fusca</i> (Pallas, 1773)	–	–	–	–	–	–	–	–	+	–	+	–	–
<i>Omocestus viridulus</i> (Linneus, 1758)	+	+	–	–	+	–	–	–	–	–	–	–	+
<i>Omocestus haemorrhoidalis</i> (Charprnteir, 1825)	–	–	+	+	+	+	+	+	+	–	+	–	–
<i>Glyptobotrus maritimus jacutus</i> Storozhenko 2002	–	–	–	–	–	+	–	+	–	–	+	–	–
<i>Gomphocerus sibiricus</i> (Linneus, 1767)	–	–	+	+	+	+	+	+	+	–	+	–	–
<i>Chorthippus albomarginatus</i> (De Geer, 1773)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	–	+
<i>Chorthippus fallax</i> (Zubowsky, 1900)	–	–	–	+	–	–	–	–	+	–	+	–	–
<i>Stethophyma grossum</i> (Linneus, 1758)	+	+	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Всего	6	4	5	4	7	6	4	8	9	1	14	1	6

Примечание. 1 – окр. с. Ус-Кюель, 2 – окр. с. Хомустах, 3 – фаунистические сборы в различных точках, 1999 г.

Note. 1 – vicinity of the village of Us-Kyuel, 2 – vicinity of the village of Khomustakh, 3 – faunal collections at various points, 1999.

ненных поясах также господствовала *Chorthippus albomarginatus*, в сочетании с степными (*Gampsocleis sedakovii*, *Montana montana*, *Omocestus haemorrhoidalis*) и широко ксерофильными (*Gomphocerus sibiricus*) видами, которые в условиях Центральной Якутии связаны с широким спектром ксероморфных стаций. Максимальный уровень суммарного обилия – 790 экз./100 взм. зарегистрирован в сообществе остепненного пояса аласа № 2, основной вклад в суммарное обилие пришелся на долю белополосой кобылки (70 %) (см. табл. 2).

На аласных лугах в окрестностях с. Ус-Кюель было выявлено 10 видов прямокрылых (табл. 3). На влажных лугах в составе группировок помимо белополосой кобылки присутствовали гигрофильный *Stethophyma grossum* и гигромезофильный *Omocestus viridulus*. На средних поясах практически всех исследованных аласов господствовала белополосая кобылка, иногда уступая лидерство

краснобрюхой травянке в сочетании со степными (*Montana montana*) и широко ксерофильными (*Glyptobothrus maritimus jacutus* и *Gomphocerus sibiricus*) видами. Уровень суммарного обилия прямокрылых на средних поясах различных аласов варьировал в широких пределах от сравнительно низких (20 экз./100 взм.) до значительных (670 экз./100 взм.) показателей. Сообщества остепненных поясов включали от двух до четырех видов с довольно высоким уровнем суммарного обилия, достигающим на некоторых стациях 750 экз./100 взм. Как правило, в таких сообществах господствовала краснобрюхая травянка при участии белополосой кобылки и якутского подвиды приморского конька (*Glyptobothrus maritimus jacutus*).

Сравнение структуры сообществ по количественным данным показало, что в 2019 г. в травянистых ландшафтах северо-восточной части Лено-Амгинского междуречья (Тюнгулюнская

Таблица 2

Сообщества прямокрылых (доли видов от общего обилия) аласных лугов
в окрестностях с. Хомустах

Table 2

Orthoptera communities (proportion of species from the total abundance) of alas meadows
in the vicinity of the village of Khomustakh

Вид	Алас № 1		Алас № 2		Алас № 3	
	6	7	8	9	10	11
	мезо	ксеро	мезо	ксеро	мезо	ксеро
<i>Gampsocleis sedakovii</i>	—	—	—	0,13	—	0,02
<i>Montana montana</i>	—	—	—	0,18	—	—
<i>Metrioptera brachyptera</i>	—	—	0,33	0	—	—
<i>Omocestus haemorrhoidalis</i>	0,04	—	0,33	0,09	0,11	0,18
<i>Gomphocerus sibiricus</i>	—	—	—	0,13	0,06	0,02
<i>Chorthippus albomarginatus</i>	0,76	1	0,33	0,7	0,84	0,78
<i>Ch. fallax</i>	0,25	—	—	—	—	—
Число таксонов (S)	3	1	3	5	3	4
Обилие, экз./100 взм.	250	10	310	790	550	500
Индекс Шеннона (H')	0,66	0,00	1,10	0,88	0,55	0,66
Выравненность (E)	0,64	1,00	1,00	0,48	0,58	0,48
Индекс Бергера–Паркера (d)	0,76	1,00	0,33	0,71	0,84	0,78

и Абалахская террасы) наблюдались две основные группы сообществ (см. рисунок). Первая включала сообщества с абсолютным преобладанием *Chorthippus albomarginatus*, доля которого в структуре варьировала от 70 до 100 %. Они встречались на всех гидротермических поясах аласов, причем в их составе наблюдался широкий спектр видов от гигромезофильных до степных. Вариации видового состава зависели от набора растительных ассоциаций и почвенно-эдафических условий конкретного биотопа. Внутри кластера первым отклоняется сообщество влажного пояса аласа Ампардах, в котором в равных долях присутствуют *Gampsocleis sedakovii* и *Chorthippus albomarginatus*. Далее следует группа моносообществ *Chorthippus albomarginatus*, распространенных на влажных и средних поясах аласных лугов Абалахской террасы. Затем кластеризуются несколько сообществ с долей *Chorthippus albomarginatus* выше 70 % и субдоминантом краснобрюхой травянкой (*Omocestus haemorrhoidalis*); исключением являлось сообщество настоящего пояса аласа № 1 (окр. с. Хомустах), где в качестве субдоминанта выступал *Ch. fallax*.

Структура второго кластера более дифференцирована. Первыми отклонялись сообщества с абсолютным (вплоть до моносообществ) доминированием *Omocestus haemorrhoidalis*, приуро-

ченные к остепненным поясам аласов Абалахской террасы. Затем следуют две группы, первая из которых объединяет сообщества, характерные для влажных поясов, сформированные мезогигрофильными видами, такими как *Stethophyma grossum* и *Omocestus viridulus*. Вторая группа сообществ характеризуется совместным доминированием *Omocestus haemorrhoidalis* и *Chorthippus albomarginatus*, в их составе часто встречаются степные и широко ксерофильные виды (*Metrioptera brachyptera*, *Montana montana*, *Gomphocerus sibiricus* и *Glyptobothrus maritimus jacutus*). Такие сообщества населяют средние пояса аласных лугов, а также различные ксероморфные станции (степные склоны и сухие пояса аласов).

Заключение

Таким образом, на аласах Абалахской террасы было выявлено 18 видов прямокрылых насекомых из 15 родов, 3 семейств, а всего на территории Лено-Амгинского междуречья за период наблюдений обнаружено 26 видов из 17 родов. Единственный вредный вид из семейства саранчовых — белополосая кобылка была отмечена практически во всех травянистых фитоценозах как естественного, так и антропогенного происхождения.

Таблица 3

Сообщества прямокрылых (доли от числа видов) аласных лугов
в окрестностях с. Ус-Кюель

Table 3

Orthoptera communities (proportions of the number of species) of alas meadows
in the vicinity of the village of Us-Kyuel

Вид	Диринг			Битиеттини		Дюлонгнях			Ат Баса			Ампардаах			Кердюген	
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
	а	б	в	б	в	а	б	в	а	б	в	а	б	в	а	б
<i>Gampsocleis sedakovii</i>	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,5	–	–	–	–
<i>Montana montana</i>	–	–	–	0,09	–	–	0,14	0,25	–	–	–	–	0,015	–	–	–
<i>Omocestus viridulus</i>	0,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
<i>Omocestus haemorrhoidalis</i>	–	–	0,7	0,46	0,1	–	0,29	0,5	–	–	0,82	–	0,15	0,36	–	0,43
<i>Glyptobothrus maritimus jacutus</i>	–	–	–	0,09	–	–	0,29	0,25	–	–	–	–	–	–	–	–
<i>Gomphocerus sibiricus</i>	–	–	0,1	0,09	–	–	–	–	–	–	–	–	0,12	–	–	–
<i>Chorthippus albomarginatus</i>	–	1	0,1	0,27	0,9	–	0,29	–	1	1	0,18	0,5	0,72	0,64	1	0,57
<i>Ch. fallax</i>	–	–	0,1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
<i>Stethophyma grossum</i>	0,5	–	–	–	–	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Число таксонов (S)	2	1	4	5	2	1	4	3	1	1	2	2	4	2	1	2
Обилие экз./100 взм.	20	20	200	110	700	20	70	40	20	70	110	20	670	750	130	30
Индекс Шеннона (H')	0,69	0	0,94	1,37	0,33	0	1,35	1,04	0,0	0,0	0,47	0,69	0,84	0,65	0,0	0,68
Выравненность (E)	1	1	0,64	0,78	0,69	1	0,97	0,94	1,0	1,0	0,80	1,00	0,58	0,96	1,0	0,99
Индекс Бергера–Паркера (d)	0,5	1	0,7	0,46	0,9	1	0,29	0,50	1,0	1,0	0,82	0,50	0,72	0,64	1,0	0,57

Примечание. Пояса аласов: а – гигрофит, б – мезофит, в – ксерофит.

Note. Types of alass: а – hygrophyte, б – mesophyte, в – xerophyte.

В настоящее время подходы к управлению популяциями вредителей, в том числе саранчовых, должны быть, с одной стороны, приемлемыми с точки зрения поддержания устойчивости экосистем и не вредящими здоровью человека (в том числе с отложенным эффектом), с другой стороны, быть экономически и социально оправданными. Это подразумевает переориентацию с тотального уничтожения популяций вредных саранчовых на снижение численности ниже экономически значимого порога вредоносности [18]. Особенности природно-климатических и хозяйственно-экономических условий Центральной Якутии создают определенные трудности для сельхозпроизводителей в организации и осуществлении защитных мероприятий. Во-первых, в Якутии, в отличие от других регионов, защитные мероприятия необходимо проводить в естественных травянистых ландшафтах, которые являются исконными местообитаниями прямо-

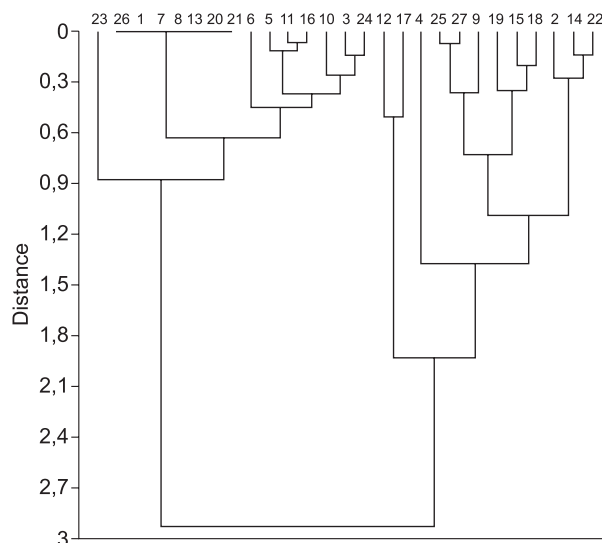
крылых насекомых, что делает невозможным применение метода барьерных обработок, дающего хорошие результаты при защите агроценозов [18–20]. Также в условиях жаркого и сухого лета не получается использовать наиболее щадящие и безопасные препараты на основе бактерий и грибов, для применения которых необходимы повышенные влажность и температура окружающего воздуха [21, 22]. Обилие аласов (в Центральной Якутии насчитывается 16 тыс.), их изолированность, а также то, что в подавляющем большинстве они переданы в частную форму собственности, создают трудности при планировании и согласовании широкомасштабных истребительных мероприятий. С точки зрения сохранения биологического разнообразия проблема борьбы с вредными видами усугубляется тем, что, как показано выше, белополая кобылка является господствующим видом практически во всех типах травянистых ландшафтов.

Ранее нами было установлено, что применение в течение ряда лет для защиты сенокосных угодий метода сплошных обработок с использованием навесных и ручных опрыскивателей препаратами локустин (ингибитор синтеза хитина), кинфос и фаскорд привело к полному исчезновению прямокрылых насекомых на средних поясах аласов Ынах и Улахан Сыххан, принадлежащих СПХК «Тумул» [17] (информация любезно предоставлена руководителем Россельхозцентра России в РС(Я)). В это же время на средних поясах необрабатываемых аласов Абалахской террасы в 2019 г. численность прямокрылых колебалась от 20 до 790 экз./100 взм.

Поэтому для сохранения урожая кормовых трав и в то же время минимизации экологического ущерба необходимо разработать наиболее приемлемые значения экономического порога вредоносности белополосой кобылки для различных типов сенокосных и пастбищных угодий. Регулярно проводить весенние обследования с последующим уничтожением развивающихся очагов. При проведении истребительных мероприятий рекомендуется метод СИМП (сниженный инсектицид на меньшей площади) как наиболее подходящий для условий Центральной Якутии. СИМП – это интегрированный метод борьбы с саранчовыми на сенокосах и пастбищах, при котором обработки проводятся с пониженными (по сравнению с традиционными) дозировками инсектицидов, а обработанные препаратом полосы чередуются с необработанными (т. е. с рефугиумами). Эта стратегия основана на объединении химического (саранчовые получают летальную дозу препарата в обработанных полосах и при миграции с необработанных участков на обработанные) и биологического (хищники и паразиты саранчовых на необработанных полосах снижают численность вредителей) методов [18].

Список литературы / References

1. Стебаев И.В. Характеристика надпочвенного и напочвенного зоомикробиологических комплексов степных ландшафтов Западной и Средней Сибири. *Зоологический журнал*. 1968;47(5):661–675.
- Stebaev I.V. Characteristics of above-ground and ground zoomicrobiological complexes of steppe landscapes of Western and Central Siberia. *Zoological Journal*. 1968;47(5):661–675. (In Russ.)
2. Десяткин Р.В. Роль саранчовых в биогеохимическом круговороте веществ таежно-аласных ландшафтов. В кн.: Добровольский Г.В., Хитров Н.Б. (ред.) *Тези-*



Сходство сообществ прямокрылых аласных лугов северо-восточной части Лено-Амгинского междуречья (Евклидовы расстояния для долей видов) Тюнгулюнская терраса. Алас Талактах: 1 – гигрофит, 2 – ксерофит; алас Ынах: 3 – ксерофит, 4 – степной склон; алас Улахан Сыххан: 5 – ксерофит. Абалахская терраса: 6–27 (см. табл. 2, 3)

Similarity of communities of Orthoptera alass meadows in the northeastern part of the Lena-Amga interfluvium (Euclidean distances for the proportions of species) Tyungyulyun terrace. Alass Talaktakh: 1 – hygrophite, 2 – xerophyte; alass Ynakh: 3 – xerophyte, 4 – steppe slope; alass Ulakhan Sykhan: 5 – xerophyte. Abalakh terrace: 6–27 (Tables 2, 3)

сы докладов III съезда ДОП, г. Суздаль, 11–15 июля 2000 г. Кн. 2. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева; 2000. С. 74.

