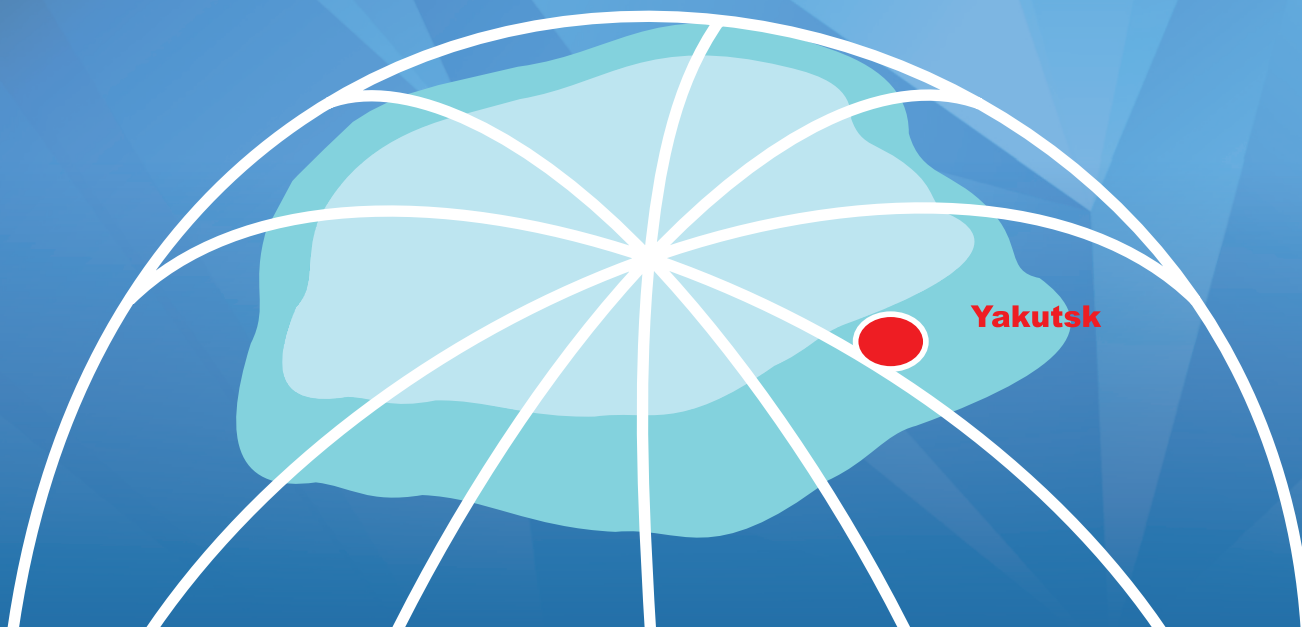


ISSN 2618-9712 (Print)
ISSN 2686-9683 (Online)



ПРИРОДНЫЕ РЕСУРСЫ АРКТИКИ И СУБАРКТИКИ

ARCTIC AND SUBARCTIC NATURAL RESOURCES

Tom/
Vol. **30** **2025**
№4
resar.elpub.ru

ПРИРОДНЫЕ РЕСУРСЫ АРКТИКИ И СУБАРКТИКИ

(до 2018 г. «Наука и образование»)

Научный журнал

2025, Том 30, № 4

Основан в 1996 г.
Выходит 4 раза в год

Учредители

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

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

Главный редактор

Л.Н. Владимиров

Член-корреспондент РАН

Заместители главного редактора:

В. Ю. Фридовский, член-корр. РАН

Н.С. Данилова, д-р биол. наук

Ответственный секретарь

З.А. Корнилова

Адрес редакции:

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

<https://resar.elpub.ru>

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

Входит в Перечень ВАК Минобрнауки РФ, «Белый список»
Включен в базу данных Russian Science Citation Index (RSCI)

© Академия наук РС(Я), 2025

© ФИЦ «Якутский научный центр», 2025

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

© Министерство образования и науки РС(Я), 2025

ISSN 2618-9712 (Print)

ISSN 2686-9683 (Online)

ARCTIC AND SUBARCTIC NATURAL RESOURCES

(until 2018 “Nauka i Obrazovanie”)

Scientific journal

2025, Vol. 30, No. 4

Founded in 1996
4 issues per year

Founders

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

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

Editor-in-Chief

L.N. Vladimirov

Corresponding Member, RAS

Deputy Editors-in-Chief:

V.Yu. Fridovsky

Corresponding Member, RAS

N.S. Danilova

Dr. Sci. (Biol.)

Executive Editor

Z.A. Kornilova

Editorial Office Address:

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

<https://resar.elpub.ru>

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

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

© Academy of Sciences of RS (Ya), 2025

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

© Ammosov North-Eastern Federal University, 2025

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

ПРИРОДНЫЕ РЕСУРСЫ АРКТИКИ И СУБАРКТИКИ

ARCTIC AND SUBARCTIC NATURAL RESOURCES

Редакционный совет:

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

Редакционная коллегия:

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

Науки о Земле

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

Биологические науки

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

Материаловедение и химические технологии

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

Editorial Council:

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

Editorial Board:

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

Earth Sciences

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

Biological Sciences

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

Materials Science and Chemical Technologies

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

Таксономическое разнообразие и биостратиграфическая последовательность кунгурских аммоноидей в Западном Верхоянье	
<i>Кутыгин Р.В.</i>	529
Минералого-геохимическая характеристика сростаний благородных и редких металлов из рудно-россыпных проявлений Анабарской антеклизы Сибирской платформы	
<i>Округин А.В., Герасимов Б.Б.</i>	540
Состав пирита золоторудного проявления Утанах в диафоритах Верхне-Тимптонского района Алдано-Станового щита (по данным РСМА и ЛА-ИСП-МС)	
<i>Лоскутов Е.Е., Фридовский В.Ю., Иванов Е.Е.</i>	559
Вещественный состав и U-Pb возраст магматических пород Эвотинского массива (Южная Якутия, Алдано-Становой щит)	
<i>Иванов М.С., Иванов А.И., Журавлев А.И., Лоскутов Е.Е., Кравченко А.А., Гузев В. Е., Терехов А.В.</i>	572
Особенности плотностей нефти в Непско-Ботуобинской антеклизе	
<i>Григорьева А.В., Сивцев А.И., Рожин И.И.</i>	589

Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

Брикетиrowание углей для обеспечения качественным топливом потребителей в Арктической зоне	
<i>Москаленко Т.В., Михеев В.А.</i>	599
Высокоэффективная теплоизоляция грунтовой дамбы в г. Якутск	
<i>Алексеева О. И., Большев К. Н., Литовко А. В.</i>	609

Биологические науки

Экология

Дальность разлета семян анемохорных деревьев Якутии	
<i>Исаев А.П., Габышева Л.П., Чикидов И.И.</i>	618
Накопление тяжелых металлов в почках и печени полевковых и бурозубок в зоне влияния Норильского промышленного района	
<i>Чысыма Р.Б., Прокудин А.В., Сергеева О.К.</i>	630

Биологические ресурсы

Черника Смолла (<i>Vaccinium smallii</i> a. Gray): биологические особенности и отбор форм из природных популяций острова Сахалин	
<i>Шейко В.В., Лебедев Д.В., Сорокопудов В.Н., Сорокопудова О.А.</i>	638
Морфобиологические особенности смородинно-крыжовникового гибрида в условиях Северо-Востока России	
<i>Коробкова Т. С.</i>	649

Биоресурсная коллекция генетического материала современных диких млекопитающих
Северо-Востока России

*Соловьева Н.А., Охлопков И.М., Павлова Н.И., Артемьева А.В., Кычкина О.И., Сидоров М.М.,
Сазонова М.И., Михайлова Н.А., Мамаев Н.В.* 657

Материаловедение и химические технологии

Климатическая деградация базальтопластиковых композиционных материалов
плоской формы: предельные значения пористости и статистическое моделирование
ее формирования

Кычкин А.К., Стручков Н.Ф., Винокуров Г.Г. 664

Влияние поверхностной обработки армирующих тканей на физико-механические
свойства эластомерных композитов

Марков А.Е., Дьяконов А.А., Туисов А.Г., Охлопкова А.А. 673

CONTENTS

Earth sciences

Geology and mineral resources

Taxonomic diversity and biostratigraphic sequence of Kungurian ammonoids in Western Verkhoyanie <i>Kutygin R.V.</i>	529
Mineralogical and geochemical characteristics of noble and rare-metal intergrowths from ore-placer occurrences, Anabar antecline, Siberian platform <i>Okrugin A.V., Gerasimov B.B.</i>	540
Chemical composition of pyrite from the Utanakh gold occurrence in diaphorites of the Verkhne-Timptonkiy area, Aldan-Stanovoy shield (based on EPMA and LA-ICP-MS data) <i>Loskutov E.E., Fridovsky V.Y., Ivanov E.E.</i>	559
Composition and U-Pb age of igneous rocks of the Evotinsky massif (Southern Yakutia, Aldan-Stanovoy shield) <i>Ivanov M.S., Ivanov A.I., Zhuravlev A.I., Loskutov E.E., Kravchenko A.A., Guzev V.E., Terekhov A.V.</i>	572
Features of oil densities in the Nepa-Botuoba antecline <i>Grigoreva A.V., Sivtsev A.I., Rozhin I.I.</i>	589

Engineering geology, permafrost and soil science

Coal briquetting for supplying quality fuel to consumers in the Arctic Zone <i>Moskalenko T.V., Mikheev V.A.</i>	599
High-efficiency thermal insulation for an embankment dike in Yakutsk <i>Alekseeva O.I., Bolshev K.N., Litovko A.V.</i>	609

Biological sciences

Ecology

Dispersal distance of anemochorous tree seeds in Yakutia <i>Isaev A.P., Gabysheva L.P., Chikidov I.I.</i>	618
Accumulation of heavy metals in the kidneys and liver of voles and shrews from the influence zone of the Norilsk industrial region <i>Chysyma R.B., Prokudin A.V., Sergeeva O.K.</i>	630

Biological resources

Small's blueberry (<i>Vaccinium smallii</i> A. Gray): Biological characteristics and selection of forms from natural populations on Sakhalin Island <i>Sheiko V.V., Lebedev D.V., Sorokopudov V.N., Sorokopudova O.A.</i>	638
Morphological and biological features of the currant-gooseberry hybrid in North-Eastern Russia conditions <i>Korobkova T.S.</i>	649

Bioresource collection of genetic material from modern wild mammals in North-Eastern Russia

Solovyeva N.A., Okhlopkov I.M., Pavlova N.I., Artemyeva A.V., Kychkina O.I., Sidorov M. M., Sazonova M.I., Mikhailova N.A., Mamaev N.V. 657

Materials science and chemical technologies

Climatic degradation of flat basalt-plastic composites: Limiting porosity values and statistical modeling of pore formation

Kychkin A.K., Struchkov N.F., Vinokurov G.G. 664

Effect of reinforcement surface treatment on the physico-mechanical properties of elastomeric composites

Markov A.E., Dyakonov A.A., Tuisov A.G., Okhlopkova A.A. 673

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Геология и полезные ископаемые

УДК 564.53 (571.5)

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-529-539>



Оригинальная статья

Таксономическое разнообразие и биостратиграфическая последовательность кунгурских аммоноидей в Западном Верхоянье

Р. В. Кутыгин

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

✉ rkutygin@mail.ru

Аннотация

Кунгурский этап в развитии аммоноидей характеризуется угасанием и вымиранием ранее доминировавших родов, а также возникновением морфогенетических трендов, способствовавших становлению новых семейств и подсемейств. Западное Верхоянье относится к очень редким в мире регионам с широким вертикальным и латеральным распространением кунгурских аммоноидей. Многолетние исследования опорных разрезов показали, что биостратиграфическое взаимоотношение ранее выделенных орольского и такамыкского аммоноидных комплексов здесь не столь отчетливое, как представлялось ранее. Новые материалы потребовали переосмысления стратиграфической последовательности и таксономического состава кунгурских аммоноидей в регионе, направленного на достижение основной цели – построение новой биостратиграфической шкалы по аммоноидеям. Для этого были ревизованы таксономическая принадлежность и стратиграфическая приуроченность изученных цефалопод. В кунгурских отложениях Западного Верхоянья (13 основных местонахождений) определены 10 видов аммоноидей, относящихся к семи родам семейств Paragastrioceratidae, Spirolegoceratidae, Mongoloceratidae и Medlicottiidae. При этом доминирующими являются парагастриоцератиды, представленные четырьмя родами и семью видами. Основным элементом кунгурского сообщества является род Tumaroceras. На основе анализа вертикального распространения аммоноидей в Западном Верхоянье установлено пять последовательных комплексов, которые характеризуют самостоятельные биостратиграфические подразделения: слои с Paratumaroceras? sp. nov., слои с Tumaroceras yakutorum, слои с Tumaroceras kashirzevi, слои с Epijuresanites musalitini и слои с Baraioceras stepanovi. Первые три биостратона охватывают нижнетумаринский региональный подгоризонт, а два последних – верхнетумаринский. Приводится основной разрез кунгурского яруса в Западном Верхоянье, расположенный в верховьях р. Дулгалах. Изображены обломок раковины и лопастная линия голотипа вида-индекса слоев с Baraioceras stepanovi. Исследования направлены на модернизацию Региональной стратиграфической схемы пермских отложений Верхоянья.

Ключевые слова: аммоноидеи, кунгурский ярус, тумаринский региональный горизонт, орольская свита, биостратиграфия, Baraioceras

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания ИГАБМ СО РАН (№ FUG-2024-0005).

Для цитирования: Кутыгин Р.В. Таксономическое разнообразие и биостратиграфическая последовательность кунгурских аммоноидей в Западном Верхоянье. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(4):529–539. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-529-539>

Taxonomic diversity and biostratigraphic sequence of Kungurian ammonoids in Western Verkhoyanie

Ruslan V. Kutugin

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

Abstract

The Kungurian stage of ammonoid development is marked by the decline and extinction of previously dominant genera, alongside the emergence of morphogenetic trends that contributed to the formation of new families and subfamilies. Western Verkhoyanie is one of the very few regions worldwide with a broad vertical and lateral distribution of Kungurian ammonoids. Long-term studies of reference sections have revealed that the biostratigraphic relationship between the previously identified Orol and Takamkyt ammonoid associations is less clear than previously assumed. New materials required a reevaluation of the stratigraphic sequence and taxonomic composition of Kungurian ammonoids in the region, with the primary goal of constructing a new biostratigraphic scale for ammonoids. To this end, the taxonomic affiliations and stratigraphic ranges of the studied cephalopods were revised. In the Kungurian deposits of Western Verkhoyanie (comprising 13 main localities), 10 ammonoid species were identified, belonging to seven genera within the families Paragastrioceratidae, Spirolegoceratidae, Mongoloceratidae, and Medlicottiidae. Paragastrioceratids predominate, representing four genera and seven species. The genus *Tumaroceras* constitutes the main component of the Kungurian community. Based on the analysis of the vertical distribution of ammonoids in Western Verkhoyanie, five successive complexes have been established, each representing distinct biostratigraphic units: *Paratumaroceras*? sp. nov. Beds, *Tumaroceras yakutorum* Beds, *Tumaroceras kashirzevi* Beds, *Epijuresanites musalitini* Beds, and *Baraioceras stepanovi* Beds. The first three biostratons correspond to the Lower Tumarian regional substage, while the latter two correspond to the Upper Tumarian regional substage. The key section of the Kungurian stage in Western Verkhoyanie, located in the upper reaches of the Dulgalakh River, is presented. A shell fragment and suture line of the holotype of the index species from the *Baraioceras stepanovi* Beds are illustrated. Ultimately, this research contributes to the modernization of the Regional Stratigraphic Scheme of the Permian deposits of Verkhoyanie.

Keywords: ammonoids, Kungurian stage, Tumarian regional stage, Orol Formation, biostratigraphy, *Baraioceras*

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

For citation: Kutugin R.V. Taxonomic diversity and biostratigraphic sequence of Kungurian ammonoids in Western Verkhoyanie. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(4):529–539. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-529-539>

Введение

Кунгурский этап развития аммоноидей приходился на период интенсивной дифференциации морских бассейнов и возникновения большого числа изолированных экологических ниш [1]. Его характерными чертами стали угасание и вымирание многих ранее доминировавших родовых таксонов, а также возникновение необычных морфогенетических трендов, повлекших за собой развитие новых семейств и подсемейств. Из-за резкой географической разрозненности ареалов и относительно слабой степени изученности кунгурских аммоноидей их корреляционный по-

тенциал не столь высок, как у таковых подстилающего артинского яруса. Тем не менее, стратиграфическое значение аммоноидей для кунгурской стратиграфии в последние десятилетия неизменно растет благодаря новым работам, посвященным систематике и биостратиграфии рассматриваемой группы беспозвоночных. В Верхоянье кунгурский этап был выявлен В.Н. Андриановым, который в фундаментальной монографии [2] обосновал объединение гониатитов и пролеканитов тумаринского регионального горизонта (кунгурский ярус Верхоянья) в тумаринский аммоноидный комплекс. Этот комплекс был охарактеризован

представителями родов *Neouddenites*, *Paragastrioceras*, *Tumaroceras*, *Epijuresanites*, *Baraioceras* и *Popanoceras*. За последующие четыре десятилетия родовой состав изменился незначительно: выделены новые роды *Paratumaroceras* [3] и *Biarmiceras* [4], к которым были отнесены соответственно специфические тумароцерасы и все верхоянские попаноцерасы.

Ранее тумаринский комплекс предлагалось разделить на два подкомплекса – орольский и такамкытский [5] по присутствию аммоноидей в одноименных свитах тумаринского горизонта. Позднее ранг этих подкомплексов был повышен до самостоятельных комплексов [6]. По присутствию каждого из этих комплексов в кунгурском ярусе Верхоянья выделялись слои с *Tumaroceras yakutorum* и слои с *Epijuresanites musalitini* [5, 7]. Однако последующие исследования типовых разрезов морского кунгура в Западном Верхоянье показали, что биостратиграфические взаимоотношения между орольским и такамкытским комплексами не столь отчетливые, как казалось ранее. Изменения в аммоноидной части Региональной стратиграфической схемы кунгурского яруса Верхоянья уже предлагались в обзорной работе [8], но без приведения разъяснений. Принципиальные уточнения положения нижних границ тумаринского горизонта и кунгурского яруса обоснованы в отдельной статье [9]. Накопленные за последние десятилетия материалы позволили переосмыслить вертикальное распределение и таксономический состав кунгурских аммоноидей в регионе и построить новую биостратиграфическую схему, рассмотренную ниже.

Материалы и методы

Для выяснения таксономического разнообразия аммоноидей первостепенной является корректная диагностика палеонтологических образцов, большая часть которых представлена раковинами, заключенными в крепкие кремнисто-карбонатно-глинистые конкреции. При определении видов основное внимание уделялось трем ключевым признакам: лопастной линии, форме раковины и скульптуре [10]. Установление филогенетических связей и реконструкция морфогенетических трендов основывались на изучении онтогенетических преобразований трех вышеперечисленных признаков. Для выяснения вертикального распределения таксонов и комплексов аммоноидей требуются точные географические и стратиграфические привязки палеонтологических образцов в конкретных разрезах, а также чет-

кие представления о литологическом делении кунгурских отложений в регионе. Совместно с И.В. Будниковым мною были изучены стратотипы и опорные разрезы большинства нижнепермских свит Западного Верхоянья [7], уточнены границы и объемы местных подразделений, повторены ранее известные находки аммоноидей и открыт ряд новых местонахождений. Для уточнения местонахождений аммоноидей, ранее обнаруженных различными геологами, были просмотрены многочисленные производственные и тематические отчеты, хранящиеся в ГУП «Сахагеоинформ». При этом были проанализированы материалы, касающиеся конкретных разрезов, содержащих аммоноидей. Все перечисленное позволило сформировать представления о таксономическом разнообразии и вертикальной последовательности кунгурских аммоноидей в Западном Верхоянье, что и стало основой для построения новой аммоноидной биостратиграфической схемы рассматриваемого возрастного среза.

Результаты и обсуждение

Верхоянье является одним из немногих в мире регионов с широким латеральным и вертикальным распространением кунгурских аммоноидей [2, 11]. Согласно недавно составленной базе данных («Находки пермских аммоноидей в Сибири», свидетельство о регистрации RU 2025620171 от 13.01.2025.), здесь зафиксировано более 35 местонахождений, значительная часть которых приходится на Западное Верхоянье, тогда как в Северном и Южном Верхоянье находки единичны [2, 7]. Но и в Западном Верхоянье, представленном четырьмя структурно-фациальными зонами (СФЗ) [8], кунгурские аммоноидеи встречаются не повсеместно. В двух прибрежных зонах (Кобычанская и Тукуланская) находки аммоноидей рассматриваемого возраста неизвестны. Все зафиксированные местонахождения приходятся на Куранахскую и Бараинскую СФЗ, характеризующиеся более мористыми осадками, поскольку их территории в раннепермское время располагались в шельфовой зоне крупного моря, омывавшего берега Ангарида. Подавляющее большинство находок кунгурских аммоноидей характерно для Куранахской СФЗ [7, 12], тогда как Бараинская СФЗ существенно беднее.

В рамках настоящей статьи нет необходимости рассматривать каждое местонахождение аммоноидей в регионе, поскольку многие из них расположены недалеко друг от друга и относятся

ся к общим слоям и пачкам – такие местонахождения объединены. Также в одно общее местонахождение объединялись находки аммоноидей из различных стратиграфических уровней в одном опорном разрезе. В результате такой оптимизации распределения находок было получено 13 ключевых местонахождений (рис. 1), относимых к Куранахской (бассейны рек Дулгалах и Тумара) и Бараинской (бассейны рек Сартанг, Барайы и Уяна) структурно-фациальным зонам:

1. Река Эчий в районе устья р. Тасындье. Средняя пачка орольской свиты – *Tumaroceras yakutorum* Ruzhencev, *T. volkodavi* Andrianov.

2. Бассейн р. Аркачан.

2а) нижняя пачка орольской свиты – *Paragastrioceras* cf. *karpinskii* (Fredericks);

2б) средняя пачка орольской свиты – *Tumaroceras yakutorum* Ruzhencev, *Biarmiceras tumarensense* (Ruzhencev).

3–5. Верховья р. Дулгалах.

3. Бассейн р. Орол.

3а) нижняя пачка орольской свиты – *Paragastrioceras* cf. *karpinskii* (Fredericks), *Paratumaroceras?* sp. nov.;

3б) средняя пачка орольской свиты – *Tumaroceras yakutorum* Ruzhencev, *Biarmiceras tumarensense* (Ruzhencev), *Neouddenites andrianovi* Ruzhencev.

4. Левый берег р. Дулгалах ниже устья р. Маган-Хайа.

4а) средняя пачка орольской свиты – *Tumaroceras yakutorum* Ruzhencev, *Biarmiceras tumarensense* (Ruzhencev);

4б) верхняя пачка орольской свиты – *Tumaroceras kashirzevi* Andrianov;

4с) такамкытская свита – *Epijuresanites musalitini* Popow.

5. Верховья р. Отто-Сала, средняя пачка орольской свиты – *Tumaroceras yakutorum* Ruzhencev, *Biarmiceras tumarensense* (Ruzhencev).

6–9. Верховья р. Тумара.

6. Верховья р. Дьеленджа:

6а) средняя пачка орольской свиты – *Tumaroceras yakutorum* Ruzhencev, *Paratumaroceras ruzhencevi* Kutugin, *Biarmiceras tumarensense* (Ruzhencev), *Neouddenites andrianovi* Ruzhencev;

6б) верхняя пачка орольской свиты – *Tumaroceras kashirzevi* Andrianov.

7. Низовья р. Дьеленджа, орольская свита: *andrianovi* Ruzhencev.

8. Низовья р. Аллара-Хадарынья.

8а) средняя пачка орольской свиты – *Tumaroceras yakutorum* Ruzhencev;

8б) верхняя пачка орольской свиты – *Tumaroceras kashirzevi* Andrianov.

9. Руч. Учагын. Такамкытская свита – *Epijuresanites musalitini* Popow.

10. Верховья р. Сартанг, нижнетумаринская подсвита – *Tumaroceras yakutorum* Ruzhencev.

11, 12. Верховья р. Барайы.

11. Бассейн р. Нади.

11а) средняя часть нижнетумаринской подсвиты – *Tumaroceras yakutorum* Ruzhencev;

11б) верхняя часть нижнетумаринской подсвиты – *Tumaroceras kashirzevi* Andrianov.

12. Низовья р. Имтанья. Аллювий в поле развития верхней части верхнетумаринской подсвиты – *Baraioceras stepanovi* Andrianov.

13. Верховья р. Уяна. Нижнетумаринская подсвита – *Tumaroceras yakutorum* Ruzhencev.

Судя по приведенному списку, в кунгурских отложениях Западного Верхоянья выявлено 10 видов аммоноидей, относящихся к семи родам семейств *Paragastrioceratidae*, *Spirolegoceratidae*, *Monolococeratidae* и *Medlicottiidae*.

В таксономическом составе наблюдается явное доминирование парагастриоцератид, встречаемых почти во всех перечисленных местонахождениях и представленных четырьмя родами и семью видами. Ключевым элементом является род *Tumaroceras* с тремя видами: *T. yakutorum* Ruzhencev (10 местонахождений), *T. volkodavi* Andrianov (1 местонахождение) и *T. kashirzevi* Andrianov (4 местонахождения). В редких местонахождениях Куранахской СФЗ отмечены представители родов *Paragastrioceras* (*P.* cf. *karpinskii* (Fredericks)) и *Paratumaroceras* (*P.*? sp. nov. и *P. ruzhencevi* Kutugin). Четвертый представитель семейства – род *Baraioceras* (с видом *B. stepanovi* Andrianov) в Западном Верхоянье пока известен лишь в Бараинской СФЗ, благодаря единственной находке, рассмотренной ниже.

Вслед за В.Е. Руженцевым [13] отечественные исследователи традиционно рассматривают род *Epijuresanites* в качестве исходного в преимущественно среднепермском семействе *Spirolegoceratidae* [14–16; и др.]. Другой точки зрения придерживаются иностранные коллеги [17], которые эпиюресанитов относят к семейству *Paragastrioceratidae*. Для окончательного решения вопроса о таксономической принадлежности

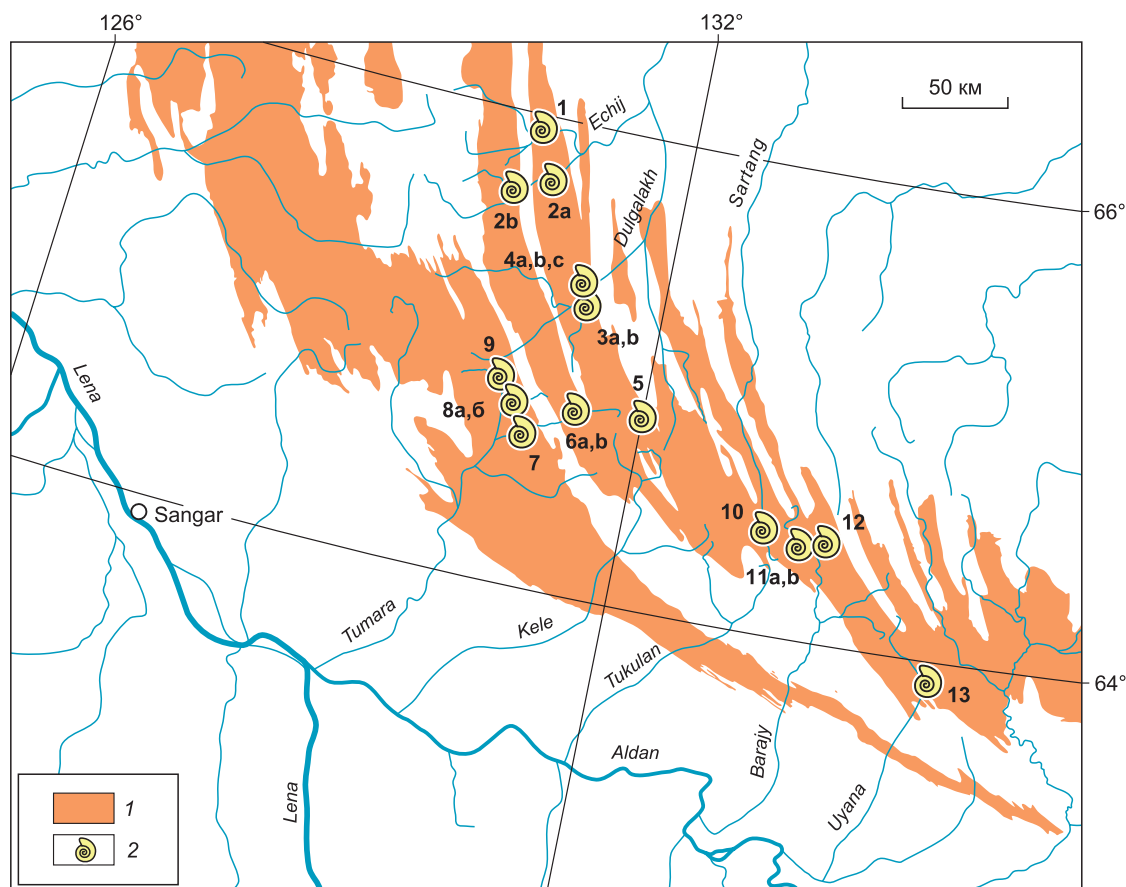


Рис. 1. Основные местонахождения кунгурских аммоидей в Западном Верхоянье: 1 – распространение пермских отложений на дневной поверхности; 2 – местонахождения (1–13 см. в тексте).

Fig. 1. The main localities of Kungurian ammonoids in Western Verkhoyanie: 1 – distribution of Permian deposits on the day surface; 2 – localities (1–13 see in text).

сти стратиграфически важного рода *Epijuresanites* необходима тщательная ревизия не только эпиюресанитов, но также и морфологически близких к ним тумароцерасов. В Западном Верхоянье эпиюресаниты известны лишь в двух местонахождениях Куранахской СФЗ, расположенных в своде центральной части Верхоянья.

Род *Biarmiceras*, являющийся исходным в преимущественно среднепермском семействе Mongoloceratidae [4, 17, 18], в кунгурском ярусе региона представлен лишь одним видом *B. tumarense* (Ruzhencev), известным в пяти местонахождениях Куранахской СФЗ. В отличие от многочисленных тумароцерасов, биармицерасы здесь редки, но они являются регулярным сопутствующим элементом во всех основных аммоидных выборках. Важно отметить, что вне Западного Верхоянья на Северо-Востоке России монголоцератида больше нигде не встречены.

Все вышерассмотренные аммоидеи являются гониатитами, тогда как единственным

представителем пролеканитов, достоверно установленным в кунгурских отложениях Западного Верхоянья, является выделенный в верховьях р. Тумара род *Neouddenites* с видом *N. andrianovi* Ruzhencev [19]. При очень широком географическом распространении неоуддениты встречаются крайне редко не только в Западном Верхоянье (три основных местонахождения в кунгурском ярусе), но и во всем мире [16, 20].

Из вышеприведенного списка местонахождений устанавливается последовательность пяти аммоидных комплексов, по распространению которых в кунгурском ярусе Верхоянья можно выделить пять биостратиграфических подразделений, обозначаемых как слои с аммоидеями (рис. 2). Полученное деление оказалось существенно подробнее принятой в Международной хроностратиграфической шкале аммоидной зональности, согласно которой кунгурский ярус состоит из генозон *Uraloceras* (верхняя часть) и *Pseudovidrioceras* [21].

МСШ			ЗАПАДНОЕ ВЕРХОЯНИЕ			Решения..., 2009 [7]			Авторский вариант		
Система	Отдел	Ярус	Куранахская СФЗ		Бараинская СФЗ	Горизонт	Подгоризонт	Слои с ам-моидами	Горизонт	Подгоризонт	Слои с ам-моидами
			Басс. р. Дулгалах	Басс. р. Тумара	Басс. р. Барайы	Горизонт	Подгоризонт	Слои с ам-моидами	Горизонт	Подгоризонт	Слои с ам-моидами
ПЕРМСКАЯ	ПРИУРАЛЬСКИЙ	КУНГУРСКИЙ	Кадачанская свита <i>Аммоиоидеи не известны</i>	Кадачанская свита <i>Аммоиоидеи не известны</i>	Верхняя часть верхне-тумаринской подсвиты <i>Baraioceras stepanovi</i> Andrianov	Тумаринский	Верхний	<i>Epijuresanites musalitini</i>	Тумаринский	Верхний	<i>Baraioceras stepanovi</i>
			Такамкытская свита <i>Epijuresanites musalitini</i> Popov	Такамкытская свита <i>Epijuresanites musalitini</i> Popov	Нижняя часть верхне-тумаринской подсвиты <i>Аммоиоидеи не известны</i>						<i>Epijuresanites musalitini</i>
			Верхняя пачка орольской свиты <i>Tumaroceras kashirzevi</i> Andrianov	Верхняя пачка орольской свиты <i>Tumaroceras kashirzevi</i> Andrianov	Верхняя часть нижне-тумаринской подсвиты <i>Tumaroceras kashirzevi</i> Andrianov						<i>Tumaroceras kashirzevi</i>
			Средняя пачка орольской свиты <i>Tumaroceras yakutorum</i> Ruzhencev, <i>T. volkodavi</i> Andrianov, <i>Biarmiceras tumarense</i> (Ruzhencev), <i>Neouddenites andrianovi</i> Ruzhencev	Средняя пачка орольской свиты <i>Tumaroceras yakutorum</i> Ruzhencev, <i>Paratumaroceras ruzhencevi</i> Kutugin, <i>Biarmiceras tumarense</i> (Ruzhencev), <i>Neouddenites andrianovi</i> Ruzhencev	Средняя часть нижне-тумаринской подсвиты <i>Tumaroceras yakutorum</i> Ruzhencev						<i>Tumaroceras yakutorum</i>
			Нижняя пачка орольской свиты <i>Paragastrioceras</i> cf. <i>karpinskii</i> (Fredericks), <i>Paratumaroceras?</i> sp. nov.	<i>Аммоиоидеи не известны</i>	Нижняя часть нижне-тумаринской подсвиты <i>Аммоиоидеи не известны</i>	Эчийский (верхняя часть)					<i>Paratumaroceras?</i> sp. nov.

Рис. 2. Вертикальное распределение комплексов аммоиоидей и два варианта биостратиграфического деления кунгурских отложений Западного Верхоянья

Fig. 2. Vertical distribution of ammonoid associations and two variants of biostratigraphic division of the Kungurian deposits in Western Verkhoyanie

Слои с *Paratumaroceras?* sp. nov. являются нижним биостратомом тумаринского регионально-го горизонта [9]. Формирование осадков нижней пачки орольской свиты было связано с началом крупной трансгрессии, на фоне которой в Верхоянье происходило становление тумаринского аммоиоидного сообщества. Для рассматриваемых биостратиграфических слоев характерно появление первой кунгурской формы – древнейшего представителя рода *Paratumaroceras* (*P.?* sp. nov.), характеризующегося наличием вентрального синуса в поперечном орнаменте юной раковины, подобно первым вентралносинусным клазиуралоцерасам из основания кунгурского яруса Южного Урала [22, 23]. Важной чертой рассматриваемых слоев является наличие артинского элемента – *Paragastrioceras* cf. *karpinskii* (Fredericks). Вид *P. karpinskii* широко распространен в байгенджинском горизонте (верхний артин) Южного Урала [24]. Также богаты находками этого вида и разрезы артинского яруса на Сред-

нем Урале [25], где раковины *P. karpinskii* достигают предельных для парагастриоцерасов размеров (более 10 см в диаметре). По всей видимости, с началом трансгрессии на рубеже артина и кунгура представители вида *P. karpinskii* мигрировали из Уральской палеоакватории в Западно-Верхоянскую. Находки раннеорольских аммоиоидей (хабахско-тумаринский комплекс) чрезвычайно редки и характерны для единичных разрезов с наиболее мористой базальной частью тумаринского горизонта, которые расположены в бассейне р. Дулгалах восточного склона Верхоянского хребта. Типичным является разрез на р. Орл правобережья р. Дулгалах (басс. р. Хабах) [9], в котором наблюдаются отчетливые стратиграфические взаимоотношения с подстилающей хабахской свитой и с перекрывающим биостратомом, рассмотренным ниже.

Слои с *Tumaroceras yakutorum* в Западном Верхоянье характеризуются наиболее богатыми находками, что видно из ранее приведенного

списка местонахождений. Это единственное в кунгурском ярусе региона биостратиграфическое подразделение, содержащее массовые скопления амmonoидей. Наибольшее число локальных местонахождений приходится на басс. р. Дьселенджа, где в крыльях крупных складок имеются выходы орольской свиты, наблюдаемые в многочисленных скальных обнажениях [20]. Коллекция среднеорольских амmonoидей (орольский комплекс) насчитывает несколько сотен экземпляров. Однако их препарирование и определение осложнены по причине необычной прочности вмещающей породы в совокупности с хрупкостью раковин моллюсков, камеры фрагмоконов которых нередко пустотелые. Аналогичной сохранностью обладают и образцы амmonoидей из басс. р. Дулгалах. В связи с этим, к настоящему времени в слоях с *T. yakutorum* Куранахской СФЗ уверенно определены немногим более 50 экземпляров, которые отнесены к пяти видам: *Tumaroceras yakutorum* Ruzhencev, *T. volkodavi* Andrianov, *Paratumaroceras ruzhencevi* Kutugin, *Biarmiceras tumarensense* (Ruzhencev) и *Neouddenites andrianovi* Ruzhencev. Однако совершенствование методики препарирования образцов вселяет надежды на дальнейшее расширение представлений о таксономическом составе рассматриваемого комплекса. В средней пачке орольской свиты доминирующее значение имеет вид-индекс, характерный почти для всех известных местонахождений. Помимо Западного Верхоянья, единичные находки *T. yakutorum* отмечаются в северо- и южно-верхоянских разрезах [2, 26]. Приведенный комплекс является существенно эндемичным, поскольку за пределами Верхоянья известен только вид *T. volkodavi*, встреченный в лиурьягинской свите Пай-Хоя [27].

Длительное время считалось, что наиболее продвинутый вид рода *Tumaroceras* (*T. kashirzevi* Andrianov) характерен для такамкытской свиты Западного Верхоянья, охарактеризованной также видом *Epijuresanites musalitini* Popow [2, 5; и др.]. Однако проведенный анализ местонахождений кунгурских амmonoидей показал, что достоверные находки вида *T. kashirzevi* приходятся на верхнюю пачку орольской свиты, т. е. ниже уровня распространения *E. musalitini* (такамкытская свита) и выше находок *T. yakutorum* (средняя пачка орольской свиты). Прежде всего это подтверждается нашими данными, полученными при изучении ключевого разреза тумаринского горизонта, расположенного в верховьях р. Дулгалах

(рис. 3). На основании выявленной геохронологической разобщенности вышеперечисленных комплексов предлагается между слоями с *T. yakutorum* и слоями с *E. musalitini* выделять самостоятельное биостратиграфическое подразделение, обозначаемое как **слои с *Tumaroceras kashirzevi***. Поскольку в этом биостратоне известен только один вид, логично предположить, что в конце орольского времени в Верхоянском бассейне происходило угасание таксономического разнообразия кунгурского сообщества амmonoидей. Но при этом наблюдается расширение ареала доминирующего вида: если *T. yakutorum* известен лишь в Верхоянье, то *T. kashirzevi* обнаружен также на хребте Арга-Тас (верховья р. Рассоха) и в Омолонском регионе (бассейны рек Омолон и Гижига). Следовательно, слои с *Tumaroceras kashirzevi* распространены на существенно большей территории Северо-Востока России, чем подстилающие слои с *Tumaroceras yakutorum*.

Находки амmonoидей в такамкытской свите крайне редки, поскольку ее формирование связано с крупной регрессией, во время которой условия для существования амmonoидей в Верхоянском бассейне были малоблагоприятными. Нижняя часть верхнетумаринского подгоризонта охарактеризована лишь видом-индексом **слоев с *Epijuresanites musalitini***. В Западном Верхоянье все находки *Epijuresanites musalitini* Popow приходятся на верховья рек Тумара и Дулгалах (осевая часть Западного Верхоянья), где и устанавливается рассматриваемое биостратиграфическое подразделение. На западном склоне Верхоянского хребта аналоги рассматриваемых слоев определяются по литологическим особенностям средней части тумаринской ритмосвиты и ее возрастных аналогов [2, 28], а также по присутствию в разрезе брахиопод зоны *Megousia kuliki* [29]. За пределами Западного Верхоянья вид-индекс известен в догниканской свите Южного Верхоянья [26] и в средней части озернинской толщи Приколмыя [2]. Имеются указания на присутствие эпиюресанитов в среднеджигдалинской подсвите Омолонского массива [30], однако эти сведения требуют проверки.

Достоверные находки амmonoидей в разрезах верхней части тумаринского горизонта неизвестны, поэтому данный интервал традиционно рассматривался в качестве не охарактеризованных амmonoидеями «нижнемугачанских» или «кадачанских» слоев [5, 6]. Ранее В.Н. Андрианов [2]

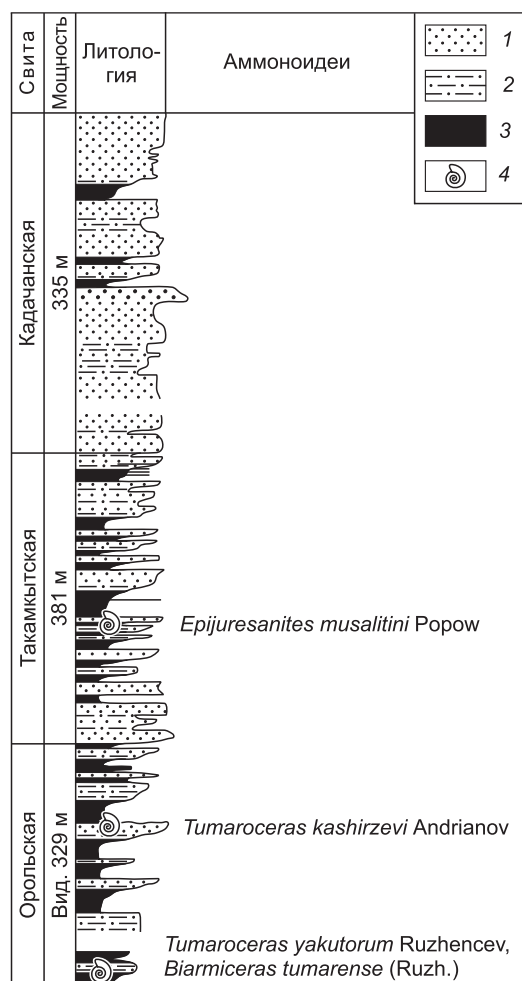


Рис. 3. Находки аммоноидей в разрезе кунгурского яруса на левом берегу р. Дулгалах ниже устья р. Маган-Хая: 1 – песчаники, 2 – крупнозернистые алевролиты, 3 – аргиллиты и мелкозернистые алевролиты, 4 – уровни находок аммоноидей. Разрез составлен И.В. Будниковым и Р.В. Кутыгиным в 2000 г.