Desyatkin R.V. The role of locusts in the biogeochemical cycle of substances in taiga-alas landscapes. In: Dobrovolskiy G.V., Khitrov N.B. (eds) *Proceedings of the 3rd Congress of the DOP, Suzdal, July 11–15, 2000. Book. 2*. Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute; 2000, p. 74. (In Russ.)

3. Николаева М.Х., Десяткин Р.В. Продуктивность луговых фитоценозов аласов Центральной Якутии. *Ботанический журнал*. 2020;105(6):578–586. <https://doi.org/10.31857/S0006813620060071>

Nikolaeva M.Kh., Desyatkin R.V. Productivity of meadow phytocenoses of the alas of Central Yakutia. *Botanicheskiy Zhurnal*. 2020;105(6):578–586. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0006813620060071>

4. Николаева М.Х., Десяткин Р.В. Динамика видового разнообразия и продуктивность настоящих лугов аласов Центральной Якутии. *Растительные ресурсы*. 2015;51(3):328–335.

Nikolaeva M.Kh., Desyatkin R.V. Dynamics of species diversity and productivity of real meadows of the alas of Central Yakutia. *Rastitelnye resursy*. 2015;51(3): 328–335. (In Russ.)

5. Николаева М.Х., Десяткин Р.В. Динамика видо-
вого разнообразия и продуктивность остепненных
лугов аласов Центральной Якутии. *Растительные
ресурсы*. 2016;52(1):20–27.
- Nikolaeva M.Kh., Desyatkin R.V. Dynamics of spe-
cies diversity and productivity of steppe meadows of the
Alas of Central Yakutia. *Rastitelnye resursy*. 2016;52(1):
20–27. (In Russ.)
6. Cigliano M.M., Braun H., Eades D.C., Otte D. Or-
thoptera Species File Online [Internet Resource] / Or-
thoptera Species File (Version 5.0/5.0). URL: <http://Orthoptera.SpeciesFile.org> (Accessed: 03.03.2022).
7. Sergeev M.G., Storozhenko S.Yu., Benediktov A.A.
An Annotated check-list of Orthoptera of Tuva and adja-
cent regions. Part 1. Suboder Ensifera. *Far Eastern Ento-
mologist*. 2018;372:1–24. <https://doi.org/10.25221/fee.372.1>
8. Sergeev M.G., Storozhenko S.Yu., Benediktov A.A.
An Annotated check-list of Orthoptera of Tuva and adja-
cent regions. Part 2. Suboder Caelifera. Tridactylidae,
Tetrigidae, Acrididae: Melanoplineae, Calliptaminae and
Gomphocerinae (exempt Gomphocerini). *Far Eastern Ento-
mologist*. 2019;389:7–44. <https://doi.org/10.25221/fee.389.2>
9. Sergeev M.G., Storozhenko S.Yu., Benediktov A.A.
An Annotated check-list of Orthoptera of Tuva and adja-
cent regions. Part 3. Suboder Caelifera (Acrididae: Gom-
phocerinae: Gomphocerini; Locustinae). *Far Eastern Ento-
mologist*. 2020;402:1–36. <https://doi.org/10.25221/fee.402.1>
10. Стороженко С.Ю. Длинноусые прямокрылые
насекомые (Orthoptera, Ensifera) азиатской части
России. Владивосток: Дальнаука; 2004. 280 с.
- Storozhenko S.Yu. *Long-horned orthopterans (Or-
thoptera, Ensifera) of the Asiatic part of Russia*. Vladiv-
ostok: Dalnauka Publ.; 2004. 280 p. (In Russ.)
11. Storozhenko S.Yu. An annotated list of Grasshop-
pers and Their Allies (Orthoptera: Caelifera) of the Asian
Part of Russia. *Korean Journal of Soil Zoology*. 2009;
13(1-2):10–24.
12. Мэгарран Э. Экологическое разнообразие и его
измерение. М.: Мир; 1992. 181 с.
- Magarran E. *Ecological diversity and its measurement*.
Moscow: Mir Publ.; 1992. 181 p. (In Russ.)
13. Песенко Ю.А. Принципы и методы количест-
венного анализа в фаунистических исследованиях.
М.: Наука; 1982. 288 с.
- Pesenko Yu.A. *Principles and methods of quantita-
tive analysis in faunal studies*. Moscow: Nauka; 1982.
288 p. (In Russ.)
14. Сергеев М.Г. Сообщества саранчовых (Orthop-
tera, Acrididae) прерий Великих равнин. I. Ландшафт-
ные типы. *Евразийский энтомологический журнал*.
2004;3(1):1–9.
- Sergeev M.G. Communities of locusts (Orthoptera,
Acrididae) of the Great Plains prairies. I. Landscape
types. *Eurasian Entomological Journal*. 2004;3(1):1–9.
(In Russ.)
15. Hammer H., Harper D.A.T., Ryan P.D. PAST:
Paleontological statistics software package for education
and data analysis. *Paleontologica Electronica*. 2006;
4(1):1–9.
16. Соловьев П.А. Криолитозона северной части
Лено-Амгинского междуречья. М.: Изд-во АН СССР;
1959. 144 с.
- Soloviev P.A. *Permafrost zone of the northern part of
the Lena-Amga interfluve*. Moscow: Publishing House of
the USSR Academy of Sciences; 1959. 144 p. (In Russ.)
17. Ермакова Ю.В., Бурнашева А.П. Структура и
пространственное распределение сообществ прямо-
крылых насекомых (Orthoptera) таежно-аласных лан-
дшафтов Лено-Амгинского междуречья (Центральная
Якутия). Ч. I. Сообщества прямокрылых Тунгюлюн-
ской террасы. *Природные ресурсы Арктики и Субар-
ктики*. 2022;27(3):405–414.
- Ermakova Yu.V., Burnasheva A.P. Structure and spa-
tial distribution of communities of Orthoptera in the taiga-
alas landscapes of the Lena-Amga interfluve (Central
Yakutia). Part 1. Communities of Orthoptera on the
Tyungyulyun Terrace. *Arctic and Subarctic Natural Re-
sources*. 2022;27(3):405–414. (In Russ.)
18. Сергеев М.Г., Чильдебаев М.К., Ванькова И.А.
и др. Итальянская саранча – *Calliptamus italicus* (Lin-
naeus, 1758). Морфология. Экология. Распространение.
Управление популяциями. Рим: Продовольственная и
сельскохозяйственная организация Объединенных На-
ций (FAO); 2022. 333 с.
- Sergeev M. G., Childebaev M.K., Vankova I.A., et al.
*Italian locust Calliptamus italicus (Linnaeus, 1758). Mor-
phology, ecology, distribution, population management*.
Rome: FAO; 2022. 333 p. (In Russ.). <https://doi.org/10.4060/cb7921ru>
19. Latchinsky A.V. Grasshopper problem in Yaku-
tia (Eastern Siberia, Russia) Grasslands. *Journal of Or-
thoptera Research*. 1995;4:29–34.
20. Лачининский А.В., Гаппаров Ф.А., Утапов Н.
Совершенствование химической борьбы с саранчо-
выми в Центральной Азии: УМО или полнообъемное
опрыскивание? *Защита и карантин растений*. 2011;
6:5–10.
- Lachinsky A.V., Gapparov F.A., Utafov N. Improv-
ing chemical control of locusts in Central Asia: ULV or
full-volume spraying? *Plant health and protection* 2011;
6:5–10 (In Russ.).
21. Гаппаров Ф.А., Нуржанов А.А., Медетов М.Ж.,
Эшжанов Б.Р. Эффективность микробиологического
препарата “Green Guard SC Premium” для личинок
итальянской саранчи (*Calliptamus italicus*) в Узбеки-
стане. *Вестник Каракалпакского отделения АН Респу-
блики Узбекистан*. 2011;2:27–29.
- Gapparov F.A., Nurzhanov A.A., Medetov M.Zh.,
Eshzhanov B.R. The effectiveness of the microbiological
preparation “Green Guard SC Premium” for the larvae of
the Italian locust (*Calliptamus italicus*) in Uzbekistan.
*Bulletin of the Karakalpak department. Academy of Sci-
ences of the Republic of Uzbekistan*. 2011;2:27–29. (In
Russ.)

22. Леднёв Г.Р., Успанов А.М., Левченко М.В. и др. Биологическая эффективность масляной конидиальной суспензии гриба *Beauveria bassiana* s.l. в отношении саранчовых в полевых условиях. В кн.: Павлюшин В.А. (ред.) *Фитосанитарная оптимизация агроэкосистем*. Материалы III Всероссийского съезда по защите растений, г. Санкт-Петербург, 16–20 декабря 2013 г. СПб.: ВИЗР; 2013. С. 358–361.

Lednev G.R., Uspanov A.M., Levchenko M.V., et al. Biological effectiveness of oily conidial suspension of the fungus *Beauveria bassiana* s.l. against locusts in field conditions. In: Pavlyushin V.A. (ed.) *Phytosanitary optimization of agroecosystems*: Proceedings of the 3rd All-Russian Congress on Plant Protection, St. Petersburg, December 16–20, 2013. St. Petersburg: VIZR Publ.; 2013, pp. 358–361. (In Russ.)

Об авторах

ЕРМАКОВА Юлия Владимировна, кандидат биологических наук, научный сотрудник, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-5485-9118>, Scopus Author ID: 57193325134, SPIN: 9907-9570, e-mail: yermakova68@mail.ru

БУРНАШЕВА Альбина Петровна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-8010-2469>, SPIN: 8930-3149, e-mail: a_burnacheva@mail.ru

Вклад авторов

Ермакова Ю.В. – разработка концепции, проведение исследований, проведение статистического анализа, создание черновика рукописи, редактирование рукописи; **Бурнашева А.П.** – проведение исследований, редактирование рукописи

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

ERMAKOVA, Yulia Vladimirovna, Cand. Sci. (Biol.), Institute for Biological Problems of Cryolithozone, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-5485-9118>, Scopus Author ID: 57193325134, SPIN: 9907-9570, e-mail: yermakova68@mail.ru;

Burnasheva, Albina Petrovna, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Institute for Biological Problems of Cryolithozone, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-8010-2469>, SPIN: 8930-3149, e-mail: a_burnacheva@mail.ru

Authors' contribution

Ermakova Yu.V. – conceptualization, investigation, formal analysis, writing – original draft, writing – review & editing; **Burnasheva A.P.** – investigation, writing – review & editing

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 10.04.2024

Поступила после рецензирования / Revised 30.10.2024

Принята к публикации / Accepted 17.11.2024

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 678

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-1-148-161>



Оригинальная статья

Исследование сохранения физико-механических свойств стекло-углепластиков при провокационном биозаражении в условиях холодного климата

А. К. Кычкин¹, А. А. Кычкин^{✉,2}, Н. Ф. Стручков¹

¹Институт физико-технических проблем Севера
им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

²Якутский научный центр СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

✉ icen.kychkin@mail.ru

Аннотация

Общепринятой практикой для определения сроков безопасной эксплуатации полимерных композитов является их климатическая стойкость. Она основана на экспериментальных исследованиях влияния агрессивных климатических факторов на физико-механические свойства материалов, используемых в различных климатических зонах. В данной статье представлены результаты исследований климатических испытаний (старения) в условиях экстремально холодного климата образцов стекло-углепластиков. Для оценки влияния климатических и биогенных факторов на полимерные композиты использовались методы микроструктурного анализа, динамического механического анализа (ДМА) и исследования упругопрочностных характеристик. Образцы подвергались двухлетнему климатическому экспонированию с провокационным внесением микроорганизмов для изучения изменений их свойств и структурных особенностей. Установлено, что образование микробных колоний, выделение ими продуктов метаболизма разрушают полимерную матрицу, что приводит к снижению предела прочности при растяжении у стеклопластика (СП) на 57 %, у углепластика (УП) на 8 %. Полученные результаты подтверждены исследованиями методами ДМА, профилометрии и измерения открытой пористости. Данные, полученные при изучении поверхностной деструкции, пористости и ДМА, свидетельствуют о старении материала, начинающемся с поверхностного слоя. Это проявляется в увеличении пористости, изменении степени полимеризации полимерной матрицы слоистых пластиков, а также в значительном снижении упруго-прочностных характеристик при провокационном внесении микроорганизмов. Выявленные изменения подтверждаются снижением динамического модуля упругости и повышением температуры стеклования. Полученные результаты о влиянии биогенных микроорганизмов на процессы старения полимерных композитов при одновременном воздействии УФ-излучения и низких температур могут быть применены для решения вопросов по снижению старения полимеров.

Ключевые слова: композитные материалы, биодеструкция, повреждения, прочность, модуль упругости, динамический механический анализ, профилометрия, температура стеклования

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRS-2024-0058) с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Для цитирования: Кычкин А.К., Кычкин А.А., Стручков Н.Ф. Исследование сохранения физико-механических свойств стекло-углепластиков при провокационном биозаражении в условиях холодного климата. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(1):148–161. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-1-148-161>

The preservation of physical and mechanical properties of glass-carbon composites under provocative biocontamination in cold climate conditions

Anatoliy K. Kychkin¹, Aisen A. Kychkin^{✉,2}, Nikolay F. Struchkov¹

¹Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North,

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

²Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

✉icen.kychkin@mail.ru

Abstract

A common practice for determining the safe service life of polymer composites is to assess their climatic resistance. This evaluation is based on experimental studies that examine the effects of aggressive climatic factors on the physical and mechanical properties of materials used in various climatic zones. This article presents the results of climatic aging tests conducted on glass-carbon plastic samples under extremely cold conditions. Microstructural analysis, dynamic mechanical analysis (DMA), and assessments of elastic-strength characteristics were used to evaluate the climatic and nutrient impacts on these polymer composites. The samples underwent two years of climatic exposure, during which provocative phenomena were introduced to investigate changes in their properties and structural features. As a result of the studies, a decrease in the tensile strength of a fiberglass (FG) by 57% and of the carbon fiber-reinforced plastics (CFRP) by 8% was observed. The obtained results are supported by studies of DMA, profilometry and open porosity. The findings regarding surface degradation, porosity, and DMA confirm the aging of the material in the surface layer, an increase in porosity, and changes in the degree of polymerization of the polymer matrix in layered plastics. Furthermore, the introduction of microorganisms significantly reduces the elastic-strength characteristics of the materials. The identified changes are confirmed by a decrease in the dynamic modulus of elasticity and an increase in the glass transition temperature. The results obtained regarding the influence of biogenic microorganisms on the aging processes of polymer composites, under simultaneous exposure to UV radiation and low temperatures, can be applied to address issues related to reducing the polymer aging.

Keywords: composite materials, biodegradation, damages, strength, modulus of elasticity, dynamic mechanical analysis, profilometry, glass transition temperature

Funding. This study was conducted within the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. FWRS-2024-0058) using scientific equipment of the Core Shared Research Facilities of the Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”.

For citation: Kychkin A.K., Kychkin A.A., Struchkov N.F. The preservation of physical and mechanical properties of glass-carbon composites under provocative biocontamination in cold climate conditions. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(1):148–161. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-148-161>

Введение

Полимерные композиционные материалы (ПКМ), работающие в составе изделий в открытых климатических условиях, испытывают, кроме эксплуатационных нагрузок, одновременное воздействие ультрафиолетового излучения, температуры воздуха, влажности окружающей среды, количества осадков и влияние биоразнообразия организмов на деструкцию материала. Несмотря на большое количество исследований, посвященных оценке состояния ПКМ в открытых климатических условиях, актуальность проблемы адекватного определения и прогнозирования долговечности ПКМ неуклонно возрастает, и до настоящего времени не выработано единого научного подхода о линейности или нелинейности

суммирования повреждений в композитах при раздельном и совместном воздействии группы агрессивных климатических и биогенных факторов. Не определены критерии отбора линейной или нелинейной суперпозиции повреждений на микро- и макроуровнях при прогнозировании старения ПКМ с учетом влияния биодеструкции окружающей среды. С помощью лабораторных исследований не удается воспроизвести условия открытой эксплуатационной среды. Поэтому невозможно достоверно прогнозировать долговечность изделий из ПКМ на длительные периоды эксплуатации, что тормозит их применение.

Единственным надежным методом определения срока службы материала является прямой натурный эксперимент, который позволяет под-

твердить и обосновать сохранение свойств в процессе длительной эксплуатации в различных климатических условиях. При этом необходимо получить новые сведения о вкладе различных факторов, кроме основных климатических, в на деструкцию материалов, оценить влияние разнообразных групп микроорганизмов открытой среды, которые активируют процессы деградации компонентов полимерных композитов [1–5].

Поэтому важнейшей задачей в области современного материаловедения является задача развития методов и устройств длительных климатических испытаний, разработка моделей оценки сохранения заданных свойств ПКМ на основе полученных результатов исследования открытой климатической деструкции и биокоррозии на физико-механические характеристики. При этом биоразрушение различных полимерных материалов может являться одной из актуальных экологотехнологических проблем [6.]. Решение определенной проблемы может быть достигнуто только комплексными исследованиями и выявлением закономерностей взаимодействия материалов с биораздражителями и факторами окружающей среды [7].

Изучение взаимосвязи структурно-фазового состояния и свойств полимерных материалов с учетом процессов деградации в экстремальных условиях холодного климата является актуальной задачей, имеющей очевидные практические применения для разработки и создания ПКМ с заданными свойствами.

Материалы и методы исследований

В качестве объектов исследования использовали композитные пластины с размерами 950×450 мм, изготовленные методом вакуумной инфузии и описанные в работах [8–10]. Образцы были выставлены на полигоне г. Якутск ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН согласно ГОСТ 9.708–83.

Исследование поверхностной деструкции и микроструктуры образцов проводилось на растровом электронном микроскопе JSM-7800F (JEOL, Япония) при напряжении от 1,4 до 2 кВ в вакуумной среде.

Открытая пористость определялась апробированным методом гидростатического взвешивания [11] и согласно ПНСТ 532-2021. В качестве рабочей пропитывающей жидкости использован керосин. Для данных исследований были вырезаны образцы размерами 40×40×5 мм, где торце-

вые стороны были закрыты эпоксидной смолой для исключения проникновения пропитывающей жидкости вдоль волокон ткани композитов. Образцы подвергались предварительной сушке при температуре 60 °С в течение 72 ч. Взвешивание осуществлялось на электронных аналитических весах с точностью 0,0001 г. Открытая пористость определялась по следующей формуле:

$$P_o = \frac{m_2 - m}{m_2 - m_1} \cdot 100 \%,$$

где m_2 – масса насыщенного жидкостью для испытаний образца на воздухе, г; m – масса сухого образца, г; m_1 – масса насыщенного жидкостью для испытаний образца в емкости, г.

Параметры шероховатости определены профилометром SurfTest SJ-201P (Mitutoyo, Япония) на 60 случайно выбранных участках каждого образца.

Температура стеклования определялась методом динамического механического анализа на приборе DMA 242 C фирмы NETZSCH. Для испытания образцов применялся держатель для трехточечного изгиба с длиной пролета между опорами 40 мм. Испытания проводились по ГОСТ Р 56753-2015 (метод В) в диапазоне температур от 25 до 150 °С со скоростью нагрева 5 °С/мин. Измерения проводились с частотой вынужденных колебаний 1 Гц при амплитуде колебаний 10 мкм, в среде аргона (расход газа 50 мл/мин.).

Для проведения испытаний на устойчивость к биозаражению ПКМ были отобраны 25 образцов минипластин ПКМ, проведено 68 смыслов с опытных образцов гибридных ПКМ, экспонируемых на полигоне, по 5 проб почвы, атмосферного воздуха и снежного покрова с территории полигона [11]. Для провокационного внесения микроорганизмов были использованы выделенные штаммы плесневых грибов: *Aspergillus niger* ПКМ-7 и спорообразующих бактерий *Bacillus atrophaeus* ELA-2. Подбор консорциума выполнен по принципу нейтрального действия микробных культур друг на друга. Перед постановкой опыта образцы ПКМ стерилизовали обработкой 70%-м этиловым спиртом, затем заражали микроорганизмами в соответствии с ГОСТ Р 57859-2017. Заданная концентрация микробной суспензии для биозаражения соответствовала 1–10 млн КОЕ/см³ [12].

Для выявления биологического воздействия на упругопрочностные свойств биозараженных слоистых пластиков экспонированные образцы

(акт съема № 01/10-23 от 26.10.2023г) были подвержены серии испытаний на растяжение ГОСТ Р 56785-2015, изгиб ГОСТ Р 56810-2015 с применением универсальной разрывной машины «Zwick Roel Z600» (Zwick, Ulm, Германия), тип ВРС-F0600TN.R09, серийный номер 160088-2008 на базе ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН. Чтобы исключить пластифицирующий эффект воздействия влаги, композиты перед механическими испытаниями подвергались сушке при температуре 60 °С в течение 72 ч. Для проведения испытаний на растяжение были подготовлены образцы по 5 штук с каждого типа пластиков, с размерами $10 \times 250 \pm 2$ мм с приклеиванием накладок размерами $10 \times 75 \pm 2$ мм с уклоном 30° для исключения влияния захватов на деформацию испытуемого материала. Длина

рабочего участка составляла не меньше 95 ± 2 мм, скорость испытания ($V_{\text{исп}}$) составляла 2 мм/мин. Экстензометр устанавливался с базой замера напряжения 50 мм рабочего участка образца.

Результаты исследований

Для моделирования и прогнозирования физико-механических показателей полимерных композиционных материалов при климатической деструкции необходимо фиксировать реальные показатели среды, действующей за период экспонирования материалов.

Данные приземных метеорологических наблюдений (рис. 1) получены от Федерального государственного бюджетного учреждения «Якутское управление по гидрометеорологии и монито-

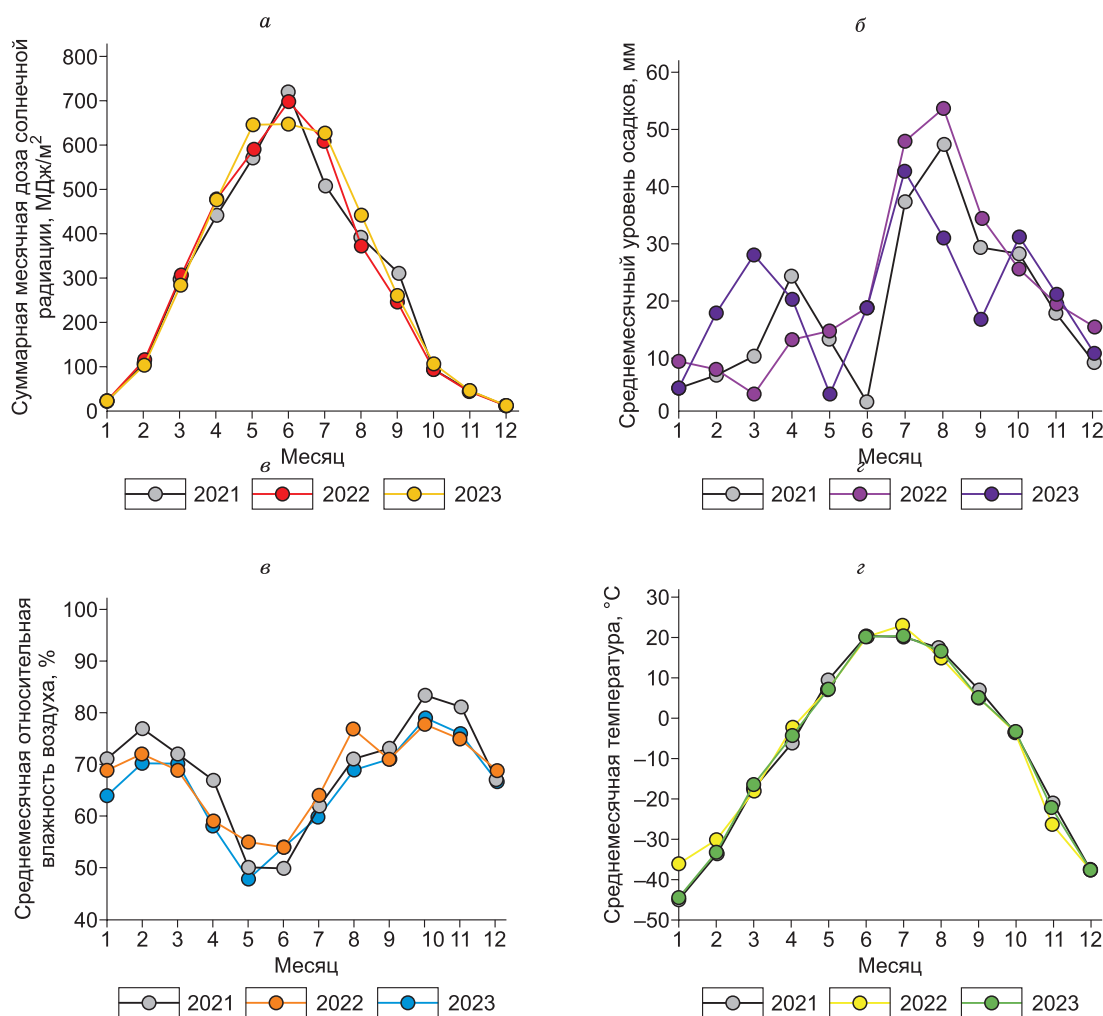


Рис. 1. Среднемесячные климатические показатели г. Якутск за 2021–2023 гг.: а – доза суммарной солнечной радиации, б – количество осадков, в – относительная влажность, г – температура

Fig. 1. Average monthly climatic indicators for the city of Yakutsk: а) total solar radiation dose, б) precipitation amount, в) relative humidity, and г) temperature, for the years 2021 to 2023

рингу окружающей среды» согласно договору № 20/1 от 14.12.2020 г.

Приземные метеорологические наблюдения производились на сети метеопостов. На рис.1 (а–г) представлены среднемесячные показатели температуры, относительной влажности, доза суммарной солнечной радиации, количество осадков за период климатических испытаний (2021–2023 гг.).

Из анализа полученных данных (см. рис.1) следует, что максимум относительной влажности воздуха наблюдался в летнее время – 82 %, минимум – зимой – 11–14 %. Наибольшее количество осадков зарегистрировано в августе – 53,5 мм. Минимальное количество осадков зарегистрировано в марте и мае – 3,3 мм. Переход от отрицательных температур к положительным наблюдался с сентября по ноябрь и в апреле–мае. Минимальная температура в зимний период составила –51,9 °С в январе, а максимальная +32,6 °С в июне. Годовая амплитуда температур составила 84,5 °С.

В рамках выполнения проекта проводились ежеквартальное освидетельствование и визуальный осмотр поверхности образцов в процессе экспозиции на открытом полигоне.

При проведении визуального осмотра 09.04.2022 (рис. 2) в образцах наблюдались: потеря глянца, слабое изменение цвета полимерной матрицы, незначительное оголение поверхности, увеличение поверхностных пор, локальное загрязнение поверхности.

Известно, что одним из важных факторов, влияющим на свойства полимерных композиционных материалов, является солнечная радиация [13–16], в частности ее ультрафиолетовая составляющая. Воздействие солнечной радиации приводит к фотодеструкции поверхности материала, образованию напряжений, трещин и разрушению поверхности матрицы, вследствие чего происходит оголение поверхностных слоев армирующего наполнителя, что снижает несущую нагрузку материалов. При деструкции и эрозии поверхности за счет воздействия УФ-излучения толщина образца может снижаться, количество дефектов и количество сорбированной влаги растет, что приводит к снижению прочности материала.

На рис. 3, 4 представлены микрофотографии (растровая электронная микроскопия (РЭМ)) поверхностей исследуемых образцов стеклопластиков (СП). Образцы, расположенные на лицевой стороне, были направлены в сторону солнца.

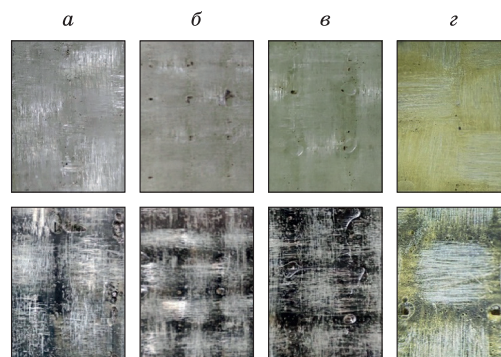


Рис. 2. Внешний вид образцов до экспозиции (а), апрель 2022 года (б), после 12 месяцев экспозиции (в), после 24 месяцев экспозиции (г)

Fig. 2. Appearance of samples before exposure (a), in April 2022 (б), after 12 months of exposure (в), and after 24 months of exposure (г)

У исходного образца стеклопластика наблюдается плотный контакт армирующего материала с полимерным связующим (см. рис. 3). После климатических испытаний на поверхностях образцов наблюдается оголение армирующего материала, увеличение поверхностных пор, локальное загрязнение поверхности. При анализе общей структуры срезов образцов СП после климатических испытаний видно, что биозараженный образец характеризуется более выраженным отслоением армирующих волокон от полимерной матрицы, а также увеличением количества микротрещин в полимерном связующем. Кроме того, у биозараженного образца отмечается формирование на волокнах нехарактерных компонентов, что связано с образованием микроколоний микроорганизмов (см. рис. 3).

Микроструктура поверхностей солнечной стороны и продольных срезов образцов углепластиков (УП) представлены на рис. 4.

Анализ структуры контрольного образца УП показывает, что углеволокна находятся в плотном контакте с полимерным связующим (см. рис. 4). Образец УП, прошедший климатические испытания, также сохраняет плотный контакт с полимерным связующим (см. рис. 4). На поверхности образцов УП отмечаются микротрещины в поверхностном слое полимерного связующего. При исследовании продольных срезов биозараженных образцов УП после двухлетней экспозиции под увеличением обнаружена локализация колоний грибов (см. рис. 4).