Fig. 3. Ammonoid finds in the Kungurian stage section on the left bank of the Dulgalakh River below the mouth of the Magan-Khaya River: 1 – sandstones, 2 – coarse-grained siltstones, 3 – mudstones and fine-grained siltstones, 4 – ammonoid find levels. Compiled by I.V. Budnikov and R.V. Kutugin in 2000

описал необычный вид *Baraioceras stepanovi* Andrianov по единственному обломку раковины, обнаруженному в аллювии р. Имтанья, верховья р. Барайы (рис. 4). Первоначально В.Н. Андрианов [31] определил обсуждаемый экземпляр как *Paragastrioceras* sp., близкий к *P. ex gr. jossae* (Verneuil). Помимо необычной морфологической характеристики примечательна его привязка: «... этот гониатит, имеющий исключительно важное значение для установления раннеперм-

ского возраста пород, был обнаружен на участке, где выходят отложения верхней пачки [верхнетумаринской подсвиты – прим. Р.К.]. Более древние образования здесь не обнажаются» [31, с. 46]. Несмотря на то что единственный экземпляр вида обнаружен вне стратиграфического разреза, представляется целесообразным обособление верхней части тумаринского горизонта в **слои с *Baraioceras stepanovi***. Справедливость выделения барайоцерасовых слоев в верхней части тумаринского горизонта подтверждается результатами изучения пермских аммоноидей Приохотья [32], среди которых были установлены представитель рода *Baraioceras*, а также форма, занимающая промежуточное морфогенетическое положение между позднекунгурским *Baraioceras* и раннекунгурским видом *Paragastrioceras kungurensis* Mirskaya [33]. Выделенный биостратон перекрывается слоями со *Sverdrupites harkeri* роудского яруса средней перми. По всей видимости, в поздне-тумаринское время происходило проникновение терминальных парагастриоцератин из Приохотья в Западно-Верхоянский бассейн. С учетом филогенетических связей, устанавливаемых между кунгурскими и роудскими аммоноидеями Западного Верхоянья, предполагается, что в поздне-тумаринское время в бассейне существовали не только парагастриоцератины рода *Baraioceras*, но и представители семейств *Spirolegoceratidae* и *Mongoloceratidae*, отсутствие находок которых объясняются огромной редкостью доступных разрезов верхнетумаринского подгоризонта.

Как уже отмечалось выше, проводить межрегиональную корреляцию кунгура по аммоноидеям очень сложно, поскольку кунгурский этап их развития отличается существенным эндемизмом таксонов и резкой дифференциацией ареалов. Наиболее близкими к верхоянскому сообществу являются аммоноидеи Охотского и Колымо-Омолонского регионов.

В Приохотье имеются интересные находки раннепермских парагастриоцератид [34], однако недостаточная информация, касающаяся их стратиграфических привязок, не позволяет провести прямую корреляцию вмещающих отложений с другими регионами Северо-Востока России. Можно с уверенностью утверждать, что в Нюто-ской структурно-фациальной зоне Охотского региона присутствуют возрастные аналоги слоев с *Baraioceras stepanovi* верхнего кунгура, содер-

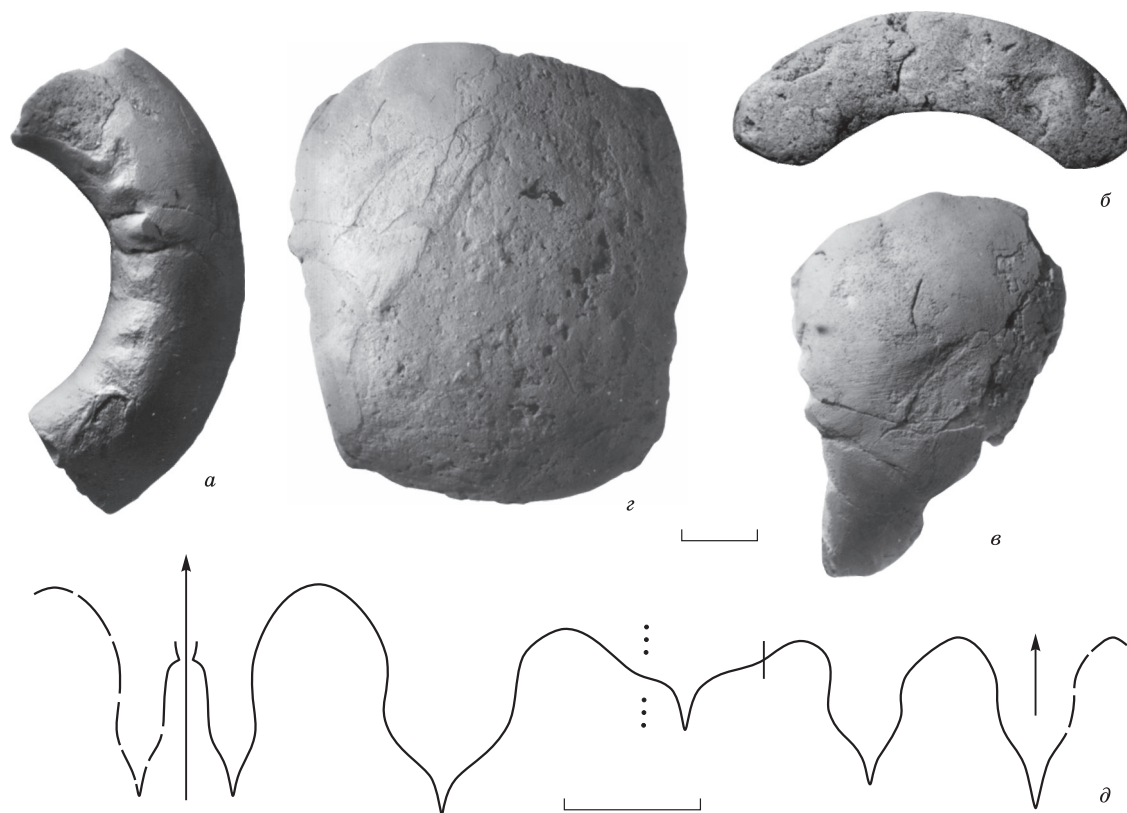


Рис. 4. Голотип *Baraioceras stepanovi* Andrianov, ИГАБМ, № 55/29: *a* – сбоку, *б* – со стороны устья, *в*, *г* – с ventральной стороны до и после реставрации образца (все – фотографии из архива В.Н. Андрианова), *д* – лопастная линия при ширине раковины около 53 мм и высоте оборота около 20 мм (зеркальное отображение). Длина масштабных отрезков 1 см

Fig. 4. Holotype of *Baraioceras stepanovi* Andrianov, DPMGI, no. 55/29: *a* – lateral view, *б* – from the aperture side, *в*, *г* – ventral view before and after restoration of the specimen (all photographs from the archive of V.N. Andrianov), *д* – suture at a shell width of about 53 mm and a whorl height of about 20 mm (mirror image). Scale bars 1 cm

жащие гониатитов *Baraioceras subwandageense* (Popov) [32].

В Колымо-Омолонском регионе выделяются слои с *Tumaroceras kashirzevi* и слои с *Epijuresanites musalitini*, позволяющие сопоставлять пограничные отложения ниже- и верхнетумаринского подгоризонта Верхоянья с нижней частью халалинского горизонта (зона *Megousia kuliki*–*Arphanania andrianovi*) [7, 35] Приколымья и Омолонского массива. Однако установление аналогов слоев с *Paratumaroceras?* sp. nov., слоев с *Tumaroceras yakutorum* и слоев с *Baraioceras stepanovi* в Колымо-Омолонском регионе остается проблематичным.

Закключение

В Западном Верхоянье известно 13 основных местонахождений кунгурских амmonoидей, в которых собраны сотни экземпляров гониатитов и редкие раковины пролеканитов. Уверенно диагностировано 10 видов амmonoидей, относя-

щихся к семи родам семейств Paragastrioceratidae, Spirolegoceratidae, Mongoloceratidae и Medlicottiidae. На основе проведенного анализа географического распространения и стратиграфического распределения амmonoидей разработана первая детальная биостратиграфическая шкала тумаринского регионального горизонта (кунгурский ярус) Западного Верхоянья, включающая пять последовательных подразделений: слои с *Paratumaroceras?* sp. nov., слои с *Tumaroceras yakutorum*, слои с *Tumaroceras kashirzevi*, слои с *Epijuresanites musalitini* и слои с *Baraioceras stepanovi*. Первые три биостратона охватывают нижнетумаринский подгоризонт, а два последних – верхнетумаринский. Полученные результаты требуют модернизации биостратиграфической части Региональной стратиграфической схемы пермских отложений Верхояно-Охотского субрегиона и корректировки палеонтологической характеристики местных стратонов кунгурского возрастного среза Западного Верхоянья.

Список литературы / References

1. Leonova T.B. Permian Ammonoids: Biostratigraphic, Biogeographical, and Ecological Analysis. *Paleontological Journal*. 2011;45(10):1206–1312. <https://doi.org/10.1134/S0031030111100029>
2. Андрианов В.Н. Пермские и некоторые каменноугольные аммоноидеи Северо-Востока Азии. Новосибирск: Наука; 1985. 180 с.
Andrianov V.N. Permian and some Carboniferous ammonoids of Northeastern Asia. Novosibirsk: Nauka; 1985. 180 p. (In Russ.)
3. Kutygin R.V. *Paratumaroceras*, a new paragastrioceratid genus (Ammonoidea) from the Lower Permian of the Western Verkhoyansk Region. *Paleontological Journal*. 2003;37(3): 252–256.
4. Leonova T.B., Kutygin R.V., Shilovsky O.P. New data on the composition and evolution of the Permian superfamily Popanocerataceae (Ammonoidea). *Paleontological Journal*. 2005;39(5): 476–486.
5. Кутыгин Р.В., Будников И.В., Бяков А.С., Клец А.Г. Слои с аммоноидеями пермской системы Верхоянья. *Отечественная геология*. 2002;4:66–71.
Kutygin R.V., Budnikov I.V., Biakov A.S., Klets A.G. Ammonoid beds of the Permian in Verkhoyanie. *Otechestvennaya Geologiya (Domestic Geology)*. 2002;4:66–71. (In Russ.)
6. Кутыгин Р.В. Ареалы распространения пермских комплексов аммоноидей Верхоянья. *Отечественная геология*. 2004;4:75–81.
Kutygin R.V. Areas of Permian ammonoid associations in Verkhoyanie. *Otechestvennaya Geologia (Domestic Geology)*. 2004;4:75–81 (In Russ.)
7. Решения Третьего межведомственного регионального стратиграфического совещания по докембрию, палеозою и мезозою Северо-Востока России. Ред. Корень Т.Н., Котляр Г.В. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ; 2009. 268 с.
Resolutions of the Third Interdepartmental Regional Conference on the Stratigraphy of the Precambrian, Paleozoic, and Mesozoic of Northeastern Russia. Koren' T.N., Kotlyar G.V. (eds.) St. Petersburg: Vseross. Nauchno-Issled. Geol. Inst.; 2009. 268 p. (In Russ.)
8. Кутыгин Р.В., Будников И.В., Сивчиков В.Е. Основные черты стратиграфии касимовско-гжельских и пермских отложений Сибирской платформы и ее складчатого обрамления. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2020; 25(4):5–29. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-4-1>
Kutygin R.V., Budnikov I.V., Sivtchikov V.E. The main features of the Kasimovian-Gzhelian and Permian stratigraphy in the Siberian platform and adjacent fold belts. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2020;25(4):5–29. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-4-1>
9. Кутыгин Р.В. Проблема обоснования границы артинско-го и кунгурского ярусов в Западном Верхоянье по аммоноидеям. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(3): 335–344. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-3-335-344>
Kutygin R.V. The problem of ammonoid substantiation of the Artinskian–Kungurian boundary in Western Verkhoyanie. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(3):335–344. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-3-335-344>
10. Руженцев В.Е. О методике исследования и описания аммоноидей. *Палеонтологический журнал*. 1964;1:120–130.
Ruzhencev V.E. On the methodology for studying and describing ammonoids. *Paleontologicheskij zhurnal*. 1964;1:120–130. (In Russ.)
11. Андрианов В.Н., Андрианова В.А. Аммоноидеи и основы ярусной шкалы каменноугольной и пермской систем на северо-востоке Азии. В кн.: Коростелев В.И. (ред.) *Вопросы геологии, тектоники и металлогении Якутии*. Якутск: ЯГУ; 1980. С. 41–46.
Andrianov V.N., Andrianova V.A. Ammonoids and the basis of the stage scale of the Carboniferous and Permian systems in northeast Asia. In: Korostelev V.I. (ed.) *Issues of geology, tectonics and metallogeny of Yakutia*. Yakutsk: Yakutsk State University, 1980, pp. 41–46. (In Russ.)
12. Кутыгин Р.В. Последовательность аммоноидей в кунгурском ярусе Куранахской подзоны (Западное Верхоянье). *Отечественная геология*. 2012;5:37–40.
Kutygin R.V. About the ammonoid sequence in the Kungurian stage of the Kuranakh subzone (Western Verkhoyanie). *Otechestvennaya Geologia (Domestic Geology)*. 2012;5:37–40. (In Russ.)
13. Руженцев В.Е. О семействах Paragastrioceratidae и Spirolegoceratidae. *Палеонтологический журнал*. 1974; 1:19–29.
Ruzhencev V.E. About the families Paragastrioceratidae and Spirolegoceratidae. *Paleontologicheskij zhurnal*. 1974;1:19–29. (In Russ.)
14. Богословская М.Ф., Кузина Л.Ф., Леонова Т.Б. Классификация и распространение позднепалеозойских аммоноидей. В кн.: Розанов А.Ю., Шевырев А.А. (ред.) *Ископаемые цефалоподы: новейшие достижения в их изучении*. М.: ПИН РАН; 1999. С. 89–124.
Bogoslovskaya M.F., Kuzina L.F., Leonova T.B. Classification and distribution of Late Paleozoic ammonoids. In: Rozanov A.Yu., Shevyrev A.A. (eds.) *Fossil cephalopods: recent advances in their study*. Moscow: Paleontological Institute; 1999, pp. 89–124. (In Russ.)
15. Leonova T.B., Shilovsky O.P. Evolution of the Permian family Spirolegoceratidae (Goniatitida, Ammonoidea). *Paleontological Journal*. 2007;41(1):28–38. <https://doi.org/10.1134/S0031030107010030>
16. Barskov I.S., Leonova T.B., Shilovsky O.P. Middle Permian Cephalopods of the Volga–Ural Region. *Paleontological Journal*. 2014;48(13):1331–1414. <https://doi.org/10.1134/S0031030114130012>
17. Furnish W.M., Glenister B.F., Kullmann J., Zhou Z. *Treatise on Invertebrate Paleontology. Part L. Mollusca 4. Revised. Volume 2: Carboniferous and Permian Ammonoidea (Goniatitida and Prolecanitida)*. Lawrence, Kansas: The University of Kansas, Paleontological Institute; 2009. 258 p.
18. Leonova T.B. Early phylogeny of the Permian superfamily Popanoceratoidea Hyatt (Ammonoidea). *Paleontological Journal*. 2024;58(4):415–425. <https://doi.org/10.1134/S0031030124600331>
19. Руженцев В.Е. Первые аммоноидеи из пермских отложений Верхоянья. *Палеонтологический журнал*. 1961;2: 50–63.
Ruzhencev V.E. First ammonoids from the Permian deposits of Verkhoyanie. *Paleontologicheskij zhurnal*. 1961;2:50–63. (In Russ.)
20. Kutygin R.V. The Permian ammonoid family Medlicottiidae in the Verkhoyansk Region. *Paleontological Journal*. 2020; 54(6):571–583. <https://doi.org/10.1134/S0031030120060039>
21. Henderson C.M., Shen S.Z. The Permian Period. In: Gradstein F.M., Ogg J.G., Schmitz M.D., Ogg G.M. (eds.). *Geologic Time Scale 2020*. Amsterdam: Elsevier; 2020, pp. 875–902.

22. Boiko M.S. Evolution of the Early Permian Family Paragastrioceratidae (Ammonoidea) in the Urals. *Paleontological Journal*. 2010;44(3):275–281. <https://doi.org/10.1134/S0031030110030056>
23. Kutugin R.V. *Clausiuraloceras mechtelense*, a new ammonoid species from the Kungurian of the Southern Cisuralian Region. *Paleontological Journal*. 2018;52(4):365–378. <https://doi.org/10.1134/S003103011804007X>
24. Руженцев В.Е. Нижнепермские аммониты Южно-Урала. II. Аммониты артинского яруса. М.: Изд-во АН СССР; 1956. 275 с.
- Ruzhencev V.E. *Lower Permian ammonites of the Southern Urals. II. Ammonites of the Artinskian stage*. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1956. 275 p. (In Russ.)
25. Богословская М.Ф. Артинские аммоноидеи Среднего Урала. М.: Изд-во АН СССР; 1962. 117 с.
- Bogoslovskaya M.F. *Artinskian ammonoids from the Central Urals*. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1962. 117 p. (In Russ.)
26. Решения Всесоюзного совещания по разработке унифицированных стратиграфических схем докембрия, палеозоя и четвертичной системы Средней Сибири, часть II (средний и верхний палеозой). Ред. В.И. Краснов. Л.: Ленинградская картографическая фабрика ВСЕГЕИ; 1982. 130 с.
- Resolution of the All-Union Meeting on the Development of Unified Stratigraphic Schemes of the Precambrian, Paleozoic and Quaternary System of Central Siberia, Part II (Middle and Upper Paleozoic)*. Krasnov V.I. (ed.). Leningrad: Leningradskaya kartographicheskaya fabrika Vseross. Nauchno-Issled. Geol. Inst.; 1982. 130 p. (In Russ.)
27. Borissenkov K.V. New Data on Cisuralian Ammonoids of Pay-Khoy (Russian Arctic) from the Family Paragastrioceratidae Ruzhencev, 1951. *Paleontological Journal*. 2020;54(10): 1178–1188. <https://doi.org/10.1134/S0031030120100020>
28. Андрианов В.Н., Петров Ю.Н., Андрианова В.А. и др. Обоснование детальной стратиграфической шкалы пермских отложений Западного Верхоянья. В кн.: Возин В.Ф. (ред.) *Стратиграфия, палеонтология и литология осадочных формаций Якутии*. Якутск: Изд-во Якутского филиала СО АН СССР; 1975. С. 50–94.
- Andrianov V.N., Petrov Yu.N., Andrianova V.A., et al. Substantiation of the detailed stratigraphic scale of the Permian deposits in Western Verkhoyanie. In: Vozin V.F. (ed.) *Stratigraphy, paleontology and lithology of sedimentary formations of Yakutia*. Yakutsk: YaF SB AS USSR, 1975, pp. 50–94. (In Russ.)
29. Клец А.Г. *Верхний палеозой окраинных морей Ангариды*. Новосибирск: Гео; 2005. 241 с.
- Klets A.G. *Upper Paleozoic of Marginal seas of Angarida*. Novosibirsk: Geo; 2005, 240 p. (In Russ.)
30. Кашик Д.С., Ганелин В.Г., Караваева Н.И. и др. *Опорный разрез перми Оломонского массива*. Л.: Наука; 1990. 200 с.
- Kashik D.S., Ganelin V.G., Karavaeva N.I., et al. *Permian key section of the Omolon massif*. Leningrad: Nauka; 1990. 200 p.
31. Андрианов В.Н. *Верхнепалеозойские отложения Западного Верхоянья*. М.: Наука; 1966. 133 с.
- Andrianov V.N. *Upper Paleozoic deposits of Western Verkhoyanie*. Moscow: Nauka; 1966. 133 p. (In Russ.)
32. Kutugin R.V., Biakov A.S. Permian Ammonoids of the Okhotsk Region, Northeast Asia. *Paleontological Journal*. 2015; 49(12):1275–1281. <https://doi.org/10.1134/S0031030115120084>
33. Богословская М.Ф. Кунгурские аммоноидеи Среднего Предуралья. *Палеонтологический журнал*. 1976;4:43–50.
- Bogoslovskaya M.F. Kungurian ammonoids of the Middle Cis-Urals. *Paleontologicheskij zhurnal*. 1976;4:43–50. (In Russ.)
34. Умитбаев Р.Б. Стратиграфия верхнепалеозойских отложений центральной части Охотского срединного массива. *Ученые записки НИИГА. Палеонтология и биостратиграфия*. 1963;2:5–15.
- Umitbaev R.B. The stratigraphy of the Upper Paleozoic deposits of the central part of the Okhotsk Median Massif. *Uchenye Zapiski Nauchno-Issled. Inst. Geol. Arkt., Ser. Paleontol. i Biostratigr.* 1963;2:5–15. (In Russ.)
35. Ганелин В.Г., Биakov А.С. The Permian biostratigraphy of the Kolyma–Omolon region, Northeast Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2006;26(3–4):225–234. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2005.11.006>

Об авторе

КУТЫГИН Руслан Владимирович, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-4115-5976>, ResearcherID: J-3318-2018, Scopus Author ID: 9277169500, SPIN: 2547-9417, e-mail: rkutygin@mail.ru

Конфликт интересов

Автор является членом редколлегии журнала «Природные ресурсы Арктики и Субарктики». Автору неизвестно о каком-либо другом потенциальном конфликте интересов, связанном с этой рукописью.

About the author

KUTYGIN, Ruslan Vladimirovich, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-4115-5976>, ResearcherID: J-3318-2018, Scopus Author ID: 9277169500, SPIN: 2547-9417, e-mail: rkutygin@mail.ru

Conflict of interest

The author is a member of the Editorial Board for the journal “Arctic and Subarctic Natural Resources”. The author is not aware of any other potential conflict of interest relating to this article.

Поступила в редакцию / Submitted 14.08.2025

Поступила после рецензирования / Revised 20.10.2025

Принята к публикации / Accepted 19.11.2025



Оригинальная статья

Минералого-геохимическая характеристика сростаний благородных и редких металлов из рудно-россыпных проявлений Анабарской антеклизы Сибирской платформы

А. В. Округин[✉], Б. Б. Герасимов

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

[✉]okrugin@diamond.ysn.ru

Аннотация

Рассматриваются особенности химического состава и структуры тесных сростаний минералов платиновой группы, золота, серебра, редких металлов и полуметаллов (Bi, Pb, Sn, Sb, Te, As) из россыпей бассейна р. Анабар на северо-востоке Сибирской платформы. На Сибирской платформе известны магматогенные золотоплатиноидные минерализации, связанные с сульфидными и окисно-рудными вкрапленно-шлировыми рудами дифференцированных мафит-ультрамафитовых интрузивов. Однако Au и элементы платиновой группы в сульфидных минералах обычно находятся в виде изоморфной примеси или в форме микроскопических и дисперсных включений, которые не могут формировать крупные россыпеобразующие минеральные зерна. В последние десятилетия в разных регионах выявлены комплексные магматогенные месторождения благородных и редких металлов, геохимическая специализация которых характерна как для гранитоидных, так и базит-ультрабазитовых магматитов. Длительная эволюция сложных рудно-магматических систем состоит из разных стадий: от ранней магматической через переходную флюидно-магматогенную до заключительной гидротермально-метасоматической. Редкие находки крупных полиминеральных сростаний благородных и редких металлов представляют большую ценность для установления физико-химических параметров формирования подобных парагенетических рудных ассоциаций и имеют практическое значение при поисках близлежащих коренных источников ценных металлов. Авторами показано сходство строения природных сростаний благородных металлов с микроструктурами искусственных и металлургических сплавов. В связи с этим на основе анализа изменения химических составов фаз, их структурных форм обсуждаются возможные тренды кристаллизации полиминеральных природных сплавов на примерах диаграмм состояния Pd–Au–Cu и Pd–Au–Te, что определяет научную новизну данной работы. Проведенные авторами исследования свидетельствуют о том, что источниками комплексной благородно-редкометалльной минерализации на северо-востоке Сибирской платформы в основном являются разновозрастные флюидно-магматические рудные системы, связанные с фанерозойскими платформенными дифференцированными мафит-ультрамафитовыми интрузивами. Также предполагается наличие магматогенно-флюидно-гидротермальных оруденений, генетически сопряженных с древними метаморфизованными гранитоидами и основными кристаллическими сланцами.

Ключевые слова: минералы платиновой группы, золото, щелочно-ультраосновные породы, фазовые диаграммы, Анабарский щит, Сибирская платформа

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания ИГАБМ СО РАН: «Процессы рудообразования и минерагения месторождений благородных металлов Верхояно-Колымской складчатой области и Сибирского кратона» (проект № FUG-2024-0006) и «Мантийный магматизм, эволюция литосферы и рудоносность восточной части Сибирской платформы, геоэкология недропользования» (проект № FUG-2024-0007).

Благодарности. Авторы благодарны А.Л. Земнухову, Р.Ю. Желонкину и другим геологам из АО «Алмазы Анабара», способствовавшим сбору шлихового материала в полевых условиях, а также своим коллегам – сотрудникам ИГАБМ СО РАН, участвовавшим в лабораторных и аналитических исследованиях.

Для цитирования: Округин А.В., Герасимов Б.Б. Минералого-геохимическая характеристика сростаний благородных и редких металлов из рудно-россыпных проявлений Анабарской антеклизы Сибирской платформы. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(4):540–558. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-540-558>

Mineralogical and geochemical characteristics of noble and rare-metal intergrowths from ore-placer occurrences, Anabar anteklise, Siberian platform

Alexander V. Okrugin✉, Boris B. Gerasimov

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

✉okrugin@diamond.ysn.ru

Abstract

Intergrowths of platinum group minerals (PGM) with gold, silver, rare metals and semimetals (Bi, Pb, Sn, Sb, Te, As) from the Anabar River basin placers (northeastern Siberian Platform) were analyzed for their chemical composition and structure. While magmatogenic Au and PGE mineralization is recognized in sulfide and oxide ores of differentiated mafic-ultramafic intrusions, these metals typically reside as isomorphic impurities or as microscopic, dispersed inclusions, making them unsuitable for forming large placer grains. Recent discoveries of complex magmatogenic deposits reveal geochemical signatures in precious and rare metals indicative of both granitoid and mafic-ultramafic magmatism. The long-term evolution of these ore-magmatic systems spans stages from early magmatic and transitional fluid-magmatogenic to late hydrothermal-metasomatic. Consequently, rare discoveries of large polymineral intergrowths of noble and rare metals are invaluable for constraining the physicochemical parameters of such paragenetic ore associations and for guiding the exploration for nearby sources of precious metals. We demonstrate that the microstructures of these natural precious-metal intergrowths resemble those of synthetic and metallurgical alloys. By analyzing compositional variations and structural forms, we discuss potential crystallization trends of these polymineral natural alloys using Pd-Au-Cu and Pd-Au-Te phase diagrams, which constitutes the core scientific contribution of this work. This study indicates that the sources of complex noble-rare metal mineralization in the northeastern Siberian Platform are primarily fluid-magmatic ore systems of diverse ages, related to Phanerozoic, differentiated mafic-ultramafic platform intrusions. Furthermore, a genetic association with ancient metamorphosed granitoids and basic crystalline schists is supported.

Keywords: platinum group minerals, gold, alkaline-mafic rocks, Anabar shield, Siberian platform, phase diagrams

Funding. This study was conducted within the state assignment for the DPMGI SB RAS: “Ore formation and mineralogy of precious metal deposits in the Verkhoyansk-Kolyma folded region and the Siberian craton” (project No. FUGG-2024-0006) and “Mantle magmatism, evolution of the lithosphere, ore occurrence in the eastern part of the Siberian platform and geocology” (project No. FUGG-2024-0007).

Acknowledgements. We express our gratitude to A.L. Zemnukhov, R.Y. Zhelonkin, and the geologists at JSC “Almaz-Anabara” for their invaluable support during fieldwork and sample collection. We also thank our colleagues for their contributions to laboratory analysis and data processing.

For citation: Okrugin A.V., Gerasimov B.B. Mineralogical and geochemical characteristics of noble and rare-metal intergrowths from ore-placer occurrences, Anabar anteklise, Siberian platform. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(4):540–558. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-540-558>

Введение

На закрытых фанерозойским чехлом территориях Сибирской платформы известны площадные золотоплатиноносные россыпи, не имеющие до сих пор установленных коренных источников [1–4]. Как было особо подчеркнуто в капитальном труде Ю.Н. Трушкова с соавторами [2], коренные источники загадочных «виллойских» россыпей мелких ценных металлов (золота и платины), вероятно, залегают в погребенных выступах кристаллического фундамента в пределах Сунтарского сво-

вого поднятия, конечные этапы размыва которого происходили в укугутское время. В современные россыпи металл частично поступал и через более древние промежуточные металлоносные осадочные толщи (коллекторы), к которым относятся грубообломочные отложения рифея, базальные конгломераты нижнего кембрия, гравийники эмяксинской подсерии верхнего девона, конгломераты каменноугольного и пермского возраста. Огромные площади распространения современных россыпей мелкого ценного металла указы-

вают на крупные размеры коренных источников, и их прогнозирование представляет актуальную задачу, имеющую практическое значение.

Положение о полициклическом перемыве золота из древних материнских пород в современные россыпи через промежуточные коллекторы было убедительно подкреплено В.А. Михайловым и Н.Н. Гаврилевым [5] на основании всестороннего изучения территориального распространения обломков самых различных пород и акцессорных минералов базальных горизонтов структурных подъярусов платформенного чехла Вилуйской синеклизы и сопредельных областей. Состав экзотических обломков метаморфических комплексов пород и акцессориев в тяжелой фракции в базальных терригенных горизонтах (средний рифей – верхний мел) Вилуйской синеклизы свидетельствует, что эти материалы могли поступить за счет денудации блоковых выступов фундамента Палеовилуйского авлакогена. Промежуточные коллекторы золота позднего палеозоя и мезозоя Вилуйской синеклизы содержат вилуйский метаморфический комплекс акцессориев. Ухудшение окатанности, увеличение содержания и размеров упомянутых акцессориев в базальных горизонтах наблюдались вблизи Сунтарского, Верхнесинского и других выступов фундамента синеклизы, что свидетельствует о присутствии здесь локальных протерозойских золоторудных оруденений [5].

В данной статье мы рассматриваем особенности химического состава и структуры тесных сростаний минералов платиновой группы (МПП), золота, серебра, редких металлов и полуметаллов (Bi, Pb, Sn, Sb, Te, As) из россыпей бассейна р. Анабар на северо-востоке Сибирской платформы. В этих россыпях наряду со многими самостоятельными зернами МПП и золота иногда встречаются тесные сростания благородных, редких металлов и их халькогенидов [4, 6–9], сохранившие свою первозданную природу в силу устойчивости благородных металлов в экзогенных условиях. Коренными источниками этих россыпей могут быть не только поверхностные источники, приуроченные к фанерозойским породам или обнаженным выходам кристаллического фундамента Анабарского щита, но и погребенные под осадочным чехлом породы фундамента платформы. Для выявления возможных коренных источников этих россыпей, кроме традиционных прикладных топоминералогических изысканий, необходимо установление по теоретически обо-

снованной методике физико-химических условий образования подобных сложных тесных природных минеральных ассоциаций, что определяет научную значимость данной работы. Одним из таких методов является сопоставление составов и микроструктуры изучаемых сростаний из россыпей и коренных месторождений с таковыми искусственных сплавов, приводимых в экспериментально изученных диаграммах состояния металлических систем.

Краткая геологическая характеристика Лено-Анабарского междуречья распространения золотоплатиноносных россыпей

На северо-востоке Сибирской платформы известны комплексные алмазоносные россыпи, содержащие весовые количества попутного благородного металла – золота и МПП. Эти россыпи занимают огромные территории междуречья Лена–Анабар (рис. 1), но не имеют до сих пор четко установленных коренных источников [1, 3, 4]. Очевидно, что они формировались в результате пространственного совмещения (парастерезиса) в россыпях устойчивых в экзогенных условиях фаз (алмаза и благородных металлов), но среди них можно выделить и парагенетические ассоциации минералов. К последним относятся золото и МПП, генетическая связь которых доказывается обнаружением в данных россыпях тесных сростаний минералов благородных и редких металлов [4, 6–9].

Известно, что на древних платформах золотоплатиноносные месторождения обычно приурочены к крупным мафит-ультрамафитовым дифференцированным массивам, содержащим сульфидные и окисно-рудные (хромититовые и титаномагнетитовые) руды. В то же время даже уникальные сульфидные месторождения с высоким содержанием платиноидов и золота лишены промышленно-значимых россыпей. Это объясняется высокой растворимостью благородных металлов в сульфидных минералах и нахождением их в основном в виде изоморфной примеси в сульфидах, или они образуют дисперсные самостоятельные фазы золота и МПП. Хотя благородные металлы в них часто формируют крупные выделения, в спокойных платформенных тектонических условиях подобные россыпеобразующие зерна металлов не транспортируются далеко и в последующем перекрываются более молодыми породами чехла.

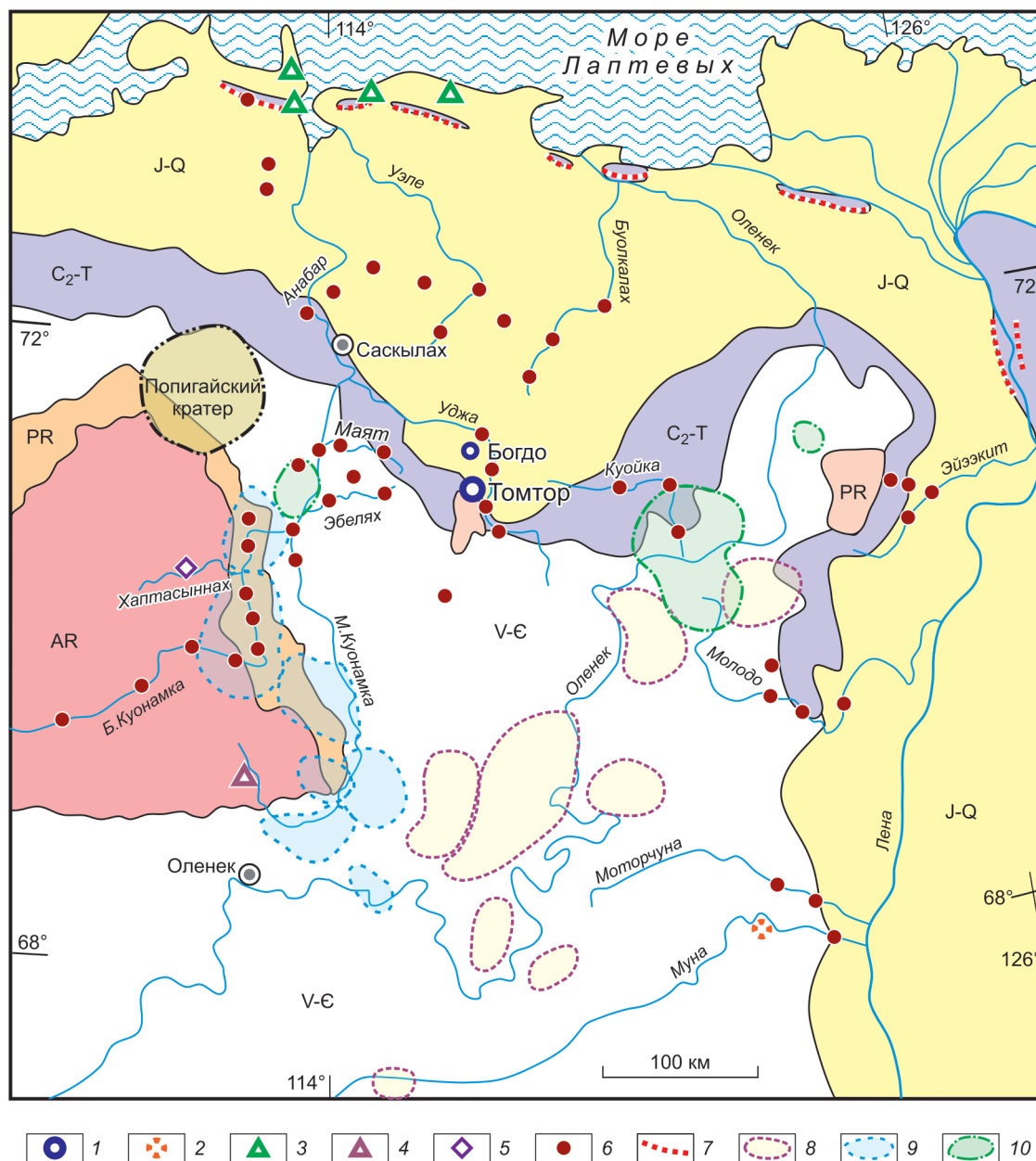


Рис. 1. Схема распространения золота и платины в россыях Лено-Анабарского междуречья: 1 – массивы ультраосновных-щелочных пород и карбонатитов Томтор и Богдо; 2 – погребенный Мунский массив [10]; 3 – пикритобазальты, устье р. Анабар [11, 12]; 4 – дайка меймечитоподобных пород [13]; 5 – проявление золота Хаптасыннахской зоны [14]; 6 – золото и платина в россыях; 7 – алмазы в туффидах карнийского яруса [15]; 8–10 – поля кимберлитов и карбонатитов по [16]: среднепалеозойские (8), раннемезозойские (9) и позднемезозойские (10)

Fig. 1. Locations of diamond, gold and platinum in placers of the Leno-Anabar province: 1 – Tomtor and Bogdo massifs; 2 – buried Muna massif [10]; 3 – picritobasalts, Anabar R. [11, 12]; 4 – dike of meimechite-like rocks [13]; 5 – gold ore occurrences, Khaptasynakh R. [14]; 6 – gold and platinum in placers; 7 – diamonds in tuffites of the Carnian stage [15]; 8–10 – fields of kimberlites and carbonatites by [16]: Middle Paleozoic (8), Early Mesozoic (9) and Late Mesozoic (10)

На северо-западной окраине Анабарского щита в бассейне р. Котуйкан в золотоносной россыпи описаны находки сперрилита [17]. Россыпь приурочена к долине водотока, рассекающего докембрийские кристаллические породы, где на-

блюдается комплекс нижнепротерозойских пород, представленный габбро-анортозитами, габбро-норитами и редкими телами габброидов и гипербазитов, которые, по-видимому, и являются источниками сперрилита в россыях.

Широкое развитие ареалов распространения платиносперрилитовых ассоциаций известно также в золотоносных россыпях Алдано-Станового щита в областях развития протерозойских расслоенных ультрамафит-мафитовых комплексов с титаномагнетитовой и сульфидной Cu-Ni минерализацией [18].

На Анабарском щите в 2024 г. геологами АО «Алмазы Анабара» по рекам Бороску Унгуохтаах и Улахан Хаптасыннах были открыты россыпные месторождения золота [14]. Эти россыпи находятся в центральной части Билляхской зоны тектонического меланжа, где заключены блоки в различной степени диафторированных и мигматизированных плагиогнейсов, гнейсов и кристаллических сланцев гранулитовой фации верхнеанабарской серии архея, а также блоки, сложенные биотит-амфиболовыми гнейсами амфиболитовой фации хапчанской серии раннего протерозоя [19]. Вдоль Билляхской зоны в субмеридиональном направлении прослеживается Хаптасыннахская рудная зона сульфидизированных пород, которые сложены в разной степени метасоматически измененными гнейсами, гранитогнейсами и представляют собой локальные выходы на дневную поверхность лимонитизированных пород. Основными минералами кремнисто-калиевых метасоматитов, наряду с кварцем, являются калиевый полевои шпат, плагиоклаз и биотит. Сопутствующие минералы представлены апатитом, цирконом, рутилом, ильменитом, монацитом, хлоритом и баритом. Рудные минералы представлены пиритом, пирротинном, халькопиритом, галенитом и сфалеритом, спорадически встречаются халькозин, борнит, арсенопирит, герсдорфит, молибденит, шеелит, гессит, теллурувисмутит, хедлеит, алтаит, антимонит, киноварь, самородный висмут. Самородное золото обнаружено в виде микрочастиц (3–8 мкм) неправильной формы среди пирита и пирротина, пробность варьирует от 550 до 926 ‰. На основе изучения минеральных включений в россыпном золоте обосновывается генетическая связь россыпей золота ближнего сноса, выявленных на Хаптасыннахском участке, с исследованными сульфидными рудами [14].

Кроме древних метаморфизованных магматитов фундамента на северо-востоке Сибирской платформы широко развиты базиты среднепалеозойского и пермо-триасового возрастов, палеозойские и мезозойские кимберлиты и карбонатиты, а также сложные комплексы щелочно-

ультраосновных пород с карбонатитами и проявления щелочных пикритобазальтов [20]. Здесь не обнаружены продукты фанерозойского гранитоидного магматизма, поэтому мы склоняемся к гипотезе связи золота и платины с мантийными мафит-ультрамафитовыми магматитами. Например, на северо-западе Сибирской платформы вблизи знаменитых норильских Cu-Ni месторождений формируются небольшие россыпи [21], характеризующиеся палладий-железисто-платиновым типом. В пределах Гулинского массива Маймеча-Котуйской провинции ультраосновных-щелочных пород установлены россыпи [22] с иридиево-осмиевым типом минерализации. Формирование пикрит-базальтовых магматических комплексов Норильского района и щелочно-ультраосновных пород Гулинского массива связано с заложением структур Енисейско-Хатангского рифтогенного прогиба в зоне сочленения Сибирской платформы и Таймырской складчатой области. Приуроченность щелочно-ультраосновных комплексов пород к периферии Сибирской платформы авторы связывают с формированием крупных изверженных провинций в результате распада суперконтинента Родиния, начавшегося в неопротерозойское время [23].

В одном зерне иридиево-железистой платины из алмазоносной россыпи р. Маят было обнаружено включение хорошо раскристаллизованного силикатного вещества, вероятно, являющегося веществом вмещающей магмы. Исходя из соотношения минералов на срезе включения и состава минеральных фаз, определенных микрозондовым анализом, был рассчитан примерный валовый состав включения, который соответствует породам ийолит-мельтейгитового ряда [12]. Также по результатам прямого датирования ^{190}Pt - ^4He методом четырех зерен было установлено, что возраст железистой платины из этой россыпи составляет 259 ± 9 млн лет [24]. Все эти данные, наряду с находкой в щелочных сиенитах Томторского массива рудного низкопробного золота в ассоциации с пиритом, свидетельствуют о связи благородных металлов из россыпей бассейна р. Анабар с комплексами щелочно-ультраосновных пород.

Материалы и методика исследований

Изученные полиминеральные агрегаты золота и МПГ были получены из концентратов тяжелых минералов хвостовых отвалов при разработке алмазоносных россыпей рек Маят, Эбелях,

Хара-Мас и др., в них иногда встречаются крупные (размером до 3–8 мм) зерна благородных металлов и их сростаний. Кроме этого, были исследованы концентраты шлиховых проб объемом до 1–2 м³ из аллювиальных отложений водотоков бассейнов рек Анабар, Уджа, Большая Куонамка и Малая Куонамка. Среди изученных более 1000 зерен было обнаружено несколько десятков частиц, состоящих из сростания МПГ, золота и их различных интерметаллических соединений, сульфидов и халькогенидов.

Состав и микроструктурные взаимоотношения минералов изучались на сканирующем микроскопе JSM-6480LV JEOL в ИГАБМ СО РАН; аналитики: Н.В. Христофорова, С.А. Карпова. Съемки проводились при следующих условиях: ускоряющее напряжение 20 кВ; ток зонда 1,09 нА; время измерения 25 с; аналитические линии: Au – Mα, Ag – Lα, другие элементы – Kα. В качестве эталонов применялись стандартизированные минералы, чистые металлы и их сплавы. Статистическая обработка аналитических данных, расчеты и графическое оформление микрорентгенов проводится на персональном компьютере по соответствующим современным программам. Детальные минералогические описания золота и МПГ были даны в наших ранних работах, и здесь мы сосредоточимся лишь на одном из малоизученных аспектов изучения механизма формирования полиминеральных ассоциаций с использованием фазовых диаграмм состояния металлических систем.

Структуры многих природных сплавов благородных и редких элементов, ранее исследованных нами [3, 9, 25], показывают, что среди них часто наблюдаются явные признаки их формирования из первоначально поликомпонентных металлических благородно-металльных жидкостей с существенной примесью редких элементов и серой. Микроструктуры сростаний благородных и редких металлов с их халькогенидами из изученных россыпей (рис. 2) соответствуют структурам эвтектических, перитектических и монотектических искусственных сплавов [26]. Присутствие более легкоплавких полуметаллов резко снижает температуру плавления тугоплавких благородных металлов. Поэтому сопоставление структур природных и искусственных сплавов позволяет проследить физико-химические условия кристаллизации металлических систем, образующихся в рудно-магматических процессах. Возможные пути фазовых превращений подобных много-

компонентных сплавов нами ранее были рассмотрены на тройных диаграммах (Pt, Pd)–Fe–Au и Pd–Cu–Au с развернутыми бинарными системами [9]. В данной статье авторами дается дальнейшее обсуждение этой проблемы на примере рассмотрения особенностей сростаний природных сплавов с использованием фазовых диаграмм металлических систем Pd–Au–Te и Pd–Au–Cu. Это обусловлено тем, что наиболее характерными, т. е. типоморфными элементами, определяющими состав большинства фаз полиминеральных сростаний, кроме главного вмещающего металла – Pt, являются Pd, Au, Cu и Te.

Тренды эволюции фазовых превращений в сложных сплавах наиболее наглядно можно проследить на тройных диаграммах состояния [3, 25]. К сожалению, в настоящее время тройные диаграммы фазовых равновесий построены только для ограниченного круга элементов с участием PGE. В связи с этим, например, при построении тройной диаграммы Pd–Au–Te (рис. 3) изотермы поверхности ликвидуса нами проведены схематично методом графической интерполяции проецирования ликвидусных линий двойных систем. Для этого соблюдались основные правила построения тройных диаграмм равновесия по данным двухкомпонентных систем [27, 28]. Используемые в данной работе диаграммы состояния двойных и тройных металлических систем были заимствованы из некоторых известных справочников (например, [29 и др.]).

Формы сростаний минералов платиновой группы и золота, их интерпретация на тройных диаграммах фазового состояния

В россыпях северо-востока Сибирской платформы железистая платина и реже изоферроплатина являются основными минералами, содержащими включения других МПГ, золота, различных сульфидов, арсенидов, теллуридов и др. Среди природных Fe–Pt сплавов в интервале от 20 до 40 ат.% Fe выделяется два минеральных вида: железистая платина с неупорядоченной решеткой и изоферроплатина Pt₃Fe с упорядоченной ячейкой.

Структуры многих изученных нами природных сплавов [3, 9] имеют признаки их формирования из поликомпонентных металлических жидкостей, поэтому при исследованиях мы обращаемся к особенностям микроструктур искус-

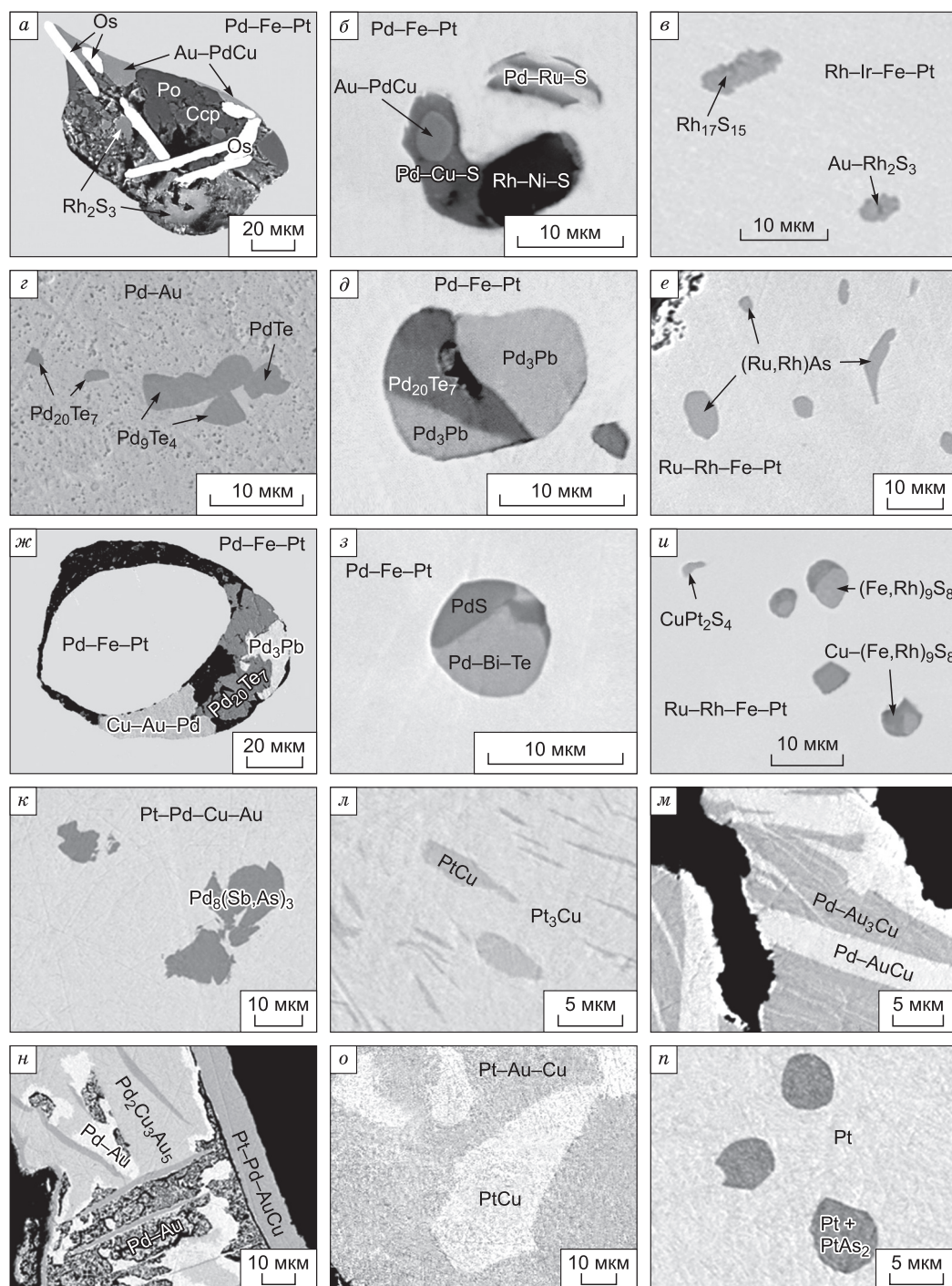


Рис. 2. Микроструктуры сплавов МПГ и золота с халькогенидами благородных и редких металлов из россыпей бассейна р. Анабар.

а, б – полифазные включения в железистой платине р. Майт, обр. М-18-157 (а) и М-13-157 (б); в – включения сульфидов Rh в железистой платине р. Майт, М-24-154; г – включения теллуридов Pd в палладистом золоте, р. Майт, М-10-154; д – овальное двухфазное включение минералов Pd в железистой платине, р. Мал. Куонамка, МК-20-18; е – включения арсенидов Ru и Rh в железистой платине, р. Мал. Куонамка, МК-20-1; ж – полифазное каплевидное включение в железистой платине, р. Мал. Куонамка, МК-20-10; з, у – расслоенные сульфидные и теллуридные включения в железистой платине, р. Бол. Куонамка, БК-23-36 (з) и БК-23-26 (у); к – амевовидные включения арсенидопалладинита в Pt-Pd-Cu-золоте, р. Бол. Куонамка, БК-25-4; л, п – микроструктуры распада в Pt-Pd-Cu-Au-As сплавах, р. Бол. Куонамка, БК-25-9 (л), БК-25-A43 (м), БК-25-A50 (н), БК-25-27 (о) и БК-25-A7 (п). Минералы: Pt – самородная платина; Os – осмий; Pd-Fe-Pt, Rh-Ir-Fe-Pt и Ru-Rh-Fe-Pt – железистая платина с высокими содержаниями Pd, Rh-Ir и Ru-Rh соответственно; PtCu – хонгшиит;

Pt₃Cu – упорядоченное соединение (?); RuS₂ – лаурит; Rh₂S₃ – баунит; Pd–Au, Pt–Pd–Cu–Au, Pt–Au–Cu – твердые растворы металлов в порядке возрастания атомарного количества; Pd–AuCu – Pd-содержащий тетра-аурикуприд; Pd–Au₃Cu – Pd-содержащее соединение Au₃Cu; Au–PdCu – Au-содержащий скаергаардит; Pd₂Cu₃Au₅ – упорядоченное тройное соединение; RhAsS – холлингвордит; Pd₂₀Te₇ – кейтконит; Pd₉Te₄ – теллуropалладинит; Pd–Pb–Te – палладий-свинцовый теллурид; Pd–Cu–S – василит; Rh–Ni–S – торривейзерит (?); PdS – выскокит; Pd–Bi–Te – палладий-висмутовый теллурид; PdTe – котульскит; Pd₉Te₄ – теллуropалладинит; Pd₂₀Te₇ – кейтконит; Pd–Cu–S – василит; Pd₃Pb – звягинцевит; Cu–Au–Pd – сплав Cu–Au-содержащего палладия; Au–PdCu – Au-содержащий скаергаардит; Pd₈(Sb,As)₃ – арсенопалладинит; Rh–Ni–S – торривейзерит (?); Pd–Ru–S – рутений-палладиевый сульфид; PdS – выскокит; Pd–Bi–Te – палладий-висмутовый теллурид; Rh₁₇S₁₅ – миассит; Au–Rh₂S₃ – Au-содержащий боунит; CuPt₂S₄ – маланит; (Fe,Rh)₉S₈ – феродсит; Cu–(Fe,Rh)₉S₈ – медистый феродсит; PtAs₂ – сперилит; (Ru,Rh)As – родиевый рутенарсенит; Ccp – халькопирит и Po – пирротин. Снимки в отраженных электронах. Объяснения в тексте

Fig. 2. Microstructure of PGM and gold alloys with noble and rare metal chalcogenides from the Anabar River basin placers. *a, б* – polyphase inclusions in ferroan platinum, Mayat R., *M-18-157 (a)* and *M-13-157 (б)*; *в* – inclusions of Rh sulfides in ferroan platinum, Mayat R., *M-24-154*; *г* – inclusions of Pd-tellurides in palladium gold, Mayat R., *M-10-154*; *д* – oval 2-phase inclusion of Pd-minerals in ferroan platinum, Mal. Kuonamka R., *MK-20-18*; *е* – inclusions of Ru and Rh arsenides in ferroan platinum, Mal. Kuonamka R., *MK-20-1*; *ж* – polyphase teardrop-shaped inclusion in ferroan platinum, Mal. Kuonamka R., *MK-20-10*; *з, и* – layered sulfide and telluride inclusions in ferroan platinum, Bol. Kuonamka R., *БК-23-36 (з)* and *БК-23-26 (и)*; *к* – amoeboid inclusions of arsenopalladinite in Pt–Pd–Cu–gold, Bol. Kuonamka R., *БК-25-4*; *л–п* – microstructures in Pt–Pd–Cu–Au–As alloys, Bol. Kuonamka R., *БК-25-9 (л)*, *БК-25-A43 (м)*, *БК-25-A50 (н)*, *БК-25-27 (о)* and *БК-25-A7 (п)*. Minerals: Pt – native platinum; Os – osmium; Pd–Fe–Pt, Rh–Ir–Fe–Pt and Ru–Rh–Fe–Pt – ferroan platinum with high content of Pd, Rh–Ir and Ru–Rh, respectively; PtCu – hongshiite; Pt₃Cu – ordered compound (?); RuS₂ – laurite; Rh₂S₃ – bauite; Pd–Au, Pt–Pd–Cu–Au, Pt–Au–Cu – solid solutions of metals; Pd–AuCu – Pd-containing tetra-auricupride; Pd–Au₃Cu – Pd-containing compound Au₃Cu; Au–PdCu – Au-containing skaergaardite; Pd₂Cu₃Au₅ – ordered triple compound; RhAsS – hollingwordite; Pd₂₀Te₇ – keyconite; Pd₉Te₄ – telluropalladinite; Pd–Pb–Te – palladium-lead telluride; Pd–Cu–S – vasilite; Rh–Ni–S – torriveiserite (?); PdS – vysotskite; Pd–Bi–Te – palladium-bismuth telluride; PdTe – kotulskite; Pd₉Te₄ – telluropalladinite; Pd₂₀Te₇ – catconite; Pd–Cu–S – vasilite; Pd₃Pb – zvyagintsevit; Cu–Au–Pd – alloy of Cu–Au-containing palladium; Au–PdCu – Au-containing skaergaardite; Pd₈(Sb,As)₃ – arsenopalladinite; Rh–Ni–S – torriveiserite (?); Pd–Ru–S – ruthenium-palladium sulfide; PdS – vysotskite; Pd–Bi–Te – palladium-bismuth telluride; Rh₁₇S₁₅ – miassite; Au–Rh₂S₃ – Au-containing bowite; CuPt₂S₄ – malanite; (Fe,Rh)₉S₈ – ferodsit; Cu–(Fe,Rh)₉S₈ – copper ferodsit; PtAs₂ – sperrilite; (Ru,Rh)As – rhodium rutenarsenite; Ccp – chalcopyrite and Po – pyrrhotite. Image in back-scattered electrons. Explanations in the text

венных сплавов. Каплевидные формы полифазных включений, состоящих из более низкотемпературных сульфидов, арсенидов и теллуридов в матрице высокотемпературных самородных Pt и Au (см. рис. 2, *а–к*) являются одним из надежных свидетельств их формирования в результате кристаллизации поликомпонентной металлической жидкости в закрытых микросистемах. Это подтверждается отсутствием вокруг таких включений хотя бы микротрещин, которые служили бы подводными каналами для поступающих извне вторичных растворов. Тут трудно согласиться с мнением исследователей, трактующих образование подобных включений проникновением вздесущих флюидных растворов через плотные упаковки платины и золота. Если проникновение флюидных и гидротермальных растворов через микротрещины пород и рыхлые структуры многих породообразующих минералов вполне допустимо, то благородные металлы способны удерживать в своей массе даже сверхтекучий гелий, на чем основан метод ¹⁹⁰Pt-⁴He изотопного датирования [30].

В многокомпонентных металлических жидкостях первыми фазами кристаллизации, очевидно, будут основные их компоненты – Pt, Pd, Fe

и Au, а незначительное количество второстепенных компонентов будет накапливаться в остаточном расплаве и концентрироваться в интерстиционных полостях кристаллитов металла хозяина. Такие остаточные жидкости ограниченного объема под действием силы поверхностного натяжения [28] часто приобретают округлые каплевидные формы (см. рис. 2, *б, д–и*) или вытесняются в интерстиционные полости ксеноморфных очертаний (см. рис. 2, *а, г, е, к*). В силу изолированности подобные расплавы развиваются автономно согласно правилу фазовых равновесий, задаваемых их составом. Например, если в матрице Pd-содержащей железистой платины (рис. 2, *а, б, д, ж, з*) появляются в основном палладиевые минералы, то в Rh-Ru-содержащей матрице фиксируются сульфиды и арсениды родия (см. рис. 2, *в, е, и*). При этом наиболее высокотемпературные фазы (Os, PdCu и теллуриды Pd) приобретают некоторые свои кристаллографические очертания (см. рис. 2, *а, г*), особенно это проявляется в форме идиоморфных кристаллов осмия. Хотя Os является самым высокотемпературным металлом из группы платины, он, будучи второстепенным компонентом, вначале при затвердевании матрицы железистой платины наряду с другими при-

месяцами вытесняется в остаточный расплав, но кристаллизуется в изолированной массе включения первым, образуя идиоморфные таблитчатые кристаллы (см. рис. 2, а). Такая микроструктура включения, сходная с офитовым соотношением минералов в магматических породах, указывает на закономерную последовательность по температуре кристаллизации и подтверждает формирование подобных сплавов из поликомпонентных металлических расплавов.

В одном зерне Pd-золота из россыпи р. Маят были установлены многочисленные округленные включения теллуридов палладия, которые иногда группируются в небольшие слившиеся скопления (см. рис. 2, з). Состав этих включений изменяется от кейтконита $\text{Pd}_{20}\text{Te}_7$ до котульскита PdTe , через теллурупалладинит промежуточного состава Pd_9Te_4 . Для обсуждения тренда кристаллизации такого интересного сплава мы решили воспользоваться диаграммой состояния трехкомпонентной системы Au–Pd–Te, но, к сожалению, эта система пока остается недостаточно изученной экспериментально, и мы построили схематическую диаграмму по данным двойных систем (см. рис. 3). В этой тройной системе высокотемпературные Pd и Au образуют непрерывный твердый раствор (Au, Pd), в котором ниже 870, 850 и 100 °C появляются промежуточные упорядоченные соединения AuPd_3 , Au_3Pd и AuPd соответственно [31]. Природных аналогов этих упорядоченных фаз пока не известно. В бинарной системе Au–Te имеется одно промежуточное соединение AuTe_2 – калаверит [29]. Наиболее сложной является Pd–Te сторона, где наблюдаются различные соединения теллуридов палладия [32]. Так как Te резко снижает температуру плавления Pd и Au, все основные этапы фазовых превращений в этой тройной системе происходят в левой низкотемпературной области по котектическим и перитектическим линиям совместной кристаллизации твердых растворов (Au,Pd) с изменяющимся последовательным набором теллуридов Pd.

В метасоматитах Хаптасыннахской рудной зоны установлены симплектитовые сростания самородного золота и калаверита с включениями халькозина [14]. Нахождение данных минералов в метасоматитах, их пористое строение, отсутствие палладиевых фаз существенно отличает золотокалаверитовую ассоциацию из руд Хаптасыннахской зоны от вышеописанных сплавов из россыпей и указывает на гидротермаль-

но-метасоматическую природу их образования в условиях открытой системы. В этом случае отложение минералов происходило из гидротермального раствора в пористой проницаемой зоне, где осуществляется свободный рост отдельных фаз. Как видно из диаграммы Au–Pd–Te (см. рис. 3), ассоциация, состоящая из примерно равного количества самородного золота и калаверита (AuTe_2), формируется в низкотемпературной области, прилегающей к стороне Au–Te. Здесь при очень низком содержании Pd сплав состава T_1 закристаллизуется ниже 447 °C в двойной эвтектике Au– AuTe_2 . Выше указываются температуры кристаллизации в сухих системах, а в гидротермальных условиях в присутствии летучих эти значения будут значительно ниже, и, согласно данным [14], температура образования золототеллуридных минералов Хаптасыннахского рудопоявления предварительно оценивается в интервале 150–280 °C.

Если в гидротермальной системе наблюдается избыток подвижного компонента – Te, то после выпадения из раствора золота и теллуридов Au, на заключительной стадии произойдет осаждение избытков низкотемпературного самородного теллура. По нашему мнению, такое явление наблюдается в золоторудных телах Кочбулакского рудного поля (Узбекистан), размещенных внутри субвулканических тел, где оруденение локализуется в геологических позициях, свойственных субвулканическим рудным формациям. В золотосульфидно-кварцевых жилах месторождения Кочбулак наряду с теллуридами Au и Ag (калаверитом, сальванитом, петцитом, гесситом) встречаются и крупные (до 6×4 см) выделения самородного теллура [33].

В случае если исходный состав жидкости, например T_2 , имеет повышенное содержание Pd и Te, то по мере выделения избыточного высокотемпературного золота остаточный расплав будет обогащаться легкоплавкими элементами-примесями и тренд кристаллизации вначале попадет на котектическую границу сокристаллизации Pd-золота и калаверита, затем перейти на котектику калаверита и меренскита (PdTe_2), а потом может дойти и до крайней нижней тройной эвтектической точки (Е) калаверит–меренскит–самородный теллур. Такой тренд кристаллизации может наблюдаться при формировании минеральных ассоциаций, характерных для многих золототеллуридно-палладиевых оруденений, производных различных магматитов [34–36].

В золотоплатиноносных россыпях бассейна р. Анабар наиболее характерной парагенетической ассоциацией является железистая платина и палладистое золото – порпечит [3, 4, 6–9]. Порпечит часто встречается в тесном сростании с МПГ в различных магматогенных Au-PGE месторождениях и связанных с ними россыпях [34, 37–42], т. е. генетическое родство золота и платины здесь не вызывает сомнения.

На тройной диаграмме Cu–Pd–Au (рис. 4) составы самостоятельных зерен порпечита из россыпей р. Анабар, в основном приурочены к нижнему правому углу диаграммы, в них содержание Pd достигает 14,65 мас.%, Cu – 3, а Ag не превышает обычно 2,75 %. Составы некоторых зерен из россыпей Маят, Бол. и Мал. Куонамка соответствуют Au-содержащему скаергаардиту (PdCu) и попадают на границу появления упорядоченного соединения β -PdCu из твердого раствора (Pd, Au, Cu) при 350 °C. В системе Cu–Pd–Au кроме фазы β -PdCu установлено присутствие упорядоченного тройного соединения на основе AuCu с гранецентрированной тетрагональной решеткой [43]. Это соединение имеет состав 19 мас.% Pd; 30 % Cu, 51 % Au и отвечает формуле $\text{Au}_3\text{Pd}_2\text{Cu}_5$ (на рис. 4 показано звездочкой – б).

Минералы подобного состава нами обнаружены в россыпях нижнего течения р. Бол. Куонамка, их составы на диаграмме Cu–Pd–Au группируются вокруг точки трехкомпонентного соединения $\text{Pd}_2\text{Cu}_3\text{Au}_5$. По периферии зерен этих минералов образуются тонкие (5–20 мкм) прерывистые каемки Cu-Pd-содержащего золота (см. таблицу, обр. БК-25-А40 и БК-25-А55). Такие оторочки часто имеют пористое строение и иногда проникают по трещинам в матрицу минерала, что свидетельствует об экзогенной их природе в результате облагораживания трехфазного соединения (Pd, Cu, Au) за счет выноса из минерала Pd и Cu. Составы таких двухфазных зерен на диаграмме (см. рис. 4) показаны красными кружочками, соединенными пунктирной линией.

Однако, кроме простого двухфазного строения с каемкой, подобные сплавы образуют и более сложные двух- и трехфазные сростания (см. таблицу, обр. БК-25-43 и БК-25-А50, соответственно), имеющие типичные структуры распада высокотемпературных твердых растворов (см. рис. 2, м, н). Это свидетельствует о том, что формирование сростаний тройного соединения $\text{Pd}_2\text{Cu}_3\text{Au}_5$ с Pd-золотом может происходить не

только в экзогенных условиях, но и в гипогенных обстановках.

Обсуждение

Для объяснения происхождения тесной парагенетической ассоциации золота и платины в россыпях с неустановленными коренными источниками необходимо кратко рассмотреть существующие на данный момент взгляды о совместном формировании комплексных золотоплатиновых руд в различных условиях. В отличие от складчатых областей, где формирование золоторудных месторождений обычно связывается с автохтонным гранитоидным магматизмом, то на древних платформах с весьма незначительным проявлением фанерозойского кислого вулканизма проблема выявления исходных золотоносных магматитов становится дискуссионной. Например, на древних платформах крупные месторождения платиноидов и ассоциирующее с ними золотое оруденение связаны с магматогенными сульфидными и хромитовыми рудами, локализованными в мафит-ультрамафитовых интрузивах с их фельзическими дериватами [35, 48–51]. Проблема усложняется также тем, что вблизи выходов фундамента платформы не исключается возможность попадания в современные россыпи благородных металлов и из источников древних золотоносных террейнов.

Мы рассмотрели тренды кристаллизации природных сплавов на диаграммах простых трехкомпонентных металлических систем и, не абсолютизируя приводимые на диаграммах температуры фазовых превращений, констатируем лишь примерные максимальные температурные параметры – возможные в относительно сухих мафических магматических системах. Очевидно, присутствие в системе других легкоплавких элементов и особенно летучих агентов, появляющихся в значительном количестве на постмагматических стадиях, значительно снижает физико-химические параметры условий, рассматриваемых уже в области гидротермального рудообразования.

Многие исследователи считают, что формирование комплексного оруденения благородных металлов в магматических породах происходило на всем протяжении эволюции рудно-магматических систем, начиная от раннемагматической стадии до постмагматического отделения рудоносных флюидов. Магматогенная Au-PGE минерализация

Представительные анализы минералов сростаний благородных металлов с халькогенидами
цветных и редких элементов из россыпей бассейна р. Анабар, мас. %

Representative analyses of minerals from intergrowths of precious metals with chalcogenides
of base and rare elements from placers of the Anabar River basin, wt. %

Номер образца	Минералы	Pt	Ir	Os	Ru	Rh	Pd	Fe	Ni	Cu	Au	Ag	Bi, Sb	Pb	Te	S	As	Total
М-18-157	Pd-Fe-Pt	81,23				1,03	4,46	10,32	0,35	1,24								98,63
	Os	0,21	10,03	79,55	10,14													99,93
	RuS ₂				61,61											37,99		99,60
	Pd-Cu	4,17					60,62	5,57		25,71	1,35						2,37	99,79
	FeS							54,33	3,10	3,23						37,04		97,70
М-13-157	CuFeS ₂							31,34		33,42						34,51		99,27
	(Rh,Fe)S					34,73		19,34	9,08	5,50						29,26		97,91
	Pd-Fe-Pt	75,27	1,36		0,82	1,14	7,75	8,32	1,17	2,56	1,65							100,04
	Au-PdCu	7,95					52,72	1,31		27,25	4,95	1,58					3,46	99,22
	Pd-Cu-S	1,69					66,61	0,52	1,00	15,68	0,95				1,33	9,51	0,90	98,19
М-24-154	Pd-Ru-S	5,75	7,56	7,93	24,88		40,25	1,12		4,75						6,21		98,45
	Rh-Ni-S		3,57			28,73		4,87	22,31	7,64						29,98		97,10
	Rh-Ir-Fe-Pt	75,09	10,36			6,31		6,84	0,98	0,53								100,11
	Rh ₁₇ S ₁₅	5,91			1,73	67,12		0,67	0,89	1,95						21,42		99,69
	Au-Rh ₂ S ₃	4,91			14,92	32,99		1,38	0,63	7,25	8,24					27,78		98,10
М-10-154	Pd-Au						6,27			2,93	89,59	0,79			0,51			100,09
	Pd ₂₀ Te ₇						59,93			0,66	9,20				26,77		2,26	98,82
	Pd ₉ Te ₄						63,37			0,45	1,57				33,51		1,09	99,99
	PdTe						42,52				1,15	0,93			52,90		1,52	99,02
	Pd-Fe-Pt	81,79					5,54	10,99		0,90								99,22
МК-20-18	Pd ₂₀ Te ₇						65,39								3,67	25,26	4,88	99,20
	Pd ₃ Pb	8,45					57,94							33,01				99,40
	Ru-Rh-Fe-Pt	79,86			2,11	3,08		12,98	0,91	0,67								99,61
	(Ru,Rh)As	2,06			25,85	28,59											42,13	98,63
	Pd-Fe-Pt	76,52					9,57	9,19	0,68	2,90								98,86
МК-20-10	Cu-Pd-Au						37,75			18,63	39,88							96,26
	Pd ₃ Pb	2,61					61,24							33,79				97,64
	Pd ₂₀ Te ₇						68,44							8,35	15,54	1,48	2,56	96,37
	Pd-Cu-S						70,16			13,57					3,72	12,25		99,70

[illegible]

Примечание. Номера образцов и аббревиатура минералов соответствует таковому на рис. 2. Буквы перед номером образцов указывают на расположение россыпей: М – Маят, МК – р. Мал. Куонамка, БК – р. Бол. Куонамка. Пустые ячейки – элемент не обнаружен в пределах чувствительности микронзондового анализа.

Note. Sample numbers and mineral abbreviations correspond to those in Fig. 2. The letters preceding sample numbers indicate placer locations: M – Mayat River, MK – Mal. Kuonamka River, BK – Bol. Kuonamka River. Empty cells indicate that the element was not detected within the detection limits of the microprobe analysis.

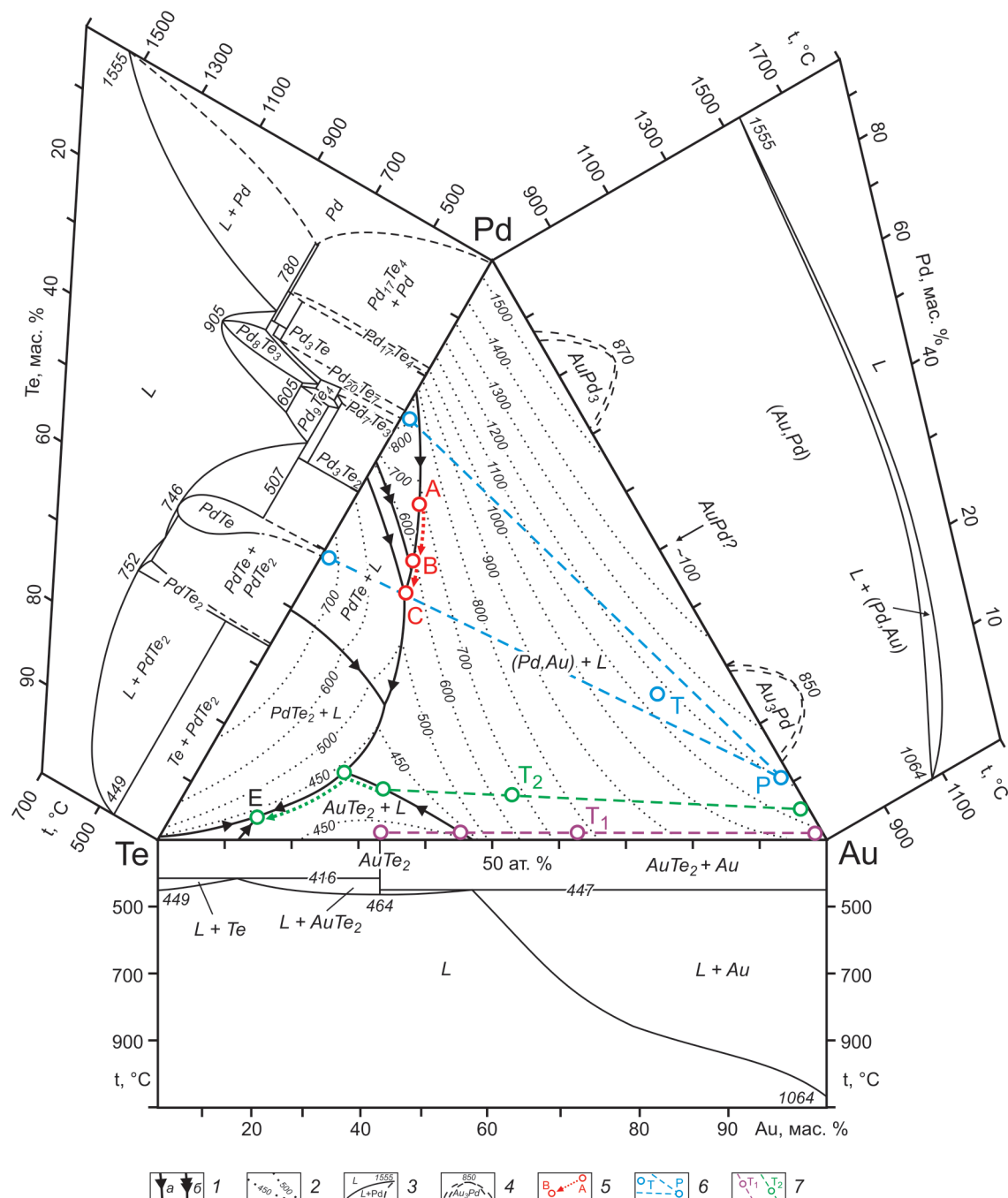


Рис. 3. Схематическая тройная диаграмма Pd–Au–Te, показывающая тренды кристаллизации сосуществующих сростаний Pd-золота с теллуридами Pd и Au.

1 – котектическая (а) и перитектическая (б) пограничные границы между поверхностями ликвидуса различных фаз; 2 – изотермы поверхности ликвидуса; 3 – границы жидких и твердых фаз; 4 – твердофазовые изменения в бинарных системах; 5 – тренды котектической кристаллизации Pd-золота (порпецита) и теллуридов Pd; 6 – соединительные линии (коноды) порпецита (P) с составами сосуществующих теллуридов Pd; 7 – то же, для сосуществующих фаз золото–калаверит (T_1) и порпецит–калаверит–меренскит–самородный теллур (T_2). Пояснения даны в тексте

Fig. 3. Schematic ternary Pd–Au–Te diagram illustrating the crystallization trends of coexisting Pd-gold, Pd telluride, and Au telluride intergrowths.

1 – cotectic (a) and peritectic (b) boundaries between the surfaces of the liquidus of various phases; 2 – liquidus surface isotherms; 3 – phases boundaries; 4 – boundaries of solvus changes; 5 – trends in cotectic crystallization of Pd gold (porpecite) and Pd tellurides; 6 – connecting lines (conodes) of porpecite (P) with compositions of coexisting tellurides Pd; 7 – the same for the coexisting phases gold–calaverite (T_1) and porpecite–calaverite–merenskite–native tellurium (T_2). Explanations in the text

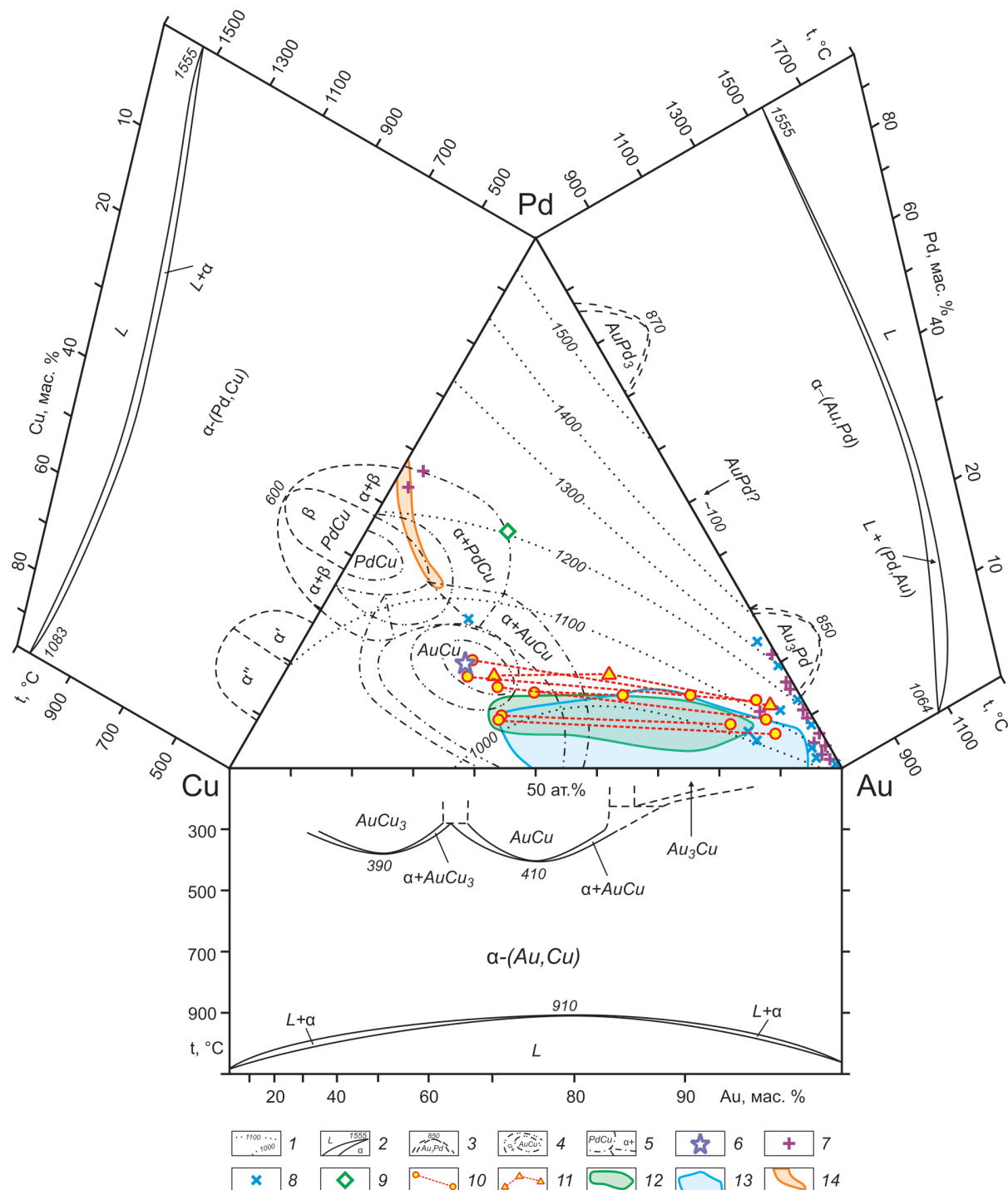


Рис. 4. Составы Cu–Pd–Au сплавов на тройной диаграмме Cu–Pd–Au с бинарными системами.

1 – изотермы поверхности ликвидуса; 2 – границы жидких и твердых фаз; 3 – твердофазовые изменения в бинарных системах; 4, 5 – изотермы существования двухфазных областей, окружающих упорядоченные фазы PdCu и AuCu при 550 °C (4) и при 350 °C (5); 6 – упорядоченное тройное соединение $\text{Pd}_2\text{Cu}_3\text{Au}_5$ по [43]; 7–9 – составы минералов из россыпей: р. Маят (7), р. Большая Куонамка (8) и р. Малая Куонамка (9); 10, 11 – сосуществующие двухфазные (10) и трехфазные (11) сростания из россыпи р. Большая Куонамка; 12–14 – поля составов минералов россыпи Кондерского массива (12) по [44, 45]; сульфидных руд Норильского месторождения (13) по [46] и руд Скаергаардского массива (14) по [47]

Fig. 4. Compositions of Cu–Pd–Au alloys on the diagram of Cu–Pd–Au with binary systems.

1 – liquidus surface isotherms; 2 – phases boundaries; 3 – solid-phase changes in binary systems; 4–5 – isotherms of the existence of two-phase ordered phases PdCu and AuCu at 550 °C (4) and at 350 °C (5); 6 – ordered triple compound $\text{Pd}_2\text{Cu}_3\text{Au}_5$ according

to [43]; 7–9 – compositions of minerals from placers: the Mayat R. (7), the Bol. Kuonamka R. (8) and the Mal. Kuonamka R. (9); 10, 11 – coexisting two-phase (10) and three-phase (11) intergrowths from the Bol. Kuonamka R. placer; 12–14 are the composition fields of minerals from the Kondersky massif (12) according to [44, 45]; sulfide ores from the Norilsk deposit (13) according to [46] and ores from the Skaergaard massif (14) according to [47]

начала формироваться в раннемагматическую стадию в результате отделения от силикатного расплава несмешивающейся малосульфидно-металлической жидкости. В процессе кристаллизации магмы в интрузивной камере рудные компоненты магмы концентрируются в остаточном расплаве, а после консолидации интрузива часть наиболее подвижных рудных элементов в составе водно-солевых растворов может покинуть материнские породы и формировать удаленные типы гидротермальных руд. Это может произойти, подобно механизму образования месторождений золота, связанных с гранитоидными интрузивами – Intrusion Related Gold System (IRGS), которые образуют широкий спектр месторождений: от глубинных IOCG-типа с Fe, Cu, Au, U, Ce, La до близповерхностных эпitherмальных Au, Ag, Cu, As, Sb, Hg, Te секущих руд [52].

Экспериментальные исследования Н.С. Горбачева с соавторами [53] показали высокую эффективность магматических и гидротермальных флюидов в переносе и фракционировании Au, Pd и PЗЭ надкритическим магматогенным флюидом в процессе дегазации магм. В частности ими показано, что в магматических условиях при $T = 1100\text{--}1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ Pd обладает более высокими магмофильными свойствами, чем Au. Различия гидрофильных и магмофильных свойств Au и Pd может приводить к фракционированию этих металлов при магматической дегазации. Таким образом, флюидный перенос может обеспечить мобилизацию Au, Pd, PЗЭ из магм и окружающих магматических пород, затем передвижение и отложение комплексных Au–Pd–PЗЭ-минерализаций в близповерхностных условиях.

Заключение

В россыпях бассейна р. Анабар установлены полиминеральные срастания МПП, палладистого золота, Au–Cu–Pd сплавов и других минералов, состоящих из сульфидов, арсенидов, теллуридов PGE и Au. На основании нахождения большинства указанных минералов в форме округлых изолированных микровключений в матрице железистой платины авторы предполагают, что образование таких срастаний происходило в результате кристаллизации многокомпонентной малосульфидно-металлической жидкости, отделившейся

от вмещающего мафит-ультрамафитового магматического расплава. Не смешивающиеся с силикатным веществом металлические жидкости, кроме PGE, Fe, Cu, Au и других второстепенных цветных металлов, в достаточно большом количестве до 10–30 мас.% содержали S, As, Te, которые значительно снижают температуру кристаллизации тугоплавких металлов платиновой группы. Детальное рассмотрение тренда кристаллизации подобных полиминеральных сплавов на фазовой диаграмме выходит уже за рамки одной статьи и требует дополнительных исследований.

Высокая устойчивость PGE и Au предохраняет такие изолированные включения сульфидных и других минералов от дальнейшего их разрушения. В процессе кристаллизации магмы наиболее подвижные рудные компоненты, например, Pd, Au и Ag, в составе водно-солевых растворов могут покинуть магматическую камеру и формировать вокруг интрузивного тела переотложенные скарновые, метасоматические и гидротермальные типы руд. Такие рудно-магматические системы, связанные с мафит-ультрамафитовыми вулканоплутоническими комплексами и их лейкократовыми дифференциатами, и могут быть источниками золотоплатиноносных россыпей, занимающих огромные территории северо-востока Сибирской платформы.

Список литературы / References

1. Шпунт Б.Р. Платиновые минералы четвертичных отложений Анабаро-Оленекского поднятия. *Геология рудных месторождений*. 1970;(2):123–126.
2. Shpunt B.R. Platinum minerals in Quaternary deposits of the Anabar-Olenek Uplift. *Geology of Ore Deposits*. 1970;(2): 123–126. (In Russ.).
3. Трушков Ю.Н., Избеков Э.Д., Томская А.И., Тимофеев В.И. *Золотоносность Вилюйской синеклизы и ее обрамления*. Новосибирск: Наука; 1975. 148 с.
4. Trushkov Yu.N., Izbekov E.D., Tomskeya A.I., Timofeyev V.I. *The gold-bearing potential of the Viluy syncline and its environs*. Novosibirsk: Nauka; 1975. 148 p. (In Russ.).
5. Округин А.В. *Россыпная платиноносность Сибирской платформы*. Якутск: ЯФ Изд-ва СО РАН; 2000. 184 с.
6. Okrugin A.V. *Platinum-bearing placers of the Siberian platform*. Yakutsk: YaF SB RAS; 2000. 184 p. (In Russ.).
7. Герасимов Б.Б., Никифорова З.С., Павлов В.И. Минералого-геохимические особенности золота россыпи р. Большая Куонамка. *Наука и образование*. 2014;(3):74–78.
8. Gerasimov B.B., Nikiforova Z.S., Pavlov V.I. Mineralogical and geochemical characteristics of placer gold in the Bol-

shaya Kuonamka river. *Nauka i Obrazovanie*. 2014;(3):74–78. (In Russ.).

5. Михайлов В.А., Гаврильев Н.Н. Роль орогенных комплексов Вилуйской синеклизы в золотоносности ее платформенного чехла. *Известия АН СССР. Серия геологическая*. 1976;(12):110–118.

Mikhailov V. A., Gavriliev N. N. The role of orogenic complexes of the Vilyui syncline in the gold content of its platform cover. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR, Seriya Geologicheskaya (News of the USSR Academy of Sciences. Geological series)*. 1976;(12):110–118. (In Russ.).

6. Округин А.В., Мазур А.Б., Земнухов А.Л. и др. Ассоциация палладистого золота с минералами платиновой группы в россыпях бассейна р. Анабар на северо-востоке Сибирской платформы. *Отечественная геология*. 2009;(5):3–11.