Результаты фактографических исследований микроструктуры поверхностей образцов и про-

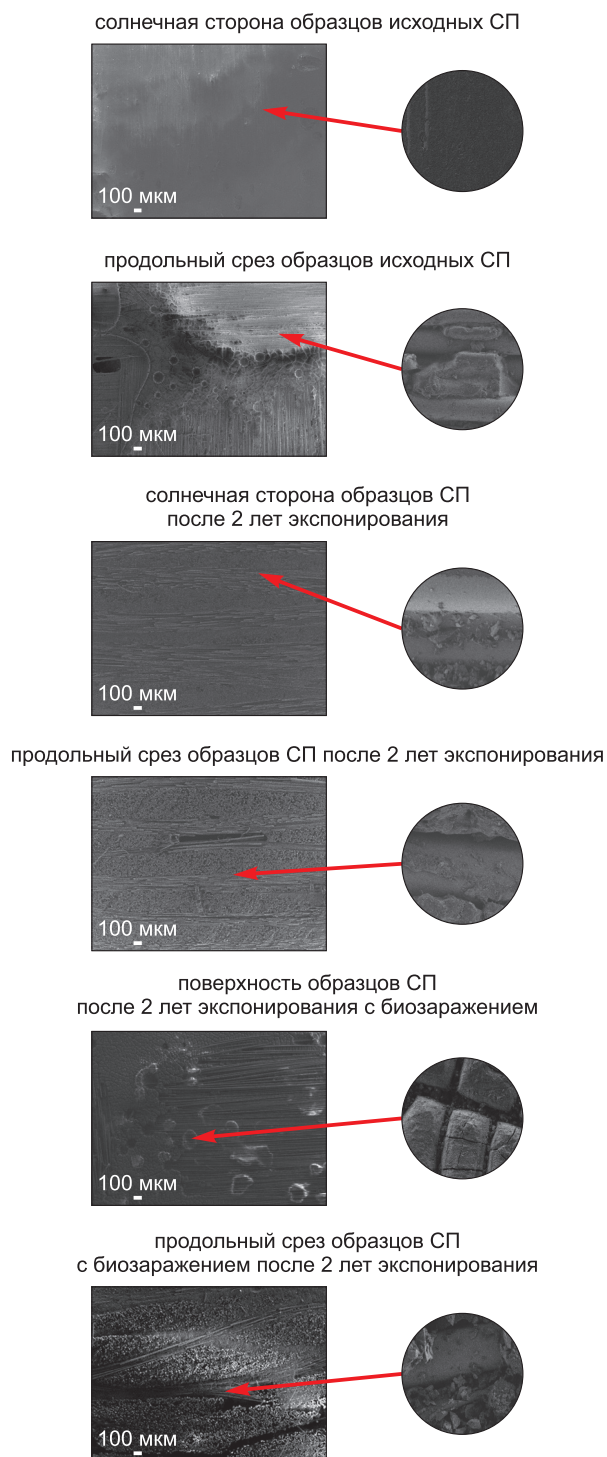


Рис. 3. Микроструктура поверхности лицевой стороны и продольных срезов стеклопластиков

Fig. 3. Microstructure of the surface of the front side and longitudinal sections of fiberglass

дольных срезов показывают, что после 2 лет климатических испытаний у образцов СП наиболее сильно проявляются микрорастрескования

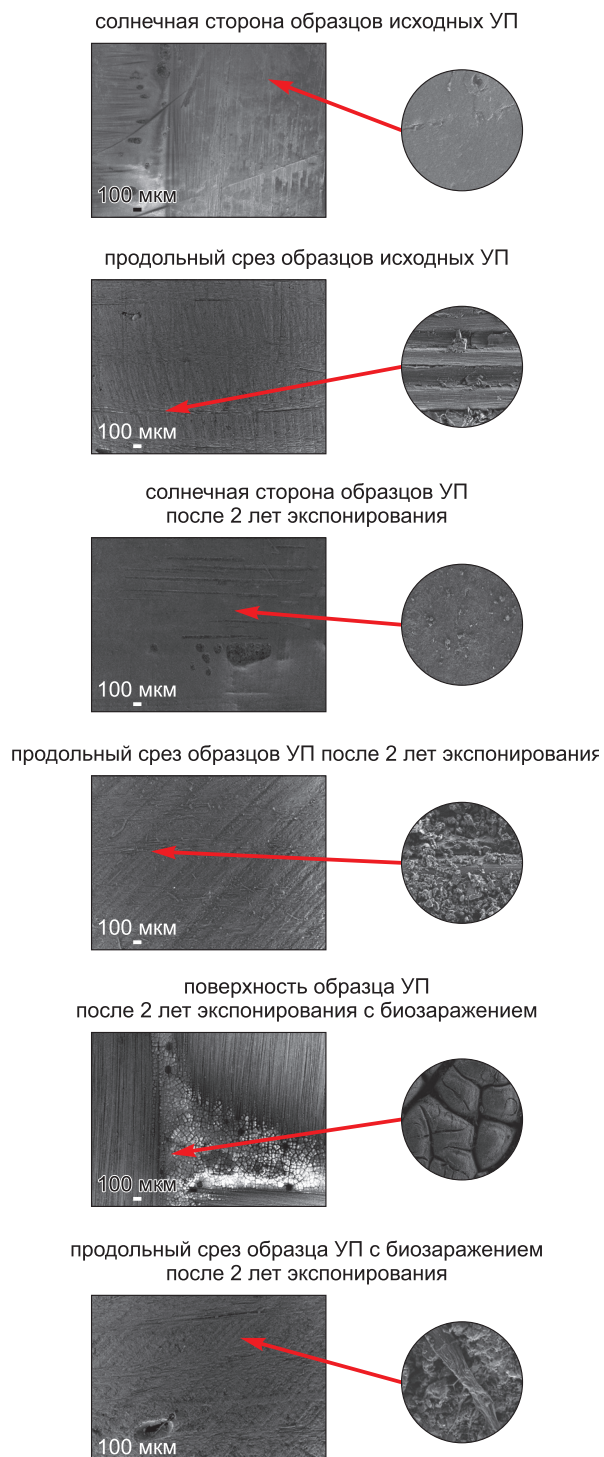


Рис. 4. Микроструктура поверхности лицевой стороны и продольных срезов углепластиков

Fig. 4. Microstructure of the surface of the front side and longitudinal sections of carbon fiber-reinforced plastics

на поверхности и расслоения внутри материала между полимерной матрицей и армирующим материалами, чем у образцов УП. Эрозия поверх-

ностей материалов связана с осушением первичного слоя матрицы. Значительное расслоение у образцов СП, видимо, связано с ростом внутренних напряжений между полимерной матрицей и армирующим материалом.

Результаты исследования открытой пористости и средней шероховатости представлены в табл. 1.

У образцов СП-Б с провокационным биозаражением открытая пористость после 1 года экспонирования повышается в 5,6 раза и далее растет до 0,96 % после 2 года. У биозараженного УП после 1 года и 2 лет экспонирования открытая пористость значительно меньше (в 2,8 и в 2,3 раза соответственно), чем у незараженного УП.

Изменения показателей шероховатости композитов после 1 года экспозиции носят разнонаправленный характер: наблюдается как увеличение, так и уменьшение значений. Однако после 2 года экспонирования шероховатость возрастает у всех марок исследуемых композитов. Данное изменение может быть связано с усадкой, набуханием, частичным разрушением поверхностного слоя или, наоборот, его уплотнением под воздействием влаги, температуры и УФ-излучения [17]. Это может приводить как к увеличению, так и к уменьшению шероховатости в зависимости от структуры материала. Ко 2 году у материалов накапливаются повреждения, в том числе вызванные биологическим воздействием: микроорганизмы колонизировали поверхность материала, с выделением продуктов метаболизма, разрушающих полимерную матрицу, способствуя увеличению шероховатости.

С увеличением времени экспонирования профили поверхностей претерпевают существенные

Таблица 1
Значения открытой пористости
и средней шероховатости слоистых пластиков

Table 1
Values of open porosity and average roughness
in laminates

Марка	Открытая пористость По, % / Средняя шероховатость, мкм		
	исходные	после 1 года экспонирования	после 2 лет экспонирования
СП	0,17 / 1,61	0,44 / 1,5	0,27 / 5,92
УП	0,13 / 1,17	0,42 / 1,07	0,45 / 2,3
СП-Б	0,17 / 1,61	0,68 / 3,15	0,96 / 6,5
УП-Б	0,13 / 1,17	0,15 / 1,07	0,19 / 1,67

изменения и приобретают более шероховатые текстуры. Данные изменения происходят за счет выветривания поверхностного слоя, обнажения изолированных пор и оголения наиболее близких к поверхности участков волокон ткани композитов [18].

На рис. 5 показаны профилограммы поверхности лицевой стороны биозараженного СП до, после 1 года и 2 лет испытаний.

Биозараженный СП, несмотря на сопоставимые значения средней шероховатости (см. табл. 1), имеет более широкий размах профилей, чем слоистые пластики УП и УП-Б, у которых данные по средней шероховатости и профилям коррелируются и имеют минимальный разброс, что указывает высокую устойчивость к биозаражению.

Исследование ДМА материалов позволило подтвердить и уточнить выводы о влиянии биодеструкторов с провокационным нанесением на их климатическую стойкость.

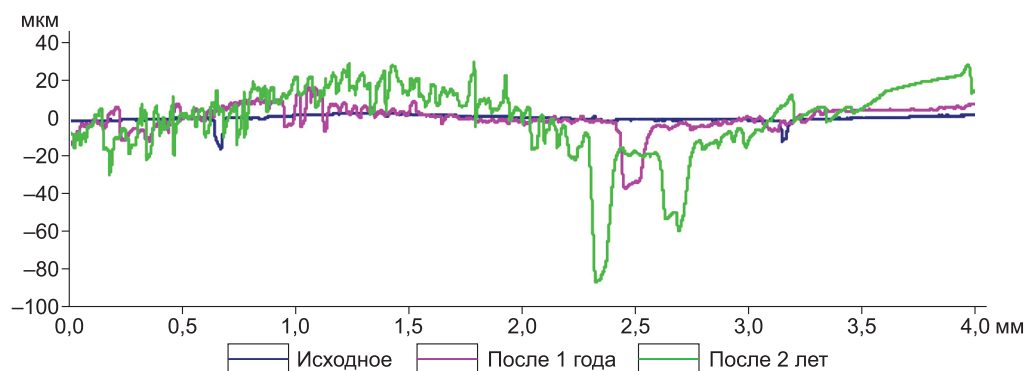


Рис. 5. Профилограммы поверхности лицевой стороны СП-Б до, после 1 года и 2 лет испытаний

Fig. 5. Profilograms of the surface of the front side of FG-B before testing, after 1 year of testing, and after 2 years of testing

После экспонирования образцов с провокационным внесением биодеструкторов отчетливо выявляется снижение динамического модуля упругости и повышение температуры стеклования (рис. 6, 7).

В табл. 2 представлены результаты исследований влияния провокационного внесения биодеструкторов на ДМА-характеристики образцов УП и СП.

Результаты ДМА-анализа образцов с провокационным внесением микроорганизмов показали снижение динамического модуля упругости и повышение температуры стеклования у образцов СП и УП на 10 и 9 °С соответственно. Динамический модуль упругости лицевых сторон биозараженных образцов оказался ниже на 26 и 46 % по сравнению с исходными образцами и образцами после двух лет экспозиции соответственно. Для тыльных сторон снижение составило 11 и 13 %. При этом у биозараженных образцов на солнечной стороне накапливается больше напряжений, чем на теневой, что подтверждается снижением модуля потерь на 60 %. Повышение температуры стеклования можно объяснить тем, что микроорганизмы в объеме полимерной матрицы ограничивают сегментальную подвижность, смещая переход материала в эластичное состояние.

На рис. 8, 9 представлены результаты испытаний на растяжение и на изгиб. Полученные результаты испытаний свидетельствуют, что после 24 месяцев натурных испытаний с биологическим воздействием на материалы наблюдается снижение показателей E_p и σ_p , в зависимости от количества углеткани в композите: у СП – σ_p на 57, E_p – на 35 % от исходных значений, у УП – снижение σ_p на 8 %, повышение E_p на 5 %.

Для проведения испытаний на изгиб были изготовлены плоские образцы с размерами $20 \times 110 \pm 1$ мм по 5 штук для каждого вида материала. Образец, лежащий на двух опорах с расстоянием 80 мм, нагружали $V_{исп}$ 2 мм/мин до момента разрушения. Радиус закругления нагружающего пуансона составлял 5 мм.

Полученные результаты испытаний свидетельствуют, что после 24 месяцев натурных испытаний с биологическим воздействием на материалы наблюдается снижение показателей E_u и σ_u : у СП – σ_u на 57 %, E_u – на 49 %, у УП – σ_u на 21, E_u – на 4 % относительно исходных значений.

Для оценки влияния биогенных факторов воздействия в течение 24 месяцев на упруго-прочностные свойства пластиков был введен обобщенный показатель – относительный коэффициент сохраняемости согласно формуле

$$k_R = R_t / R_0,$$

где R_t принимает пределы прочности при растяжении, изгибе, полученные после экспонирования 12 (R_{12}) и 24 (R_{24}) месяца на открытом полигоне; R_0 принимает соответствующие пределы исходных результатов материала.

В табл. 3 представлены упругопрочностные свойства по типам композитов. Углепластик менее подвержен биодеструкции и обладает более высокой климатической устойчивостью по сравнению со стеклопластиком. Прочностные характеристики СП после климатических испытаний с провокационным внесением микроорганизмов снизились на 35–57 %.

Заключение

Проведенный анализ демонстрирует значительное влияние микроорганизмов на свойства полимерных композиционных материалов. Образование микробных колоний на поверхности и в объеме материала приводит к выделению продуктов метаболизма, которые разрушают полимерную матрицу, способствуют появлению микротрещин, расслоений и увеличению шероховатости. Это подтверждается снижением динамического модуля упругости, повышением температуры стеклования и значительным уменьшением прочностных характеристик, особенно у материалов типа СП.

Микроорганизмы также влияют на распределение внутренних напряжений, что особенно заметно на солнечной стороне образцов, где накопление напряжений происходит интенсивнее. Эти процессы указывают на необходимость учета биогенных факторов при разработке новых материалов и моделей деструкции. Устойчивость к биокоррозии и климатическим воздействиям должна стать важным критерием при проектировании полимерных композитов, особенно предназначенных для эксплуатации в условиях повышенной влажности и температуры.