Okrugin, A. V., Mazur, A. B., Zemnuhov, A. L., et al. The palladium gold-PGM association in the placers of the Anabar River basin, NE part of the Siberian platform, Russia. *Otechestvennaya Geologiya*. 2009;(5):3–10. (In Russ.).

7. Округин А.В., Земнухов А.Л., Иванов П.О. Минералы редких и радиоактивных элементов в комплексных золото-платина-алмазоносных россыпях бассейна р. Анабар на северо-востоке Сибирской платформы. *Наука и образование*. 2014;(1):67–74.

Okrugin A. V., Zemnuhov A. L., Ivanov P. O. Minerals of rare and radioactive elements from complex gold-platinum-diamond placers in the river basin of Anabar. *Nauka i obrazovanie*. 2014;(1):67–74. (In Russ.).

8. Okrugin A., Gerasimov B. Paragenetic association of platinum and gold minerals in placers of the Anabar River in the Northeast of the Siberian Platform. *Minerals*. 2023;13(1):96. <https://doi.org/10.3390/min13010096>

9. Okrugin A., Gerasimov B. Formation of intergrowths of platinum-group minerals and gold from magmatogenic ores in relation to phase changes in Pt-Pd-Fe-Cu-Au system. *Minerals*. 2024;14:326. <https://doi.org/10.3390/min14030326>

10. Томшин М.Д., Зайцев А.И., Травин А.В., Округин А.В. Протерозойский массив щелочных габброидов на реке Муна (северо-восток Сибирской платформы). *Региональная геология и металлогения*. 2010;(42):40–48.

Tomshin M. D., Zaitsev A. I., Travin A. V., Okrugin A. V. The Proterozoic massif of alkaline gabbroids on the Muna River (northeast of the Siberian Platform). *Regional Geology and Metallogeny*. 2010;(42):40–48. (In Russ.).

11. Милашев В.А., Томановская Ю.И. Проявления щелочно-ультраосновного магматизма в прибрежной части моря Лаптевых. В кн.: Рабкин М.И. (ред.) *Кимберлитовый вулканизм и перспективы коренной алмазности Сибирской платформы*. Л.; 1971. С. 127–133.

Milashev V. A., Tomanovskaya Yu. I. Manifestations of alkaline-ultramafic magmatism in the coastal part of the Laptev Sea. In: Rabkin M. I. (ed.) *Kimberlite volcanism and prospects for the indigenous diamond content of the Siberian platform*. Leningrad; 1971, pp. 127–133. (In Russ.).

12. Округин А.В., Зайцев А.И., Борисенко А.С. и др. Золото-платиноносные россыпи бассейна р. Анабар и их возможная связь с щелочно-ультраосновными магматитами севера Сибирской платформы. *Отечественная геология*. 2012;(5):11–20.

Okrugin A. V., Zaitsev A. I., Borisenko A. S., et al. Gold-platinum-bearing placers deposits in the river basin of Anabar and their possible relation to alkali-ultrabasic magmatic rocks

in the northern Siberian platform. *Otechestvennaya Geologiya*. 2012;(5):11–21. (In Russ.).

13. Музыка Г.М., Чумирин К.Г. К вопросу о проявлении аналогов меймечитов на южной окраине Анабарского массива. В кн.: Ковальский В.В., Юркевич Р.К. (ред.) *Геология, петрография и минералогия магматических образований северо-восточной части Сибирской платформы*. М.: Наука; 1970. С. 183–190.

Muzyka G. M., Chumirin K. G. On the issue of the manifestation of analogues of meimechites on the southern outskirts of the Anabar massif. In: Kovalsky V. V., Yurkevich R. K. (eds.) *Geology, petrography and mineralogy of magmatic formations of the northeastern part of the Siberian platform*. Moscow: Nauka; 1970, pp. 183–190. (In Russ.).

14. Gerasimov B., Kondratieva L. Mineral characterization of gold ore occurrences in the Khaptasynakh Ore Zone, Anabar Shield, Far East Region, Russia. *Minerals*. 2025;15(8):774. <https://doi.org/10.3390/min15080774>

15. Граханов С.А., Смелов А.П. Возраст прогнозируемых коренных источников алмазов на севере Якутии. *Отечественная геология*. 2011;(5):56–63.

Grakhanov S. A., Smelov A. P. Age of predicted primary sources of diamonds in northern Yakutia. *Otechestvennaya Geologiya*. 2011;(5):56–63. (In Russ.).

16. Афанасьев В.П., Лобанов С.С., Похиленко Н.П. и др. Полигенез алмазов Сибирской платформы. *Геология и геофизика*. 2011;52(3):335–353.

Afanas'ev V. P., Lobanov S. S., Pokhilenko N. P., et al. Polygenesis of diamonds in the Siberian platform. *Russian Geology and Geophysics*. 2011;52(3):259–274. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2011.02.001>

17. Злобин В.Л., Петрова Т.Л., Соношкин В.Е., Тислов Ю.С. Первая находка сперрилита в золотоносной россыпи Анабарского щита. *Доклады Академии наук*. 1996;49(4):504–506.

Zlobin V. L., Petrova T. L., Sonushkin V. E., Tislov Yu. S. The first discovery of sperrilite in the gold-bearing placer of the Anabar shield. *Doklady Akademii Nauk*. 1996;349(4):504–506. (In Russ.).

18. Разин Л.В., Васюков В.С., Избеков Э.Д., Мионов Е.П. Россыпная платиноносность Центрально-Алданской металлогенической области. В кн.: Додин Д.А., Оганесян Л.В. и др. (ред.) *Платина России. Проблемы развития минерально-сырьевой базы платиновых минералов*. М.: Геоинформмарк; 1994. С. 159–165.

Razin L. V., Vasyukov V. S., Izbekov E. D., Mironov E. P. Platinum placers of the Central Aldan metallogenic region. In: Dodin D. A., Oganessian L. V., et al. (eds.) *Platinum in Russia: Challenges for the Development of its mineral resource base*. Moscow: Geoinformmark Publ.; 1994, pp. 159–165. (In Russ.).

19. Смелов А.П., Котов А.Б., Сальникова Е.Б. и др. Возраст и продолжительность формирования Билляхской зоны тектонического меланжа, Анабарский щит. *Петрология*. 2012;20(3):315–330.

Smelov A. P., Beryozkin V. I., Kravchenko A. A., et al. Age and duration of the formation of the Billyakh tectonic melange zone, Anabar Shield. *Petrology*. 2012;20(3):286–300.

20. Энтин А.Р., Зайцев А.И., Ненашев Н.И. и др. О последовательности геологических событий, связанных с внедрением Томторского массива ультраосновных щелочных пород и карбонатитов (Северо-Западная Якутия). *Геология и геофизика*. 1990;31(12):42–51.

- Entin A.R., Zaitsev A.I., Nenashev N.I., et al. On the sequence of geological events associated with the intrusion of the Tomtor massif of ultramafic alkaline rocks and carbonatites (Northwestern Yakutia). *Russian Geology and Geophysics*. 1990;31(12):42–51. (In Russ.)
21. Зимоглыадов Б.Н. О россыпной платине в Норильской районе. В кн.: *Магматизм, литология и вопросы рудоносности Сибири. Вып. 1*. Новосибирск; 1974. С. 169–174.
- Zimoglyadov B.N. On placer platinum in the Noril'sk region. In: *Magmatism, lithology, and problems of the presence of ore in Siberia. Vol. 1*. Novosibirsk; 1974, pp. 169–174. (In Russ.)
22. Лихачев А.П., Кириченко В.Т., Лопатин Г.Г. и др. К особенностям платиноносности массивов щелочно-ультраосновной формации. *ЗВМО*. 1987;116(1):122–125.
- Likhachev A.P., Kirichenko V.T., Lopatin G.G., et al. Distinctive features of platinum occurrences in the massifs of alkali-ullrabasic formations. *Zapiski Vsesoyuznogo Mineralogicheskogo Obshchestva (Proceedings of the Russian Mineralogical Society)*. 1987;(1):122–125. (In Russ.)
23. Ernst R.E., Hamilton M.A., Söderlund U., et al. Long-lived connection between southern Siberia and northern Laurentia in the Proterozoic. *Nature Geoscience*. 2016;9:464–469. <https://doi.org/10.1038/NGeo2700>
24. Okrugin A.V., Yakubovich O.V., Ernst R.E., Druzhinina Zh.Yu. Platinum-bearing placers: mineral associations and their 190Pt–4He and Re–Os ages, and potential links with large igneous provinces in the Siberian craton. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*. 2020;115(8):1835–1853. <https://doi.org/10.5382/econgeo.4773>
25. Okrugin A.V. Origin of platinum-group minerals in mafic-ultramafic rocks: from dispersed elements to nuggets. *The Canadian Mineralogist*. 2011;49(6):1397–1412. <https://doi.org/10.3749/canmin.49.6.1397>
26. Райнз Ф.Н. *Диаграммы фазового равновесия в металлургии*. М.: Металлургиздат; 1960. 376 с.
- Rhines F.N. *Phase diagrams in metallurgy. Their development and application*. New York–Toronto–London: McGraw–Hill; 1956.
27. Аносов В.Я., Погодин С.А. *Основные начала физико-химического анализа*. М.–Л.: Изд-во АН СССР; 1947. 876 с.
- Anosov V.Y., Pogodin S.A. *Basic principles of physical and chemical analysis*; Moscow–Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1947. 876 p. (In Russ.)
28. Деверо О.Ф. *Проблемы металлургической термодинамики*. М.: Металлургия; 1986.
- Devereux O.F. *Topics in Metallurgical Thermodynamics*. New York: J. Wiley; 1983.
29. Вол А.Е., Каган И.К. *Строение и свойства двойных металлических систем*. Т. 3. М.: Наука; 1976. 814 с.
- Vol A.E., Kagan I.K. *Structure and properties of binary metal systems*. Vol. 3. Moscow: Nauka; 1976. 814 p. (In Russ.)
30. Шуколюков Ю.А., Якубович О.В., Мочалов А.Г. и др. Новый изотопный геохронометр для прямого датирования самородных минералов (^{190}Pt – ^4He метод). *Петрология*. 2012;20(6):545–559.
- Shukolyukov Yu.A., Yakubovich O.V., Mochalov A.G., et al. New geochronometer for the direct isotopic dating of native platinum minerals (^{190}Pt – ^4He method). *Petrology*. 2012;20(6):491–505.
31. Okamoto H., Massalski T. B. *Alloy Phase Diagrams*. 2nd ed. 1990. V. 1, pp. 409–410.
32. Okamoto H. The Pd–Te system (Palladium–Tellurium). *Journal of Phase Equilibria*. 1992;13:73–78.
33. Кирезиди С.В. Геохимия селена и теллура в рудах месторождения Кочбулак. В кн.: *Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий: 12-я Межрегиональная научно-практическая конференция, г. Уфа, 21–23 мая, 2018 г.* СПб.: Свое издательство; 2018. С. 249–255.
- Kirezidi S.V. Geochemistry of selenium and tellurium in ores of the Kochbulak deposit. In: *Geology, minerals and problems of geoecology of Bashkortostan, the Urals and adjacent territories: 12th Interregional Scientific and Practical Conference, Ufa, May 21–23, 2018*. St. Petersburg: Svoe Izdatelstvo; 2018, pp. 249–255. (In Russ.)
34. Тарбаев М.Б., Кузнецов С.К., Моралев Г.В. и др. Новый золото-палладиевый тип минерализации в Кожимском районе Приполярного Урала (Россия). *Геология рудных месторождений*. 1996;38(1):15–30.
- Tarbaev M.B., Kuznetsov S.K., Moralev G.V., Soboleva A.A., Laputina I.P. New gold-palladium type of mineralization in the Kozhim region of Circumpolar Urals (Russia). *Geology of Ore Deposits*. 1996;38(1):11–25.
35. Шайбеков Р.И., Сокерина Н.В., Исаенко С.И. и др. Золото-теллуридно-палладиевая минерализация как новый тип в габбро-долеритах хребта Пай-Хой (Югорский полуостров, Россия). *Геология и геофизика*. 2020;61(3):334–356. <https://doi.org/10.15372/GiG2019156>
- Shaybekov R.I., Sokerina N.V., Isaenko S.I., et al. Gold–telluride–palladium mineralization, a new type of mineralization in gabbro-dolerites of the Pai-Khoi ridge (Yugor Peninsula, Russia). *Russian Geology and Geophysics*. 2020;61(3):334–356. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/RGG2019156>
36. Мурзин В.В., Пальянова Г.А., Аникина Е.В., Молошаг В.П. Минералогия благородных металлов (Au, Ag, Pd, Pt) Волковского Cu–Fe–Ti–V месторождения (Средний Урал). *Литосфера*. 2021;21(5):643–659. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2021-21-5-643-659>
- Murzin V.V., Palyanova G.A., Anikina E.V., Moloshag V.P. Mineralogy of noble metals (Au, Ag, Pd, Pt) in Volkovskoe Cu–Fe–Ti–V deposit (Middle Urals, Russia). *Lithosphere (Russia)*. 2021;21(5):643–659. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2021-21-5-643-659>
37. Cabri L.J., Laflamme J.H.G. Rhodium, platinum and gold alloys from the Stillwater Complex. *The Canadian Mineralogist*. 1974;12:399–403.
38. Kingston G.A., El-Dosuky B.T. A Contribution on the platinum-group mineralogy of the Merensky reef at the Rustenburg platinum mine. *Economic Geology*. 1982;77:1367–1384.
39. Кривенко А.П., Толстых Н.Д., Веселовский Н.Н., Майорова О.Н. Золотосодержащие теллуриды платиноидов и палладистое золото в габбро-норитах Панского массива на Кольском полуострове. *Доклады АН СССР*. 1991;319(3):725–729.
- Krivenko A.P., Tolstykh N.D., Veselovsky N.N., Mayorova O.N. Gold-bearing tellurides of platinoids and palladium gold in gabbro-norites of the Pana massif, Kola Peninsula. *Doklady Akademii Nauk*. 1991;319(3):725–729. (In Russ.)
40. Некрасов И.Я., Ленников А.М., Октябрьский Р.А. и др. *Петрология и платиноносность кольцевых щелочно-ультраосновных комплексов*. М.: Наука; 1994. 381 с.

- Nekrasov I.Ya., Lennikov A.M., Oktyabrsky R.A., et al. *Petrology and platinum potential of ring alkaline-ultrabasic complexes*. Moscow: Nauka; 1994. P. 381. (In Russ.).
41. Malitch K.N., Auge T., Badanina I.Yu., et al. Os-rich nuggets from Au-PGE placers of the Maimecha-Kotui Province, Russia: a multi-disciplinary study. *Mineralogy and Petrology*. 2002;76:121–148.
42. Божко Е.Н. К вопросу об источниках золотоплатиноидной минерализации структурно-формационной зоны Матагания-Сигири (Гвинея, Западная Африка). *Вестник Воронежского университета. Геология*. 2005;(1):193–203.
- Bozhko E.N. To the problem of the hard-rock types of the auriferous-platiniferous mineralization of the Matagania-Sigiri structural-formational zone (Guinea, West Africa). *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*. 2005;(1):193–203. (In Russ.).
43. Raub E., Wörwag G. Über *Gold-Palladium-Kupfer-Legierungen*. *Journal of Materials Research*. 1955;46(2):119–128. <https://doi.org/10.1515/ijmr-1955-460208>
44. Shcheka G.G., Lehmann B., Gierth E., et al. Macrocrytals of Pt-Fe alloy from the Kondyor PGE placer deposit, Khabarovskiy Kray, Russia: trace-element content, mineral inclusions and reaction assemblages. *The Canadian Mineralogist*. 2004;42:601–617. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.42.2.601>
45. Nekrasov I.Ya., Ivanov V.V., Lennikov A.M., et al. Rare natural polycomponent alloys based on gold and copper from the platinum placer in the Kondor alkaline-ultrabasic massif, southeastern Aldan shield, Russia. *Geology of Ore Deposits*. 2001;43(5):406–417.
46. Разин Л.В. Минералы – природные сплавы золота и меди в рудах медно-никелевых месторождений норильского типа. В кн.: Барсанов Г.П. (ред.) *Труды Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана. Вып. 24*. М.: Наука; 1975. С. 93–106.
- Razin L.V. Minerals–natural alloys of gold and copper in ores of copper-nickel deposits of the Norilsk type. In: Barsanov G.P. (ed.) *Proceedings of Fersman Mineralogical Museum. Vol. 24*. Moscow: Nauka; 1975, pp. 93–106. (In Russ.).
47. Rudashevsky N.S., McDonald A.M., Cabri L.J., et al. Skaergaardite, PdCu, a new platinum-group intermetallic mineral from the Skaergaard intrusion, Greenland. *Mineralogical Magazine*. 2004;68(4):615–632. <https://doi.org/10.1180/0026461046840208>
48. Naldrett A.J., Cabri L.J. Ultramafic and related mafic rocks: their classification and genesis with special reference to the concentration of nickel sulfides and platinum-group elements. *Economic Geology*. 1976;71(7):1131–1158. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.71.7.1131>
49. Genkin A.D., Evstigneeva T.L. Association of platinum-group minerals of the Noril'sk copper-nickel sulfide ores. *Economic Geology*. 1986;81(5):1203–1212. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.81.5.1203>
50. Дистлер В.В., Гроховская Т.Л., Евстигнеева Т.Л. и др. *Петрология сульфидного магматического рудообразования*. М.: Наука; 1988. 232 с.
- Distler V.V., Grokhovskaya T.L., Evstigneeva T.L., et al. *Petrology of sulfide magmatic ore formation*. Moscow: Nauka; 1988. 232 p. (In Russ.).
51. Некрасов И.Я. *Геохимия, минералогия и генезис золоторудных месторождений*. М.: Наука; 1991. 302 с.
- Nekrasov I.Ya. Geochemistry, mineralogy, and genesis of gold deposits. Moscow: Nauka; 1991. 302 p. (In Russ.).
52. Orlandea E., Vlad S.N. A novel conceptual model of intrusion related gold bearing systems and exploration tools. *Studia UBB Geologia*. 2020;63(1):1–12. <https://doi.org/10.5038/1937-8602.63.1.1304>
53. Горбачев Н.С., Дадзе Т.П., Каширцева Г.А., Кунц А.Ф. Флюидный перенос золота, палладия, редкоземельных элементов и генезис рудопроявлений Приполярного Урала. *Геология рудных месторождений*. 2010;52(3):241–259.
- Gorbachev N.S., Dadze T.P., Kashirtseva G.A., Kunts A.F. Fluid transfer of gold, palladium, and rare earth elements and genesis of ore occurrences in the Subpolar Urals. *Geology of Ore Deposits*. 2010;52(3):215–233.

Об авторах

ОКРУГИН Александр Витальевич, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-1248-8993>, ResearcherID: V-7207-2018, Scopus Author ID: 6603402108, SPIN: 6412-7556, e-mail: okrugin@diamond.ysn.ru

ГЕРАСИМОВ Борис Борисович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-5112-536X>, ResearcherID: L-6369-2018, Scopus Author ID: 14063438000, e-mail: bgerasimov@yandex.ru

Вклад авторов

Округин А.В. – разработка концепции, методология, верификация, участие в полевых работах, минералогические исследования, обработка аналитических данных, визуализация, создание и редактирование рукописи; **Герасимов Б.Б.** – методология, проведение полевых работ, отбор проб, выделение монофракций минералов и их аналитическое исследование, редактирование черновика рукописи

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

OKRUGIN, Alexander Vitalievich, Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-1248-8993>, ResearcherID: V-7207-2018, Scopus Author ID: 6603402108, SPIN: 6412-7556, e-mail: okrugin@diamond.ysn.ru

GERASIMOV, Boris Borisovich, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5112-536X>, ResearcherID: L-6369-2018, Scopus Author ID: 14063438000, e-mail: bgerasimov@yandex.ru

Authors' contribution

Okrugin A.V. – conceptualization, methodology, validation of data, participating in field work, mineralogical investigation, data analysis, visualization, writing – original draft, writing – review & editing; **Gerasimov B.B.** – methodology, validation of geological data, conducting field work, sampling, selection minerals and their analytical study, writing – review & editing

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 29.09.2025

Поступила после рецензирования / Revised 12.11.2025

Принята к публикации / Accepted 04.12.2025



Оригинальная статья

Состав пирита золоторудного проявления Утанах в диафторитах Верхне-Тимптонского района Алдано-Станового щита (по данным РСМА и ЛА-ИСП-МС)

Е. Е. Лоскутов^{✉,1}, В. Ю. Фридовский^{1,2}, Е. Е. Иванов¹

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

²Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило ДВО РАН,
г. Магадан, Российская Федерация

✉ loskutov@diamond.ysn.ru

Аннотация

В Верхне-Тимптонском рудном районе, несмотря на наличие крупных россыпных месторождений и более чем вековую историю освоения, сопоставимых рудных месторождений не выявлено, а данные об их возможных типах весьма ограничены. Целью работы является исследование минералогических особенностей и состава пирита проявления Утанах для реконструкции условий формирования и типизации золоторудной минерализации. С использованием рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и лазерной абляцией (ЛА-ИСП-МС) изучен состав пирита золоторудного проявления Утанах Верхне-Тимптонского рудного района. Золоторудное проявление Утанах расположено в диафторитах (биотит-мусковитовые и хлоритовые сланцы) Холодниканского зеленокаменного пояса. Минерализация представлена карбонат-кварцевыми жилами и линзами мощностью от 0,1 до 1,5 м и окорудными метасоматитами с вкрапленными сульфидами. Выделены две генерации пирита. Состав пирита-1 из метасоматитов эпидот-кварцевого состава близок к стехиометрическому. Пирит-1 встречается в виде мелких агрегатов кубической формы размером до 200 мкм. Пирит-1 обогащен Ni, Cu, As, Pb, Te и Zn при умеренных содержаниях Co и Se и демонстрирует выраженную секториальную зональность: ядра насыщены As и Ni, каймы обогащены Cu, Co и Pb. Пирит-2 наблюдается в виде аллотриоморфных зерен размером от 0,8 до 7,0 мм, в их дефектах кристаллизуются халькопирит, борнит в ассоциации с самородным золотом. Пирит-2 из карбонат-кварцевых жил отличается от пирита-1 аномально высокими содержаниями Co и Se, низкими концентрациями Ni, Cu и As и повышенными значениями отношения Co/Ni. Содержания золота в пирите обоих типов крайне низкие. Полученные результаты свидетельствуют о смене ранних As–Ni-обогащенных метаморфических источников поздними Co–Cu-обогащенными источниками магматического происхождения. Установленные геохимические индикаторы характерны для орогенного золоторудного оруденения, контролируемого зонами диафторитов в гранулитовых и амфиболитовых комплексах. Исследование химического состава пирита является эффективным инструментом типизации слабо изученных проявлений золота.

Ключевые слова: золото, пирит, геохимия, микроэлементы, орогенный тип, Утанах, Алдано-Становой щит

Финансирование. Минералого-геохимические исследования выполнены за счет средств госзадания ИГАБМ СО РАН (проект № FUG-2024-0006), интерпретация результатов проведена при поддержке гранта РНФ (№ 23-47-00064).

Для цитирования: Лоскутов Е.Е., Фридовский В.Ю., Иванов Е.Е. Состав пирита золоторудного проявления Утанах в диафторитах Верхне-Тимптонского района Алдано-Станового щита (по данным РСМА и ЛА-ИСП-МС). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(4):559–571. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-559-571>

Chemical composition of pyrite from the Utanakh gold occurrence in diaphthorites of the Verkhne-Timptonkiy area, Aldan-Stanovoy shield (based on EPMA and LA-ICP-MS data)

Evgeniy E. Loskutov^{✉,1}, Valery Y. Fridovsky^{1,2}, Egor E. Ivanov¹

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

²N.A. Shilo North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Magadan, Russian Federation

[✉]loskutov@diamond.ysn.ru

Abstract

In the Verkhne-Timptonkiy ore district, despite the presence of large placer deposits and more than a century-long mining history, no comparable primary gold deposits have been identified, and information on their possible types remains highly limited. The aim of this study was to investigate the mineralogical characteristics and chemical composition of pyrite from the Utanakh occurrence in order to reconstruct the conditions of ore formation and to classify the type of gold mineralization. The composition of pyrite from the Utanakh gold occurrence in the Verkhne-Timptonkiy district was examined using electron probe microanalysis (EPMA) and laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS). The Utanakh occurrence is hosted in diaphthorites (biotite–muscovite and chlorite schists) of the Kholodnikan greenstone belt. Mineralization is represented by carbonate–quartz veins and lenses 0.1–1.5 m thick, and by adjacent metasomatites containing disseminated sulfides. Two generations of pyrite were distinguished. Pyrite-1 hosted in epidote–quartz metasomatites is close to stoichiometric composition and forms fine cubic aggregates up to 200 µm in size. Pyrite-1 is enriched in Ni, Cu, As, Pb, Te, and Zn, contains moderate amounts of Co and Se, and exhibits well-developed sectoral zoning: the cores are enriched in As and Ni, whereas the rims are enriched in Cu, Co, and Pb. Pyrite-2 occurs as anhedral grains 0.8–7.0 mm in size, with chalcopyrite and bornite crystallizing in structural defects in association with native gold. Pyrite-2 from carbonate–quartz veins differs from Py-1 by anomalously high concentrations of Co and Se, low contents of Ni, Cu, and As, and elevated Co/Ni ratios. Gold concentrations in both pyrite types are extremely low. The obtained results indicate a transition from early As–Ni-rich metamorphic fluid sources to late Co–Cu-rich magmatic-derived fluids. The established geochemical indicators are typical of orogenic gold mineralization controlled by diaphthorite zones within granulite and amphibolite complexes. The study demonstrates that pyrite chemistry is an effective tool for classifying poorly investigated gold occurrences.

Keywords: gold, pyrite, geochemistry, trace elements, orogenic type, Utanakh, Aldan-Stanovoy shield

Funding. Mineralogical and geochemical analyses were conducted with financial support from the state assignment for the DPMGI SB RAS (Project No. FUGG-2024-0006). The interpretation of the results was supported by the Russian Science Foundation (Grant No. 23-47-00064).

For citation: Loskutov E.E., Fridovsky V.Y., Ivanov E.E. Chemical composition of pyrite from the Utanakh gold occurrence in diaphthorites of the Verkhne-Timptonkiy area, Aldan-Stanovoy shield (based on EPMA and LA-ICP-MS data). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(4):559–571. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-559-571>

Введение

В Верхне-Тимптонском рудном районе (ВТРП) известны крупные россыпные месторождения, однако сопоставимых по масштабу рудных месторождений до сих пор не выявлено, а данные об их возможных типах и металлоносности весьма ограничены [1–4]. Известные проявления, в том числе Утанах Скабельцинского рудного

поля, локализуются в зонах диафторитов, развитых по породам, метаморфизованным в условиях гранулитовой и амфиболитовой фаций метаморфизма [3]. В диафторитах проявлены карбонат-кварцевые жилы с сульфидной минерализацией и вкрапленный пирит [4]. Пирит является минералом носителем «невидимого» Au, а его характеристики широко используются для выяснения

условий рудообразования и определения типа минерализации [5–10]. Вариации состава пирита из золоторудных месторождений в диафторитах Алдано-Станового щита не изучены.

Основное внимание в данном исследовании уделено минералогическим и геохимическим характеристикам пирита проявления Утанах, изученным с использованием рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и лазерной абляцией (ЛА-ИСП-МС). Результаты исследования вносят вклад в понимание процессов формирования золотоносных систем региона и могут быть использованы для поисков и оценки подобных месторождений.

Общие сведения о геологическом строении района и минералогии рудопоявления Утанах

Скабельцинское рудное поле приурочено к восточному замыканию Каларской зоны тектонического меланжа, которая разделяет крупные структурные элементы Центрально-Алданского супертеррейна и Тындинский террейн [11, 12]. Наиболее древние породы Скабельцинского рудного поля представлены архейско-протерозойскими метаморфическими комплексами (гнейсы, сланцы, амфиболиты, кварциты) [13]. Они перекрываются триасовыми вулканитами, ранне- и среднеюрскими терригенными отложениями и раннемеловыми песчано-конгломератовыми толщами. Проявлены магматические образования широкого возрастного диапазона — от архея до раннего мела. В отдельный комплекс выделены диафториты Холодниканского зеленокаменного пояса — биотит-мусковитовые и хлоритовые сланцы.

В ВТРП проявлены несколько этапов докембрийской и фанерозойской тектонической и магматической активности. В докембрии сформировались ультраметаморфические породы, мигматиты и гранитоидные массивы. Внедрение гранит-гранодиоритовых интрузий и формирование сопутствующих метасоматитов произошло в мезозойский этап. Среднеюрский возраст (~170 млн лет) установлен для амфибол-биотитового тоналита Неричинского массива, секущего диафториты [14]. Осадочное заполнение мезозойских грабенов началось с накопления триасовых вулканитов и юрских терригенных отложений и завершилось раннемеловыми песчано-конгло-

мератовыми толщами, лежащими с угловым несогласием на подстилающих толщах.

Золоторудное проявление Утанах расположено в низовьях одноименного ручья. Минерализация представлена карбонат-кварцевыми жилами и линзами мощностью от 0,1 до 1,5 м, околорудными метасоматитами, залегающими в диафторированных породах. По данным атомно-абсорбционной спектроскопии, содержание золота в жилах достигает 1,72 г/т. Выделены пирит-кварцевая, пирит-карбонат-кварцевая и золотополисульфидная минеральные ассоциации [16].

Пирит-кварцевая ассоциация приурочена к метасоматитам мощностью около 20 см. Кварц образует систему тонких прожилков в призальбандовых частях кварцевых жил. Пирит-1 встречается в виде мелких агрегатов кубической формы размером до 200 мкм, в дефектах которых развиваются поздние минералы. Пирит-карбонат-кварцевая ассоциация слагает жилы массивной и полосчатой текстуры. Пирит-2 наблюдается в виде аллотриоморфных зерен размером от 0,8 до 7,0 мм. Зерна пирита-2 катаклазированы, в их дефектах кристаллизуются халькопирит, борнит. Золотополисульфидно-кварцевая ассоциация проявлена в карбонат-кварцевых жилах и околорудных метасоматитах эпидот-кварцевого состава. Халькопирит образует отдельные аллотриоморфные зерна размером до 0,4 мм, а также выполняет дефекты в ранних сульфидах вместе с галенитом. Галенит встречается в виде редкой вкрапленности и мелких скоплений, его зерна аллотриоморфной формы достигают размеров 5 мкм.

Самородное золото образует микроскопические (до 5 мкм) зерна неправильной формы и ассоциирует с халькопиритом и борнитом. Его пробаность варьирует от 633,1 до 948,0 ‰.

Материалы и методы исследования

Пробы для минералого-геохимических исследований отбирались из естественных обнажений рудопоявления Утанах. Были приготовлены аншлифы (9 шт.) и эпоксидные шашки с зернами сульфидов (15 зерен пирита в двух шашках). Текстуры и структуры руд изучали на оптическом микроскопе МТ 9430L (Япония). Качественный элементный и минеральный состав пород и руд (26 анализов, 2 образца) определяли на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) JSM-6480LV фирмы JEOL (Япония) с энерге-

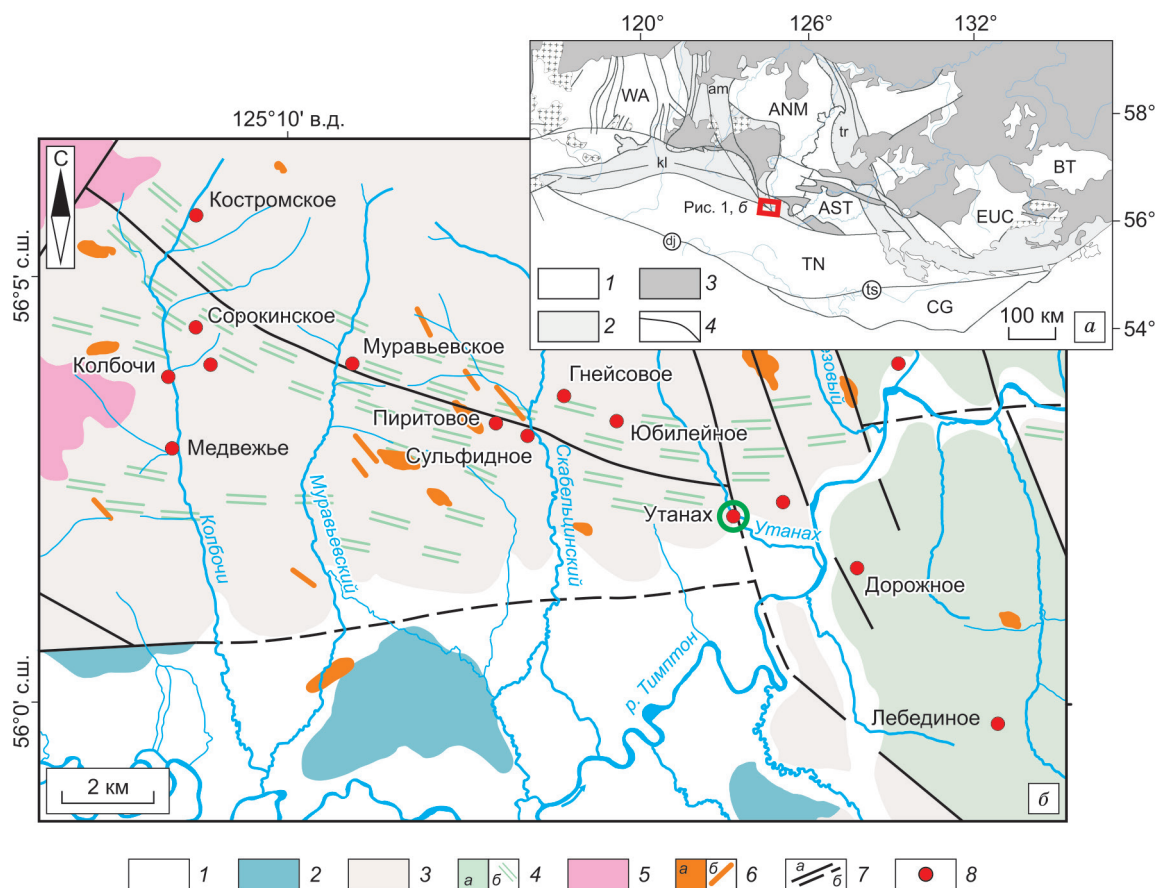


Рис. 1. Тектоническая схема Алдано-Станового щита (по [12] с изменениями) (а), положение района работ и схема геологического строения Скабельцинского рудного поля (по материалам [15] с изменениями и дополнениями) (б). а: 1 – террейны (WA – Западно-Алданский, BT – Батомгский, ANM – Нимнырский, CG – Чогарский, AST – Сутамский, EUC – Учурский, TN – Тындинский); 2 – зоны тектонического меланжа (am – Амгинская, kl – Каларская, tr – Тыркандинская); 3 – чехол Сибирской платформы; 4 – разломы (dj – Джелтулакский, ts – Таксакандинский). б: 1, 2 – отложения (1 – четвертичные, 2 – юрские терригенные); 3 – породы докембрийского фундамента; 4 – диафториты (а) и диафторированные породы (б) Холодниканского зеленокаменного пояса; 5 – граниты Неричинского массива; 6 – мезозойские щелочные массивы (а) и дайки (б); 7 – разломы достоверные (а) и предполагаемые (б); 8 – рудопроявления золота. Зеленым кругом выделено рудопроявление Утанах

Fig. 1. а – Tectonic scheme of Aldan-Stanovoy shield and the location of work area (by [12] with changes); б – Scheme of the geological structure of Scobeltsinsky ore field (by [15] with changes and additional). а: 1 – terranes (WA – West Aldan, BT – Batomga, ANM – Nimnur, CG – Chogar, AST – Sutam, EUC – Uchur, TN – Tyndin); 2 – zones of tectonic mélange (am – Amga, kl – Kalar, tr – Tyrkanda); 3 – cover of the Siberian platform; 4 – faults (dj – Dzhel-tulaksky, ts – Taksakandin). б: 1, 2 – sediments: 1 – Quaternary; 2 – Jurassic terrigenous; 3 – rock of the Precambrian basement; 4 – diaphthorite (a) and diafluoridated (b) rocks; 5 – granite of the Nerichin massif; 6 – Mesozoic alkaline massifs (a) and dikes (b); 7 – faults reliable (a) and supposed (b); 8 – ore occurrence of gold. The Utanakh ore occurrence is indicated in green circle

тическим дисперсионным спектрометром INCA Energy 350 фирмы Oxford Instruments Analytical (Великобритания) (условия съемки: напряжение 20 кВ, сила тока 1 нА, диаметр пучка 1 мкм) (ИГАБМ СО РАН). Полуколичественный анализ химического состава пирита (135 анализов, 15 зерен) проведен по стандартной методике рентгеноспектральным методом (PCMA) на микроанализаторе Camebax-Micro фирмы Cameca (Франция) (ИГАБМ СО РАН). Условия анализа

следующие: ускоряющее напряжение 20 кВ; ток пучка 25 нА; время измерения 10 с; серия К для Fe, Co, Ni, Cu и S; серия М для Au и Pb; серия L для As и Sb; и спектрометр с дисперсией по длине волны (WDS) с кристаллами LiF, PET и TAP. Использовались следующие стандарты: FeS₂ для Fe и S, FeAsS для As, сплав Fe–Ni–Co для Co, Ni, сплав Au–Ag крупности для Au и Ag, CuSbS₂ для Sb и PbS для Pb. Пределы обнаружения 0,01 %. В каждом зерне определяли содержа-

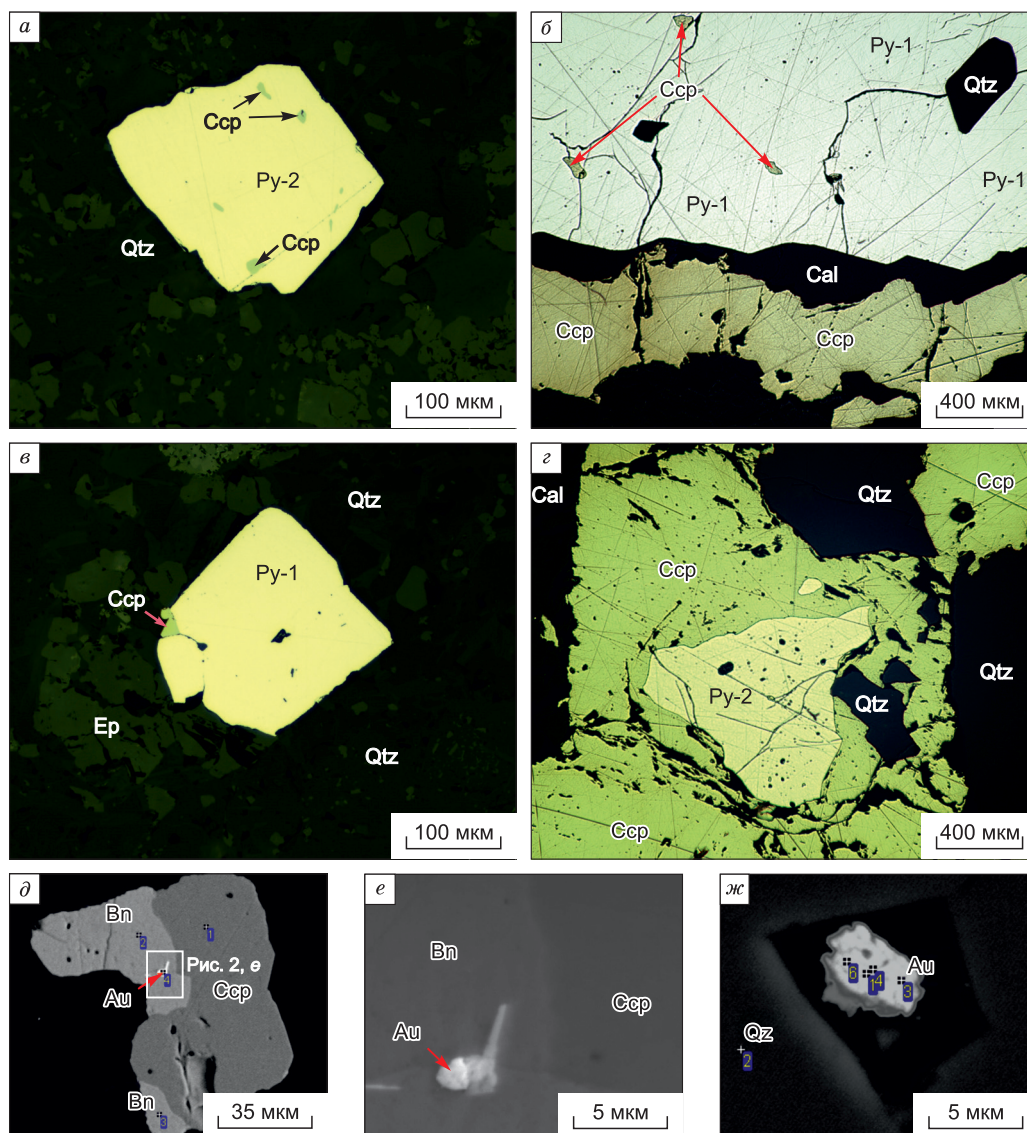


Рис. 2. Фотографии (а–з) и микрофотографии (д–ж) в обратно-рассеянных электронах минерализации проявления Утанах.

а – зерно пирита-2 (Py-2) пирит-кварцевой ассоциации с включениями халькопирита (Ccp); б – агрегаты пирита (Py-1) и халькопирита (Ccp) в кальците (Cal); в – зерно пирита-1 (Py-1) с включением халькопирита (Ccp) в эпидот-кварцевом (Ep, Qtz) метасоматите; з – агрегаты пирита-2 (Py-2) и халькопирита (Ccp) в кварц-карбонатной жиле (Qtz, Cal); д – борнит (Bn) с вкраплениями самородного золота (Au) и халькопирит (Ccp); е – вкрапления самородного золота (Au) в борните (Bn); ж – самородное золото (Au) в каверне, оставшейся после разложения пирита-2

Fig. 2. Photographs (a–z) and back-scattered electron (BSE) microphotographs (д–ж) of mineralization from the Utanakh occurrence.

а – Pyrite-2 (Py-2) grain of the pyrite–quartz association with inclusions of chalcopyrite (Ccp); б – aggregates of pyrite (Py-1) and chalcopyrite (Ccp) hosted in calcite (Cal); в – pyrite-1 (Py-1) grain with chalcopyrite (Ccp) inclusion in epidote–quartz (Ep, Qtz) metasomate; з – aggregates of pyrite-2 (Py-2) and chalcopyrite (Ccp) in a quartz–carbonate vein (Qtz, Cal); д – bornite (Bn) with disseminated native gold (Au) and chalcopyrite (Ccp); е – inclusions of native gold (Au) in bornite (Bn); ж – native gold (Au) hosted in a cavity formed after decomposition of pyrite-2

ния в девяти аналитических точках, расположенных на перпендикулярных линиях (горизонтальная линия – анализы 1–5, вертикальная линия – анализы 6–9, ядро – 3). Анализы 1, 5, 6 и 9 располо-

жены в кайме зерен, анализы 2, 4, 7 и 8 – в переходной зоне между ядром и краем, что позволило детально охарактеризовать изменение состава зерен.

Элементы-примеси пирита исследовали методом ЛА-ИСП-МС (15 зерен) с помощью лазерной абляционной системы LAUP-213 фирмы New Wave Research (США), сочлененной с квадрупольным масс-спектрометром Agilent 7700х фирмы Agilent Technologies (США) (Институт минералогии УрО РАН, г. Миасс) по методике, приведенной в [17].

Химический состав пирита

Результаты определения состава пирита по данным РСМА представлены в табл. 1. Концентрации основных макрокомпонентов в пирите-1 варьируют в следующих пределах, мас. %: Fe – от 45,24 до 47,30 (среднее 46,70), S – от 52,22 до 54,46 (среднее 53,46). Его состав отличается от стехиометрического пирита (Fe = 46,55 мас. % и S = 53,45 мас. %). Отношения S/Fe для каймы, переходной зоны и ядра близки и составляют 1,99–2,00. Отмечается слабый дефицит серы на периферии зерен. Пирит-1 содержит элементы-примеси Co, Ni, реже Cu и As, содержание которых от 0,05 до 3,64 мас. %. Другие элементы присутствуют в количествах ниже предела обнаружения РСМА. В пирите Co, Ni, Cu могут изоморфно замещать Fe [18]. Обнаруживается неоднородность распределения элементов в различных зонах роста зерен пирита. Повышенные содержания Co (до 2,80 мас. %), Ni (до 0,54) и Cu (до 0,06 мас. %) характерны для переходной

зоны. В ядре зерен C_{Co} от 0,06 до 1,91 мас. % (среднее 0,46 мас. %), в кайме C_{Co} от 0,03 до 0,53 мас. % (среднее 0,09 мас. %). Отношение Co/Ni составляет от 1,29 до 6,00 с уменьшением от ядра к кайме. Наибольшие содержания As до 0,24 мас. %, как и значения коэффициента вариации ($V\sigma = 500,00$ %), установлены в переходной зоне зерен пирита-1. Состав пирита-1 $Fe_{1,00}S_{2,00}$, в переходной зоне $Fe_{0,99}Ni_{0,003}Co_{0,007}S_{2,00}$.

В пирите-2 содержания макрокомпонентов варьируют, мас. %: Fe – от 45,24 до 47,30 (среднее 46,45), S – от 52,22 до 53,90 (среднее 53,08). Отношение S/Fe для каймы, переходной зоны и ядра соответственно 2,02, 1,98 и 1,99. Пирит-2 по сравнению с пиритом-1 безмышьяковистый, с низкими содержаниями Co, Ni и Cu ($\Sigma_{Co,Ni,Cu}$ от 0,12 до 0,21 мас. %). По данным РСМА, другие элементы присутствуют в количествах ниже предела обнаружения. Наблюдается слабая тенденция к снижению количества Co от каймы к ядру, мас. %: кайма C_{Co} от 0,03 до 0,79 (среднее 0,20), переходная зона C_{Co} от 0,02 до 0,80 (среднее 0,13), ядро C_{Co} от 0,03 до 0,29 (среднее 0,11). Содержания Ni (0,13 мас. %, среднее 0,02 мас. %) и Cu (0,02 мас. %) низкие. Состав пирита-2 близок к стехиометрическому – $Fe_{0,99}S_{2,00}$ в краевой зоне, $Fe_{1,01}S_{2,00}$ – в переходной и $Fe_{1,00}S_{2,00}$ – в ядре.

Методом ЛА-ИСП-МС выполнено 10 анализов пирита-1 и 20 анализов пирита-2. Вари-

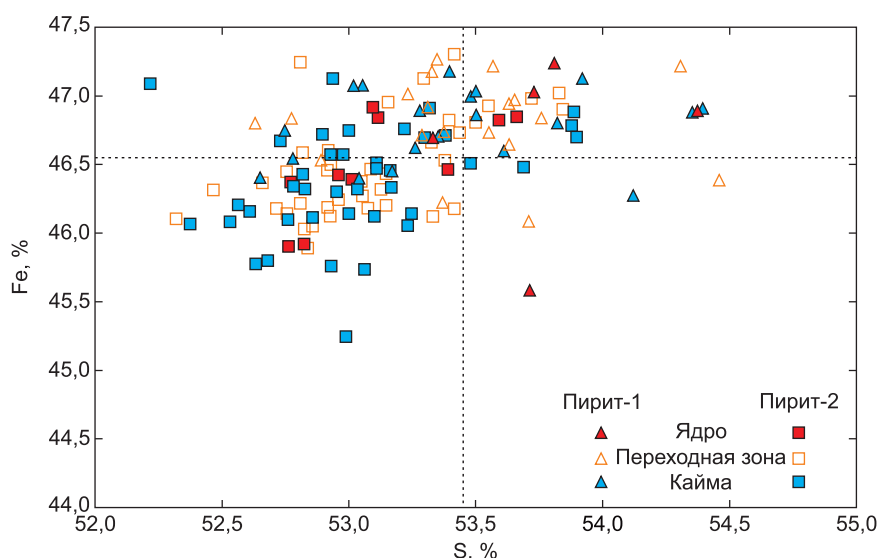


Рис. 3. Диаграмма соотношений Fe и S в пирите рудопоявления Утанах. Пересечение линий соответствует стехиометрическому составу

Fig. 3. Fe–S relationship diagram for pyrite from the Utanakh gold occurrence. The intersection of the lines corresponds to the stoichiometric composition

Таблица 1

Химический состав пирита проявления Утанах, по данным РСМА, мас. %

Table 1

Chemical composition of pyrite from the Utanakh gold occurrence based on EPMA data (wt. %)

Проба	Характеристика	Fe	S	Co	Ni	Cu	As	Co/Ni
Пирит-1, кайма, n = 20	мин	46,25	52,65	0,05	—	—	—	—
	макс	47,16	54,39	0,53	0,34	0,02	—	1,56
	среднее	46,76	53,42	0,13	0,10	0,01	—	1,30
	медиана	46,82	53,38	0,09	0,07	0,01	—	1,29
	Stdv	0,27	0,50	0,12	0,10	0,01	—	—
	Vσ	0,58	0,94	92,3	100	100	—	—
Пирит-1, переходная зона, n = 20	мин	44,35	52,63	0,05	—	—	—	—
	макс	47,27	54,46	2,80	0,54	0,06	0,24	5,18
	среднее	46,67	53,46	0,32	0,13	0,01	0,01	2,46
	медиана	46,81	53,37	0,09	0,06	—	—	1,50
	Stdv	0,64	0,44	0,69	0,14	0,02	0,05	—
	Vσ	1,37	0,82	215,6	107,7	200,0	500,0	—
Пирит-1, ядро, n = 5	мин	45,57	53,33	0,06	—	—	—	—
	макс	47,23	54,37	1,91	0,32	0,03	—	6,00
	среднее	46,68	53,79	0,46	0,10	0,01	—	4,60
	медиана	46,88	53,73	0,07	0,03	—	—	2,33
	Stdv	0,65	0,37	0,81	0,14	0,01	—	—
	Vσ	1,39	0,69	176,1	140,0	100,0	—	—
Пирит-2, кайма, n = 40	мин	45,24	52,22	0,03	—	—	—	—
	макс	47,12	53,90	0,79	0,13	0,02	—	6,07
	среднее	46,37	53,03	0,20	0,01	—	—	20,00
	медиана	46,39	52,99	0,10	—	—	—	—
	Stdv	0,40	0,38	0,21	0,02	—	—	—
	Vσ	0,86	0,72	105,0	200,0	—	—	—
Пирит-2, переходная зона, n = 40	мин	45,89	52,32	0,02	—	—	—	—
	макс	47,30	53,85	0,80	0,06	0,01	—	13,33
	среднее	46,48	53,08	0,13	0,01	—	—	13,00
	медиана	46,40	53,06	0,09	0,01	—	—	9,00
	Stdv	0,36	0,35	0,13	0,02	—	—	—
	Vσ	0,77	0,66	100,0	200,0	—	—	—
Пирит-2, ядро n = 10	мин	45,89	52,76	0,03	—	—	—	—
	макс	46,92	53,66	0,29	0,04	0,01	—	7,25
	среднее	46,49	53,12	0,11	0,01	—	—	11,00
	медиана	46,44	53,05	0,10	0,01	—	—	10,00
	Stdv	0,37	0,33	0,08	0,01	—	—	—
	Vσ	0,80	0,62	72,7	100,0	—	—	—

Примечание. Stdv – стандартное отклонение, Vσ – коэффициент вариации, «—» – ниже предела обнаружения.

Note. Stdv is the standard deviation and Vσ is the coefficient of variation, «—» indicates that the value is below the detection limit.

ции содержания элементов-примесей приведены в табл. 2. В пирите-1 наряду с заметным количеством Ni (от 358,00 до 2338,00 г/т, среднее 1598,80 – кайма и 1228,10 г/т – ядро), Co (от

43,00 до 1700,00 г/т, среднее 739,20 – кайма и 1140,40 г/т – ядро), Cu (от 0,52 до 1570,00 г/т, среднее 440,43 – кайма и 87,84 г/т – ядро) и As (от 6,25 до 1320,00 г/т, среднее 30,62 – кайма

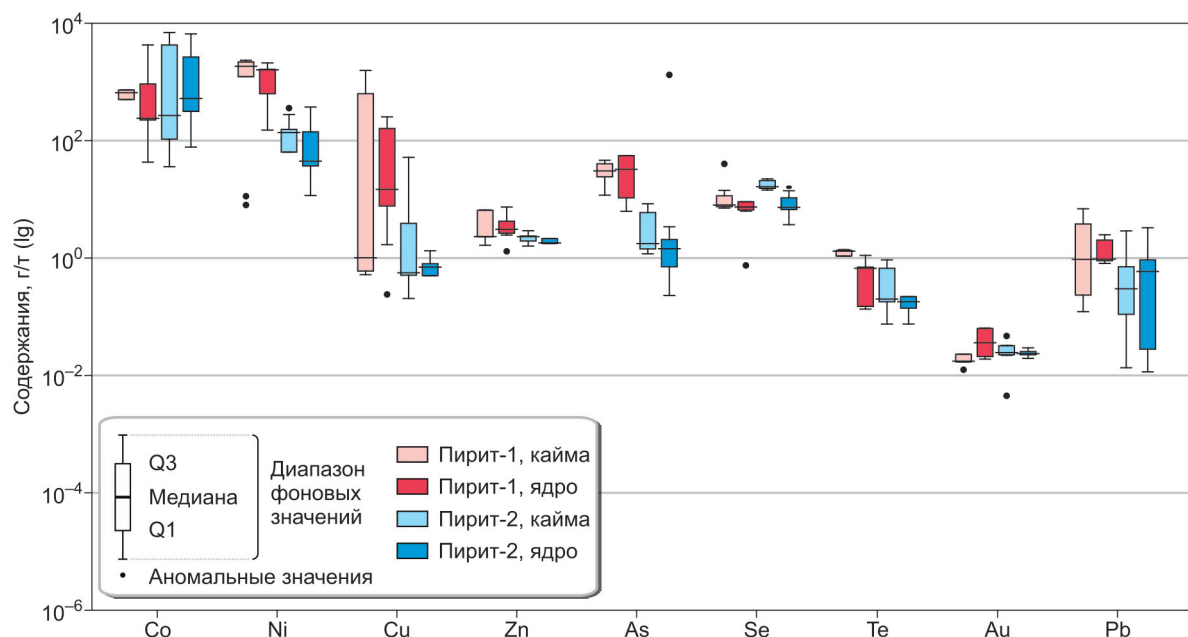


Рис. 4. Распределение элементов-примесей в пирите рудопоявления Утанах, по результатам ЛА-ИСП-МС

Fig. 4. Distribution of trace elements in pyrite from the Utanakh gold occurrence based on LA-ICP-MS data

и 284,95 г/т ядро), что сопоставимо с содержанием микропримесей по данным РСМА, определены Se, Zn, Pb (первые – десятки г/т) и Te, Au (сотые – первые г/т). Выявлены различия в распределении микроэлементов между периферийными и ядерными частями зерен пирита-1. Его каймы обогащены следующими элементами, г/т: Cu (от 0,52 до 1570,00, среднее 440,83), Ni (от 358,00 до 2338,00 г/т, среднее 1591,80), Pb (от 0,12 до 6,90, среднее 0,12). Мышьяк характеризуется значительными вариациями содержаний. Каймы истощены в отношении As (C_{As} от 11,78 до 46,30 г/т, среднее 30,62 г/т), ядра – обогащены As (от 6,25 до 1320,00 г/т, среднее – 284,95 г/т). Концентрации Cu в ядре зерен варьируют от 1,69 до 254,00 г/т, что значительно ниже максимальных значений на периферии зерен (среднее 440,83 г/т). Отношение Co/Ni сопоставимо в разных зонах и варьирует от 0,05 до 4,75 (среднее в кайме – 1,19, в ядре 0,97). Селен показывает равномерное распределение между каймами (C_{Se} от 14,20 до 16,10 г/т, среднее – 9,66 г/т) и ядром (C_{Se} от 6,30 до 16,10 г/т, среднее – 9,10 г/т) зерен.

По данным ЛА-ИСП-МС в пирите-2 выявлена зональность в распределении микроэлементов, не отмеченная по данным РСМА (рис. 4, табл. 2). В каймах пирита установлены повышенные содержания следующих элементов, г/т: Co (от 36,00 до 6946,00, среднее – 1965,80), Cu

(от 0,21 до 52,00, среднее – 9,89), As (0,24–8,41, среднее – 3,25), Se (1,15–40,20, среднее – 17,5), Pb (от 0,01 до 2,90, среднее – 0,63). Максимальные концентрации отмечены для Co (6946,00 г/т) и Cu (52,00 г/т). Наблюдается незначительное снижение концентраций Co (от 77,70 до 6580,00, среднее – 1760,10 г/т), Cu (от 0,16 до 9,20, среднее – 9,89), As (от 0,23 до 3,41, среднее – 1,46) и Se (от 0,75 до 14,00, среднее – 7,90 г/т) в ядре зерен по сравнению с периферийными частями. Концентрации Ni в пирите-2 незначительно варьируют средние значения (кайма – 112,50, ядро – 91,67 г/т). Содержания Au в пирите-2 составляют сотые г/т, а Te – десятые, без значительных вариаций между каймой и ядром.

Полученные результаты показали различия в концентрации микроэлементов в пирите-1 и пирите-2. Пирит-1 отличается повышенными средними концентрациями Ni (1409,93 г/т), Cu (264,13), As (157,78), Pb (1,92), Te (0,80) и Zn (3,92 г/т) по сравнению с пиритом-2. Коэффициенты (K) концентраций в пирите-1 относительно пирита-2 составляют: $K_{Ni} = 13,81$, $K_{Cu} = 46,56$, $K_{As} = 67,17$, $K_{Te} = 2,67$, $K_{Pb} = 2,59$, $K_{Zn} = 1,82$. Пирит-1 характеризуется пониженными средними содержаниями Co ($C_{Co}=939,80$ г/т, $K_{Co} = 0,50$) и Se ($C_{Se} = 9,38$ г/т; $K_{Se} = 0,74$). Средние содержания золота сопоставимы с пиритом-2 ($K_{Au} = 1,50$). Пирит-2 в отличие от пирита-1 демон-

Таблица 2

Основные элементы-примеси в пирите рудопрооявления Утанах, по данным ЛА-ИСП-МС, г/г

Table 2

Major trace elements in pyrite from the Utanakh gold occurrence based on LA-ICP-MS data (ppm)

Генерация / зерно	Co		Ni		Cu		Zn		As		Se		Te		Au		Pb		Co/Ni	
	K*	Я	K	Я	K	Я	K	Я	K	Я	K	Я	K	Я	K	Я	K	Я	K	Я
Пирит-1/2	656,00	225,00	1847,0	1607,0	1570,0	254,00	6,60	4,24	46,30	32,40	8,00	6,60	1,39	0,70	0,02	0,06	6,90	2,49	0,36	0,14
Пирит-1/3	501,00	4270,0	2338,0	1642,0	0,52	14,80	1,65	2,65	24,20	55,50	14,20	9,10	1,08	1,11	0,00	0,04	0,23	0,96	0,21	2,60
Пирит-1/7	1700,0	240,00	358,0	151,30	1,01	1,69	2,32	3,09	30,50	10,60	7,10	6,30	1,31	0,14	0,02	0,02	0,95	2,02	4,75	1,59
Пирит-1/8	109,00	43,00	2187,0	630,00	0,60	161,00	2,30	7,40	11,78	6,25	7,50	7,40	0,11	0,67	0,02	0,06	0,12	0,81	0,05	0,07
Пирит-1/11	730,00	924,00	1229,0	2110,0	630,00	7,70	6,50	2,46	40,30	1320,0	11,50	16,10	1,35	0,15	0,05	0,02	3,80	0,90	0,59	0,44
Минимум	109,00	43,00	358,00	151,30	0,52	1,69	1,65	2,46	11,78	6,25	7,10	6,30	0,11	0,14	0,00	0,02	0,12	0,81	0,05	0,07
Максимум	1700,0	4270,0	2338,0	2110,0	1570,0	254,0	6,60	7,40	46,30	1320,0	14,20	16,10	1,39	1,11	0,05	0,06	6,90	2,49	4,75	2,60
Среднее	739,20	1140,4	1591,8	1228,1	440,43	87,84	3,87	3,97	30,62	284,95	9,66	9,10	1,05	0,55	0,02	0,04	0,12	1,44	1,19	0,97
Медиана	656,00	240,00	1847,0	1607,0	1,01	14,80	2,32	3,09	30,50	32,40	8,00	7,40	1,31	0,67	0,02	0,04	0,12	0,96	0,36	0,44
Stdv	588,2	1781,45	810,9	807,7	687,7	114,17	2,46	2,039	13,56	578,9	3,08	4,06	0,54	0,41	0,02	0,02	0,12	0,77	1,99	1,09
Пирит-2/1	1777,0	1502,0	16,81	19,60	3,00	0,16	2,28	2,43	0,24	1,10	1,15	7,30	0,19	0,08	0,03	0,02	0,29	0,01	105,71	76,63
Пирит-2/2	250,30	238,00	133,2	141,1	0,67	1,33	2,92	1,81	1,18	0,71	16,2	13,40	0,85	0,63	0,03	0,02	1,16	3,28	1,88	1,69
Пирит-2/3	913,00	2658,0	140,6	21,10	3,90	0,73	2,35	1,78	3,31	3,41	20,9	6,70	0,67	0,21	0,03	0,02	2,90	0,03	6,49	125,9
Пирит-2/4	36,00	523,20	180,0	60,00	0,56	0,59	1,95	1,90	1,21	0,91	20,0	10,60	0,17	0,22	0,03	0,03	0,07	0,93	0,20	8,72
Пирит-2/6	4260,0	315,10	63,80	44,70	52,0	9,20	2,37	3,11	5,96	1,44	40,2	8,00	0,93	0,47	0,02	0,02	0,71	2,71	66,77	7,05
Пирит-2/7	267,90	77,70	155,2	37,70	0,54	0,70	1,60	1,77	1,76	0,23	14,4	3,70	0,08	0,14	0,02	0,02	0,30	0,01	1,73	2,06
Пирит-2/8	106,00	2893,0	137,5	37,10	0,21	0,50	2,38	1,30	1,43	2,69	15,4	7,30	0,18	0,18	0,02	0,03	0,15	0,59	0,77	77,98
Пирит-2/9	71,90	391,00	278,5	170,0	37,3	0,80	2,06	2,91	1,47	1,52	16,4	14,00	0,20	0,18	0,01	0,02	0,62	0,77	0,26	2,30
Пирит-2/10	5030,0	2423,0	11,31	373,8	0,51	0,24	2,31	2,15	7,50	2,07	8,10	7,20	0,21	0,11	0,02	0,03	0,11	0,11	444,74	6,48
Пирит-2/11	6946,0	6580,0	8,01	11,62	0,23	0,22	1,93	1,76	8,41	0,52	22,3	0,75	0,20	0,08	0,03	0,02	0,01	0,01	867,17	566,3
Минимум	36,00	77,70	8,01	11,62	0,21	0,16	1,60	1,30	0,24	0,23	1,15	0,75	0,08	0,08	0,01	0,02	0,01	0,01	0,20	1,69
Максимум	6946,0	6580,0	278,5	373,8	52,0	9,20	2,92	3,11	8,41	3,41	40,2	14,00	0,93	0,63	0,03	0,03	2,90	3,28	867,2	566,3
Среднее	1965,8	1760,1	112,5	91,67	9,89	1,45	2,22	2,09	3,25	1,46	17,5	7,90	0,37	0,23	0,03	0,02	0,63	0,85	149,6	87,51
Медиана	590,45	1012,6	135,35	41,20	0,62	0,65	2,30	1,86	1,62	1,27	16,3	7,30	0,20	0,18	0,03	0,02	0,29	0,35	4,19	7,88
Stdv	2520,9	2012,9	87,22	112,48	18,7	2,75	0,35	0,57	2,95	1,00	10,2	4,03	0,32	0,18	0,01	–	0,87	1,19	287,9	173,9

* К – кайма, Я – ядро, Stdv – стандартное отклонение.

* К – rim; Я – core; Stdv – standard deviation.

стрирует anomalно высокое средние содержания Co ($C_{Co} = 1862,96$ г/т, $K_{Co} = 1,98$) и Se ($C_{Se} = 12,70$ г/т, $K = 1,35$), именно эти элементы формируют его характерный геохимический профиль.

Обсуждение результатов

Выполненные исследования позволили определить уровни концентраций и наличие секторальной зональности распределения элементов-примесей в пирите из метасоматитов (пирит-1) и рудных жил (пирит-2). В пирите-1 кайма обогащена Cu, Co, Pb, а ядра зерен – As, содержание Ni распределено равномерно. Такое распределение микроэлементов согласуется с наблюдениями [19], согласно которым ранние (ядро) зоны роста пирита орогенных месторождений фиксируют поступление мышьяк- и никельсодержащих компонентов в условиях умеренных температур и восстановительных флюидов, а поздние каймы формируются в окислительных условиях при циркуляции флюидов, обогащенных Cu. По мнению [20], Cu и Pb присутствуют в пирите преимущественно в форме микровключений, а не изоморфно замещают атомы в кристаллической решетке пирита. Сравнительно низкие значения отношения Co/Ni (среднее 0,97 – ядро и 1,19 – край) для пирита-1 укладываются в диапазон, характерный для пирита орогенных месторождений, сформированный из гидротермально-метаморфогенных флюидов [17, 21] (рис. 5, а). Следует отметить, что повышенные содержания As в ядрах пирита могут отражать локальное за-

мещение S на As в структуре FeS_2 и, как отмечено в [9], способствовать включению «невидимого» золота в кристаллическую решетку. Однако содержания Au в пирите-1 крайне низкие (до 0,064 г/т), что указывает на слабо золотоносные ранние импульсы гидротермальной деятельности.

Пирит-2 по сравнению с пиритом-1 обогащен Co. Такие пириты характерны для высокотемпературных систем, связанных с внедрением базитов и участием мантийных компонентов [20]. Отношения Co/Ni в пирите-2 достигают 867,00, что можно интерпретировать как индикатор возможного участия глубинного магматического (мантийного) компонента в рудообразующей системе [23]. Содержания золота в пирите-2 низкие (до 0,03 г/т) и не коррелируют с As, что отмечено [24] для пиритов, находящихся ниже линии насыщения Au/As (рис. 5, б). Таким образом, золото в системе, вероятно, находится в иных минеральных фазах и связано с присутствием халькопирита в золотополисульфидной минеральной ассоциации.

Контрастное распределение элементов между ядром и каймой зерен пирита отражает эволюцию гидротермальной системы. В начале рудообразования поступали As- и Ni-обогащенные метаморфические флюиды. Позднее циркулирующие Co–Cu-обогащенные растворы сформировали кайму пирита-1 и пирита-2. По данным [25], последовательное увеличение отношения Co/Ni в пирите отражает эволюцию источника флюидов от метаморфогенного к магматогенному. Со-

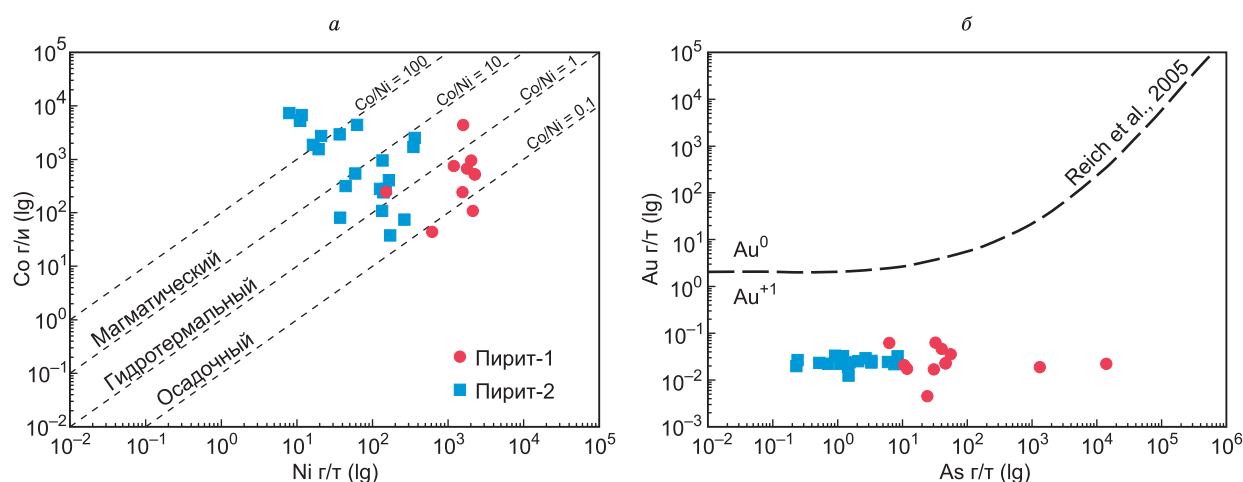


Рис. 5. Графики, показывающие соотношения в пирите рудопоявления Утанах между концентрацией (а) Ni и Co; (б) As и Au (поля диаграммы по [22])

Fig. 5. Plots demonstrating relationships in pyrite from the Utanakh gold occurrence between (a) Ni and Co concentrations, and (б) As and Au concentrations (using data from [22])

поставление с моделью, предложенной в [9], показывает, что As-богатые ядра пирита-1 не достигли уровня насыщения по Au, но могли служить «сборочными» центрами для последующего выделения золота при изменении состава раствора. Это косвенно объясняет наличие низких, но стабильных содержаний Au и переменных значений Au/Ag в краевых частях пирита обоих типов.

Заключение

Детальное изучение с использованием методов РСМА и ЛА-ИСП-МС химического состава и секториальной зональности пирита позволило реконструировать эволюцию рудообразующей системы проявления Утанах. Ядра пирита-1 обогащены As–Ni, каймы их зерен, как и пирита-2, – Co–Cu–Se. Эти результаты позволяют предположить эволюцию состава флюида от ранних метаморфических As–Ni-обогащенных источников к поздним Co–Cu-обогащенным флюидам магматического происхождения. Золото находится преимущественно в самородной форме и связано с халькопирит-полисульфидной ассоциацией. Выделенные геохимические особенности пирита могут быть использованы для оценки перспектив и типизации оруденения слабо изученного Верхне-Тимптонского района.

Список литературы / References

1. Попов Н.В., Шапорина М.Н., Амузинский В.А. и др. Металлогения золота Алданской провинции. *Геология и геофизика*. 1999;40(5):716–728.
Popov N.V., Shaporina M.N., Amuzinsky V.A., et al. Gold metallogeny in the Aldan province. *Russian Geology and Geophysics*. 1999;40(5):716–728. (In Russ.)
2. Ветлужских В.Г. Золотоносность Северо-Становой металлогенической зоны (Южная Якутия, Амурская область). *Отчетственная геология*. 2007;(1):59–71.
Vetluzhskikh V.G. Gold potential of the North Stanovoy metallogenic zone (Southern Yakutia, Amur region). *Otechestvennaya Geologiya = [Domestic Geology]*. 2007;(1):59–71. (In Russ.)
3. Молчанов А.В., Терехов А.В., Шатов В.В. и др. Золоторудные районы и узлы Алдано-Становой металлогенической провинции. *Региональная геология и металлогения*. 2017;(71):93–111.
Molchanov A.V., Terekhov A.V., Shatov V.V., et al. Gold ore districts and ore clusters of the Aldanian metallogenic province. *Regional Geology and Metallogeny*. 2017;(71):93–111. (In Russ.)
4. Лоскутов Е.Е., Фридовский В.Ю., Тарасов Я.А. Золотое оруденение в диафоритах Верхне-Тимптонского рудного района Алдано-Станового щита. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(2):181–192. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-181-192>
5. Лоскутов Е.Е., Фридовский В.Ю., Тарасов Я.А. Gold mineralization in the diafforites of the Verkhne-Timptonsky ore district (Aldan–Stanovoy Shield). *Arctic and Subarctic Natural*

Resources. 2024;29(2):181–192. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-181-192>

5. Викентьев В.И. Невидимое и микроскопическое золото в пирите: методы исследования и новые данные для колчеданных руд Урала. *Геология рудных месторождений*. 2015;57(4):267–298.

Vikentyev V.I. Invisible and microscopic gold in pyrite: methods and new data for massive sulfide ores of the Urals. *Geology of Ore Deposits*. 2015;57(4):2370265.

6. Сидорова Н.В., Викентьева И.В., Абрамова В.Д., Ковальчук Е.В. Золото и другие элементы-примеси в пирите Березовского месторождения, Средний Урал. *Литосфера*. 2019;(2):327–336. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2019-19-2-327-336>

Sidorova N.V., Vikentyeva I.V., Abramova V.D., Kovalchuk E.V. Gold and other impurity elements in pyrite from the Berzovskoe deposit in the Middle Urals. *Lithosphere*. 2019;(2):327–336. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2019-19-2-327-336>

7. Фридовский В.Ю., Полуфунтикова Л.И., Кудрин М.В. Геохимические и изотопные характеристики вкрапленной сульфидной минерализации орогенных золоторудных месторождений Яно-Колымского металлогенического пояса (Северо-Восток России). *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. 2023;508(1):24–31. <https://doi.org/10.31857/S2686739722601697>

Fridovsky V.Y., Polufuntikova L.I., Kudrin M.V. Geochemical and isotopic characteristics of disseminated sulfide mineralization of orogenic gold deposits of the Yana-Kolyma metallogenic belt (North-East of Russia). *Doklady Earth Sciences*. 2023;508(1):24–31. <https://doi.org/10.31857/S2686739722601697> (In Russ.)

8. Large R.R., Danyushevsky L., Hollit C., et al. Gold and trace element zonation in pyrite using a laser imaging technique: Implications for the timing of gold in orogenic and Carlin-style sediment-hosted deposits. *Economic Geology*. 2009;104(5):635–668. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.104.5.635>

9. Deditius A.P., Reich M., Kesler S.E., et al. The coupled geochemistry of Au and As in pyrite from hydrothermal ore deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2014;140:644–670. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2014.05.045>

10. Keith M., Smith D.J., Jenkin G.R.T., et al. A review of Te and Se systematics in hydrothermal pyrite from precious metal deposits: Insights into ore-forming processes. *Ore Geology Reviews*. 2018;96:269–282. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.07.023>

11. Березкин В.И., Смелов А.П., Зедгенизов А.Н. и др. Геологическое строение центральной части Алдано-Станового щита и химические составы пород раннего докембрия (Южная Якутия). Новосибирск: Изд-во СО РАН; 2015. 459 с.

Berezkin V.I., Smelov A.P., Zedgenizov A.N., et al. *Geological structure of the central Aldan–Stanovoy Shield and chemical compositions of Early Precambrian rocks (Southern Yakutia)*. Novosibirsk: Publishing House SB RAS; 2015. 459 p. (In Russ.)

12. *Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия)*. Отв. редакторы: д.г.-м.н. Л.М. Парфенов, чл.-корр. РАН М.И. Кузьмин. М.: МАИК “Наука/Интерпериодика”; 2001. 571 с.

Tectonics, geodynamics and metallogeny of the territory of the Sakha Republic (Yakutia). Responsible editors: doctor of geological and mineralogical sciences L.M. Parfenov, corresponding member of the Russian Academy of Sciences

- M.I. Kuzmin. Moscow: MAIK "Nauka/Interperiodika"; 2001. 571 p. (In Russ.)
13. Радков А.В. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Алдано-Забайкальская. Лист О-51 – Алдан. Объяснительная записка. Санкт-Петербург: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ; 2015. 365 с.
- Radkov A.V. State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (third generation). Aldan–Transbaikalian series. Sheet O-51 – Aldan. Explanatory note. Saint Petersburg: VSEGEI Cartographic Factory; 2015. 365 p. (In Russ.)
14. Котов А.Б., Ларин А.М., Смелов А.П. и др. Возрастные границы проявления зеленосланцевого диафтореза в зоне Станового структурного шва. *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. 2015;463(6):687–691. <https://doi.org/10.7868/S0869565215240184>
- Kotov A.B., Larin A.M., Smelov A.P., et al. Age limits of greenschist facies diathoresis in the Stanovoy suture zone. *Doklady Earth Sciences*. 2015;463(6):687–691. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0869565215240184>
15. Кац А.Г. Объяснительная записка к геологической карте СССР масштаба 1:200 000. Алданская серия, лист О-51-XXXVI. Москва: ЦСП ХП ВГФ; 1965. 115 с.
- Kats A.G. Explanatory note to the geological map of the USSR, scale 1:200,000. Aldan series, sheet O-51-XXXVI. Moscow: TsSP KhP VGF Publ.; 1965. 115 p. (In Russ.)
16. Иванов Е.Е., Лоскутов Е.Е., Кравченко А.А., Бондарь-Лунецкас Н.А. Вещественный состав руд проявления Утанакское, Верхне-Тимптонский золоторудный район (Алдано-Становой щит). В кн.: *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России 2024: Материалы XIV Международной научно-практической конференции, Якутск, 26–29 марта 2024г.* Новосибирск: Сибирское отделение Российской академии наук; 2024. С. 105–108. https://doi.org/10.53954/9785604990100_105
- Ivanov E.E., Loskutov E.E., Kravchenko A.A., Bondar-Lunetskis N.A. Material composition of ores from the Utanakh occurrence, Verkhne-Timpton gold ore district (Aldan–Stanovoy Shield). In: *Geology and Mineral Resources of Northeast Russia 2024. Proc. 14th Int. Scientific-Practical Conference*. Novosibirsk; 2024, pp. 105–108. https://doi.org/10.53954/9785604990100_105 (In Russ.)
17. Kudrin M.V., Fridovsky V.Y., Polufuntikova L.I., Kryuchkova L.Yu. Disseminated gold–sulfide mineralization in metasomatites of the Khangalas deposit, Yana–Kolyma metallogenic belt (Northeast Russia): Analysis of the texture, geochemistry, and S isotopic composition of pyrite and arsenopyrite. *Minerals*. 2021;11(4):403. <https://doi.org/10.3390/min11040403>
18. Roman N., Reich M., Leisen M., et al. Geochemical and micro-textural fingerprints of boiling in pyrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2019;246:60–85. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2018.11.034>
19. Large R.R., Danyushevsky L.V., Hollit C., et al. Gold and trace element zonation in pyrite using a laser imaging technique: Implications for the timing of gold in orogenic and Carlin-style sediment-hosted deposits. *Economic Geology*. 2009;104(5):635–668. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.104.5.635>
20. Huston D.L., Sie S.H., Suter G.F., et al. Trace elements in sulfide minerals from eastern Australian volcanic-hosted massive sulfide deposits: Part I, Proton microprobe analyses of pyrite, chalcopyrite, and sphalerite, and Part II, Selenium levels in pyrite; comparison with $\delta^{34}\text{S}$ values and implications for the source of sulfur in volcanogenic hydrothermal systems. *Economic Geology*. 1995;90(5):1167–1196. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.90.5.1167>
21. Gao F., Du Y., Pang Z., et al. LA-ICP-MS Trace-element analysis of pyrite from the Huanxiangwa gold deposit, Xiong'er Shan District, China: Implications for ore genesis. *Minerals*. 2019;9(3):157. <https://doi.org/10.3390/min9030157>
22. Reich M., Kesler S.E., Utsunomiya S., et al. Solubility of gold in arsenian pyrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2005;69(11):2781–2796. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2005.01.011>
23. Goldfarb R.J., Groves D.I. Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time. *Lithos*. 2015;233:2–26. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.07.011>
24. Román N., Reich M., Leisen M., et al. Geochemical and micro-textural fingerprints of boiling in pyrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2019;246:60–85. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2018.11.034>
25. Large R.R., Bull S.W., Maslennikov V.V. A carbonate sedimentary source-rock model for Carlin-type and orogenic gold deposits. *Economic Geology*. 2011;106(3):331–358. <https://doi.org/10.2113/econgeo.106.3.331>

Об авторах

ЛОСКУТОВ Евгений Евгеньевич, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-7491-1067>, ResearcherID: AAO-4823-2021, Scopus Author ID: 57205150102, SPIN: 3030-3370, e-mail: loskutov@diamond.ysn.ru

ФРИДОВСКИЙ Валерий Юрьевич, член-корреспондент РАН, доктор геолого-минералогических наук, профессор, директор (ИГАБМ СО РАН, Якутск); главный научный сотрудник (СВКНИИ, Магадан), <https://orcid.org/0000-0002-4994-2141>, Scopus Author ID: 6505824025, SPIN: 3383-0398, e-mail: fridovsky@diamond.ysn.ru

ИВАНОВ Егор Евгеньевич, ведущий инженер, <https://orcid.org/0009-0007-4856-3709>, ResearcherID: OXB-0019-2025, Scopus Author ID: 57225734846, SPIN: e-mail: egor-ivanov1996@mail.ru

Вклад авторов

Лоскутов Е.Е. – сбор полевых материалов, проведение исследования, подготовка и редактирование рукописи, визуализация; **Фридовский В.Ю.** – сбор полевых материалов, разработка концепции, подготовка и редактирование рукописи; **Иванов Е.Е.** – проведение исследования, создание черновика рукописи, визуализация

Конфликт интересов

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

About the authors

LOSKUTOV, Evgeniy Evgenievich, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-7491-1067>, ResearcherID: AAO-4823-2021, Scopus Author ID: 57205150102, SPIN: 3030-3370, e-mail: loskutov@diamond.ysn.ru

FRIDOVSKY, Valery Yurievich, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Professor, Director (DPMGI SB RAS, Yakutsk); Chief Researcher (NEISRI, FEB RAS, Magadan), <https://orcid.org/0000-0002-4994-2141>, Scopus Author ID: 6505824025, SPIN: 3383-0398, e-mail: fridovsky@diamond.ysn.ru

IVANOV, Egor Evgenievich, Leading Engineer, <https://orcid.org/0009-0007-4856-3709>, ResearcherID: OXB-0019-2025, Scopus Author ID: 57225734846, SPIN: e-mail: egor-ivanov1996@mail.ru

Authors' contribution

Loskutov E.E. – resources, investigation, writing – review & editing; **Fridovsky V.Y.** – resources, conceptualization, writing – review & editing; **Ivanov E.E.** – investigation, writing – original draft, visualization

Conflict of interest

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

Поступила в редакцию / Submitted 28.08.2025

Поступила после рецензирования / Revised 17.10.2025

Принята к публикации / Accepted 26.11.2025



Оригинальная статья

Вещественный состав и U-Pb возраст магматических пород Эвотинского массива (Южная Якутия, Алдано-Становой щит)

М. С. Иванов^{✉1}, А. И. Иванов¹, А. И. Журавлев¹, Е. Е. Лоскутов¹,
А. А. Кравченко¹, В. Е. Гузев², А. В. Терехов²

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

²Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

[✉]ivanov.michil@bk.ru

Аннотация

Проблемы определения металлогенической специализации магматических пород рудных районов всегда актуальны и дискуссионны. В решении этих задач ключевой момент – комплексное изучение отдельно взятых объектов с целью выявления особенностей петрографического и петро-геохимического составов магматических пород, а также геохронологические исследования во взаимосвязи с условиями образования и металлогенической оценкой последних, позволяющие получить объективную картину. Одним из таких образований является Эвотинский массив, пространственно входящий в одноименный рудно-россыпной район центральной части Алдано-Станового щита. При исследовании магматических образований главных фаз массива были использованы образцы пород, отобранные в ходе полевых работ 2018–2020 гг., с последующей обработкой и определением основных компонентов методами силикатного, многоэлементного анализов в отделе физико-химических методов анализа Института геологии алмаза и благородных металлов СО РАН и масс-спектрометрии в лаборатории ООО «ХАЦ Плазма», г. Томск. Геохронологические исследования U-Pb методом (SIMS, SHRIMP-II) по цирконам проводились в Центре изотопных исследований Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского. В результате изучения и интерпретации аналитического материала получены следующие результаты и выводы: Эвотинский массив имеет антидромное строение. Установлены две фазы внедрения: первая – амфиболовые кварцевые сиениты, вторая – амфибол-пироксеновые кварцевые монцониты. Породы принадлежат к высококальциевой известково-щелочной петрохимической серии и соответствуют производным шошонит-латитового ряда. Установлен вклад в формирование массива как мантйных, так и коровых источников. По петрогеохимическим параметрам, соотношению редких элементов Rb, Y, Yb, Ta породы массива близки составам вулканитов окраинно-континентальных и островных дуг. U-Pb возраст по циркону (SHRIMP II) амфиболовых кварцевых сиенитов – 119 ± 1 млн лет, амфибол-пироксеновых кварцевых монцонитов – 117 ± 1 млн лет (аптский век раннего мела). Один из основных выводов состоит в том, что образование Эвотинского массива происходило в условиях задугового растяжения на заключительных стадиях закрытия Монголо-Охотского океана, а также показан минерогенический потенциал Эвотинского массива на золотую минерализацию.

Ключевые слова: Алдано-Становой щит, Эвотинский рудно-россыпной район, магматизм, U-Pb возраст циркона, кварцевые сиениты, кварцевые монцониты

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания ИГАБМ СО РАН (проект № FUG-2024-0005).

Благодарности. Авторы выражают благодарность за проведение аналитических работ сотрудникам ИГАБМ СО РАН Л.Т. Галенчиковой и С.Ю. Коркиной.

Для цитирования: Иванов М.С., Иванов А.И., Журавлев А.И., Лоскутов Е.Е., Кравченко А.А., Гузев В. Е., Терехов А.В. Вещественный состав и U-Pb возраст магматических пород Эвотинского массива (Южная Якутия, Алдано-Становой щит). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(4):572–588. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-572-588>

Composition and U-Pb age of igneous rocks of the Evotinsky massif (Southern Yakutia, Aldan-Stanovoy shield)

Michil S. Ivanov^{✉,1}, Aleksey I. Ivanov¹, Anatoliy I. Zhuravlev¹, Evgeniy E. Loskutov¹,
Alexander A. Kravchenko¹, Vladislav E. Guzev², Artem V. Terekhov²

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

²Russian Geological Research Institute (VSEGEI), St. Petersburg, Russian Federation

[✉]ivanov.michil@bk.ru

Abstract

Determining the metallogenic specialization of igneous rocks in ore districts remains a pressing and often controversial challenge. Addressing this issue requires a comprehensive approach, that integrates petrographic and petrogeochemical data with geochronological studies of individual formations. Such integrated analysis, when contextualized within specific formation conditions and metallogenic assessments, provides a robust framework for interpretation. The Evotinsky massif, located within the eponymous Evotinsky placer ore region in the central Aldan-Stanovoy shield, represents one such critical formation. This study investigates its petrogenesis based on rock samples collected during fieldwork from 2018 to 2020, focusing on the massif's main phases. Subsequent processing and major element analysis were performed using silicate and multielement techniques at the Department of Physicochemical Analysis Methods of the Diamond and Precious Metals Geology Institute SB RAS (Yakutsk). Trace element concentrations were determined by mass spectrometry at the CAC Plasma LLC laboratory (Tomsk). Finally, geochronological U-Pb dating of zircons was conducted using SIMS (SHRIMP-II) at the Center for Isotope Research of the Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI). The Evotinsky massif displays an antidromous structure and comprises two intrusive phases: an earlier phase of amphibole quartz syenites and a later phase of amphibole-pyroxene quartz monzonites. The rocks are classified within the high-potassium calc-alkaline series, corresponding to derivatives of the shoshonite-latitude series. Geochemical data indicate a mixed mantle and crustal source for the magmas. Petrochemical parameters and trace element ratios (Rb, Y, Yb, Ta) show compositions analogous to volcanic rocks from continental margins and island arcs. U-Pb zircon geochronology (SHRIMP II) constrains the emplacement of the amphibole quartz syenites to 119 ± 1 Ma and the amphibole-pyroxene quartz monzonites to 117 ± 1 Ma (Aptian, Early Cretaceous). In conclusion, the Evotinsky massif formed under back-arc extensional conditions during the final stages of the Mongol-Okhotsk Ocean closure. Furthermore, these findings demonstrate the massif's significant potential for gold mineralization.