Таким образом, для создания долговечных и надежных материалов необходимо учитывать влияние микроорганизмов на структурно-фазо-

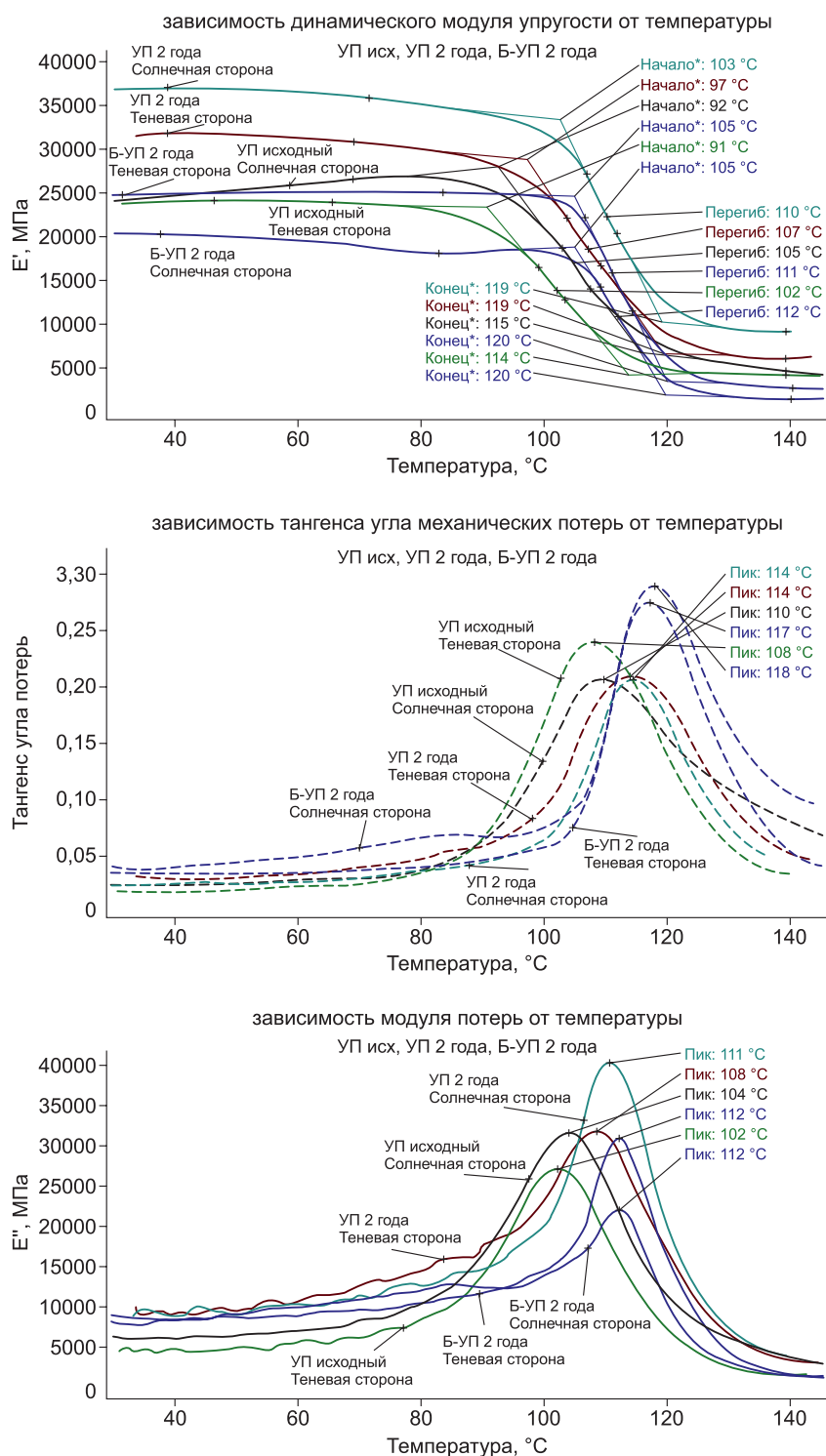


Рис. 6. Зависимости модуля упругости, тангенса угла механических потерь и модуля потерь УП исходного, УП 2 года климатического воздействия и Б-УП 2 года климатического воздействия (теневой и солнечной стороны) от температуры

Fig. 6. Dependence of the elastic modulus, mechanical loss tangent, and loss modulus of CFRP initial, CFRP 2 years climate impact, and Б-CFRP 2 years climate impact (both shaded and sunny sides) on temperature

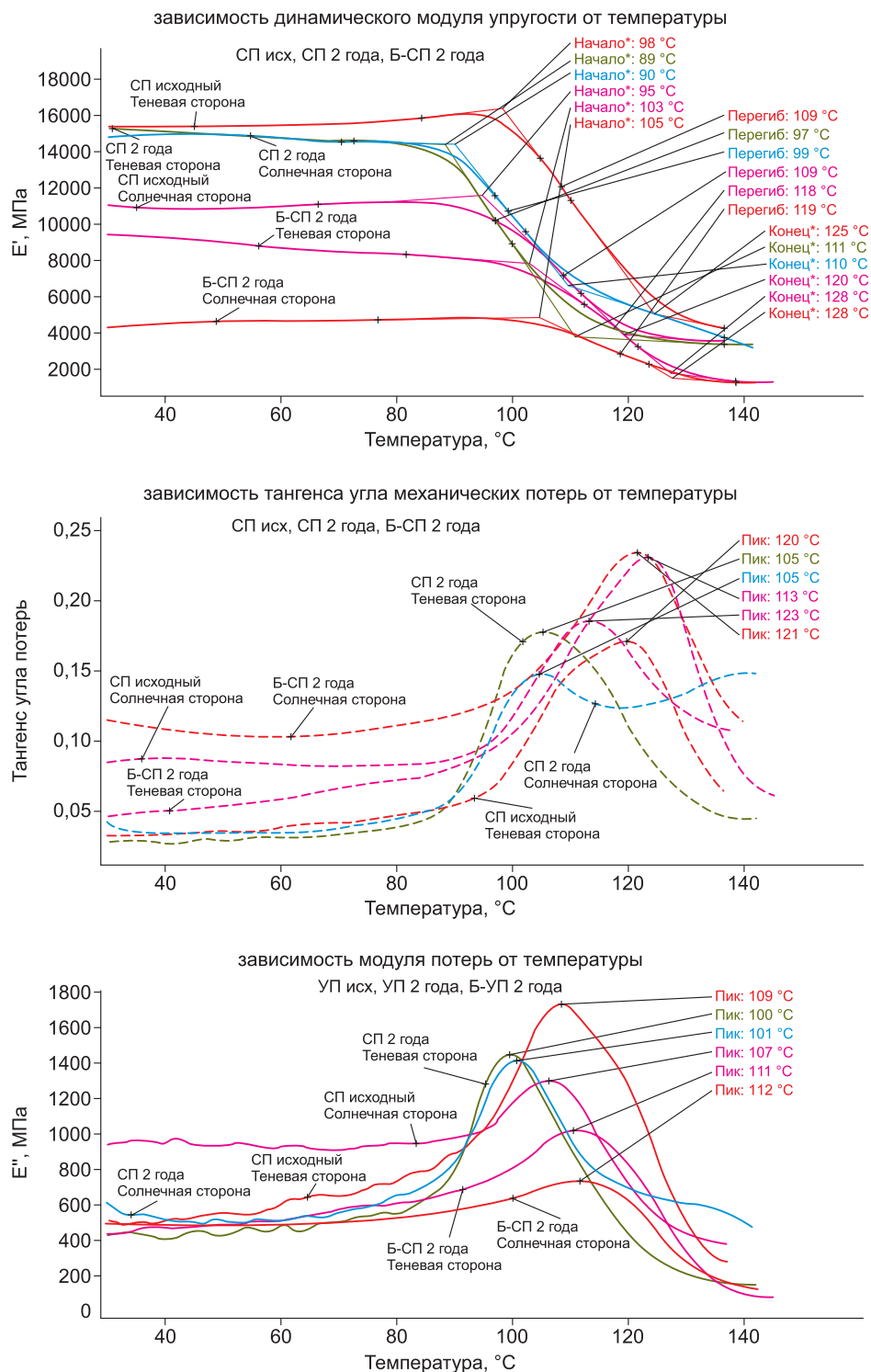


Рис. 7. Зависимости модуля упругости, тангенса угла механических потерь и модуля потерь СП исходный, СП 2 года климатического воздействия и Б-СП 2 года климатического воздействия (теневой и солнечной стороны) от температуры

Fig. 7. Dependence of the elastic modulus, mechanical loss tangent, and loss modulus of FG initial, FG 2 years climate impact, and B-FG 2 years climate impact (both shaded and sunny sides) on temperature

Таблица 2

Результаты ДМА образцов УП и СП

Table 2

DMA results of CFRP and FG samples

Наименование показателя	Образцы	УП		СП	
		С ¹	Т ²	С	Т
Значение модуля упругости E' , МПа	Исх	24469	24128	11034	15366
	2 года	36995	36995	14873	15229
	2 года с Б ³	20314	24710	4280	9381
Экстраполированное значение начала перехода на кривой модуля упругости – T_{onset} , °C	Исх	92	91	95	98
	2 года	103	97	90	89
	2 года с Б	105	105	105	103
Точка перегиба – T_g , °C	Исх	105	102	109	109
	2 года	110	107	99	97
	2 года с Б	112	111	119	118
Экстраполированное окончание перехода на кривой модуля упругости, °C	Исх	115	114	120	125
	2 года	119	119	110	111
	2 года с Б	120	120	129	128
Пик на кривой тангенса T_{tg} , °C	Исх	110	108	113	120
	2 года	114	114	105	105
	2 года с Б	118	117	121	123
Пик на кривой модуля потерь – T_{loss} , °C	Исх	104	102	107	109
	2 года	111	108	101	100
	2 года с Б	112	112	112	111

¹ Солнечная сторона образцов / sunny side.

² Теневая сторона образцов / shaded side.

³ Образцы с провокационным биозаражением / Samples with provocative biocontamination.

Таблица 3

Изменение коэффициента сохраняемости упругопрочностных свойств биозараженных слоистых пластиков

Table 3

Change in the coefficient of retention of elastic strength properties of biocontaminated laminated plastics

Маркировка	Показатель	R_0	R_{12}	R_{24}	k_{R12}	k_{R24}
Б-СП	σ_p , МПа	610,66	612,45	260,43	1,00	0,43
	E_p , ГПа	27,60	24,24	17,96	0,88	0,65
	σ_u , МПа	625,93	356,47	275,30	0,57	0,44
	E_u , ГПа	23,92	22,50	12,15	0,94	0,51
	a_n , МПа	218,68		159,11		0,73
Б-УП	σ_p , МПа	647,77	633,60	597,48	0,98	0,92
	E_p , ГПа	70,82	72,48	74,28	1,02	1,05
	σ_u , МПа	660,24	587,81	523,86	0,89	0,79
	E_u , ГПа	50,84	50,74	48,89	1,00	0,96
	a_n , МПа	91,08		269,51		2,96

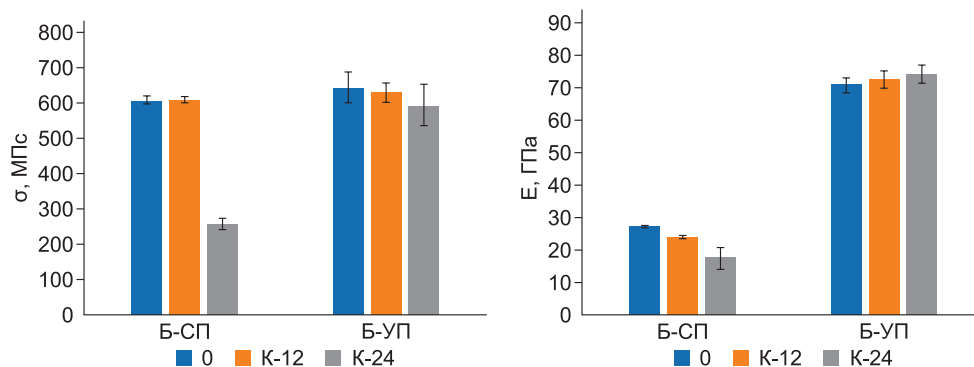


Рис. 8. Гистограмма механических показателей при растяжении биозараженных слоистых пластиков

Fig. 8. Histogram of mechanical parameters during the tension of biocontaminated laminates

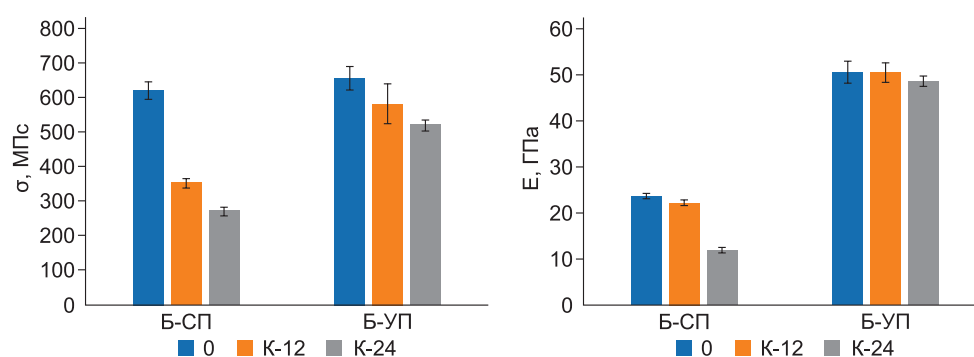


Рис. 9. Гистограмма механических показателей при изгибе биозараженных слоистых пластиков

Fig. 9. Histogram of mechanical parameters during the bending of biocontaminated laminates

вое состояние и свойства полимеров, а также разрабатывать методы защиты от биодеструкции. Это позволит повысить устойчивость материалов к комплексным воздействиям окружающей среды и продлить срок их службы.

Список литературы / References

1. Каблов Е.Н., Старцев О.В. Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях (обзор). *Авиационные материалы и технологии*. 2015; Т.4(37):38–52.
Kablov E.N., Startsev O.V. Basic and applied research and aging of materials under climatic conditions (review). *Aviation materials and technologies*. 2015; Т.4(37):38–52. (In Russ.)
2. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии. *Авиационные материалы и технологии*. 2015;2(35):76–87.
Kablov E.N., Startsev O.V., Medvedev I.M. Review of foreign experience in corrosion research and corrosion protection products. *Aviation materials and technologies*. 2015;2(35):76–87. (In Russ.)
3. Kablov E.N., Startsev O.V., Krotov A.S et al. Climatic aging of composite materials: 1. Aging mechanisms. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2011;10:993–1000.

4. Kablov E.N., Startsev O.V., Krotov A.S., et al. Climatic aging of composite aviation materials: 2. Relaxation of the initial structural nonequilibrium and through thickness gradient of properties. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2011;(10):1001–1007.

5. Kablov E.N., Startsev O.V., Krotov A.S., et al. Climatic aging of composite aviation materials: 3. Significant aging factors. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2012;(4). 323–329.

6. Кузьмин Д.А. Использование монотерпеноидов в качестве средств защиты промышленных материалов от микробиологических повреждений: Автореф. дис. канд. биол. наук. Нижний Новгород; 2006. 27 с.

7. Кряжев Д.В. Экологические основы диагностики процессов биодеструкции природных и синтетических полимерных материалов в условиях воздействия ряда абиотических факторов внешней среды: : Автореф. дис. докт. биол. наук. Нижний Новгород; 2014. 305 с.

8. Kryazhev D.V. Ecological basis for diagnosing the processes of biodegradation of natural and synthetic polymeric materials under the influence of a number of abi-

otic environmental factors: Abstr. Sc.D. Diss. Biol. Sci. Nizhniy Novgorod; 2014. 305 s. (In Russ.)

8. Кычкин А.А., Кычкин А.К., Туйсов А.Г. Создание гибридных композиционных полимерных материалов для исследования взаимосвязей “структура-технология” при длительном воздействии климатических факторов. В кн.: Лукин Е.С. (ред.) *EURASTRENCOLD-2022: Сборник трудов X Евразийского симпозиума по проблемам прочности и ресурса в условиях климатически низких температур, посвященный 100-летию образования ЯАССР и 300-летию Российской Академии наук, г. Якутск, 12–16 сентября 2022 года*. Киров: Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании; 2022. С. 250–257.