Keywords: Aldan-Stanovoy shield, Evotinsky gold-bearing region, magmatism, U-Pb age from zircons, quartz syenites, quartz monzonites

Funding. This study was conducted within the framework of the state assignment for the Diamond and Precious Metals Geology Institute SB RAS (project No. FUGG-2024-0005).

Acknowledgements. The authors are grateful to L.T. Galenchikova and **S.Yu. Korkina** from the Diamond and Precious Metals Geology Institute SB RAS for conducting the analytical work.

For citation: Ivanov M.S., Ivanov A.I., Zhuravlev A.I., Loskutov E.E., **Kravchenko A.A.**, Guzev V.E., Terekhov A.V. Composition and U-Pb age of igneous rocks of the Evotinsky massif (Southern Yakutia, Aldan-Stanovoy shield). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(4):572–588. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-572-588>

Введение

Эвотинский массив расположен в западной части гранулит-ортогнейсового Нимнырского террейна (рис. 1, а) Алдано-Станового щита в пределах одноименного рудно-россыпного района [1]. Последний расположен на границе с Ам-

гинской зоной тектонического меланжа в непосредственной близости с Чульманской впадиной мезозойского возраста. В геологическом строении района принимают участие раннедокембрийские метаморфические породы, представленные биотит-пироксен-амфиболовыми и силлиманит-

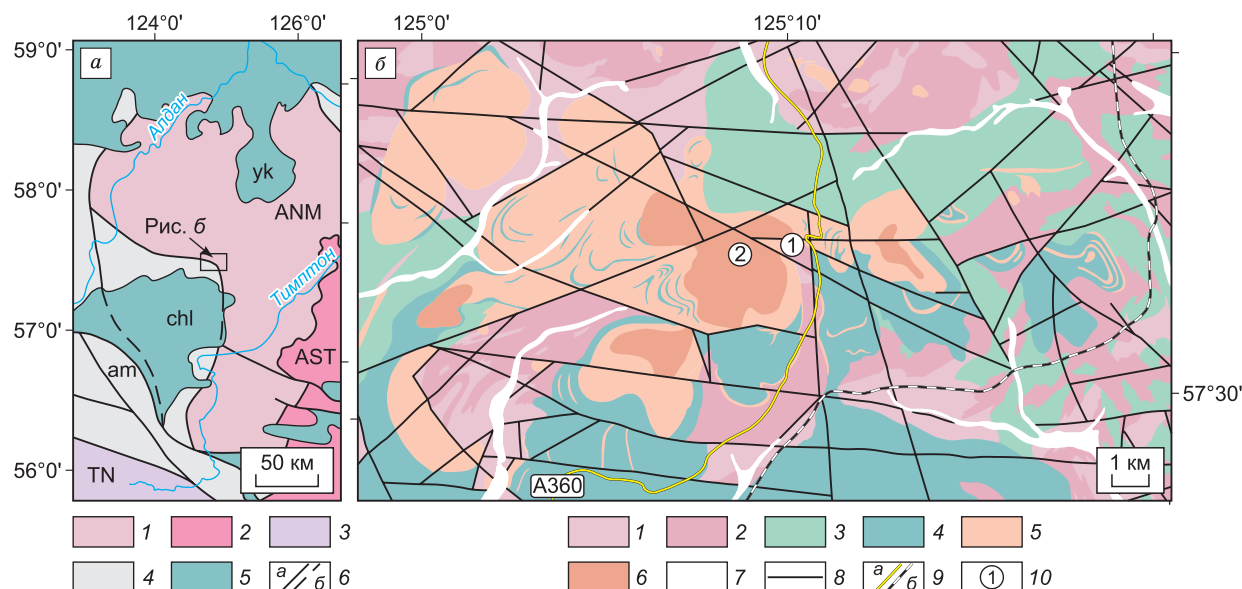


Рис. 1. Тектоническая схема центральной части Алдано-Станового щита (по [1]): 1 – гранулит-ортогнейсовый Нимнырский (ANM) террейн; 2 – гранулит-парагнейсовый Сутамский (AST) террейн; 3 – тоналит-трондьемит-гнейсовый Тындинский (TN) террейн; 4 – Амгинская (am) зона тектонического меланжа; 5 – породы чехла Сибирской платформы (chl – Чульманская впадина, yk – Якокутский грабен); 6 – разломы явные (a) и скрытые (б). Схема геологического строения Эвотинского массива (по фоновым материалам И.Д. Вороны и Л.М. Реутова, 1963 с дополнениями) (б): 1 – федоровская толща; 2 – докембрийские граниты и гранитоиды; 3 – габбро-диориты унгринского комплекса; 4 – венд-раннекембрийские доломиты усть-юдомской свиты; Эвотинский массив: 5 – кварцевые сиениты, 6 – кварцевые монзониты; 7 – четвертичные отложения; 8 – разломы; 9 – автотрасса А360 «Лена» (a) и железная дорога (б); 10 – места отбора образцов на определение возраста: 1 – Э18-11, 2 – Э18-13

Fig. 1. *a* – Tectonic scheme of the central part of the Aldan-Stanovoy shield (after [1]): 1 – granulite-ortogneiss Nimnyr (ANM) terrane; 2 – granulite-paragneiss Sutam (AST) terrane; 3 – tonalite-trondhjemite-gneiss Tynda (TN) terrane; 4 – Amginskaya (am) zone of tectonic mélange; 5 – rocks of the Siberian platform cover: chl – Chulman depression, and yk – Yakokutsky graben; 6 – obvious (a) and hidden (b) faults. *b* – Scheme of the geological structure of the Evotinsky massif (based on archive materials of I.D. Vorona and L.M. Reutov, 1963 with additions): 1 – Fedorovskaya sequence; 2 – Precambrian granites and granitoids; 3 – gabbro-diorites of the Unginsky complex; 4 – Vendian-Early Cambrian dolomites of the Ust-Yudomskaya suite; Evotinsky massif: 5 – quartz syenites, 6 – quartz monzonites; 7 – Quaternary deposits; 8 – faults; 9 – A360 Lena highway (a) and railway (b); 10 – sampling locations for age determination: 1 – E18-11, 2 – E18-13

гранат-кордиеритовыми гнейсами, а также кристаллосланцами с горизонтами, прослоями и линзами кварцитов, мраморов, кальцифиров в составе курумканской, нимнырской и федоровской свит верхнеалданской и тимптонской серий. Эти образования, прорванные многочисленными дайками позднепротерозойских долеритов, интенсивно деформированы с образованием сложной системы пликтивных и дизъюнктивных нарушений [1, 2]. Венд-нижнекембрийские карбонатные и нижнеюрские терригенные породы платформенного чехла сохранились преимущественно в южной, юго-западной и северной частях района. В эпоху мезозойской тектоно-магматической активизации были сформированы щелочные и умеренно щелочные породы монзонит-сиенитовой формации [2]: массивы Медведевский, Таежный, Михайловский и др., а также силлы и дайки [3].

Ранее в пределах Эвотинского рудно-россыпного района авторами были определены петрологические характеристики пород Медведевского и Таежного массивов, определен интервал становления интрузивов 122,0–114,5 млн лет; выявлены принадлежность всех образований к монзонит-сиенитовой формации [3] и генетическая связь золоторудной минерализации с мезозойским магматизмом [2].

В пределах рассматриваемой территории разведано лишь одно месторождение рудного золота (им. П. Пинигина) и ряд мелких рудопроявлений (Бривас, Унга-Нимгеркан и др.), которые пространственно и генетически связывают с докембрийскими метагаббро медведевского комплекса [4].

По аналогии с Центрально-Алданским рудным районом здесь можно ожидать обнаруже-

ния золоторудных объектов, связанных со скарированными отложениями венд-кембрийского возраста на контакте с мезозойскими сиенитами, где известны находки кварц-сульфидных руд [2]. Стоит отметить, что, несмотря на длительный период изучения мезозойского магматизма Алдано-Станового щита [2, 4; и др.], до сих пор не сняты многие вопросы эволюции и металлогении магматических пород этого возраста. Следовательно, актуальным является изучение отдельных крупных многофазовых массивов, таких как Эвотинский плутон (рис. 1, б), с целью определения петрогеохимических параметров составов, геохронологии и потенциальной рудоносности слагающих их пород.

Материалы и методы

Образцы для выполнения анализов, а также пробы для определения возраста (весом до 10 кг) были отобраны в ходе полевых работ 2018–2020 гг. в пределах Эвотинского рудно-россыпного района. Петрографический состав (30 шлифов) изучался с помощью поляризационного микроскопа МИН-8. Определение основных компонентов по 23 образцам проводилось методами силикатного анализа (Л.Т. Галенчикова), микроэлементов – многоэлементной атомно-эмиссионной спектроскопии (С.Ю. Коркина) в отделе физико-химических методов анализа Института геологии алмаза и благородных металлов СО РАН (ИГАБМ СО РАН, г. Якутск). Анализ редких элементов (4 образца) проводился на масс-спектрометре ЭЛАН, ДРК-э (ООО «ХАЦ Плазма», Томск, Россия). U-Pb датирование цирконов (SIMS, SHRIMP-II) выполнено в Центре изотопных исследований Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского по методике, описанной нами в [3].

Результаты исследований

Геология и петрография магматических пород Эвотинского массива. Площадь выходов Эвотинского массива на дневную поверхность составляет 100 км² (см. рис. 1, б). По данным В.Г. Амарского, в строении Эвотинского плутона были выделены две фазы, которые интродуцируют породы чехла и фундамента: первая – авгит-роговообманковые кварцевые сиенит-порфиры, вторая – роговообманковые граносиенит-порфиры (см. рис. 1, б) [5]. Массив прорван дайками щелочных сиенит-порфиров и известково-щелочных лампрофиров, протяженность которых достигает 1 км при мощности в первые десятки метров [5]. В южной части массив осложняется многочисленными субгоризонтальными апофизами кварцевых сиенитов мощностью до 40 м и протяженностью в первые километры (в данной работе эти породы не рассматриваются). Вмещающие породы в северном экзоконтакте массива катаклазированы, милонитизированы, тогда как в эндоконтактовых частях эти изменения не наблюдаются [5].

По результатам полевых и петрографических исследований авторами установлено, что составы фаз внедрения Эвотинского массива отличаются от описанных ранее В.Г. Амарским [5] и представлены двумя разновидностями: первая фаза – амфиболовые кварцевые сиениты, вторая фаза – амфибол-пироксеновые кварцевые монцониты. По нашим данным, значительная площадь массива сложена породами ранней фазы в краевых частях; образования поздней фазы занимают его центральную область. Последовательность внедрения основных фаз массива определена по вкрапленникам ортоклаза, олигоклаза и темноцветных минералов второй фазы амфибол-пироксеновых кварцевых монцонитов, в которых по мере приближения к контакту с амфибол-кварцевыми сиенитами перечисленные кристаллы минералов уменьшаются в размере. Это может указывать на быстрое проникновение поздней фазы в центральную часть плутона. Ранние образования не успели закристаллизоваться и были прорваны расплавами второй фазы с формированием нормальной (прямой) зональности массива [6]. Последовательность внедрения фаз также подтверждается петрографическими исследованиями – наблюдаются каймы плавления олигоклаза и ортоклаза в амфиболовых кварцевых сиенитах, подвергшихся серицитизации, пелитизации и хлоритизации.

Амфиболовые кварцевые сиениты – светло-серые, розовато-серые, лейкократовые породы, содержащие не более 10 % темноцветных минералов. Структура – порфировая с полнокристаллической основной массой, текстура массивная. Породы содержат ортоклаз – 50 %, олигоклаз – 35, кварц – 10, амфибол – 10 (роговую обманку и баркевикит), рудные минералы – до 3 %. Вторичные минералы представлены карбонатом, хлоритом, эпидотом, серицитом и мусковитом;

акцессорные минералы – апатитом, цирконом и магнетитом.

Амфибол-пироксеновые кварцевые монцитониты – серые, розовато-серые порфировые породы, с гипидиоморфно-зернистой основной массой и резким идиоморфизмом плагиоклаза над ортоклазом во вкрапленниках (элементы монцитонитовой структуры). Минеральный состав пород: альбит, олигоклаз – 30 %, ортоклаз – 35, темноцветные минералы (роговая обманка, авгит) – 15, кварц – 13, рудные минералы – 5, акцессорные минералы (апатит, циркон) – 2 %. Вкрапленники представлены альбитом, олигоклазом, ортоклазом и темноцветными минералами. Основная масса сложена олигоклазом, ортоклазом и роговой обманкой. Следует отметить присутствие в породе ксенолитов протерозойских гранитов.

Петрогеохимический состав магматических пород Эвотинского массива. Выделенные при петрографическом исследовании породы ранней фазы по химическому составу ($\text{SiO}_2 = 65,4\text{--}67,6\%$; $\text{TiO}_2 = 0,27\text{--}0,43$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 14,4\text{--}16,1$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 1,04\text{--}2,46$; $\text{FeO} = 1,28\text{--}1,98$; $\text{CaO} = 1,57\text{--}3,04$; $\text{Na}_2\text{O} = 4,76\text{--}5,32$; $\text{K}_2\text{O} = 3,55\text{--}4,49\%$) и суммарному содержанию щелочей ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 8,51\text{--}9,56 < 12\%$) (табл. 1) относятся к умеренно щелочным амфиболовым кварцевым сиенитам [7]. Породы характеризуются калиево-натриевым типом щелочности [7] ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 1,12\text{--}1,40$) и относятся к высокоглиноземистой серии [8] ($al' = 2,39\text{--}4,59$), при значениях индексов $ASI = 0,78\text{--}1,09 < 1,15$ и железистости $f^* = 0,54\text{--}0,78$ (см. табл. 1). Согласно классификационной диаграмме $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})\text{--SiO}_2$ [9], составы пород ранней фазы соотносятся как с гранитами, так и частично с сиенитами (рис. 2, а). По отношениям $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})\text{--SiO}_2$ [10] и $R_1\text{--}R_2$ [11] породы первой фазы относятся к кварцевым моноцитонитам (рис. 2, б, в). По соотношению $\text{K}_2\text{O}\text{--SiO}_2$ [12] последние отвечают таковым высококалиевой известково-щелочной петрохимической серии пород (рис. 2, г).

Амфибол-пироксеновые кварцевые монцитониты второй фазы, в отличие от ранних пород, характеризуются низкими значениями $\text{SiO}_2 = 63,77\text{--}64,42\%$, $\text{MgO} = 0,44\text{--}0,89\%$ и высокими содержаниями большинства оксидов ($\text{TiO}_2 = 0,37\text{--}0,56\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 16,24\text{--}16,64$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 1,77\text{--}2,39$, $\text{FeO} = 1,47\text{--}2,08$, $\text{CaO} = 3,12\text{--}3,16$, $\text{Na}_2\text{O} = 4,99$, $\text{K}_2\text{O} = 4,21\text{--}4,57\%$), а также более

высокой суммарной щелочностью ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 9,24\text{--}9,76 < 12$ (см. табл. 1), отвечающей умеренно щелочным породам [7]. Образования второй фазы характеризуются калиево-натриевым типом щелочности ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 1,12\text{--}1,21$) и относятся к высокоглиноземистой серии ($al' = 2,91\text{--}3,31$), при низких по сравнению с породами ранней фазы значениях индекса $ASI = 0,86\text{--}0,87 < 1$ и более высокой железистости $f^* = 0,60\text{--}0,79$ (см. табл. 1). На классификационных диаграммах [9–11] составы пород поздней фазы занимают поля кварцевых моноцитонитов (см. рис. 2, а–в). По соотношению $\text{K}_2\text{O}\text{--SiO}_2$ [12] они относятся к высококалиевой известково-щелочной петрохимической серии магматических пород (см. рис. 2, г).

Амфиболовые кварцевые сиениты Эвотинского массива геохимически специализированы на литофильные элементы Rb, Sr, Ba, B, Cr, V, Nb, Zr (здесь и далее классификация элементов дана по [13]), концентрация в них халькофильных Cu, Sn, Zn, Pb, Ge и сидерофильных Ni, Co элементов ниже, что характерно для производных латитовой серии [14] (табл. 2). Породы ранней фазы по высокому содержанию индикаторных крупноионных элементов Sr (700 г/т) = 750–1100 г/т (в скобках здесь и далее индикаторные элементы по [14]), Ba (1700 г/т) = 1600–3100 г/т (один из геохимических признаков латитов [14]), Co (11,2 г/т) = 4,80–8,82 г/т, а также по концентрациям микроэлементного состава Hf (3,2 г/т) = 2,42–2,97 г/т, Yb (1,2 г/т) = 0,90–1,06 г/т и отношениям La/Yb (>12 [14]) = 12,35–12,9; Ce/Yb (>22 [15]) = 25,78–26,42 (см. табл. 2, 3) наиболее близки к производным латитов шошонитового типа [15]. Породы имеют плавный отрицательный наклон в распределении РЗЭ при проявлении отрицательной Eu аномалии ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0,51\text{--}1,04$) (табл. 3); они обогащены цериевыми (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu) и обеднены иттриевыми (Y, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) элементами (см. табл. 3, рис. 3, а). На спайдер-диаграмме отчетливо заметны минимумы для Rb, Th, Nb, Ta, Nd, а также ярко выраженные максимумы значений для Ba, U, La и Sr (см. рис. 3, б).

Амфибол-пироксеновые кварцевые монцитониты массива специализированы на тот же круг элементов, что и породы предыдущей фазы (см. табл. 2), но отличаются повышенными содержаниями литофильных (Sr, Ba, V, Sc, Nb, Zr, Y), а также части халькофильных (Cu, Zn) и сидерофильных

Таблица 1

Петрохимический состав магматических пород Эвотинского массива

Table 1

Petrochemical composition of igneous rocks of the Evotinsky massif

Компонент	Фаза 1										Фаза 2													
	Э18-11	Э18-11/1	Э18-11/2	Э18-11/3	Э18-12	Э18-12/2	Э18-12/3	Э18-12/4	И19-43	И19-43/2	И19-43/3	И19-43/4	И19-43/5	И19-43/6	Э18-13	Э18-13/1	Э18-13/2	Э18-14	Э18-14/1	Э18-15	Э18-15/1	Э18-15/2	Э18-15/3	
SiO ₂	67,6	66,3	66,1	66,7	65,5	65,7	66,8	65,4	65,9	65,6	67,3	65,9	66,7	67,1	64,1	64,4	63,7	64,6	64,3	64,3	64,3	64,1	63,8	64,3
TiO ₂	0,36	0,42	0,27	0,31	0,34	0,51	0,43	0,27	0,43	0,37	0,35	0,35	0,30	0,41	0,44	0,46	0,55	0,53	0,37	0,40	0,46	0,55	0,56	
Al ₂ O ₃	16,1	15,7	16,1	15,8	15,4	15,9	16,1	15,4	15,4	15,4	15,2	15,7	14,4	14,4	16,37	16,25	16,64	16,43	16,40	16,43	16,48	16,61	16,44	
Fe ₂ O ₃	1,68	1,07	1,42	1,65	1,59	1,57	1,04	1,52	2,46	2,00	2,17	2,01	1,40	1,75	1,93	1,84	1,98	1,79	2,02	1,77	2,39	2,35	1,89	
FeO	1,42	1,83	1,52	1,48	1,56	1,98	1,71	1,44	1,29	1,28	1,28	1,58	1,22	1,81	2,08	1,82	1,80	1,66	1,47	1,69	1,61	1,64	1,78	
MnO	0,08	0,06	0,06	0,06	0,07	0,08	0,07	0,06	0,08	0,07	0,07	0,07	0,05	0,06	0,06	0,07	0,07	0,09	0,08	0,07	0,07	0,08	0,08	
MgO	0,75	0,89	0,89	0,95	0,97	1,13	0,35	0,87	0,76	0,72	0,99	0,80	0,49	1,26	0,44	0,61	0,61	0,68	0,89	0,71	0,65	0,47	0,65	
CaO	1,57	2,08	2,09	1,95	2,59	2,54	2,93	3,07	2,84	2,93	1,71	2,96	3,04	2,75	3,18	3,21	3,38	3,35	3,27	3,12	3,16	3,25	3,23	
Na ₂ O	4,76	4,91	4,79	4,95	4,83	4,91	4,91	4,96	5,03	5,21	5,21	5,05	5,32	4,94	5,11	5,07	5,07	5,03	5,03	5,19	4,99	5,07	5,07	
K ₂ O	3,82	4,21	4,28	3,90	3,97	3,84	3,82	3,55	4,21	4,35	4,49	4,07	3,87	4,19	4,23	4,32	4,26	4,21	4,34	4,57	4,47	4,51	4,41	
H ₂ O ⁻	0,24	0,20	0,26	0,26	0,16	0,20	0,24	0,30	0,24	0,18	0,20	0,24	0,22	0,14	0,22	0,22	0,28	0,18	0,18	0,16	0,24	0,16	0,22	
H ₂ O ⁺	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,97	0,71	0,38	0,40	0,98	0,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
P ₂ O ₅	0,24	0,25	0,24	0,22	0,21	0,24	0,24	0,22	0,20	0,20	0,21	0,19	0,15	0,21	0,18	0,19	0,22	0,23	0,22	0,20	0,20	0,21	0,23	
CO ₂	0,16	0,42	0,39	0,47	1,19	0,31	0,49	1,68	0,81	0,64	0,14	0,08	1,31	0,08	0,56	0,53	0,40	0,26	0,42	0,44	0,45	0,40	0,42	
S	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
F	0,01	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	0,05	0,07	0,09	0,08	0,09	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	
Сумма	99,3	99,1	99,1	99,4	99,2	99,3	99,3	99,4	100,7	99,9	99,9	99,5	100,4	99,7	99,3	99,1	99,1	99,1	99,1	99,1	99,3	99,2	99,3	
Na ₂ O+K ₂ O	8,58	9,12	9,07	8,85	8,80	8,75	8,73	8,51	9,24	9,56	9,70	9,12	9,19	9,13	9,34	9,39	9,33	9,24	9,37	9,76	9,46	9,58	9,48	
Na ₂ O/K ₂ O	1,25	1,17	1,12	1,27	1,22	1,28	1,29	1,40	1,19	1,20	1,16	1,24	1,37	1,18	1,21	1,17	1,19	1,19	1,16	1,14	1,12	1,12	1,15	
al'	3,23	2,84	3,03	2,86	2,72	2,39	4,04	2,97	2,90	3,14	2,67	4,59	3,74	2,10	3,09	3,07	3,10	3,15	2,91	3,09	3,02	3,31	3,06	
ASI	1,09	0,96	0,99	1,00	0,91	0,95	0,92	0,88	0,86	0,83	0,92	1,02	0,78	0,82	0,87	0,86	0,87	0,87	0,87	0,86	0,88	0,87	0,87	
f*	0,62	0,59	0,58	0,57	0,57	0,57	0,78	0,58	0,64	0,63	0,56	0,70	0,68	0,54	0,79	0,71	0,71	0,67	0,60	0,66	0,70	0,76	0,69	

Примечание. Составы пород Эвотинского массива: фаза 1 – амфиболовые кварцевые сyenиты, фаза 2 – амфибол-пироксеновые кварцевые монзониты. Все значения, кроме коэффициентов даны в мас. %; al' = Al/(Fe*+Mg), ASI = Al/(Ca–1,67×P+Na+K), f* = Fe*/(Fe*+Mg) – молекулярные количества.

Note. Rock compositions of the Evotinsky massif: 1 – amphibole quartz syenites, 2 – amphibole-pyroxene quartz monzonites. All values except coefficients are given in wt. %; al' = Al/(Fe*+Mg), ASI = Al/(Ca–1,67×P+Na+K), f* = Fe*/(Fe*+Mg) – molecular quantities.

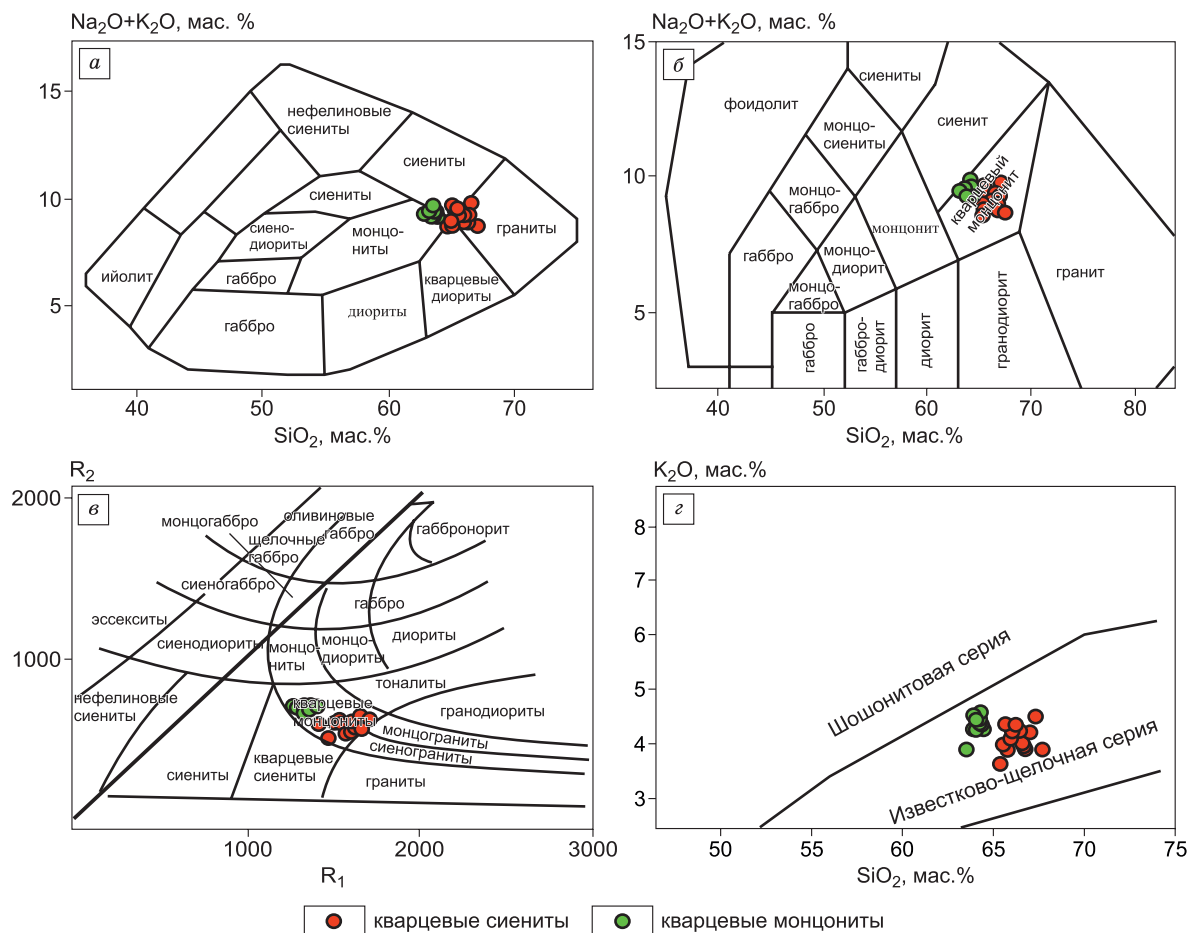


Рис. 2. Классификационные диаграммы для пород Эвотинского массива. а, б – диаграммы $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ - SiO_2 [9, 10]; в – диаграмма $(R_1 - R_2)$ [11] ($R_1 = 4\text{Si} - 11(\text{Na} + \text{K})$, $R_2 = 6\text{Ca} + 2\text{Mg} + \text{Al}$, молекулярные количества); з – диаграмма K_2O - SiO_2 [12]

Fig. 2. Classification diagrams for the rocks of the Evotinsky massif. (а, б) – diagrams $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ - SiO_2 [9, 10]; (в) – diagram $(R_1 - R_2)$ [11] ($R_1 = 4\text{Si} - 11(\text{Na} + \text{K})$, $R_2 = 6\text{Ca} + 2\text{Mg} + \text{Al}$, molecular quantities); з – diagram K_2O - SiO_2 [12]

(Co) элементов (см. табл. 2, 3). Породы второй фазы по высокому содержанию Sr (700 г/т) = 1100–1400 г/т, Ba (1700 г/т) = 2100–3400 г/т, Co (11,2 г/т) = 5,97–11,20 г/т, содержанию микроэлементов La (18 г/т) = 15,03–21,80 г/т, Ce (35 г/т) = 31,47–41,74 г/т, Yb (1,2 г/т) = 1,20–1,30 г/т и отношениям La/Yb (>12 [14]) = 12,52–16,76, Ce/Yb (>22 [15]) = 26,23–32,15 (см. табл. 2, 3) наиболее близки к производным латитов шошонитового типа [15]. Кварцевые монцониты обогащены цериевыми (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu) и обеднены иттриевыми (Y, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) элементами, имеют слабую отрицательную Eu-аномалию (Eu/Eu^* до 0,79–0,83). Характер распределения РЗЭ аналогичен породам первой фазы, но в целом при более высоких значениях всех РЗЭ (см. табл. 3, рис. 3, а). На спайдер-диаграмме отмечается аналогичное распределение большинства микроэлементов от-

носительно кварцевых сиенитов за исключением Zr, Eu, Dy, Yb и Lu (см. рис. 3, б).

Геохронологические исследования магматических пород Эвотинского массива. Как уже отмечалось, Эвотинский массив имеет двухфазовое строение: ранние – амфиболовые кварцевые сиениты и поздние – амфибол-пироксеновые кварцевые монцониты. Для геохронологических исследований нами были отобраны две пробы из наименее измененных пород (фазы внедрения, образцы: первая – Э19-11, вторая – Э19-13) с последующим выделением из них цирконов, по которым было сделано 30 изотопных U-Pb определений возраста (SHRIMP-II) (табл. 4).

Кристаллы цирконов из пород первой и второй фаз внедрения представлены в основном крупными, удлиненными (коэффициент удлинения 1:2–6) призматическими индивидами (250–600 мкм по длинной оси) и их обломками (190–

Т а б л и ц а 2

Геохимический состав магматических пород Эвотинского массива

Table 2

GEOCHEMICAL COMPOSITION OF IGNEOUS ROCKS OF THE EVOTINSKY MASSIF

Номер пробы	Фаза	I литофильные										II халькофильные					III сидерофильные		
		Sr	Ba	Cr	V	Sc	Nb	Zr	Y	Cu	Sn	Zn	Pb	Ge	Ni	Co			
Э18-11	1	980,00	3000,00	100	50,70	8,75	7,98	110,00	16,40	3,3	1,77	32,40	66,70	1,20	15,40	5,83			
Э18-11/1		920,00	2800,00	42	51,00	6,31	10,80	100,00	13,20	15,40	2,01	52,50	71,60	1,66	13,90	6,79			
Э18-11/2		1100,00	3100,00	190	61,60	7,30	8,78	83,40	13,80	30,80	3,53	33,30	69,50	1,48	16,00	6,14			
Э18-11/3		860,00	2200,00	220	50,40	6,10	13,20	88,00	12,20	24,60	2,97	29,50	67,60	1,45	14,30	6,38			
Э18-12		900,00	3100,00	150	59,10	7,45	7,65	96,30	13,30	13	2,02	39,80	82,60	1,73	15,70	6,68			
Э18/12/2		980,00	2500,00	52	71,70	9,54	12,30	92,90	13,40	28,80	4,28	36,40	81,80	1,52	15,50	8,82			
Э18-12/3		870,00	1900,00	260,00	44,40	5,41	10,80	89,20	10,60	17,90	2,71	38,10	74,80	1,30	15,70	6,18			
Э18-12/4		900,00	1900,00	210	43,90	7,03	7,68	92,90	11,90	91,20	5,06	39,70	82,10	1,65	19,20	5,94			
И19-43		1100,00	1900,00	160,00	66,20	8,32	5,32	110,00	10,30	5,24	<4	65,00	42,40	<2,2	15,10	6,05			
И19-43/2		950,00	1900,00	110,00	59,90	7,04	8,67	110,00	9,33	<5	<4	69,00	49,50	<2,2	13,40	6,36			
И19-43/3		860,00	2300,00	130,00	68,20	7,25	10,80	97,70	8,07	6,74	<4	67,00	56,60	<2,2	13,70	6,87			
И19-43/4		910,00	2100,00	150,00	66,40	6,58	5,91	95,40	9,43	16,50	<4	66,40	44,70	<2,2	14,50	6,39			
И19-43/5		750,00	1600,00	190,00	55,70	5,68	4,64	91,20	8,20	<5	<4	<60	48,60	<2,2	12,80	4,80			
И19-43/6		790,00	1700,00	210,00	69,00	7,16	5,06	94,50	7,69	16,20	<4	<60	48,80	<2,2	30,50	8,37			
Э18-13	2	1100,00	2100,00	77	61,10	7,21	10,20	110,00	14,80	18,40	1,43	52,70	41,80	1,65	13,50	6,31			
Э18-13/1		1300,00	2500,00	38	60,10	8,00	9,47	130,00	15,40	39,50	3,53	43,80	56,80	1,26	11,40	7,06			
Э18-13/2		1000,00	2500,00	190,00	69,90	7,22	12,90	160,00	16,30	17,20	2,49	39,60	47,40	1,72	14,60	6,54			
Э18-14		1300,00	2600,00	36	75,60	9,33	11,80	140,00	18,50	18,20	3,10	44,20	55,10	1,62	12,80	7,78			
Э18-14/1		1400,00	3400,00	140	55,40	9,08	5,78	140,00	16,40	4,8	2,14	43,40	51,70	2,01	16,00	6,19			
Э18-15		1200,00	3000,00	120	71,90	8,14	10,50	160,00	16,30	29,00	1,91	45,70	54,10	2,22	20,50	11,20			
Э18-15/1		1200,00	3400,00	150	67,40	8,43	8,47	140,00	15,50	26,70	1,72	37,10	54,30	1,09	17,50	8,19			
Э18-15/2		1200,00	2800,00	40	74,70	8,88	16,40	140,00	17,10	46,60	3,86	49,50	65,30	2,31	13,00	7,40			
Э18-15-3		1200,00	2900,00	170	72,70	7,82	10,10	130,00	15,50	45,00	2,68	38,70	55,10	1,46	13,20	5,97			

Примечание. Элементы даны в г/т, I–III по классификации [13].
Note: Elements are given in ppm, I–III according to classification [13].

Таблица 3
Геохимический состав магматических пород
Эвотинского массива по данным ICP-MS

Table 3
Geochemical composition of igneous rocks
of the Evotinsky massif according to ICP-MS data

Элемент	Э18-12	Э18-12/2	Э18-13	Э18-15/2
	Фаза 1		Фаза 2	
Rb	73,27	69,47	84,01	84,24
Sr	871,69	969,54	1176,00	1191,06
Y	9,79	10,02	12,59	14,20
Zr	108,14	127,44	110,76	124,25
Nb	5,74	5,86	6,14	4,67
Cs	2,80	8,28	4,13	9,32
Ba	1862,50	1867,01	1959,22	2202,23
La	11,12	13,80	15,03	21,80
Ce	23,20	28,07	31,47	41,74
Pr	2,73	3,48	3,94	5,19
Nd	11,90	13,54	15,39	22,22
Sm	2,54	2,84	3,18	4,52
Eu	0,38	0,99	0,76	1,20
Gd	2,00	2,97	2,70	4,29
Tb	0,27	0,37	0,40	0,59
Dy	1,65	1,77	2,08	2,72
Ho	0,34	0,36	0,43	0,55
Er	0,90	0,86	1,21	1,30
Tm	0,14	0,18	0,19	0,23
Yb	0,90	1,06	1,20	1,30
Lu	0,14	0,23	0,18	0,21
Hf	2,42	2,97	2,60	2,62
Ta	0,27	0,37	0,32	0,44
Th	2,93	3,99	4,32	6,82
U	0,98	1,58	1,21	2,20
Rb/Sr	0,08	0,07	0,07	0,07
K/Rb	128,75	121,15	111,76	102,80
Ba/Rb	25,42	26,88	23,32	26,14
Ba/La	167,49	135,29	130,35	101,01
Nb/La	0,52	0,42	0,41	0,21
Th/U	2,98	2,52	3,58	3,10
Y/Nb	1,70	1,71	2,05	3,04
La/Nb	1,94	2,35	2,45	4,67
La/Th	3,80	3,46	3,48	3,20
Eu/Eu*	0,51	1,04	0,79	0,83
ΣPЗЭ	58,20	70,52	78,16	107,86

Примечание. Породы Эвотинского массива: фаза 1 – амфиболовые кварцевые сиениты; фаза 2 – амфибол-пироксеновые кварцевые монзониты. По данным ICP MS все значения в г/г; $Eu/Eu^* = EuN/[SmN \times GdN]^{1/2}$.

Note. Rocks of the Evotinsky massif: 1 – amphibole quartz syenites; 2 – amphibole-pyroxene quartz monzonites. According to ICP MS data, all values are in ppm; $Eu/Eu^* = EuN/[SmN \times GdN]^{1/2}$.

350 мкм) с корродированными границами, реже зернами изометричной формы. В CL-изображении (CL – катодOLUMИНЕСЦЕНТНОЕ изображение) в большинстве кристаллов хорошо различаются ядра и каймы (рис. 4).

Центральная часть цирконов – светлые области кристаллов неправильной формы, часто с резко выраженной осцилляционной зональностью и повышенным количеством микровключений. Каймы цирконов имеют более темную окраску с иногда неотчетливо выраженной ростовой осцилляционной зональностью и секториальностью. При этом в CL-изображениях фиксируется, что зональность кайм не конформна зональности ядер.

Выделенный циркон из амфиболовых кварцевых сиенитов (обр. Э18-11) характеризуется гетерогенностью U–Pb изотопной системы: содержания U и Th в ядрах зерен варьируют от 43,8 до 337 и от 6,67 до 321 г/т, тогда как в каймах – от 355 до 2664 и от 19,7 до 870 г/т соответственно. При этом величина Th/U отношения в центральных частях зерен изменяется от 0,16 до 1,20, а в периферийных зонах – от 0,02 до 0,34. По девяти точкам получено конкордантное значение возраста 119 ± 1 млн лет при СКВО конкордантности 0,24 (см. рис. 4).

Акцессорный циркон из амфибол-пироксеновых кварцевых монзонитов обр. Э18-13 имеет сходные геохимические характеристики с цирконом из обр. Э18-11. В каймах зерен содержания U и Th сильно варьируют от 227 до 2590 и от 2,59 до 1851 г/т соответственно. Диапазон значений Th/U отношения в периферийных частях кристаллов изменяется от 0,01 до 0,74. Рассчитанный конкордантный возраст цирконов в их краевых зонах попадает в компактную область значений – 117 ± 1 млн лет (СКВО = 0,71; см. рис. 4).

В ядрах изученных зерен обоих образцов содержания U и Th низкие – в среднем 211 и 112 г/т соответственно. Средняя величина Th/U отношения 0,67. Ядра цирконов отличаются древними значениями U–Pb изотопного возраста: от 1802 до 2843 млн лет (см. табл. 4).