Kychkin A.A., Kychkin A.K., Tuisov A.G. Creation of hybrid composite polymer materials for studying the “composition-structure-technology” relationships under long-term exposure to climatic factors. In: Lukin E.S. (ed.) *EURASTRENCOLD-2022: Proceedings of the 10th Eurasian Symposium on problems of strength and resource in conditions of climatic low temperatures, dedicated to the 100th anniversary of the YASSR and the 300th anniversary of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, September 12–16, 2022*. Kirov: Interregional Center for Innovative Technologies in Education; 2022, pp. 250–257. (In Russ.)

9. Копырин М.М., Марков А.Е., Иванов А.Н. и др. Исследование упруго-прочностных свойств гибридных композиционных пластиков. В кн.: Лукин Е.С. (ред.) *EURASTRENCOLD-2022: Сборник трудов X Евразийского симпозиума по проблемам прочности и ресурса в условиях климатически низких температур, посвященный 100-летию образования ЯАССР и 300-летию Российской Академии наук, г. Якутск, 12–16 сентября 2022 года*. Киров: Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании; 2022. С. 233–237.

Kopyrin M.M., Markov A. E., Ivanov A.N., et al. Study of elastic-strength properties of hybrid composite plastics. In: Lukin E.S. (ed.) *EURASTRENCOLD-2022: Collection of proceedings of the 10th Eurasian Symposium on problems of strength and resource in conditions of climatic low temperatures, dedicated to the 100th anniversary of the formation of the YASSR and the 300th anniversary of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, September 12–16, 2022*. Kirov: Interregional Center for Innovative Technologies in Education; 2022, pp. 233–237. (In Russ.)

10. Кычкин А.А., Кычкин А.К., Туйсов А.Г., и др. Прочностные свойства комбинированных полимерных композиционных пластиков из базальто- угле- тканей, полученных методом инфузии. В кн.: Лукин Е.С. (ред.) *EURASTRENCOLD-2023: Сборник трудов XI Евразийского симпозиума по проблемам прочности и ресурса в условиях климатически низких температур, посвященного 85-летию со дня рождения академика В.П. Ларионова, г. Якутск, 11–15 сентября 2023 года*. Киров: Межрегиональный центр

инновационных технологий в образовании; 2023. С. 324–329.

Kychkin A.A., Kychkin A.K., Tuisov A.G., et al. Strength properties of combined polymer composite plastics from basalt-carbon fabrics obtained by infusion. In: Lukin E.S. (ed.) *EURASTRENCOLD-2023: Proceedings of the 10th Eurasian Symposium on problems of strength and resource in conditions of climatic low temperatures, dedicated to the 85th anniversary of the Academician V.P. Larionov, Yakutsk, 11–15 September 2023*. Kirov: Interregional Center for Innovative Technologies in Education, 2023, pp. 324–329. (In Russ.)

11. Kychkin A.K., Erofeevskaya L.A., Kychkin A., et al. Investigation of biofouling and its effect on the properties of basalt fiber reinforced plastic rebars exposed to extremely cold climate conditions. *Polymers*. 2022;(14): 369. <https://doi.org/10.3390/polym14030369>.

12. Ерофеевская Л.А., Кычкин А.К., Кычкин А.А. и др. Исследование биологического воздействия на базальтопластиковую арматуру. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;27(1):153–167. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-1-153-167>.

Erofeevskaya L.A., Kychkin A.K., Kychkin A.A., et al. Research of biological effects on basaltoplastic rebars. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(1): 153–167. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-1-153-167>. (In Russ.)

13. Курс М.Г., Николаев Е.В., Абрамов Д.В. Натурно-ускоренные испытания металлических и неметаллических материалов: ключевые факторы и специализированные стенды. *Авиационные материалы и технологии*. 2019;54(1):66–73. HYPERLINK “<https://doi.org/10.18577/2071-9140-2019-0-1-66-73>”<https://doi.org/10.18577/2071-9140-2019-0-1-66-73>

Kurs M.G., Nikolaev E.V., Abramov D.V. Full-scale accelerated testing of metallic and non-metallic materials: key factors and specialized stands. *Aviation Materials and Technologies*. 2019;54(1):66–73. (In Russ.)

14. Chin J.W. Durability of Composites for Civil Structural Applications. *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*. 2007;80–97.

15. Николаев Е.В., Барботько С.Л., Андреева Н.П. и др. Комплексное исследование воздействия климатических и эксплуатационных факторов на новое поколение эпоксидного связующего и полимерных композиционных материалов на его основе. Часть 4. Натурные климатические испытания полимерных композиционных испытаний на основе эпоксидной матрицы. *Труды ВИАМ*. 2016;42(6):93–108.

Nikolaev E.V., Barbotko S.L., Andreeva N.P., et al. A comprehensive study of the impact of climatic and operational factors on a new generation of epoxy binders and polymer composite materials based on them. *Trudy VIAM*. 2016;42(6):93–108. (In Russ.)

16. Павлов М.Р., Николаев Е.В., Андреева Н.П. и др. К вопросу о методике оценки стойкости полимерных материалов к воздействию солнечного излучения (обзор). *Труды ВИАМ*. 2016;7(43):11.

Pavlov M.R., Nikolaev E.V., Andreeva N.P., et al. On the issue of methods for assessing the resistance of polymer materials to solar radiation (review). *Trudy VIAM*. 2016;7(43):11. (In Russ.)

17. Винокуров Г.Г., Стручков Н.Ф., Кычкин А.К. и др. Оценка предельных значений пористости базальтопластиковых композиционных материалов при климатических испытаниях в условиях Севера. *Химическая технология*. 2022;23(6):270–279. <https://doi.org/HYPERLINK> “<https://doi.org/10.31044/1684-5811-2022-23-6-270-279>”10.31044/1684-5811-2022-23-6-270-279

Vinokurov G.G., Struchkov N.F., Kychkin A.K., et al. Assessment of the limiting values of porosity of basalt-plastic composite materials during climatic tests in the North. *Khimicheskaya Tekhnologiya*. 2022;23(6):270–279.

<https://doi.org/10.31044/1684-5811-2022-23-6-270-279>. (In Russ.)

18. Васильева Е.Д., Ерофеевская Л.А., Стручков Н.Ф. и др. Поверхностная деструкция полимерных композиционных материалов в условиях Севера. В кн.: *Все-российская конференция “XXIV Всероссийское совещание по неорганическим и органосиликатным покрытиям”*: Сборник тезисов докладов, г. Санкт-Петербург, 05–09 июня 2023 года. Санкт-Петербург: ООО “Издательство “ЛЕМА”; 2023. С. 56–59.

Vasileva E.D., Erofeevskaya L.A., Struchkov N.F., et al. Surface destruction of polymer composite materials in the North. In: *All-Russian conference “24th All-Russian meeting on inorganic and organosilicate coatings”*: Proceedings, St. Petersburg, June 05–09, 2023. St. Petersburg: LEMA Publishing House LLC, 2023, pp. 56–59. (In Russ.)

Об авторах

КЫЧКИН Анатолий Константинович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-5276-5713>, ResearcherID: D-9234-2014, Scopus Author ID: 35300061400, SPIN: 2885-9914, e-mail: kychkinplasma@mail.ru

КЫЧКИН Айсен Анатольевич, кандидат технических наук, научный сотрудник, Якутский научный центр, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-1540-8140>, ResearcherID: ABA-4932-2020, Scopus Author ID: 57215690274, SPIN: 5724-1789, e-mail: icen.kychkin@mail.ru

СТРУЧКОВ Николай Федорович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-3078-0709>, ResearcherID: C-7166-2014, Scopus Author ID: 35335217600, SPIN: 4524-7540, e-mail: struchkov_n@rambler.ru

Вклад авторов

Кычкин А.К. – концептуализация, создание и редактирование рукописи, методология, администрация проекта; **Кычкин А.А.** – формальный анализ, написание – рецензирование и редактирование; **Стручков Н.Ф.** – формальный анализ, визуализация

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

KYCHKIN, Anatoly Konstantinovich, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-5276-5713>, ResearcherID: D-9234-2014, Scopus Author ID: 35300061400, SPIN: 2885-9914, e-mail: kychkinplasma@mail.ru

KYCHKIN, Aisen Anatolyevich, Cand. Sci. (Eng.), Researcher, Laboratory of Composite Materials to the Arctic and Subarctic, Yakut Scientific Centre of the SB RAS, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-1540-8140>, ResearcherID: ABA-4932-2020, Scopus Author ID: 57215690274, SPIN: 5724-1789, e-mail: icen.kychkin@mail.ru

STRUCHKOV, Nikolay Fedorovich, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Larionov Institute of the Physical and Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-3078-0709>, ResearcherID: C-7166-2014, Scopus Author ID: 35335217600, SPIN: 4524-7540, e-mail: struchkov_n@rambler.ru

Authors' contribution

Kychkin A.K. – conceptualization, writing—original draft preparation, methodology, project administration; **Kychkin A.A.** – formal analysis, writing—review and editing; **Struchkov N.F.** – formal analysis, visualization

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 08.07.2024

Поступила после рецензирования / Revised 18.02.2025

Принята к публикации / Accepted 20.02.2025



Оригинальная статья

Обработка быстрым джоулевым нагревом углеродных пленок, сформированных осаждением в плазме метана

Е. П. Неустроев[✉], А. Р. Прокопьев

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация
[✉]neustr@mail.ru

Аннотация

Практическое применение углеродных наноматериалов стимулирует искать новые методы эффективного синтеза. Одним из таких перспективных методов является способ получения графеноподобных материалов путем быстрого (флэш) джоулевого (или омического) нагрева углеродсодержащего прекурсора. В работе представлены результаты исследования воздействия флэш-джоулевого нагрева на аморфные углеродные пленки, сформированные осаждением в плазме метана на подложки Si/SiO₂. Нагрев образцов производился путем пропускания тока разряда конденсаторного блока емкостью 180 мФ, заряженных до напряжения от 100 до 300 В. При исследованиях были привлечены методы спектроскопии комбинационного рассеяния, сканирующей электронной микроскопии, рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии и вольт-амперных характеристик. Выявлено, что наиболее упорядоченной структурой является углеродная пленка после воздействия быстрого джоулевого нагрева при напряжении разряда 160 В. Также установлено, что флэш-нагрев приводит к значительному росту электропроводности и повышению гидрофобности материала. Наиболее высокие показатели наблюдались для углеродных пленок после разряда конденсаторного блока, заряженного до напряжения 160 В. Полученные результаты могут быть объяснены переходом исходной аморфной углеродной пленки в кристаллическую структуру с преобладанием sp²-гибридизированных связей, имеющую малое электрическое сопротивление. Причиной возникновения водоотталкивающих свойств может являться «эффект лотоса», вызванный формированием сферических частиц размерами до 1 мкм и их более крупных конгломератов на поверхности пленки. Полученные результаты могут быть использованы для синтеза из аморфного углерода графеноподобных наноматериалов с высокой гидрофобностью и электропроводностью. Материалы с такими характеристиками представляют интерес, в частности, при разработке конструкций всепогодных беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова: углеродные пленки, джоулев нагрев, кристаллизация, электропроводность, гидрофобность
Финансирование. Работа выполнена в рамках проекта «Создание гидрофобных покрытий с применением плазменного осаждения углерода и последующей низкотемпературной кристаллизации» Российского научного фонда № 24-22-20087 (региональный проект).

Благодарности. Авторы благодарны сотрудникам молодежной лаборатории «Север» за помощь при проведении флэш-обработок материалов.

Для цитирования: Неустроев Е.П., Прокопьев А.Р. Обработка быстрым джоулевым нагревом углеродных пленок, сформированных осаждением в плазме метана. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(1):162–170. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-1-162-170>

Original article

Fast Joule heating of carbon films formed by methane plasma deposition

Efim P. Neustroev[✉], Aisen R. Prokopen

Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation
[✉]neustr@mail.ru

Abstract

The practical application of carbon nanomaterials drives the search for new methods of efficient synthesis. One promising approach is the production of graphene-like materials through fast (flash) Joule heating (or Ohmic heating) of a carbon-containing precursor. In this study, we investigated the effects of flash Joule heating on amorphous carbon

films formed by deposition in methane plasma on Si/SiO₂ substrates. Joule heating was conducted via electric discharge through samples from a capacitor block with a total capacitance of 180 mF, charged to voltages ranging from 100 to 300 V. We used various methods, including Raman spectroscopy, scanning electron microscopy, X-ray energy-dispersive spectroscopy, and current-voltage characteristics. The findings revealed that the most ordered structure is the carbon film subjected to fast Joule heating at a discharge voltage of 160 V. Furthermore, flash heating significantly enhances both the electrical conductivity and hydrophobicity of the material. The highest values were observed for carbon films after the discharge of a capacitor bank charged to 160 V. These results can be attributed to the transition of the initial amorphous carbon film to a crystalline structure characterized by a predominance of sp²-hybridized bonds, which exhibit low electrical resistance. The emergence of water-repellent properties can be explained by the “lotus effect, the formation of spherical particles up to 1 μm in size and their larger conglomerates on the film surface. These findings can be used to synthesize graphene-like nanomaterials with high hydrophobicity and electrical conductivity from amorphous carbon. Such materials are particularly relevant for the development of designs for all-weather unmanned aerial vehicles.

Keywords: carbon films, Joule heating, crystallization, electrical conductivity, hydrophobicity

Funding. This study was conducted within the project “Creation of hydrophobic coatings using plasma deposition of carbon and subsequent low-temperature crystallization” of the Russian Science Foundation under Grant No. 24-22-20087 (regional project).

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the staff of the laboratory “Sever” for their assistance in conducting the flash processing of materials.

For citation: Neustroev E.P., Prokojev A.R. Fast Joule heating of carbon films formed by methane plasma deposition. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(1):162–170. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-162-170>

Введение

Арктическая зона в отличие от более умеренных широт выделяется значительными сезонными (от –60 до +40 °C) и суточными (до +20 °C) перепадами температуры. При суточных перепадах температуры или в условиях высокой влажности и сильных ветров материалы могут подвергаться неоднократным обледенениям. Кроме этого, к материалам предъявляются высокие требования к способности выдерживать высокие механические нагрузки. Этим требованиям во многом отвечают материалы на основе углерода, и поэтому они находят все более широкое применение при освоении территорий Арктики и Субарктики [1]. Углеродные материалы, в том числе композитные, во многом заменили металлические конструкции в беспилотных летательных аппаратах, ветряных электростанциях, в наземных и водных транспортных средствах благодаря своей легкости, прочности и технологичности [2–6].