Обсуждение

По классификационным данным [9–11], состав пород ранней фазы варьирует от кварцевых монзонитов до граносиенитов, но с учетом петрографических исследований (преобладание в составе пород калиевого полевого шпата над

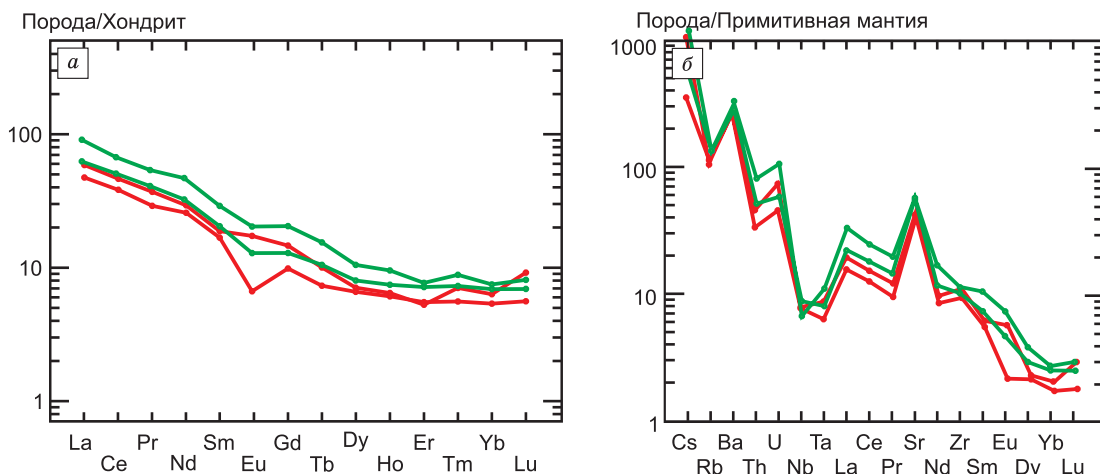


Рис. 3. Спектры распределения редкоземельных элементов (а), нормированных к составу хондрита [16]; редких элементов (б), нормированных к составу примитивной мантии [17] для пород Эвотинского массива. Условные обозначения точек составов пород см. на рис. 2

Fig. 3. Distribution spectra of rare earth elements (а), normalized to the chondrite composition [16]; rare elements (б), normalized to the primitive mantle spectra of composition [17] for the rocks of the Evotinsky massif. For the legend of the rock composition points, see Fig. 2

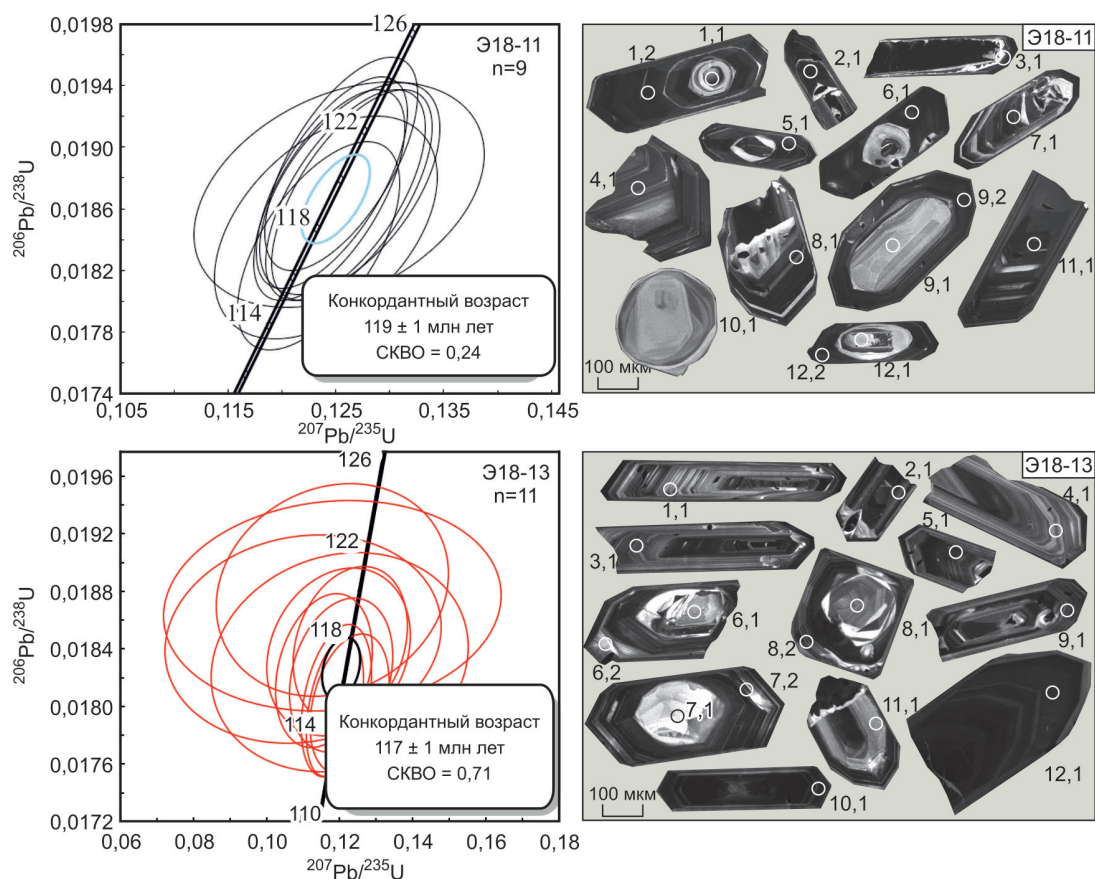


Рис. 4. Диаграммы с конкордиями для магматических пород Эвотинского массива. Справа показаны CL-изображения датированных зерен цирконов с точками определений

Fig. 4. Concordia diagrams for igneous rocks of the Evotinsky massif. CL-images of dated zircon grains with determination points are shown to the right

Таблица 4

Результаты локального (SHRIMP-II) U-Pb анализа циркона из магматических пород Эвотинского массива

Table 4

Results of local (SHRIMP-II) U-Pb analysis of zircon from igneous rocks of the Evotinsky massif

Точка измерения	²⁰⁶ Pb _c , %	Содержание, г/г			²³² Th/ ²³⁸ U	²⁰⁶ Pb*/ ²³⁸ U±1σ возраст, млн лет	
		U	Th	²⁰⁶ Pb*			
Амфиболовые кварцевые сиениты. Э18-11							
1,1	0,03	337	291	105	0,89	1997	±26
1,2	0	1398	358	22,5	0,26	119	±2
2,1	0,12	2498	56,1	40,3	0,02	120	±2
3,1	1,04	1877	538	36	0,3	141	±2
4,1	0,26	355	19,7	6,11	0,06	127	±2
5,1	0,07	1416	200	22,4	0,15	117	±2
6,1	0	990	137	15,9	0,14	120	±2
7,1	0,19	1096	46,6	17,4	0,04	118	±2
8,1	0,09	2131	93,5	34,6	0,05	121	±2
9,1	0,07	142	88,8	44,3	0,65	2003	±2
9,2	0	1437	159	23,1	0,11	119	±2
10,1	0,1	276	321	81,6	1,2	1903	±3
11,1	0,42	743	107	12	0,15	119	±2
12,1	0,27	43,8	6,67	20,4	0,16	2783	±44
12,2	0,16	2664	870	42,9	0,34	119	±2
Амфибол-пироксеновые кварцевые монцитониты. Э18-13							
1,1	0,82	240	2,59	3,91	0,01	120	±2
2,1	0,33	815	28,7	12,8	0,04	116	±1
3,1	0,89	400	14,5	6,49	0,04	120	±2
4,1	0,62	227	4,29	3,59	0,02	117	±2
5,1	0,31	900	36,1	14,2	0,04	117	±1
6,1	0,06	186	126	72,9	0,7	2416	±26
6,2	1,13	337	28,8	5,41	0,09	118	±2
7,1	0,19	154	138	42,9	0,93	1802	±22
7,2	0,24	1331	290	20,6	0,23	115	±1
8,1	0,04	361	61,8	172	0,18	2843	±26
8,2	0,37	640	53,4	10,2	0,09	118	±1
9,1	0,19	1064	272	16,5	0,26	115	±1
10,1	0,2	2590	1851	40,1	0,74	115	±1
11,1	0,12	145	121	42,6	0,86	1901	±21
12,1	0,49	471	12,9	7,47	0,03	117	±2

Примечание. Pb_c и Pb^* – обыкновенный и радиогенный свинец. Ошибки при калибровке стандарта 0,37 % (обр. Э18-11) и 0,45 % (обр. Э18-13) не включены в ошибки определения единичного локального анализа. Коррекция на обыкновенный свинец при расчете возраста произведена по величине измеренного ^{204}Pb .

Note. Pb_c and Pb^* are common and radiogenic lead. Standard calibration errors of 0.37 % (sample E18-11) and 0.45 % (sample E18-13) are not included in the errors of the single local analysis. Correction for common lead in the age calculation was made based on the measured ^{204}Pb .

плагиоклазом, присутствие в составе сиенитов кварца до 10 %, двух разновидностей амфибола до 10 %) мы относим образования первой фазы

к амфиболовым кварцевым сиенитам [7]. Породы второй фазы по этим же параметрам соответствуют амфибол-пироксеновым кварцевым мон-

цонитам. То есть установлен антидромный характер внедрения пород нормальной (прямой) зональности массива [6].

Магматические образования Эвотинского массива по петрохимическому составу отвечают субщелочным породам, характеризуются калиево-натриевым типом щелочности и относятся к высококалиевой известково-щелочной петрохимической серии. По содержанию индикаторных элементов Sr, Ba, концентрациям микроэлементного состава Hf, Yb [15], отношениям La/Yb (>12 [18]) = 12,35–12,99; Ce/Yb (>15 [18]) = 25,78–26,42, а также характерной геохимической специализации на литофильную группу элементов (см. табл. 3) они наиболее близки к производным пород шошонит-латитового ряда [14, 18].

В целом характер распределения микроэлементов в образованиях ранней и поздней фаз идентичен, кроме повышенного содержания всех элементов в поздней фазе, что может говорить о внедрении пород из одного источника, но с контаминацией поздней фазы на заключительной стадии породами первой фазы [19]. Наличие слабой отрицательной Eu-аномалии пород первой фазы массива (Eu/Eu* до 0,51–1,04) и снижение этого показателя к поздней фазе (до 0,79–0,83) (см. табл. 3) может свидетельствовать о формировании первичных мантийных магм при фракционной кристаллизации темноцветных порообразующих минералов [19]. Стоит отметить наименьшую концентрацию РЗЭ в кварцевых сиенитах до 64,36 г/т, которая увеличивается к кварцевым монцонитам до 93,00 г/т (средние значения), что подтверждает антидромную последовательность внедрения пород массива [19].

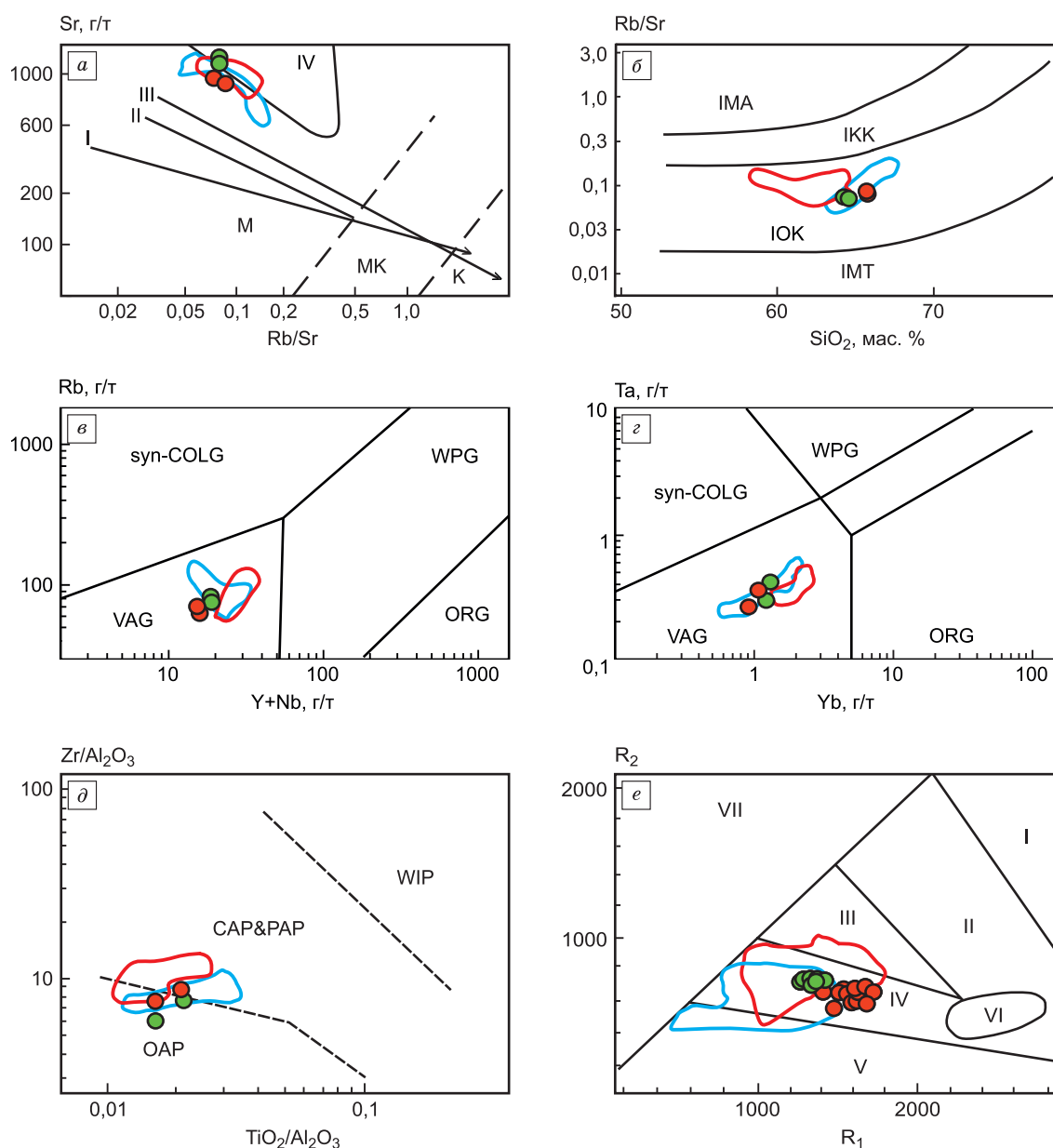
По отношениям Rb/Sr (0,08 [20]) = 0,07–0,08, Ba/Rb (22 [14]) = 23,32–26,88 а также Sr–Rb/Sr [21] (рис. 5, а) все породы массива близки к магматическим образованиям мантийного генезиса. Низкие значения Nb/La (<1 [22]) = 0,21–0,52 и высокие значения Th/U (>2 [22]) = 2,52–3,58 могут указывать на присутствие корового вещества [22]. Высокие показатели отношения Y/Nb ($>1,2$ [18]) = 1,70–3,04 могут отражать вклад как мантийного, так и корового источника с геохимическими характеристиками La/Yb (>12 [18]) = 12,35–12,99, Ce/Yb (>15 [18]) = 25,78–26,42, Ba/La (>3 [23]) = 101,01–167,49, La/Th (1–10 [24]) = 3,46–3,80 магматических пород островных дуг и континентальных окраин [18, 23]. Такой же точки зрения придержи-

ваются А.Я. Кочетков и К.А. Лазебник [25], которые отметили петрохимическую и геохимическую близость пород мезозойских магматических образований алданского комплекса с вулканитами островных дуг.

U–Pb изотопные возрасты в краевых зонах цирконов показали, что формирование Эвотинского массива произошло в относительно короткий промежуток времени – 117–119 млн лет (аптский век), что соответствует заключительному этапу формирования магматизма Алданской мезозойской магматической провинции 150–115 млн лет назад [26]. Ядра цирконов имеют более древние значения U–Pb изотопного возраста – от 1802 до 2843 млн лет. Это свидетельствует, что цирконы с древним возрастом ядер имеют ксеногенную природу и были захвачены расплавом из пород фундамента при кристаллизации Эвотинского массива.

Ранее было высказано мнение об участии субдуцированной океанической коры Монголо-Охотского бассейна в формировании материнских магматических очагов всего алданского комплекса [1, 21]. Результаты изучения магматических пород Эвотинского рудно-россыпного района подтверждают это мнение. По соотношению Rb/Sr–SiO₂ [28] все породы массива относятся к производным магматического очага, генерировавшегося в пределах океанической коры (рис. 5, б). На дискриминантных диаграммах Дж. Пирса [29] Rb–Y+Nb, Ta–Yb и Zr/Al₂O₃–TiO₂/Al₂O₃ [30] (рис. 5, в–д) точки составов пород локализуются в полях производных островных дуг, что присуще надсубдукционным образованиям. В то же время соотношения Sr–Rb/Sr [21] и R₁–R₂ [31] соответствуют породам рифтогенного или позднеорогенного этапа, т. е. формирование массива происходило в условиях растяжения (см. рис. 5, а, е). Возможно, это свидетельствует об образовании пород Эвотинского массива в условиях задугового растяжения на заключительных стадиях закрытия Монголо-Охотского океана. Однако это предположение нуждается в дополнительном подтверждении. Стоит отметить, что подобная обстановка установлена и для других мезозойских массивов Эвотинского рудно-россыпного района, в частности, Медведевского, Таежного и Михайловского (см. рис. 5) [3].

На основе геохимических данных выполнен анализ минерагенического потенциала магматических пород Эвотинского массива. По соотношению в них Fe₂O₃/FeO–Rb [32] породы массива



Составы магматических пород массивов Эвотинского рудного района по [3]

Медведевский Таежный

Рис. 5. Дискриминантные диаграммы для магматических образований Эвотинского массива. *a* – соотношение Sr–Rb/Sr в магматических породах. Поля составов магнеобразующих источников [21]: М – мантийные, МК – мантийно-коровые, К – коровые. Сплошные линии – тренды дифференциации типовых и вулканических серий: I – толеитовая островных дуг, II – известково-щелочная, III – известково-щелочная активных континентальных окраин, IV – рифтовых зон континентов; *б* – Rb/Sr–SiO₂, поля диаграммы [28]: магматические породы: IMT – толеитовой серии, IKK – континентальной коры, IOK – океанической коры, IMA – щелочно-мантийные; *в*, *г* – Rb–Y+Nb и Ta–Yb – поля диаграмм [29]: ORG – граниты океанических хребтов, WPG – внутриплитные граниты, VAG – граниты вулканических дуг, syn-COLG – коллизионные граниты; *д* – диаграмма Zr/Al₂O₃–TiO₂/Al₂O₃ для пород различных геодинамических обстановок по [30]: WIP – внутриплитные, CAP&PAP – окраинно-континентальных и постколлизионных вулканических дуг, OAP – океанических дуг; *е* – R₁–R₂, поля диаграммы [31]: производные: I – мантийных магм, II – доплитной коллизии, III – постколлизионного воздымания, IV – позднеорогенного, V – анорогенного, VI – синколлизонного этапов развития территории, VII – дифференциации щелочных магм. $R_1 = 4Si - 11(Na + K) - 2(Fe + Ti)$, $R_2 = 6Ca + 2Mg + Al$

Fig. 5. Discriminant diagrams for igneous formations of the Evotinsky massif. *a* – Sr–Rb/Sr ratio in igneous rocks. Fields of compositions of magma-forming sources [21]: M – mantle, MK – mantle-crustal, K – crustal. Solid lines are trends of differentia-

tion of type and volcanic series: I – tholeiitic of island arcs, II – calc-alkaline, III – calc-alkaline of active continental margins, IV – rift zones of continents; δ – Rb/Sr–SiO₂, fields of diagram [28]: igneous rocks: IMT – tholeiitic series, IKK – continental crust, IOK – oceanic crust, IMA – alkaline-mantle; e , e – Rb–Y+Nb and Ta–Yb – fields of diagrams [29]: ORG – ocean ridge granites, WPG – within-plate granites, VAG – volcanic arc granites, syn-COLG – collision granites; z – Zr/Al₂O₃–TiO₂/Al₂O₃ diagram for rocks of different geodynamic settings according to [30]: WIP – within-plate, CAP&PAP – continental margin and post-collisional volcanic arcs, OAP – oceanic arcs; δ – R₁–R₂, fields of diagram [31]: derivatives: I – mantle magmas, II – pre-plate collision, III – post-collisional uplift, IV – late orogenic, V – anorogenic, VI – syncollisional stages of territory development, VII – differentiation of alkaline magmas. R₁=4Si-11(Na+K)-2(Fe+Ti), R₂=6Ca+2Mg+Al

могут быть специализированы на комплексное Mo-Au-Cu оруденение (рис. 6).

Наиболее изученным золоторудным месторождением аналогичного генезиса в пределах Центрально-Алданского рудного района является Лебединое, оруденение которого связано со скарнами, расположенными на контакте мезозойских субщелочных и щелочных интрузий и карбонатных пород венда–нижнего кембрия [4, 33].

По результатам оценки минерагенического потенциала Эвотинского массива определено, что он специализирован на комплексную Mo-Au-Cu минерализацию (см. рис. 6). В россыпепроявлении р. Эвота, берущей свое начало в пределах Эвотинского массива, нами при шлиховом опробовании было установлено присутствие среднепробного золота [34]. Это позволяет предполагать, что при проведении дальнейших исследований

в Эвотинском массиве может быть обнаружена золотая минерализация.

Закключение

В результате исследований установлено, что в строении Эвотинского массива выделяется две фазы (антидромный характер) внедрения: первая – амфиболовые кварцевые сиениты, вторая – амфибол-пироксеновые кварцевые монцониты. По особенностям петрогеохимических составов породы массива наиболее близки таковым высококальциевой известково-щелочной петрохимической серии, производным шошонит-латитового ряда. Установлен вклад как мантийного, так и корового источников при формировании массива, а также выявлены черты сходства составов фаз Эвотинского массива с вулканитами окраинно-континентальных и островных дуг. U-Pb (циркон,

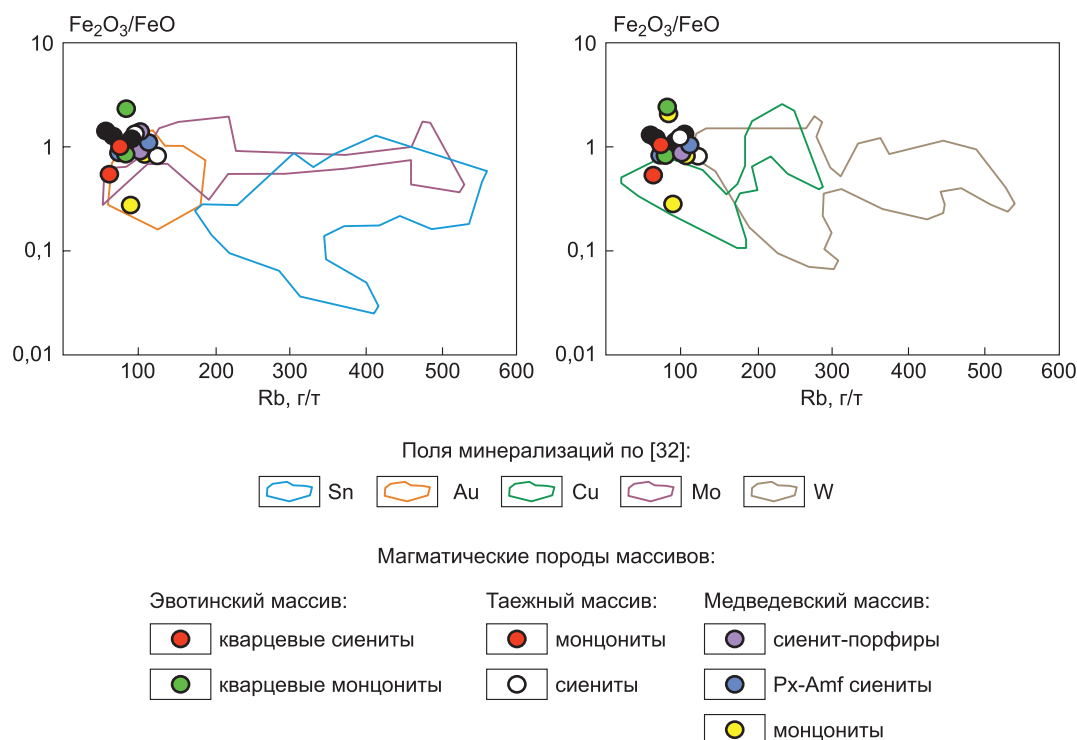


Рис. 6. Положение точек составов магматических пород Эвотинского рудного узла на диаграмме Fe₂O₃/FeO–Rb [32]

Fig. 6. Position of composition points of igneous rocks of the Evotinsky ore cluster on the Fe₂O₃/FeO–Rb diagram after [32]

SHRIMP-II) возраст кристаллизации пород массива варьирует от 119 ± 1 (амфиболовые кварцевые сиениты) до 117 ± 1 млн лет (амфибол-пироксеновые кварцевые монциты) – аптский век, что соответствует заключительному этапу формирования Алданской мезозойской магматической провинции. При их внедрении происходило плавление раннедокембрийских пород Алдано-Станового щита с возрастом 1802–2843 млн лет. Высказано предположение об образовании пород Эвотинского массива в условиях задугового растяжения на заключительных стадиях закрытия Монголо-Охотского океана, как и других массивов Эвотинского рудно-россыпного района (Медведевского, Тажного и Михайловского). На основании анализа минерогенического потенциала пород установлено, что магматические образования Эвотинского массива перспективны на обнаружение золоторудной минерализации.

Список литературы / References

1. Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). Отв. редакторы: д.г.-м.н. Л.М. Парфенов, чл.-корр. РАН М.И. Кузьмин. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика»; 2001. 571 с.
Tectonics, geodynamics and metallogeny of the territory of the Republic of Sakha (Yakutia). Responsible editors: doctor of geological and mineralogical sciences L.M. Parfenov, corresponding member of the Russian Academy of Sciences M.I. Kuzmin. Moscow: MAIK «Nauka/Interperiodika»; 2001. 571 p. (In Russ.)
2. Молчанов А.В., Терехов А.В., Шатов В.В. и др. Золоторудные районы и узлы Алдано-Становой металлогенической провинции. *Региональная геология и металлогения*. 2017;(71):93–111.
Molchanov A.V., Terekhov A.V., Shatov V.V., et al. Gold ore districts and ore clusters of the Aldanian metallogenic province. *Regional Geology and Metallogeny*. 2017;(71):93–111. (In Russ.)
3. Ivanov A.I., Loskutov E.E., Ivanov M.S., Zhuravlev A.I. Petrography, geochemical features and absolute dating of the mesozoic igneous rocks of Medvedev and Tazhniy Massifs (Southeast Russia, Aldan Shield). *Minerals*. 2022;12(12):1516 <https://doi.org/10.3390/min12121516>
4. Кравченко А.А., Смелов А.П., Березкин В.И., Попов Н.В. Геология и генезис докембрийских золотоносных метабазитов центральной части Алдано-Станового щита (на примере месторождения им. П. Пинигина). Якутск: ООО РИЦ «Офсет»; 2010. 148 с.
Kravchenko A.A., Smelov A.P., Berezkin V.I., Popov N.V. *Geology and genesis of Precambrian gold-bearing metabasites of the central part of the Aldan-Stanovoy shield (P. Pinigin deposit)*. Yakutsk: Offset; 2010. 148 p. (In Russ.)
5. Амарский В.Г. О связи рудообразования и магматизма (на примере Эвотинского района Алданского щита). *Известия ЗФГО СССР*. 1971;7(2):11–18.
Amarsky V.G. The connection between ore formation and magmatism (Evotinsky district of the Aldan shield). *News of the TB of the GC of the USSR*. 1971;7(2):11–18. (In Russ.)
6. Vigneresse J.L. The role of discontinuous magma inputs in felsic magma and ore generation. *Ore Geology Reviews*. 2007;30(3–4):181–216. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2006.03.001>
7. Богатиков О.А., Морозов А.Ф., Петров О.В. *Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования*. СПб.: ФГБУ «ВСЕГЕИ»; 2009. 160 с.
Bogatikov O.A., Morozov A.F., Petrov O.V. *Petrographic Code of Russia. Magmatic, metamorphic, metasomatic, impact formations*. Saint-Petersburg: VSEGEI; 2009. 160 p. (In Russ.)
8. Шарпенюк Л.Н. *Практическая петрология: методические рекомендации по изучению магматических образований применительно к задачам госгеокарт*. СПб.: ФГБУ «ВСЕГЕИ»; 2017. 168 с.
Sharpenok L.N. *Practical petrology: methodological recommendations for the study of igneous formations in relation to the tasks of state geological maps*. Saint-Petersburg: VSEGEI; 2017. 168 p. (In Russ.)
9. Wilson M. *Review of igneous petrogenesis: A global tectonic approach*. London.: Unwin Hyman; 1989. 466 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6788-4>
10. Middlemost E.A. *Magma and magmatic rocks. an introduction to igneous petrology*. London, New-York.: Longman; 1985. 266 p.
11. De la Roche H., Leterrier J., Grandclaude P., Marchal M. A classification of volcanic and plutonic rocks using R1–R2-diagram and major-element analyses – Its relationships with current nomenclature. *Chemical Geology*. 1980;29(1):183–210. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(80\)90020-0](https://doi.org/10.1016/0009-2541(80)90020-0)
12. Whitford D.J., Nicholls I.A., Taylor S.R. Spatial Variations in the geochemistry of quaternary lavas across the Sunda arc in Java and Bali. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1979;70:341–356. <https://doi.org/10.1007/BF00375361>
13. Goldschmidt V.M. *Geochemistry*. Oxford: Oxford University Press; 1954. 730 p.
14. Таусон Л.В. *Геохимические типы и потенциальная рудоносность гранитоидов*. М.: Наука; 1977. 280 с.
Tauson L.V. *Geochemical types and potential ore-bearing capacity of granitoids*. Moscow: Nauka; 1977. 280 p. (In Russ.)
15. Pearce J.A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: Thorpe R.S. (ed.) *Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks*. New York: Wiley; 1982, pp. 525–548.
16. Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. *Geological Society. Special Publications*. 1989;42(1):313–345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
17. McDonough W.F., Sun S.-S., Ringwood A.E., et al. Potassium, rubidium and cesium in the Earth and Moon and the evolution of the mantle of the Earth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1992;56(3):1001–1012. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(92\)90043-I](https://doi.org/10.1016/0016-7037(92)90043-I)
18. Eby G.N. The A-Type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis. *Lithos*. 1990;26(1–2):115–134. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(90\)90043-Z](https://doi.org/10.1016/0024-4937(90)90043-Z)
19. Балашов Ю.А. *Геохимия редкоземельных элементов*. М.: Наука; 1976. 267 с.
Balashov Yu.A. *Geochemistry of rare earth elements*. Moscow: Nauka; 1976. 267 p. (In Russ.)
20. Whalen J.B., Kenneth L., Currie K.L., Chappel B.W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1987;95(2):603–632. <https://doi.org/10.1007/BF00402202>

21. Даценко В.М. Петрогеохимическая типизация гранитоидов юго-западного обрамления Сибирской платформы. В кн.: *Петрография на рубеже XXI века: итоги и перспективы: материалы Второго Всероссийского петрографического совещания, г. Сыктывкар, 27–30 июня 2000 г.* Сыктывкар: Институт геологии Коми НЦ УРО РАН; 2000. С. 270–274.
- Datsenko V.M. Petrogeochemical typification of granitoids of the southwestern framing of the Siberian Platform. In: *Petrography at the turn of the 21st century: Results and prospects: Proceedings of the Second All-Russian Petrographic Conference, Syktvykar, June 27–30, 2000.* Syktvykar: Institute of Geology of the Komi Scientific Center URO RAS; 2000, pp. 270–274. (In Russ.)
22. Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М. *Континентальная кора, ее состав и эволюция.* М.: Мир; 1988. 380 с.
- Taylor S.R., McLennan S.M. *Continental crust, its composition and evolution.* Moscow: Mir Publ.; 1988. 380 p. (In Russ.)
23. Arculus R.J., Powell R. Source component mixing in the regions of arc magma generation. *Journal of Geophysical Research.* 1986;91:5913–5926. <https://doi.org/10.1029/JB091iB06p05913>
24. Туркина О.М. *Лекции по геохимии магматического и метаморфического процессов: учеб. пособие.* Новосибирск: ИИЦ НГУ; 2014. 118 с.
- Turkina O.M. *Lectures on geochemistry of magmatic and metamorphic processes: a tutorial.* Novosibirsk: Novosibirsk State University. 2014. 118 p. (In Russ.)
25. Кочетков А.Я., Лазебник К.А. Щелочные ультрабазиты и базиты Якокутского массива (Центральный Алдан). В кн.: Ковальский В.В. и др. (ред.) *Геохимия и минералогия базальтов и ультрабазитов Сибирской платформы.* Якутск: ЯФ СО АН СССР; 1984. С. 62–82.
- Kochetkov A.Y., Lazebnik K.A. Alkaline Ultrabasic and Basic Rocks of Yakokut Massif (Central Aldan). In: Kovalsky V.V., et al. (eds.) *Geochemistry and Mineralogy of Basalts and Ultrabasites of Siberian Platform.* Yakutsk: YaF AS USSR; 1984, pp. 62–82. (In Russ.)
26. Prokopyev I.R., Doroshkevich A.G., Ponomarchuk A.V., et al. U-Pb SIMS and Ar-Ar geochronology, petrography, mineralogy and gold mineralization of the late Mesozoic Amga alkaline rocks (Aldan shield, Russia). *Ore Geology Reviews.* 2019;109:520–534. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.05.011>
27. Великославинский С.Д., Котов А.Б., Сальникова Е.Б. и др. U-Pb-возраст федоровской толщи Алданского гранулитогнейсового мегакомплекса (Алданский щит). *Доклады РАН.* 2003;393(1):91–96.
- Velikoslavinsky S.D., Kotov A.B., Sal'nikova E.B., et al. The U-Pb age of the Fedorov sequence of the Aldan granulite-gneiss megacomplex, the Aldan shield. *Doklady Earth Sciences.* 2003;393(8):1151–1155.
28. Tischendorf G., Pälchen W. Zur Klassifikation von Granitoiden. *Zeitschrift fuer Geologische Wissenschaften.* 1985;13: 615–627.
29. Pearce J.A., Harris N.B.W., Tindle A.G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology.* 1984;25:956–983. <https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>
30. Müller D., Rock N.M.S., Groves D.I. Geochemical discrimination between shoshonitic and potassic volcanic rocks in different tectonic settings: A pilot study. *Mineralogy and Petrology.* 1992;46:259–289. <https://doi.org/10.1007/BF01173568>
31. Batchelor R.A., Bowden P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters. *Chemical Geology.* 1985;48(1-4):43–55. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(85\)90034-8](https://doi.org/10.1016/0009-2541(85)90034-8)
32. Blevin P.L., Chappell B.W. The role of magma sources, oxidation states and fractionation in determining the granite metallogeny of eastern Australia. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh.* 1992;83(1-2): 305–316. <https://doi.org/10.1017/s0263593300007987>
33. Максимов Е.П., Уютов В.И., Никитин В.М. Центрально-Алданская золото-урановорудная магматогенная система (Алдано-Становой щит, Россия). *Тихоокеанская геология.* 2010;29(2):3–26.
- Maximov E.P., Nikitin V.M., Uyutov V.I. The Central Aldan gold-uranium ore magmatogenic system, Aldan-Stanovoy shield, Russia. *Russian Journal of Pacific Geology.* 2010;4(2):95–115.
34. Журавлев А.И., Никифорова З.С., Кравченко А.А. и др. Минералого-геохимические особенности самородного золота из россыпей Эвотинского золотоносного района (Южная Якутия). В кн.: *Байкальская молодежная научная конференция по геологии и геофизике: Материалы VI Всероссийской молодежной научной конференции, посвященной памяти академика Н.Л. Добрецов, г. Улан-Удэ – Горячинск, 23–27 августа 2021 г.* Улан-Удэ: БНЦ СО РАН; 2021. С. 49–51. <https://doi.org/10.31554/978-5-7925-0604-6-2021-49-51>
- Zhuravlev A.I., Nikiforova Z.S., Kravchenko A.A., et al. Mineralogical and geochemical features of native gold from placers of the Evotinsky gold-bearing region (South Yakutia). In: *Baikal youth scientific conference on geology and geophysics: Proceedings of the 6th All-Russian youth scientific conference dedicated to the memory of academician N.L. Dobretsov, Ulan-Ude – Goryachinsk, August 23–27, 2021.* Ulan-Ude: BSC SB RAS. 2021, pp. 49–51. (In Russ.). <https://doi.org/10.31554/978-5-7925-0604-6-2021-49-51>

Об авторах

ИВАНОВ Мичил Спартаквич, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-0204-1653>, ResearcherID: AAL-7447-2021, Scopus Author ID: 57212410522, SPIN: 6254-7142, e-mail: ivanov.michil@bk.ru

ИВАНОВ Алексей Иванович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-5485-3127>, ResearcherID: JBR-7954-2023, Scopus Author ID: 57674640500, SPIN: 7715-0867, e-mail: aiivanov@diamond.ysn.ru

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

ЛОСКУТОВ Евгений Евгеньевич, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-7491-1067>, ResearcherID: AAO-4823-2021, Scopus Author ID: 57205150102, SPIN: 3030-3370, e-mail: Loskutov@diamond.ysn.ru

КРАВЧЕНКО Александр Александрович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-9767-6610>, Scopus Author ID: 15750892800, SPIN: 1760-7705, e-mail: freshrock@yandex.ru

М. С. Иванов и др. ♦ Вещественный состав и U-Pb возраст магматических пород Эвотинского массива...

ГУЗЕВ Владислав Евгеньевич, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий геолог, <https://orcid.org/0000-0003-3288-7999>, Scopus Author ID: 57355951700, SPIN: 4056-7413, e-mail: lector10@mail.ru

ТЕРЕХОВ Артем Валерьевич, кандидат геолого-минералогических наук, зав. отделом, <https://orcid.org/0000-0003-2001-1391>, Scopus Author ID: 57215378338, SPIN: 7531-5674, e-mail: artem_terekhov@vsegei.ru

Вклад авторов

Иванов М.С. – разработка концепции, методология, проведение исследования, верификация данных, создание черновика рукописи, редактирование рукописи; **Иванов А.И.** – разработка концепции, методология, проведение исследования, верификация данных, создание черновика рукописи, редактирование рукописи; **Журавлев А.И.** – методология, проведение исследования, верификация данных, создание черновика рукописи, редактирование рукописи; **Лоскутов Е.Е.** – проведение исследования, верификация данных, создание черновика рукописи; редактирование рукописи; **Кравченко А.А.** – разработка концепции, проведение исследования; **Гузов В.Е.** – методология, проведение исследования, создание черновика рукописи; **Терехов А.В.** – методология, создание черновика рукописи, редактирование

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

IVANOV, Michil Spartakovich, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-0204-1653>, ResearcherID: AAL-7447-2021, Scopus Author ID: 57212410522, SPIN: 6254-7142, e-mail: ivanov.michil@bk.ru

IVANOV, Alexey Ivanovich, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5485-3127>, ResearcherID: JBR-7954-2023, Scopus Author ID: 57674640500, SPIN: 7715-0867, e-mail: aiivanov@diamond.ysn.ru

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

LOSKUTOV, Evgeniy Evgenievich, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-7491-1067>, ResearcherID: AAO-4823-2021, Scopus Author ID: 57205150102, SPIN: 3030-3370, e-mail: Loskutov@diamond.ysn.ru

KRAVCHENKO, Alexander Alexandrovich, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-9767-6610>, Scopus Author ID: 15750892800, SPIN: 1760-7705, e-mail: freshrock@yandex.ru

GUZEV, Vladislav Evgenievich, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Leading Geologist, <https://orcid.org/0000-0003-3288-7999>, Scopus Author ID: 57355951700, SPIN: 4056-7413, e-mail: lector10@mail.ru

TEREKHOV, Artem Valerievich, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Head of Department, <https://orcid.org/0000-0003-2001-1391>, Scopus Author ID: 57215378338, SPIN: 7531-5674, e-mail: artem_terekhov@vsegei.ru

Authors' contribution

Ivanov M.S. – conceptualization, methodology, investigation, validation, writing – original draft, writing – review & editing; **Ivanov A.I.** – conceptualization, methodology, investigation, validation, writing – original draft, writing – review & editing; **Zhuravlev A.I.** – conceptualization, methodology, investigation, validation, writing – original draft, writing – review & editing; **Loskutov E.E.** – investigation, validation, writing – original draft, writing – review & editing; **Kravchenko A.A.** – conceptualization, investigation; **Guzev V.E.** – conceptualization, investigation, writing – review & editing; **Terekhov A.V.** – methodology, writing – original draft, writing – review & editing

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 14.11.2024

Поступила после рецензирования / Revised 30.10.2025

Принята к публикации / Accepted 18.11.2025



Оригинальная статья

Особенности плотностей нефти в Непско-Ботуобинской антеклизе

А. В. Григорьева¹, А. И. Сивцев^{✉,2}, И. И. Рожин³

¹ООО «Таас-Юрях Нефтегазодобыча», г. Якутск, Российская Федерация

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

³Институт проблем нефти и газа СО РАН, ФИЦ «ЯНЦ СО РАН», г. Якутск, Российская Федерация

✉maraday@yandex.ru

Аннотация

До настоящего времени все еще остаются дискуссионными вопросы, связанные с источником нефтей в вендских терригенных отложениях, залегающих на кристаллическом фундаменте в пределах Непско-Ботуобинской антеклизы. Целью работы является изучение зависимостей плотностей нефти в плане и по разрезу Непско-Ботуобинской антеклизы для решения проблемы источника нефтегазообразования и направлений миграции и генерации. Осуществлен обзор научных публикаций по закономерностям изменения плотности нефти с глубиной залегания, где отмечена общая устанавливаемая тенденция уменьшения плотности нефти в залежах вниз по разрезу. Материалами исследований послужили данные по плотностям нефтей месторождений Непско-Ботуобинской антеклизы и прилегающей части Предпатомского регионального прогиба, представленные в Государственном балансе запасов полезных ископаемых по Республике Саха (Якутия). На основе сопоставления 124 определений плотности нефти по 24 месторождениям по глубине зафиксирована тенденция уменьшения плотности нефти вверх по разрезу. Распределение данных по плотностям нефти по литолого-тектоническим элементам Непско-Ботуобинской антеклизы позволило установить относительно сильную корреляционную связь между плотностью нефти и глубиной в пределах Непско-Пеледуйского свода и слабую – в Мирнинском выступе. Выявлено общее значительное ослабление корреляционной связи плотности нефти и глубины в карбонатных отложениях относительно терригенных. Исходя из полученных результатов, сделан вывод, что устойчивое снижение плотности нефти с уменьшением глубины в пределах Непско-Пеледуйского свода обусловлено фильтрационным эффектом в условиях литологического контроля залежей и влиянием криолитозоны при добыче. Сделано предположение, что слабая корреляционная связь плотности нефти с глубиной в пределах Мирнинского выступа может быть результатом неоднократного переформирования залежей в ходе тектонических процессов, это не исключает возможность наличия нефтей из различных генетических источников. Отмечена необходимость дополнительных исследований для уточнения генезиса нефтей Мирнинского выступа.

Ключевые слова: Непско-Пеледуйский свод, Мирнинский выступ, Вилючанская седловина, месторождения нефти и газа, терригенные отложения, карбонатные отложения, плотность нефтей по глубине

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки России «Геофлюидодинамическое и геолого-геохимическое обоснование современных технологий освоения углеводородного сырья и сопутствующих неуглеводородных компонентов пластовых флюидов в пределах нефтегазоносных районов Западной Якутии» (рег. №125020301277-6, проект № FWRS-2025-0036).

Для цитирования: Григорьева А.В., Сивцев А.И., Рожин И.И. Особенности плотностей нефти в Непско-Ботуобинской антеклизе. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(4):589–598. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-589-598>

Features of oil densities in the Nepa-Botuoba antecline

Anita V. Grigoreva¹, Alexey I. Sivtsev^{✉,2}, Igor I. Rozhin³

¹LLC “Taas-Yuryakh Neftegazodobycha”, Yakutsk, Russian Federation

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

³Institute of Oil and Gas Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

✉maraday@yandex.ru

Abstract

The origin of oil within the Vendian terrigenous deposits overlying the crystalline basement of the Nepa-Botuoba antecline remains a subject of ongoing debate. This study examines the lateral and vertical distribution patterns of oil density across the antecline to elucidate constraints on hydrocarbon source, migration pathways, and generation history. A review of the scientific literature indicates a general consensus that reservoir oil density tends to decrease with increasing depth. For the present analysis, oil density data were obtained from the State Balance of Mineral Reserves of the Republic of Sakha (Yakutia) for fields distributed across the Nepa-Botuoba antecline and the adjoining Predpatomsky regional trough. Comparison of 124 oil density determinations from 24 fields revealed a distinct trend of decreasing density upsection. The distribution of oil density data according to the lithological and tectonic elements of the Nepa-Botuoba antecline established a relatively strong correlation between oil density and depth within the Nepa-Peleduy arch and a weak correlation within the Mirny ledge. A significant overall weakening of the correlation between oil density and depth was observed in carbonate deposits relative to terrigenous ones. The results indicate that the consistent decrease in oil density with shallower depth in the Nepa-Peleduy arch is caused by a filtration effect under conditions of lithological control of the deposits and the influence of the permafrost zone during production. The weak correlation in the Mirny ledge is hypothesized to result from repeated reformation of the deposits during tectonic processes, which does not exclude the presence of oils from different genetic sources. Further research is required to clarify the genesis of the oils in the Mirny ledge.

Keywords: Nepa-Peleduy arch, Mirny ledge, Vilyuchanskaya saddle, oil and gas fields, terrigenous deposits, carbonate deposits, oil density by the depth

Funding. This study was conducted within the framework of the state assignment from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (reg. No. 125020301277-6, project No. FWRS-2025-0036) “Geofluidodynamic and geological-geochemical substantiation of modern technologies for the development of hydrocarbon raw materials and associated non-hydrocarbon components of reservoir fluids within the oil and gas bearing regions of Western Yakutia”.

For citation: Grigoreva A.V., Sivtsev A.I., Rozhin I.I. Features of oil densities in the Nepa-Botuoba antecline. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(4):589–598. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-589-598>

Введение

Разрез осадочного комплекса Непско-Ботуобинской антеклизы (НБА) на 75–95 % представлен карбонатно-галогенными породами кембрия [1]. Терригенные отложения венда развиты преимущественно в юго-восточной части в основании осадочного чехла. Их суммарная мощность на различных площадях изменяется от 20 до 620 м, увеличиваясь к востоку от Среднебо-

туобинского месторождения к Вилуйско-Джербинскому [2].

Из суммарных запасов углеводородного сырья, выявленных и с различной степенью детальности изученных, на месторождениях Республики Саха (Якутия) более две трети запасов газа и нефти связаны с отложениями вендского возраста НБА. Вместе с тем, обоснованность потенциальной нефтегазоносности терригенных отло-

жений венда на перспективных территориях НБА по-прежнему характеризуется как слабая и неравномерная, а геолого-геохимические предпосылки нефтегазоносности карбонатных отложений венда еще менее изучены.

Все еще остаются невыясненными вопросы генерации, миграции и аккумуляции углеводородов (УВ) в толщах венд-кембрийского возраста. Широко распространенные представления о весьма значительной, практически определяющей, роли рифейских отложений [3–5] в генерации УВ и последующего накопления их в разновозрастных толщах осадочного чехла далеко не в полной мере согласуются с имеющимися геолого-геохимическими данными [6–10].