Класс углеродных материалов очень широк, они различаются как по структуре, так и по методам формирования [7–9]. Углеродные фазы в таких материалах могут находиться в состояниях различной степени spⁿ-гибридизации, где n = 1, 2, 3 [7, 10], определяющих физические и химические свойства [7–10]. Отдельный интерес вызывает фаза с sp²-гибридизацией, формирующая плоские шестиугольные ячейки из атомов

углерода. Такой структурой обладают графит и графен. Уникальные свойства графена и графеноподобных материалов описаны во многих работах, например, [11–14]. Практическое применение таких материалов стимулирует исследователей постоянно искать новые методы эффективного синтеза. Одним из таких перспективных методов является получение графеноподобных материалов путем быстрого (меньше 1 с) флэш-джоулевого нагрева углеродсодержащего прекурсора [15–17]. Синтезированный таким способом материал может содержать упорядоченные агрегированные чешуйки sp²-доменов, атомы углерода в состоянии sp³-гибридизации и аморфного углерода (a:C), а также турбостратного графена (тГф) [15–17]. В турбостратной структуре графеновые чешуйки повернуты относительно друга, что приводит к увеличению межслойного расстояния и ослаблению ван-дер-ваальсовых взаимодействий между слоями [15, 18, 19]. При флэш-обработке такая неупорядоченная укладка возникает из-за кинетической фиксации графеновых слоев вследствие быстрого нагрева и охлаждения. Увеличенное межслоевое расстояние приводит к тому, что свойства тГф, несмотря на большое количество слоев, близки к свойствам однослойного графена [15–19]. Это сходство отражается в спектрах комбинационного рассеяния турбостратного графена и однослойного графена [15–19].

Исследования воздействия быстрого омического нагрева проведены преимущественно для полимерных отходов и природных материалов [15–26], которые имеют в составе различные примеси и включения. В то же время, методика крайне чувствительна к неоднородностям структуры. Это обусловлено влиянием таких включений на электропроводность материалов. В результате могут существенно измениться основные параметры процесса, такие как ток разряда, температура нагрева и длительность процесса. Для устранения влияния различных примесей и дефектов на условия обработки следует использовать однородные структуры. Аморфные углеродные пленки, осажденные в плазме метана, относятся к таким материалам. Кристаллы кремния с покрытием из диоксида кремния, обладающего диэлектрическими свойствами, имеют высокую термоустойчивость. Технологии получения высокочистых и структурно совершенных кристаллов кремния и диоксида кремния как основных материалов современной электроники являются наиболее отработанными. Поэтому представляет интерес использование материалов с известными и предсказуемыми свойствами для изучения воздействия быстрого омического нагрева на свойства углеродной пленки.

Известно, что аморфные углеродные пленки успешно кристаллизуют методами термического отжига, микроволнового излучения и др. Однако данные методы характеризуются длительностью проведения процесса, использованием катализаторов, дорогостоящего оборудования. Метод джоулевого нагрева, представленный в работе, заметно отличается от вышеперечисленных технологий графитизации аморфных структур коротким временем проведения процесса (за доли секунды).

Таким образом, целью данной работы стало исследование воздействия быстрого джоулевого нагрева на свойства углеродной аморфной пленки, осажденной в плазме метана на подложку SiO_2/Si .

Материалы и методы

В качестве исходного материала была использована углеродная пленка, полученная осаждением на поверхность подложки SiO_2/Si в плазме метана. Толщины SiO_2 и Si составляли 300 нм и 400 мкм соответственно. Процесс проводился в камере, предварительно откачанной до давления, не превышающего 0,005 мбар. Затем в камеру напускался поток метана со скоростью

60 $\text{см}^3/\text{мин}$, и давление возрастало до 0,08 мбар. Осаждение углерода проводилось в индуктивно связанной плазме мощностью 200 Вт в течение 6 минут. Температура образца в процессе обработки не превышала 50 °С. В результате осаждения формировались пленки аморфного углерода толщиной 70–80 нм, определенные с помощью рефлектометра Thetrametrisis SA FR-pOrtable (Греция). Для проведения процессов флэш-обработки углеродных пленок была использована установка быстрого джоулевого нагрева, схема которой приведена в работе [27]. В установке были заменены конденсаторы (Jianghai CD135, Китай) на более емкие в целях увеличения мощности разряда; таким образом, конденсаторный блок имел суммарную емкость 180 мФ и в данной работе заряжался от 100 до 300 В. Образец помещался в вакуумную камеру и обхватывался прижимными контактами. В связи с тем, что исходная углеродная пленка являлась изолятором, для инициализации разряда использовалась алюминиевая фольга, которая плавится при достижении температур выше 660 °С [28]. При таких температурах начинаются процессы графитизации и ток идет через углеродную пленку. При разряде длительностью меньше 100 мс конденсаторного блока через образец достигались температуры от 1800 до ~3000 °С в зависимости от напряжения разряда конденсаторного блока. Расчеты длительности и температуры процесса проводились в соответствии с формулой, приведенной в работе [17], и по закону Джоуля–Ленца при первом приближении. Быстрый джоулев нагрев проводился в атмосфере азота при давлении ~0,3 бар.

Для исследований спектров комбинационного рассеяния света (КРС) использовалась установка NTegra Spectra (Зеленоград, Россия) с длиной волны лазера 532 нм (2,32 эВ) и диаметром светового потока около 1 мкм. Мощность лазера устанавливалась не более 1 мВт для устранения перегрева исследуемых образцов. Сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) JEOL 7800F с приставкой рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии (РЭДС) использованы для изучения морфологии поверхности и проведения элементного анализа состава поверхности образцов. Измерения вольт-амперных характеристик полученных образцов были проведены двухзондовым методом при постоянном напряжении (ASEC-03, Зеленоград, Россия) и комнатной температуре.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены результаты исследований, проведенных с помощью NTeгра Spectra, до и после быстрой термической обработки образцов при различных напряжениях на образцах (100, 160 и 300 В). Исходная углеродная пленка (a:C) имеет широкую полосу фотолюминесценции, свойственную полимерному аморфному углероду [29, 30], которая полностью затмевает спектр КРС. Термическая флэш-обработка приводит к кристаллизации исходной аморфной пленки с формированием графитовой структуры. Это следует как из подавления интенсивной полосы фотолюминесценции, так и из появления характерных для кристаллической графитовой структуры пиков в спектрах КРС. Такими пиками являются G- (1580 см^{-1}) и D-пики (1350 см^{-1}), связанные с движением растяжения связей sp^2 -пары атомов С и «дыхательными» колебаниями шестиугольных ароматических колец атомов углерода соответственно [31, 32]. Движение атомов, вызывающее появление D-пика в идеальной решетке графита, является запрещенным, но становится возможным при наличии разупорядочения в плоской структуре шестиугольных ячеек графита (или графена) [32]. Кроме того, в спектрах КРС имеются полосы в окрестностях длин волн 2700 (2D-пик) и 2930 см^{-1} (D+G-пик) [32–34]. 2D-пик является обертоном D-пика, но для его наблюдения в спектрах КРС не требуется наличие нарушений структуры решетки [32, 33]. D+G-полоса является комбинацией D- и G-пиков и также активируется в спектрах КРС при наличии дефектов. Пики TS_1 (1886 см^{-1}) и TS_2 (2031 см^{-1}), соответствующие турбостратному графену [17, 25, 26], в спектрах КРС не обнаружены. Отношение интенсивностей пиков D и G (I_D/I_G) используется для оценки степени дефектности кристаллической структуры графита, и чем больше это отношение, тем выше разупорядоченность решетки [32].

Наименьшее значение I_D/I_G достигается при напряжении 160 В и составляет $\sim 0,8$, что свидетельствует о значительной степени упорядоченности сформированной структуры. При уменьшении и увеличении напряжения разряда отношения I_D/I_G пиков возрастают (~ 2 при 100 В и $\sim 1,1$ при 300 В). В первом случае это может быть вызвано недостаточной степенью кристаллизации, связанной с малой тепловой мощностью, выделяемой джоулевым нагревом. В то же время,

происходят перестройки в структуре, приводящие к формированию sp^2 -гибридизированных связей и подавляющие люминесценцию аморфного углерода. При большем напряжении (300 В) избыточная тепловая мощность может приводить к росту степени дефектообразования формируемых графитовых структур, на что указывает увеличение интенсивности D-пика. Отношение интенсивностей пиков 2D и G (I_{2D}/I_G) в спектрах КРС используется для определения количества слоев графена [26, 27, 32], где $I_{2D}/I_G < 1$ обозначает наличие многослойного мультиграфена, а $I_{2D}/I_G > 1$ означает присутствие однослойного графена [34]. Отношения интенсивностей этих пиков составили $\sim 1,2$ при 160 В и $\sim 0,5$ при 300 В. Как следует из полученных данных, при использовании напряжения 300 В преимущественно формируются многослойные графеновые чешуйки.

Изображения исходной поверхности аморфной пленки углерода после флэш-обработок при напряжениях батареи 160 В и 300 В, полученные методом СЭМ, приведены на рис. 2. Поверхность аморфного углерода, сформированная осаждением в плазме метана, имеет ровную и однородную структуру (см. рис. 2, а). Флэш-обработка при разряде батареи напряжением 160 В приводит к изменению морфологии поверхности (см. рис. 2, б, в). На поверхности можно выделить частицы округлой формы размерами до 1 мкм и их скопления более крупных размеров (см. рис. 2, в). Местами эти объекты слипаются между собой, образуя вытянутые структуры. Также

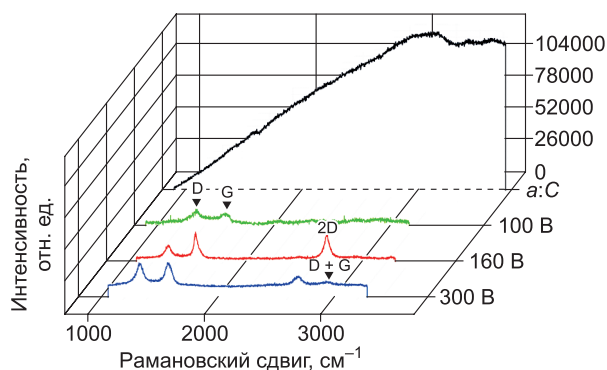


Рис. 1. Спектры КРС углеродной пленки после плазменного осаждения в метане (a:C) и флэш-обработки при напряжениях 100, 160 и 300 В

Fig. 1. Raman spectra of the initial (a:C film) and the carbon film after fast Joule heating at various voltages (100 V, 160 V, 300 V).

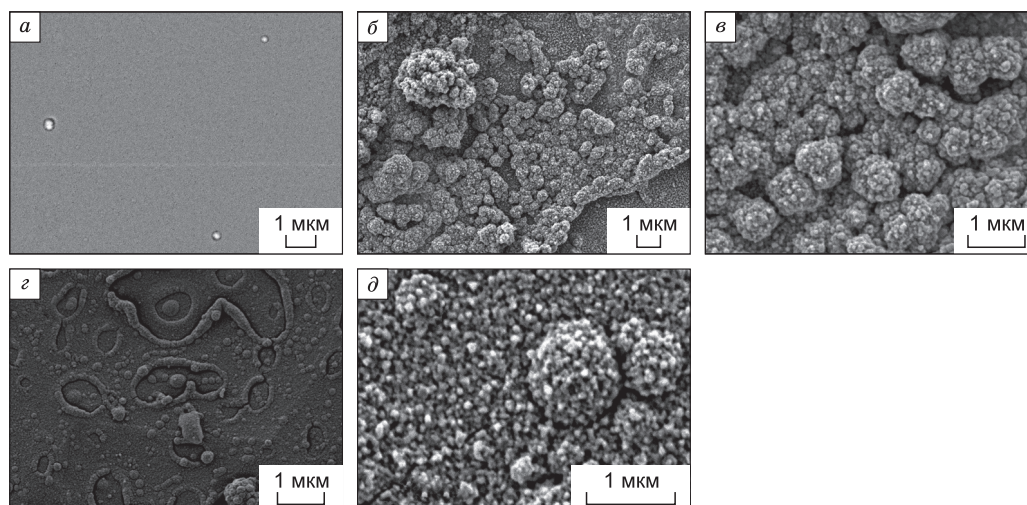


Рис. 2. Изображения, полученные методом СЭМ: *а* – исходной поверхности аморфной пленки углерода; *б* и *в* – после флэш-обработки при разрядке батареи напряжением 160 В при различных увеличениях; *г* и *д* – после флэш-обработки при разрядке батареи напряжением 300 В при различных увеличениях

Fig. 2. SEM images: *a*) Initial surface of the a:C-film; *б*, *в*) Subsequent fast Joule heating (160 V) at various magnifications; *г*, *д*) Subsequent fast Joule heating (300 V) at various magnifications

видно, что структура этих образований имеет зернистую структуру с диаметром зерен около 100 нм (см. рис. 2, *в*). При разряде батареи, заряженной до напряжения 300 В, на поверхности появляются крупные «кратеры» размерами от нескольких единиц до десятков микрометров (см. рис. 2, *г*). Количество шарообразных частиц становится заметно меньше, вместе с этим увеличивается концентрация мелких зерен размерами ~100 нм, которые покрывают всю поверхность (см. рис. 2, *д*). Увеличение числа таких зерен могло быть вызвано распадом крупных шарообразных частиц при увеличении напряжения воздействия, сопровождаемом ростом тока разряда и выделяемого количества теплоты.

Элементный анализ, проведенный методом РЭДС, показал высокое содержание кислорода в полученных пленках. Отношение процентного содержания атомов кислорода и углерода (О/С) в разных точках на поверхности пленок варьирует в пределах от 0,9 до 1,1 при напряжении разряда 160 В. При увеличении напряжения до 300 В это отношение увеличивается до 1,25. При джоулевом нагреве наиболее высокие температуры в пленках будут в каналах протекания электрического тока пробоя и спадать при удалении от этих областей. Разброс значений О/С можно объяснить неравномерным разогревом образца, приводящим к разным скоростям реакций, идущих с участием кислорода.

Для исследования гидрофильных свойств наносилась капля дистиллированной воды на поверхность образца. Измерения краевого угла смачивания поверхности пленки были проведены до (рис. 3, *а*) и после (рис. 3, *б*) флэш-обработки при напряжении 160 В. Как видно из рисунка, краевой угол смачивания ~70°, соответствующий аморфному углероду, возрастает до ~105° после обработки. Такой переход из гидрофильного состояния в гидрофобное можно объяснить «эффектом лотоса» [35], связанным с наличием большого числа сферических частиц и их агломераций на поверхности пленки.

Измерения вольт-амперных характеристик показали значительное уменьшение электрического сопротивления исходной аморфной углеродной пленки, являющейся изолятором ($R > 10^{12}$ Ом), до значений ~1,5 кОм/квадрат после флэш-обработки ($U = 160$ В). Наиболее вероятной причиной повышения электропроводности при тепловой обработке является трансформация углерода из аморфного состояния в графитизированную структуру, содержащую sp^2 -домены. Это предположение следует из данных спектроскопии комбинационного рассеяния, рассмотренных выше.

Как было показано в работе Стэнфорда и др. [25], при быстром джоулевом нагреве углеродных прекурсоров преимущественно формируются две углеродные структуры – это турбостратный флэш-графен и слои сморщенного

графена. Проведенное Стэнфордом и соавторами атомистическое моделирование показало, что при термическом отжиге преимущественно формируется сморщенный графен, в отличие от тГф, формируемого при прямом воздействии тока, проходящего через материал. Источником кристаллической структуры в обоих случаях служит подвижный углерод из аморфного слоя. В соответствии с этим механизмом на начальных этапах нагрева аморфный углерод, не имеющий жесткой структуры, подвергается быстрой кристаллизации, сопровождаемой дегазацией неуглеродных материалов, что приводит к образованию графеноподобной структуры. Быстрое охлаждение приводит к «застыванию» образовавшейся структуры. Этот процесс приводит к существенной трансформации спектров КРС, приводящей к преобладанию sp^2 -гибридизированных связей в структуре материала (см. рис.1).

Наблюдаемые в СЭМ шарообразные формирования подобны сферическим частицам, формируемым в углеродных материалах, после флэш-обработки являющихся зародышами тГф [25]. Отсутствие пиков TS_1 и TS_2 , связанных с присутствием тГф, в спектрах КРС может быть вызвано недостаточной тепловой мощностью, выделяемой при джоулевым нагреве, которая не приводит к образованию ориентированных турбостратных листов графена. Как следует из данных РЭДС, полученные пленки имеют высокие значения отношения содержания атомов кислорода к углероду (О/С) (от 0,9 до 1,25), существенно превышающие этот параметр для оксида графена (до 0,49) и чистого графена (0,052) [36]. Увеличение содержания кислорода в образцах может происходить во время или после флэш-обработки за счет реакций окисления. Кроме того, при термообработках активно выделяется водород, содержащийся в исходной аморфной пленке углерода [37], который замещается атомами кислорода.

Заключение

В работе проведено исследование воздействия быстрой джоулевой (омической) обработки на свойства аморфных углеродных пленок, сформированных осаждением в плазме метана. Для джоулевого нагрева исследуемых образцов использована конденсаторная батарея емкостью 180 мФ. Ток разряда конденсаторов, заряженных до напряжения в пределах от 100 до 300 В, вызывает

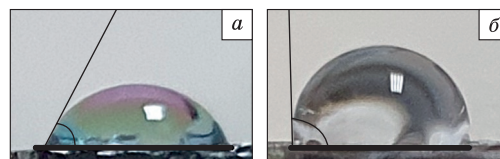


Рис. 3. Изменение гидрофильных свойств поверхности пленки до (а) и после (б) флэш обработки после разрядки конденсатора, заряженного до $U = 160$ В

Fig. 3. Changes in the hydrophilic properties of the film surface before (a) and after (b) fast Joule heating following the discharge a capacitor bank at $U = 160$ V

выделение значительного количества тепла и нагрев образца до ~ 3000 °С за короткий промежуток времени. В результате флэш-обработки происходят кардинальные изменения состояния поверхности и электропроводности, переход из гидрофильного состояния исходного аморфного материала в гидрофобное. Наиболее вероятной причиной повышения электропроводности (от состояния изолятора до 1,5 кОм/квадрат) является переход из аморфного состояния в графеноподобную кристаллическую структуру с преобладанием sp^2 -гибридизированных связей. Природа гидрофобных свойств объяснена «эффектом лотоса», вызванным формированием сферических частиц на поверхности пленок при флэш-обработке. Полученные результаты могут быть использованы для синтеза из аморфного углерода графеноподобных наноматериалов с высокой гидрофобностью и электропроводностью. В дальнейшем планируется развитие методики джоулевой флэш-обработки в сторону применения композитных углеродных материалов для достижения требуемых значений механических параметров и электропроводности. Такие материалы представляют интерес, в частности, при разработке конструкций всепогодных беспилотных летательных аппаратов.

Список литературы / References

1. Путилина П.М., Куцевич К.Е., Исаев А.Ю. Полимерные композиционные материалы на основе углеродных и стеклянных волокон для изготовления деталей беспилотных летательных аппаратов и перспективы их развития. *Труды ВИАМ*. 2023; 126(8):85–99. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2023-0-8-85-99>
- Putilina P.M., Kutsevich K.E., Isaev A.Yu. Carbon fiber-reinforced and glass fiber-reinforced polymer composites for the manufacture of components for unmanned aerial vehicles and their developing prospects. *Trudy VIAM*. 2023;126(8):85–99. (In Russ.)

2. Elfaham M.M., Mostafa A.M., Nasr G.M. Unmanned aerial vehicle (UAV) manufacturing materials: Synthesis, spectroscopic characterization and dynamic mechanical analysis (DMA). *Journal of Molecular Structure*. 2020;1201:127211. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2019.127211>
3. Lyu M.Y., Choi T.G. Research trends in polymer materials for use in lightweight vehicles. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2015; 16:213–220. <https://doi.org/10.1007/s12541-015-0029-x>
4. Zhang J., Lin G., Vaidya U., Wang H. Past, present and future prospective of global carbon fibre composite developments and applications *Composites Part B: Engineering*. 2023;250:110463. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110463>
5. Agarwal N., Rangamani A., Bhavsar K., et al. An overview of carbon-carbon composite materials and their applications. *Frontiers in Materials*. 2024;11: 1374034. <https://doi.org/10.3389/fmats.2024.1374034>
6. Mishnaevsky Jr.L., Branner K., Petersen H.N., et al. Materials for wind turbine blades: An overview. *Materials*. 2017;10(11):1285. <https://doi.org/10.3390/ma10111285>
7. Li J., Yin D., Qin Y. Carbon materials: structures, properties, synthesis and applications. *Manufacturing Review*. 2023;10:13. <https://doi.org/10.1051/mfreview/2023011>
8. Meunier V., Souza Filho A.G., Barros E.B., Dresselhaus M.S. Physical properties of low-dimensional sp²-based carbon nanostructures *Reviews of Modern Physics*. 2016;88(2):025005. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.88.025005>
9. Titirici M.M., White R.J., Brun N., et al. Sustainable carbon materials. *Chemical Society Reviews*. 2015;44(1): 250–290. <https://doi.org/10.1039/C4CS00232F>
10. Дроздов М.Н., Дроздов Ю.Н., Охалкин А.И. и др. Анализ углеродсодержащих материалов методом вторично-ионной масс-спектрометрии: содержание атомов углерода в sp²- и sp³-гибридных состояниях. *Письма в Журнал технической физики*. 2020;46(6):38–42. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2020.06.49164.18151>
11. Drozdov M.N., Drozdov Y.N., Okhapkin A.I., et al. Sims analysis of carbon-containing materials: content of carbon atoms in sp² and sp³ hybridization states. *Technical Physics Letters*. 2020;46(3):290–294. <https://doi.org/10.1134/S1063785020030190>
12. Papageorgiou D.G., Kinloch I.A., Young R.J. Mechanical properties of graphene and graphene-based nanocomposites. *Progress in Materials Science*. 2017;90: 75–127. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.07.004>
13. Hina M., Kamran K., Bashir S., et al. Extra ordinary properties of graphene. In: Subramaniam R.T., Kasi R., Bashir S., Kumar S.S.A. (eds) *Graphene. Engineering Materials*. Singapore; Springer; 2023, pp. 21–52. <https://doi.org/10.1007/978-981-99-1206-3>
14. Kumar A., Sharma K., Dixit A.R. A review of the mechanical and thermal properties of graphene and its hybrid polymer nanocomposites for structural applications. *Journal of Materials Science*. 2019;54(8):5992–6026. <https://doi.org/10.1007/s10853-018-03244-3>
15. Ji X., Xu Y., Zhang W., et al. Review of functionalization, structure and properties of graphene/polymer composite fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2016;87:29–45. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.04.011>
16. Luong D.X., Bets K.V., Algozeeb W.A., et al. Gram-scale bottom-up flash graphene synthesis. *Nature*. 2020;577(7792):647–651. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-1938-0>
17. Sun Z., Hu Y.H. Ultrafast, low-cost, and mass production of high-quality graphene. *Angewandte Chemie International Edition*. 2020;59(24):9232–9234. <https://doi.org/10.1002/anie.202002256>
18. Algozeeb W.A., Savas P.E., Luong D.X., et al. Flash graphene from plastic waste. *ACS nano*. 2020;14(11): 15595–15604. <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acsnano.0c06328>
19. Deng B., Eddy L., Wyss K.M., et al. Flash Joule heating for synthesis, upcycling and remediation. *Nature Reviews Clean Technology*. 2025;1:32–54. <https://doi.org/10.1038/s44359-024-00002-4>
20. Kokmat P., Surinlert P., Ruammitree A. Growth of high-purity and high-quality turbostratic graphene with different interlayer spacings. *ACS Omega*. 2023(8):4010–4018. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c06834>
21. Wyss K.M., Luong D.X., Tour J.M. Large-scale syntheses of 2D materials: flash joule heating and other methods. *Advanced Materials*. 2022;34(8):2106970. <https://doi.org/10.1002/adma.202106970>
22. Wyss K.M., De Kleine R.D., Couvreur R.L., et al. Upcycling end-of-life vehicle waste plastic into flash graphene. *Communications Engineering*. 2022;1(1):3. <https://doi.org/10.1038/s44172-022-00006-7>
23. Wyss K.M., Li J.T., Advincula P.A., et al. Upcycling of waste plastic into hybrid carbon nanomaterials. *Advanced Materials*. 2023;35(16):2209621. <https://doi.org/10.1002/adma.202209621>
24. Eddy L., Luong D.X., Beckham J.L., et al. Automated laboratory kilogram-scale graphene production from coal. *Small Methods*. 2024;8(3):2301144. <https://doi.org/10.1002/smt.202301144>
25. Huang P., Zhu R., Zhang X., Zhang W. Effect of free radicals and electric field on preparation of coal pitch-derived graphene using flash Joule heating. *Chemical Engineering Journal*. 2022;450:137999. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.137999>
26. Stanford M.G., Bets K.V., Luong D.X., et al. Flash graphene morphologies. *ACS Nano*. 2020;14(10):13691–13699. <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c05900>
27. Advincula P.A., Luong D.X., Chen W., et al. Flash graphene from rubber waste. *Carbon*. 2021;178:649–656. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.03.020>
28. Прокопьев А.Р., Васильева Е.Д., Лоскин Н.Н., Попов Д.Н. Получение быстрым джоулевым нагревом углеродных графенсодержащих порошков и их

применение в качестве модификаторов для стекловолнока. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(4):651–660. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-651-660>

Prokopyev A.R., Vasilieva E.D., Loskin N.N., Popov D.N. Production of graphene-containing carbon powders via fast Joule heating for fiberglass modification. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(4):651–660. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-651-660>

28. Kanel G.I., Razorenov S.V., Baumung K., et al. Dynamic yield and tensile strength of aluminum single crystals at temperatures up to the melting point. *Journal of Applied Physics*. 2001;90(1):136–143. <https://doi.org/10.1063/1.1374478>

29. Ferrari A.C., Robertson J. Resonant Raman spectroscopy of disordered, amorphous, and diamondlike carbon. *Physical Review B*. 2001;64(7):075414. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.64.075414>

30. Casiraghi C., Ferrari A.C., Robertson J. Raman spectroscopy of hydrogenated amorphous carbons. *Physical Review B*. 2005;72(8):085401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.72.085401>

31. Ferrari A.C., Robertson J. Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon *Physical Review B*. 2000;61(20):14095. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.61.14095>

32. Ferrari A.C., Basko D.M. Raman spectroscopy as a versatile tool for studying the properties of graphene.

Nature Nanotechnology. 2013;8(4):235–246. <https://doi.org/10.1038/nnano.2013.46>

33. Тимофеева Т.Е., Неустроев Е.П., Попов В.И. и др. Применение вейвлет-преобразований к анализу компонентов 2D-пика рамановского спектра трех- и четырехслойного графена. *Оптика и спектроскопия*. 2018;125(5):588–594. <https://doi.org/10.21883/OS.2018.11.46815.153-18>

Timofeeva T.E., Neustroev E.P., Popov V.I., et al. Application of wavelet transforms to the analysis of components of the 2D peak of the Raman spectrum of three- and four-layer graphene. *Optics and spectroscopy*. 2018;125(5):588–594. (In Russ.)

34. Liu X., Luo H. Preparation of coal-based graphene by flash joule heating. *ACS Omega*. 2024;9(2):2657–2663. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c07438>

35. Patankar N.A. Mimicking the lotus effect: influence of double roughness structures and slender pillars. *Langmuir*. 2004;20(19):8209–8213. <https://doi.org/10.1021/la048629t>

36. Randviir E.P., Brownson D.A., Gómez-Mingot M., et al. Electrochemistry of Q-graphene. *Nanoscale*. 2012;4(20):6470–6480. <https://doi.org/10.1039/C2NR31823G>

37. Neustroev E.P., Prokopyev A.R., Popov V.I., et al. Optical properties of thin films formed by carbon deposition in methane plasma and subsequent annealing *AIP Conference Proceedings*. 2021;2328(1):050017. <https://doi.org/10.1063/5.0042175>

Об авторах

НЕУСТРОЕВ Ефим Петрович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Радиофизика и электронные системы» Физико-технического института, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-8163-2012>, ResearcherID: A-3860-2014, Scopus Author ID: 6603429455, SPIN: 8488-1115, e-mail: neustr@mail.ru

ПРОКОПЬЕВ Айсен Русланович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Лаборатория «Дизайн-центр электроники «Север», Физико-технический институт, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-2212-2485>, ResearcherID: AFG-0633-2022, Scopus Author ID: 57200722270, SPIN: 7047-8695, e-mail: aisenprokopyev@mail.ru

Вклад авторов

Неустроев Е.П. – разработка концепции, верификация данных, создание черновика рукописи, редактирование рукописи, получение финансирования; **Прокопьев А.Р.** – проведение исследований, ресурсное обеспечение исследования

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

NEUSTROEV, Efim Petrovich, Cand. Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor, Institute of Physics and Technologies, Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-8163-2012>, ResearcherID: A-3860-2014, Scopus Author ID: 6603429455, SPIN: 8488-1115, e-mail: neustr@mail.ru

PROKOPIEV, Aisen Ruslanovich, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Laboratory “Design Center of Electronics “Sever”, Institute of Physics and Technologies, Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Fed-

Е. П. Неустроев, А. Р. Прокопьев • Обработка быстрым джоулевым нагревом углеродных пленок...

eration, <https://orcid.org/0000-0002-2212-2485>, ResearcherID: AFG-0633-2022, Scopus Author ID: 57200722270, SPIN: 7047-8695, e-mail: aisenprokopiev@mail.ru

Authors' contribution

Neustroev E.P. – conceptualisation, validation, writing – original draft, writing – review & editing, funding acquisition; **Prokopiev A.R.** – investigation, resources

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 17.09.2024

Поступила после рецензирования / Revised 27.02.2025

Принята к публикации / Accepted 03.03.2025

Редактор *О.В. Уарова*
Корректурa *З.А. Корнилова*
Компьютерная верстка *И.В. Мелехов*
Обложка *Б.В. Яковлев*

Дата выхода в свет 31.03.2025. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая
Усл. п.л. 19,75. Тираж 100 экз. Заказ № 935. Цена свободная.

Адрес редакции:

677007, г. Якутск, пр. Ленина, 33, тел. 8(4112) 33-57-11, <https://resar.elpub.ru>

Адрес издателя:

677007, г. Якутск, пр. Ленина, 33, ГБУ «Академия наук Республики Саха (Якутия)»,
тел. 8(4112) 33-57-11, e-mail: anrsya@mail.ru

Адрес типографии:

ООО «Компания «Дани-Алмас»
677008, г. Якутск, ул. Билибина, д. 10А
тел. 8(4112) 36-93-38, e-mail: ardah@inbox