В разрезе терригенного венда в пределах Непско-Ботубинской антеклизы не устанавливаются выраженные нефтематеринские породы, т. е. имеется актуальный фундаментальный вопрос: откуда появилась нефть в терригенных отложениях венда, залегающих на породах кристаллического фундамента?

Вместе с тем, по мнению ряда исследователей [9], имеющаяся геологическая информация не позволяет подтвердить формирование залежей за счет латеральной миграции УВ из погруженных зон прилегающего с востока Предпатомского прогиба. Указывают на отсутствие в пределах северного борта Предпатомского прогиба протяженных коллекторов, которые могли бы служить зоной транзита УВ в сторону НБА.

Вслед за Б.А. Соколовым [11] весьма оригинальную гипотезу выдвигают А.Г. Берзин

и М.Р. Марсанова, предполагая что источником нефтей для месторождений Непско-Пеледуйского свода служат нефтематеринские отложения рифея, залегающие под пластообразным телом кристаллического фундамента с ориентировочной толщиной порядка 300 м [12]. Другими словами, имеется авлакоген, заполненный рифейскими отложениями, который перекрыт оторванной пластиной кристаллического фундамента в районе Непско-Пеледуйского свода.

Данное исследование имеет цель приблизиться к решению проблемы основного направления нефтегазонакопления в Непско-Ботубинской антеклизе на основе сопоставления плотностей нефти в плане и по разрезу.

Постановка проблемы и материалы исследований

Плотность нефти зависит от многих факторов: содержания тех или иных веществ, глубины, возраста, окисленности, близости к контактовой зоне и т. д. В научной литературе отмечается преимущественно обратная связь плотности нефти с увеличением глубины и возраста отложений. Так, по данным А.А. Карцева [13], из 300 рассмотренных им месторождений в 70 % плотность нефти увеличивается с уменьшением глубины залегания. Некоторые примеры указанной зависимости схематически приведены на рис. 1. Также отмечается прямая связь плотности нефти с содержанием в ней смол и серы.

Средние величины плотности (для 305 залежей) и средние величины выхода легких фрак-

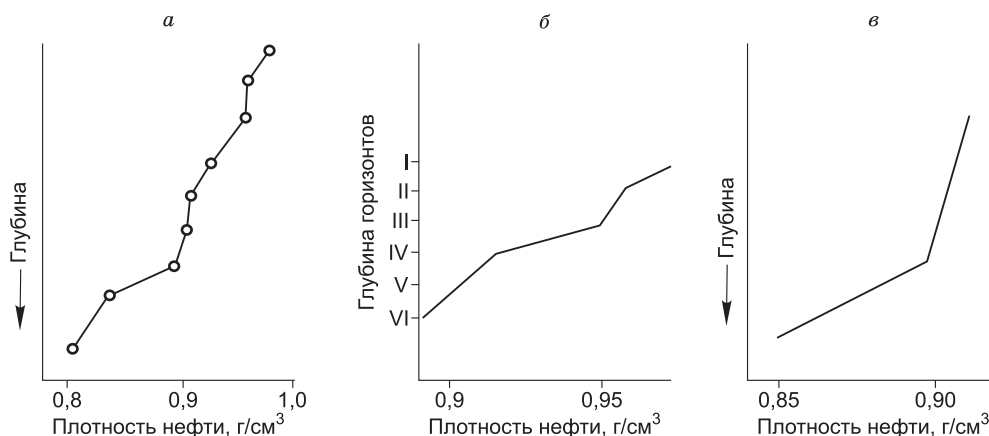


Рис. 1. Типичные случаи изменения плотности нефтей по разрезам отдельных месторождений по А.А. Карцеву [13]: а – Нафталан, б – Мене-Гранде, в – Туймазы

Fig. 1. Typical cases of changes in oil density in sections of individual fields according to A.A. Kartsev [12]: а – Naftalan, б – Mene-Grande, в – Tuymazy

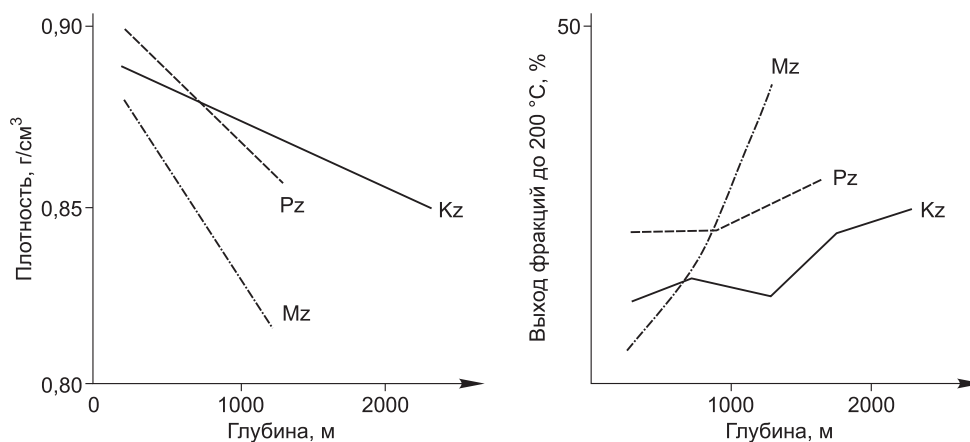


Рис. 2. Изменение свойств нефтей с глубиной [13]

Fig. 2. Changes in the properties oils with depth [13]

ций (для 170 залежей) нефтей СССР отдельно для отложений кайнозоя, мезозоя и палеозоя по различным интервалам глубин представлены на рис. 2. С увеличением глубины залегания плотность нефтей падает, а содержание в них легких фракций растет [13]. Данные зависимости фиксируются для всех возрастов нефтей, следовательно, в данном исследовании влияние возраста исключается.

Согласно базе данных (более 21000 образцов нефтей из 167 нефтеносных бассейнов мира) Института химии нефти СО РАН [14], наиболее тяжелые нефти находятся на глубинах до 1000 м, а далее с ростом глубины проявляется тенденция уменьшения плотности до значений 0,833 г/см³ на глубинах, близких к 4500 м.

Схожие результаты были получены при отдельном анализе изменения плотности тяжелых нефтей в зависимости от глубины их залегания. Установлено, что для тяжелых нефтей плотность в среднем уменьшается с ростом глубины залегания и с увеличением возраста [15, 16].

Отмечается также географическая (меридиональная) закономерность плотности нефти, где в связанных между собой месторождениях более плотные разности нефтей приурочиваются ближе к южным регионам [17]. Подчеркивается, что описываемая тенденция не является законом, а только часто проявляющейся закономерностью. Также имеются сведения и об отсутствии каких-либо зависимостей плотности нефти от глубины [18].

На основе анализа распределения плотностей месторождений Непско-Ботуобинской антеклизы в плане и по разрезу попытаемся установить за-

кономерности, которые могут уточнить представления о процессах нефтегазоаккумуляции в изучаемом регионе.

Полученные результаты помогут приблизиться к решению фундаментальной научной проблемы источника нефти Непско-Ботуобинской антеклизы.

Материалами исследований послужили данные по плотностям нефти месторождений представленные в Государственном балансе запасов полезных ископаемых по Республике Саха (Якутия) [19].

Распределение плотности нефти в Непско-Ботуобинской антеклизе

К настоящему времени в пределах якутской части Непско-Ботуобинской антеклизы и сопряженных участков Предпатомского прогиба открыты 24 нефтегазоконденсатные (НГК), газонефтяные (ГН) и нефтяные (Н) месторождения: Алинское НГК, Бетинчинское НГК, Верхневилючанское НГК, Верхнепелудуйское НГК, Восточно-Бетинчинское Н, Иктехское НГК, Кубалахское НГК, Курунское ГН, Кыттыгасское НГК, Ленское НГКМ, Маччобинское НГК, Мирнинское НГК, Нелбинское НГК, Северо-Талаканское ГН, Среднеботуобинское НГК, Станакское НГК, Сюльдюкарское НГК, Таас-Юряхское НГК, Талаканское НГК, Текесское Н, Тымпучинское НГК, Чаяндынское НГК, Южно-Сюльдюкарское Н и Южно-Талаканское НГК.

Всего в исследовании учтено 124 определения плотности нефти по 24 месторождениям Непско-Ботуобинской антеклизы, представленные в Государственном балансе запасов.

Нефть на изучаемых месторождениях различна по плотности, вязкости, содержанию парафинов, серы, смол и асфальтенов. По извлекаемым запасам категорий $A + B_1 + C_1$ на долю особо легкой (до $0,830 \text{ г/см}^3$) приходится 0,11 %, легкой ($0,831\text{--}0,850 \text{ г/см}^3$) – 37,7, средней плотности ($0,851\text{--}0,870 \text{ г/см}^3$) – 53,63, тяжелой ($0,871\text{--}0,895 \text{ г/см}^3$) – 8,56 % [19].

Построен точечный график, отображающий зависимость плотности нефти от глубины отбора проб (рис. 3). При отборе нефти с определенного интервала глубина отбора принималась на середине интервала. На рис. 3 видно, что имеется определенная общая тенденция уменьшения плотности нефти вверх по разрезу в продуктивных горизонтах. Полученная тенденция не коррелируется с результатами исследования А.С. Макаровой [20], где было отмечено увеличение плотности нефти вверх по разрезу для продуктивных горизонтов Непско-Ботубинской антеклизы.

При построении графика сделали дифференциацию по следующим литолого-тектоническим элементам:

- Мирнинский выступ. Терригенные отложения.
- Мирнинский выступ. Карбонатные отложения.
- Непско-Пеледуйский свод. Терригенные отложения.
- Непско-Пеледуйский свод. Карбонатные отложения.
- Вилючанская седловина.

Результаты: наименьшая установленная плотность нефтей $0,831 \text{ г/см}^3$, максимальная – $0,895 \text{ г/см}^3$. Большая часть значений плотности нефти находится в интервале $0,84\text{--}0,87 \text{ г/см}^3$.

Заметная корреляционная связь плотности нефти с глубиной устанавливается в карбонатных и терригенных отложениях Непско-Пеледуйского свода (увеличение плотности с глубиной). По Мирнинскому выступу корреляция практически не просматривается. При этом в карбонатных отложениях Мирнинского выступа и терригенных отложениях Непско-Пеледуйского свода фиксируется значительное количество одинаковых значений плотностей нефтей на разных глубинах. По всей видимости, данное явление связано с принятием величин плотностей нефти в поздних отчетах по оперативному подсчету запасов данных по плотности нефтей ранних отчетов (по аналогии).

Обращает на себя внимание наличие пустого коридора в облаке значений плотности. Нижняя часть коридора показывает отсутствие залежей нефти с плотностью $0,84 \text{ г/см}^3$ на глубинах 1200–1400 м, а верхняя часть – отсутствие залежей нефти с плотностью $0,88 \text{ г/см}^3$ на глубинах 1500–1700 м.

Результаты и их обсуждение

Для выяснения наиболее тесных корреляционных связей построили для каждого элемента отдельные графики зависимости плотности нефти от глубины и рассчитали коэффициенты корреляции (рис. 4).

Максимальная величина коэффициента корреляции 0,6349 фиксируется по терригенным отложениям Непско-Пеледуйского свода. Добавление данных по плотности нефтей терригенных отложений Вилючанской седловины только усиливает корреляцию до коэффициента 0,6551.

Слабая корреляция прослеживается по карбонатным отложениям Непско-Пеледуйского свода с коэффициентом 0,19. По Мирнинскому выступу корреляционная связь между плотностями нефти и глубиной практически не устанавливается.

Рассмотрим физико-химические факторы, которые обуславливают изменение плотности нефти по глубине. Уменьшение плотности нефти с увеличением глубины может произойти в результате:

- анаэробного окисления нефтей за счет сульфатов, сопровождаемого процессами осернения нефтей;
- термокаталитического превращения нефти за счет перераспределения водорода и перехода нефтей циклического состава в нефти алифатического состава, сопровождающегося образованием легких фракций и общим снижением плотности;
- процессов разукрупнения молекул и образования обедненных водородом крупных молекул, переходящих в состав пород в виде высокоуглеродистых минералов;
- физического фракционирования. А.А. Карцев [13] показал, что при латеральной миграции, которая формирует залежь по вероятному направлению миграции, также возрастает плотность нефти, увеличивается количество нафенов в ней, а в бензиновых фракциях падает содержание парафиновых и ароматических УВ. Следует иметь в виду, что направление латеральной миграции совпадает с уменьшением глубины залегания;

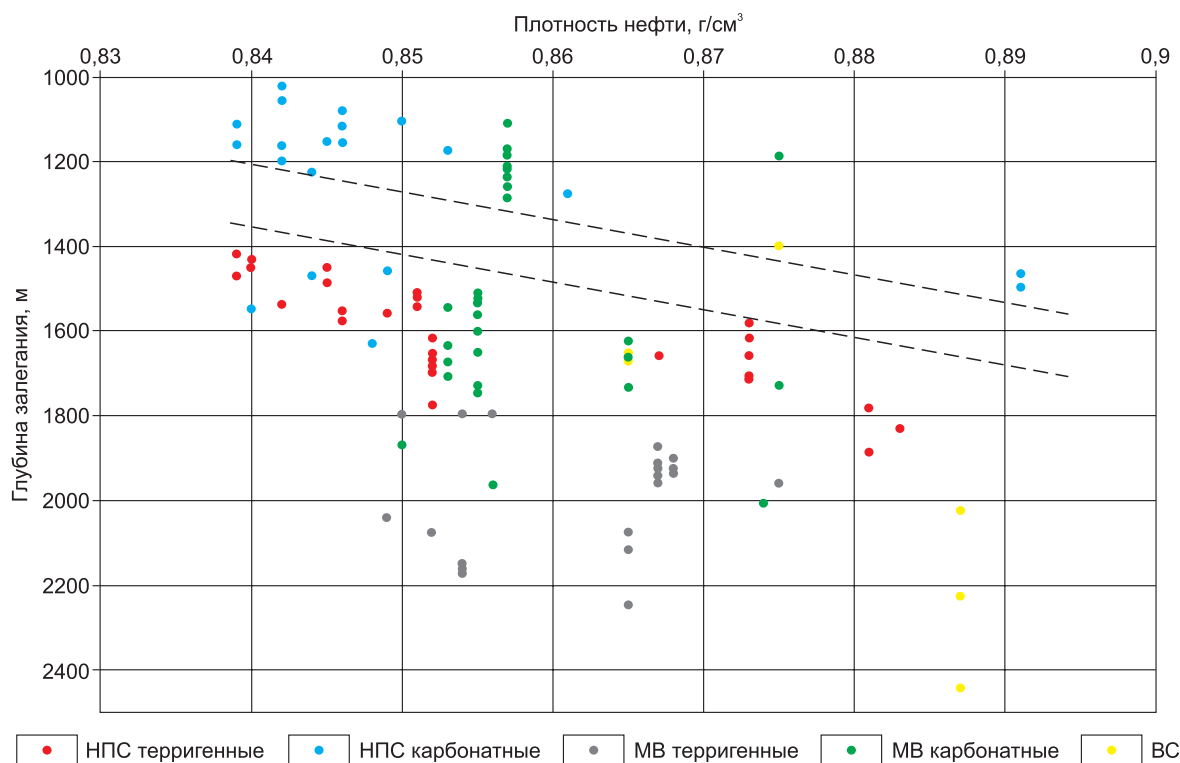


Рис. 3. Зависимость плотности нефти Непско-Ботуобинской антеклизы от глубины

Fig. 3. Dependence of the density of oil of the Nepa-Botuoba anteclise on depth

– эффекта центрифуги. Планета представляется как гигантская центрифуга и при вращении тонкодисперсные частицы проникают в пустоты между крупными частицами под действием центробежных сил. При этом более плотные вещества проникают дальше (выше) [17];

– проявления принципа дифференциального улавливания. Более погруженные положительные структуры заполняются газообразными флюидами, а вверх по восстанию сменяются нефтью с различным газонасыщением и плотностью. Если генерируются только жидкие УВ, то все ловушки будут заполнены нефтью, но плотность ее будет увеличиваться в сторону восстания резервуара [21–23].

Уменьшение плотности нефти с уменьшением глубины может произойти за счет:

– эффекта фильтрации. Глинистый материал, содержащийся в коллекторах, обладает способностью адсорбировать молекулы УВ, в особенности сложного строения. Поэтому нефть в процессе миграции по порам постепенно очищается от тяжелых фракций и становится легкой;

– выпадения (при образовании твердой фазы) высокомолекулярных парафинов, асфальтенов,

смола и сероорганических соединений на территориях распространения многолетнемерзлых пород [24].

Кроме того, А.А. Карцев [13] указывает, что уменьшение плотности нефти с уменьшением глубины характерно для нефтяных месторождений с сильной дизъюнктивной нарушенностью. Данная зависимость устанавливается всего в двух-трех десятках из нескольких сотен исследованных месторождений. Вместе с тем, по мнению ряда исследователей [25, 26], в пределах Непско-Пеледуйской зоны превалирует литологический фактор контроля залежей, а в Мирнинском выступе резко преобладает структурно-тектонический.

С учетом вышеизложенных факторов можно сделать предположение, что устойчивое снижение плотности нефти с уменьшением глубины залегания в пределах Непско-Пеледуйского свода обусловлено фильтрационным (при миграции) эффектом в условиях литологического контроля залежей и влиянием криолитозоны при добыче. В свою очередь, в Мирнинском выступе, где превалируют структурно-тектонические условия контроля залежей, предполагаются неоднократ-

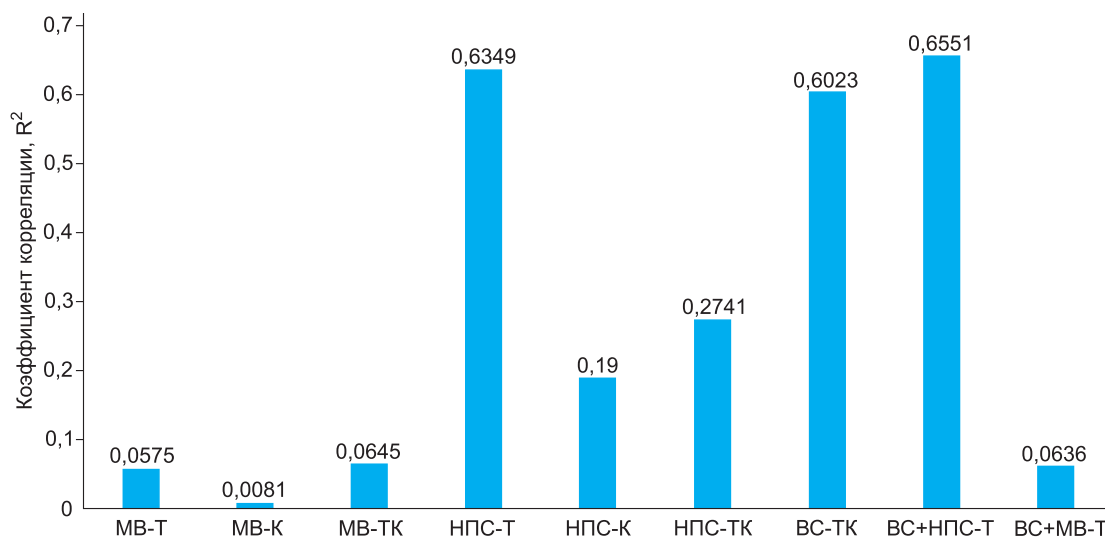


Рис. 4. Коэффициент корреляции плотности нефти от глубины для различных литолого-тектонических элементов.

Корреляции для нефтей: МВ-Т – в терригенных отложениях Мирнинского выступа, МВ-К – в карбонатных отложениях Мирнинского выступа, МВ-ТК – в терригенно-карбонатных отложениях Мирнинского выступа, НПС-Т – в терригенных отложениях Непско-Пеледуйского свода, НПС-К – в карбонатных отложениях Непско-Пеледуйского свода, НПС-ТК – в терригенно-карбонатных отложениях Непско-Пеледуйского свода, ВС+НПС-Т – в терригенных отложениях Вилучанской седловины и Непско-Пеледуйского свода, ВС+МВ-Т – в терригенных отложениях Вилучанской седловины и Мирнинского выступа.

Fig. 4. Correlation coefficient of oil density from depth for various lithological and tectonic elements.

Correlations for oils: MB-T – in terrigenous deposits of the Mirny ledge, MB-K – in carbonate deposits of the Mirny ledge, MB-TK – in terrigenous-carbonate deposits of the Mirny ledge, НПС-Т – in terrigenous deposits of the Nepa-Peleduy arch, НПС-К – in carbonate deposits of the Nepa-Peleduy arch, НПС-ТК – in the terrigenous-carbonate deposits of the Nepa-Peleduy arch, ВС+НПС-Т – in the terrigenous deposits of the Vilyuchanskaya saddle and the Nepa-Peleduy arch, ВС+МВ-Т – in the terrigenous deposits of the Vilyuchanskaya saddle and the Mirny ledge

ные переформирования залежей УВ по сложным и многоканальным путям миграции УВ, что не исключает возможность наличия нефтей из различных генетических источников (Ыгыаттинская впадина, Курейская синеклиза).

Закключение

Четких пространственных закономерностей по типу флюидов в разрезах месторождений не устанавливается [27]. Наблюдается общая тенденция уменьшения плотности нефти вверх по разрезу в продуктивных горизонтах. Данная зависимость более выражена на месторождениях Непско-Пеледуйского свода НБА. Большая часть территории содержит образцы легкой нефти, хотя встречаются некоторые участки с тяжелыми сортами нефти. Аналогичная зависимость устанавливается в ряде площадей северных районов Сургутского свода [28], где также присутствуют многолетнемерзлые породы. По всей видимости, относительная охлажденность разреза также влияет на качество подвижной нефти – более тяжелые составляющие (высокомолекулярные па-

рафины, асфальтены, смолы и сероорганические соединения) нефтей при добыче выпадают в коллаторах.

Наличие пустого коридора в точечном графике, по всей видимости, отображает уровень залегания карбонатных отложений (без учета нижнеюряхской подсвиты) венда, нефтегазоносность которых установлена в незначительном количестве площадей.

Отсутствие корреляционной связи плотности нефти с глубиной в пределах Мирнинского выступа может быть обусловлено превалированием структурно-тектонического контроля залежей – сложными, многоэтапными и многоканальными миграционными процессами. Несомненно, здесь не исключается присутствие нефтей из различных генетических источников из сопряженных территорий.

Таким образом, результаты проведенных исследований не противоречат выводу о «предпатомском» генезисе нефтей в пределах Непско-Пеледуйского свода. Генезис нефтей Мирнинского выступа требует дополнительных исследований.

Список литературы / References

1. Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) / Отв. редакторы: д.г.-м.н. Л.М. Парфенов, чл.-корр. РАН М.И. Кузьмин. М.: МАИК "Наука/Интерпериодика"; 2001. 571 с.
Tectonics, geodynamics and metallogeny of the territory of the Republic of Sakha (Yakutia) / Responsible editors: doctor of geological and mineralogical sciences L.M. Parfenov, corresponding member of the Russian Academy of Sciences M.I. Kuzmin. Moscow: MAIK "Nauka/Interperiodika"; 2001. 571 p. (In Russ.)
2. Осипова М.В., Сивцев А.И. Наклонный водонефтяной контакт в ботуобинском горизонте Среднеботуобинского нефтегазоконденсатного месторождения как признак особенностей нефтегазообразования и нефтегазонакопления в пределах Непско-Ботуобинской антеклизы. *Нефтяная провинция*. 2019;18(2):1–24. <https://doi.org/10.25689/NP.2019.2.1-24>.
3. Osipova M.V., Sivtsev A.I. Tilted oil-water contact in the Botuobinsky horizon of the Srednebotuobinskoe oil gas condensate field as an indication of peculiarities of oil and gas formation and accumulation in Nepsko-Botuobinskaya anticline. *Neftyanaya Provintsiya*. 2019;18(2):1–24. (In Russ.) <https://doi.org/10.25689/NP.2019.2.1-24>.
4. Анциферов А.С., Бакин В.Е., Варламов И.П. и др. *Геология нефти и газа Сибирской платформы*. М.: Недра; 1981. 552 с.
5. Antsiferov A.S., Bakin V.E., Varlamov I.P., et al. *Geology of oil and gas of the Siberian platform*. Moscow: Nedra; 1981. 552 p. (In Russ.)
6. Анциферов А.С., Бакин В.Е., Воробьев В.Н. и др. Непско-Ботуобинская антеклизы – новая перспективная область добычи нефти и газа на Востоке СССР. Новосибирск: Наука; 1986. 286 с.
7. Antsiferov A.S., Bakin V.E., Vorobyov V.N., et al. *Nepa-Botuoba antecline – a new promising area for oil and gas production in the East of the USSR*. Novosibirsk: Nauka; 1986. 286 p. (In Russ.)
8. Пономаренко А.С. Геология залежей углеводородов, приуроченных к терригенным коллекторам Непско-Ботуобинской нефтегазоносной области. *Наука и техника в газовой промышленности*. 2021;85(1):3–10.
9. Ponomarenko A.S. Geology of hydrocarbon deposits, confined to terrigenous sediments of the Nepsk-Botuobinskaya oil and gas bearing region. *Science and Technology in the Gas Industry*. 2021;85(1):3–10. (In Russ.)
10. Баженова Т.К. Проблема нефтегазоносности базальных горизонтов бассейнов древних платформ в аспекте их катагенетической эволюции. *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. 2008;3(3):4. Режим доступа: http://www.ngtp.ru/rub/4/30_2008.pdf. (дата обращения: 03.04.2025 г.)
11. Bazhenova T.K. Problem of petroleum potential of basal horizons in the basins of ancient platforms in aspect of their katagenetic evolution. *Neftgazovaya Geologiya. Teoriya i praktika = Petroleum Geology. Theoretical and Applied Studies*. 2008;3(3):4. Available at: http://www.ngtp.ru/rub/4/30_2008.pdf. (In Russ.) (accessed: 03.04.2025)
12. Баженова Т.К., Дахнова М.В., Можегова С.В. Верхний протерозой Сибирской платформы – основной источник нефтегазоносности ее домезозойского мегабассейна. *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. 2011;6(2):2. Режим доступа: http://www.ngtp.ru/rub/1/17_2011.pdf. (дата обращения: 03.04.2025 г.)
13. Bazhenova T.K., Dakhnova M.V., Mozhegova S.V. Upper proterozoic formations of Siberian platform – main source of oil and gas of pre-mesozoic megabasin. *Neftgazovaya Geologiya. Teoriya i Praktika = Petroleum Geology. Theoretical and Applied Studies*. 2011;6(2):2. Available at: http://www.ngtp.ru/rub/1/17_2011.pdf. (In Russ.) (accessed: 03.04.2025)
14. Дахнова М.В., Баженова Т.К., Лебедев В.С. и др. Изотопные критерии прогноза фазового состава углеводородов в рифейских и венд-кембрийских отложениях Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции. *Геология и геофизика*. 2011;52(8):1199–1209.
15. Dakhnova M.V., Kiselev S.M., Bazhenova T.K., et al. Isotopic criteria for predicting the phase composition of hydrocarbons in Riphean and Vendian deposits of the Leno-Tunguska petroleum province. *Russian Geology and Geophysics*. 2011;52(8):945–953. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2011.07.015>.
16. Косачук Г.П., Буракова С.В., Буточкина С.И. и др. К вопросу о формировании нефтяных залежей (оторочек) месторождений Непско-Ботуобинской антеклизы. *Научно-технический сборник Вестни газовой науки*. М.: Газпром ВНИИГАЗ; 2013;16(5):114–123.
17. Kosachuk G.P., Burakova S.V., Butochkina S.I., et al. Formation of oil deposits (rims) of the Nepa-Botuoba antecline fields. *Vesti gazovoy nauki*. Moscow: Gazprom VNIIGAZ; 2013;5(16):114–123. (In Russ.)
18. Обласов Н.В., Гончаров И.В., Эфтор И.В. и др. Нефтематеринские породы месторождений Непско-Ботуобинской антеклизы, их возраст на основе геохимических исследований нефтей и событий планетарного масштаба. В кн.: *Фундаментальные, глобальные и региональные проблемы геологии нефти и газа: Материалы Всероссийской научной конференции, посвященной 90-летию со дня рождения академика РАН А.Э. Конторовича, г. Новосибирск, 29 января – 01 февраля 2024 г.* Новосибирск: Сибирское отделение РАН; 2024. С. 165–167. https://doi.org/10.53954/9785604990070_165.
19. Oblasov N.V., Goncharov I.V., Eftor I.V., et al. Source rocks for oilfields in the Nepa-Botuoba antecline, their age based on geochemical research of oil and events of a planetary scale. In: *Fundamental, global and regional problems of oil and gas geology: Proceedings of the All-Russian scientific conference dedicated to the 90th anniversary of the birth of Academician of the Russian Academy of Sciences A.E. Kontorovich, Novosibirsk, January 29 – February 01, 2024*. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2024, pp.165–167. (In Russ.) https://doi.org/10.53954/9785604990070_165.
20. Соколов Б.А. *Новые идеи в геологии нефти и газа: Избранные труды*. М.: Изд-во Моск. ун-та; 2001. 479 с.
21. Sokolov B.A. *New ideas in oil and gas geology: Selected works*. Moscow: Moscow University Publishing House; 2001. 479 p. (In Russ.)
22. Марсанова М.Р., Берзин А.Г. Кристаллический фундамент или пластину вскрывают скважины на Талаканском месторождении. Новые аргументы. В кн.: *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции, г. Якутск, 18–20 апреля 2018 года. Том II*. Якутск: Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова; 2018. С.115–119.
23. Marsanova M.R., Berzin A.G. Crystalline basement or plate is opened by wells at the Talakanskoye field. New arguments. In: *Geology and mineral resources of the North-East of Russia: Proceedings of the 8th All-Russian scientific and practical conference, Yakutsk, April 18–20, 2018. Volume II*. Yakutsk:

Amnosov North-Eastern Federal University; 2018, pp. 115–119. (In Russ.)

13. Карцев А.А. *Основы геохимии нефти и газа*. М.: Недра; 1969. 272 с.

Kartsev A.A. *Fundamentals of oil and gas geochemistry*. Moscow: Nedra; 1969. 272 p. (In Russ.)

14. Ященко И.Г., Крупицкий В.В., Полищук Ю.М. Особенности изменения физико-химических свойств нефтей в связи с большими глубинами. *Георесурсы*. 2021;23(3):99–108. <https://doi.org/10.18599/grs.2021.3.13>.

Yashchenko I.G., Krupitsky V.V., Polishchuk Yu.M. Features of changes in the physico-chemical properties of oils in connection with great depths. *Georesursy = Georesources*. 2021;23(3):99–108. (In Russ.). <https://doi.org/10.18599/grs.2021.3.13>.

15. Полищук Ю.М., Ященко И.Г. Тяжелые нефти: аналитический обзор закономерностей пространственных и временных изменений их свойств. *Нефтегазовое дело*. 2005;(3):21–29.

Polishchuk Yu.M., Yashchenko I.G. Paper is analytical review of regularities of physic-chemical and other properties of heavy oils, which are considered as main reserve of oil production for future years. *Neftegazovoe delo = Petroleum Engineering*. 2005;(3):21–29. (In Russ.)

16. Polishchuk Y.M., Yashchenko I.G. Spatial and temporal changes of density and chemical composition of heavy oils of Eurasia. *International Journal of Energy and Environment*. 2011;2(4):717–722.

17. Сарсенов А.М., Сериков Т.П., Сагинаев А.Т. и др. Изменение запасов и плотности нефти в зависимости от глубины залегания и от расположения месторождений на Земле. *Геология, география и глобальная энергия*. 2010; 37(2):6–10.

Sarsenov A.M., Serikov T.P., Saginaev A.T., et al. Changes in oil reserves and density depending on the depth of occurrence and the location of the deposits on Earth. *Geology, Geography and Global Energy*. 2010;37(2):6–10. (In Russ.)

18. Kovács Z., Zilahi-Sebess L. Evaluation of the trends of secondary and tertiary hydrocarbon migration processes based on oil density–reservoir depths relationship in Hungary. *Central European Geology*. 2018;61/1:16–33. <https://doi.org/10.1556/24.61.2018.02>.

19. Архив электронных изданий выпусков Государственного баланса запасов полезных ископаемых Российской Федерации. Режим доступа: <https://rfgf.ru/bal/> (дата обращения: 21.12.2024 г.)

Archive of electronic editions of issues of the State Balance of Mineral Reserves of the Russian Federation. Available at: <https://rfgf.ru/bal/>. (In Russ.) (accessed: 21.12.2024)

20. Макарова А.С. Геология и перспективы нефтегазоносности восточной части Непско-Ботубинской антеклиз-

зы (Якутская часть): Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. М.; 2023. 24 с.

Makarova A.S. Geology and oil and gas potential of the eastern part of the Nepa-Botuoba antecline (Yakut part): Abstract. ... Diss. Cand. Sci., Moscow; 2023. 24 p. (In Russ.)

21. Gussow W.C. Differential entrapment of oil and gas – A fundamental principle. *AAPG Bulletin*. 1954;38:816–853.

22. Максимов С.П. *Закономерности размещения и условия формирования залежей нефти и газа*. М.: Недра; 1964. 486 с.

Maksimov S.P. *Regularities of placement and conditions of formation of oil and gas deposits*. Moscow: Nedra; 1964. 486 p. (In Russ.)

23. Савченко В.П. *Формирование, разведка и разработка месторождений газа и нефти*. М.: Недра; 1977. 414 с.

Savchenko V.P. *Formation, exploration and development of gas and oil fields*. Moscow: Nedra; 1977. 414 p. (In Russ.)

24. Ашмян К.Д., Вольпин С.Г., Ковалева О.В. Разработка нефтяных месторождений в зоне распространения вечной мерзлоты. *Территория Нефтегаз*. 2016;7-8:88–95.

Ashmyan K.D., Volpin S.G., Kovaleva O.V. Development of oil fields in the permafrost zone. *Territoriya Neftegaz = Oil and gas territory*. 2016;7-8:88–95. (In Russ.)

25. Сафронов А.Ф. Зоны нефтегазоаккумуляции на северо-востоке Непско-Ботубинской антеклизы. *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*. 2006;7:18–24.

Safronov A.F. Oil and gas accumulation zones in the north-east of the Nepa-Botuoba antecline. *Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*. 2006;7:18–24. (In Russ.)

26. Ситников В.С., Бурова И.А., Кушмар И.А. и др. *Геология и нефтегазовый потенциал юго-запада Якутии: реалии и перспективы*. СПб.: ФГУП «ВНИГРИ»; 2014. 436 с.

Sitnikov V.S., Burova I.A., Kushmar I.A. et al. *Geology and hydrocarbon potential of south-western part of Yakutia: facts and prospects*. Saint-Petersburg: VNIGRI; 2014. 436 p. (In Russ.)

27. Каширцев В.А., Сафронов А.Ф., Изосимова А.Н. и др. *Геохимия нефтей востока Сибирской платформы*. Якутск: ЯНЦ СО РАН; 2009. 180 с.

Kashirtsev V.A., Safronov A.F., Izosimova A.N., et al. *Geochemistry of oils from the eastern Siberian platform*. Yakutsk: YaSC SB RAS; 2009. 180 p. (In Russ.)

28. Лошрясов А.А., Скачек К.Г., Ларичев А.И. и др. Состав нефтей северных районов Сургутского свода. *Геология нефти и газа*. 2004;(4):28–38.

Loshryasov A.A., Skachek K.G., Larichev A.I., et al. Composition of oils of the northern areas of Surgut arch. *Russian Oil and Gas Geology of*. 2004;(4):28–38. (In Russ.)

Об авторах

ГРИГОРЬЕВА Ани́та Вита́льевна, специалист сектора лицензирования, <https://doi.org/0009-0007-2106-7027>, e-mail: av_grigoreva2@tyngd.rosneft.ru

СИВЦЕВ Алексей Иванович, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры «Недропользование», <https://doi.org/0000-0001-8386-2383>, ResearcherID: F-1077-2014, Scopus Author ID: 56287496100, SPIN: 8676-4888, e-mail: maraday@yandex.ru

РОЖИН Игорь Иванович, доктор технических наук, кандидат физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник, <https://doi.org/0000-0002-9998-6425>, ResearcherID: F-1088-2014, Scopus Author ID: 13612346400, SPIN: 1336-5024, e-mail: i_rozhin@mail.ru

Вклад авторов

Григорьева А.В. – сбор данных, укрупненные расчеты, визуализация, создание черновика рукописи; **Сивцев А.И.** – разработка концепции, создание черновика рукописи, редактирование; **Рожин И.И.** – сбор и верификация данных, создание черновика рукописи, ресурсное обеспечение

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

GRIGORIEVA, Anita Vitalievna, Licensing Specialist, <https://doi.org/0009-0007-2106-7027>, e-mail: av_grigoreva2@tyngd.rosneft.ru

SIVTSEV, Aleksei Ivanovich, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), docent, <https://doi.org/0000-0001-8386-2383>, ResearcherID: F-1077-2014, Scopus Author ID: 56287496100, SPIN: 8676-4888, e-mail: maraday@yandex.ru

ROZHIN, Igor Ivanovich, Dr. Sci. (Eng.), Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Chief Researcher, <https://doi.org/0000-0002-9998-6425>, ResearcherID: F-1088-2014, Scopus Author ID: 13612346400, SPIN: 1336-5024, e-mail: i_rozhin@mail.ru

Authors' contribution

Grigorieva A.V. – data collection, consolidated calculations, visualization, writing – original draft; **Sivtsev A.I.** – conceptualization, writing – original draft, writing – review & editing; **Rozhin I.I.** – data collection and validation, writing – original draft, resources

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 14.08.2025

Поступила после рецензирования / Revised 17.10.2025

Принята к публикации / Accepted 14.11.2025

Инженерная геология, мерзлотоведение, грунтоведение

УДК 662.8.053:662.813/814 (571.56-17)

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-599-608>



Оригинальная статья

Брикетиrowание углей для обеспечения качественным топливом потребителей в Арктической зоне

Т. В. Москаленко, В. А. Михеев✉

Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация
✉labkiy@mail.ru

Аннотация

В статье представлены результаты экспериментального исследования по разработке экологически и экономически целесообразного способа брикетирования мелких классов бурых и каменных углей с использованием вторичного картона в качестве связующего вещества. Актуальность работы обусловлена сложными логистическими и климатическими условиями Арктической зоны Республики Саха (Якутия), где в рамках северного завоза уголь подвергается длительному хранению и многократным перегрузкам, вследствие чего дробится и теряет эффективность при сжигании. Предложенный подход направлен на локальную переработку мелкого угля непосредственно в местах потребления, что снижает зависимость от централизованных поставок и повышает энергетическую устойчивость удаленных поселений. В качестве исходного сырья использовались бурый уголь Кангаласского месторождения и каменный уголь Денисовского месторождения. Исследовано влияние содержания связующего вещества на прочность и теплотехнические характеристики брикетов, установлены оптимальные составы и технологические режимы производства брикетов. Эксперименты показали, что при добавлении 9–13 % картона (на сухую массу угля) для бурого угля и 9–10 % для каменного угля достигается механическая прочность брикетов, превышающая нормативное значение 7,8 МПа, при незначительном снижении теплоты сгорания. Технология реализуется без нагрева и дополнительных энергозатрат, что особенно важно для Арктики. Снижение остаточной прочности брикетов после контакта с водой может быть минимизировано за счет хранения брикетов под навесами. Технология брикетирования, основанная на предложенном способе, может быть внедрена в труднодоступных поселках, получающих уголь по северному завозу, непосредственно возле места их сжигания, что позволит снизить потери и вернуть в промышленное производство мелкие классы углей. Предложена модульная технологическая схема брикетирования, адаптированная для отдаленных районов, с возможностью сезонной эксплуатации и переориентации на местные угли в перспективе.

Ключевые слова: уголь, брикетирование, связующие вещества, картон, вторсырье, механическая прочность
Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки России (тема № 0297-2021-0022, ЕГИСУ НИОКТР № 122011800089-2).

Для цитирования: Москаленко Т.В., Михеев В.А. Брикетирование углей для обеспечения качественным топливом потребителей в Арктической зоне. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(4):599–608. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-599-608>

Original article

Coal briquetting for supplying quality fuel to consumers in the Arctic Zone

Tatiana V. Moskalenko, Valery A. Mikhhev✉

Chersky Mining Institute of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation
✉labkiy@mail.ru

Abstract

This study developed a briquetting method for fine-grained lignite and bituminous coal using recycled cardboard as a binder to address environmental and economic challenges in fuel supply. This research is particularly relevant for the Arctic zone of the Republic of Sakha (Yakutia), where coal transported under the Northern Delivery program is

subjected to prolonged storage and repeated handling, leading to particle fragmentation and reduced combustion efficiency. We propose a decentralized processing solution to convert coal fines into briquettes directly at consumption sites, thereby decreasing reliance on centralized supply chains and enhancing the energy security of remote communities. For this study, feedstock consisted of lignite from the Kangalas deposit and bituminous coal from the Denisovskoye deposit. The influence of binder content on the mechanical strength and calorific value of the briquettes was investigated to establish optimal compositions and production parameters. The results indicate that incorporating 9–13 % cardboard (by dry coal mass) for lignite and 9–10 % for bituminous coal yields briquettes with a compressive strength exceeding 7.8 MPa, although a marginal reduction in heat of combustion was observed. The process operates at ambient temperature without external energy input, which is a critical advantage for Arctic implementation. Furthermore, while briquette strength decreases after water exposure, this can be mitigated by covered storage. Therefore, the proposed briquetting technology is suitable for implementation in remote settlements dependent on the Northern Delivery Program, as processing coal fines locally can reduce transport losses and reintroduce fine coal fractions into the fuel cycle. To this end, a modular, seasonally operable production unit adaptable to local coal varieties is recommended to maximize feasibility in isolated Arctic regions.

Keywords: coal, briquetting, binders, cardboard, recycled materials, mechanical strength

Funding. This study was conducted within the state assignment from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. 0297-2021-0022, reg. No. 122011800089-2).

For citation: Moskalenko T.V., Mikhayev V.A. Coal briquetting for supplying quality fuel to consumers in the Arctic Zone. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(4):599–608. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-599-608>

Введение

Республика Саха (Якутия) в рамках административно-территориального устройства состоит из 34 улусов (районов), 13 из которых входят в Арктическую зону (АЗ) Российской Федерации. Кроме этих территорий АЗ РФ включает Мурманскую область, Ненецкий, Ямало-Ненецкий и Чукотский автономные округа, северные территории Республики Карелия, Республики Коми, Красноярского края и Архангельской области, а также острова в Северном Ледовитом океане. Эти районы с одной стороны характеризуются суровым климатом и труднодоступностью территорий, а с другой – отличаются уникальной природой, богатством ресурсов и стратегическим положением. Освоение и эффективное использование возможностей Арктики имеют огромное значение для экономического роста и укрепления позиций России на международной арене.

Комплексный подход к развитию Арктической зоны РФ предполагает реализацию широкого спектра мероприятий, направленных на укрепление экономики региона [1, 2]. Одним из ключевых факторов успешного освоения Арктики является наличие надежных источников энергии, позволяющих поддерживать комфортный температурный режим помещений, обеспечивать работу транспорта и оборудования. В этом направлении идет изучение возможности обеспечения регионов местным энергетическим сырьем, но основным видом топлива остается уголь.

При этом наиболее привлекательным с экономической и экологической точек зрения направлением представляется использование возобновляемых источников энергии. Развитие возобновляемой энергетики в мире в последние два десятилетия базируется на использовании солнечной и ветровой энергии, что обусловлено стремлением многих стран к переходу на экологически чистые источники и значительным прогрессом в масштабном промышленном освоении новых энергетических технологий [3].

В направлении использования возобновляемых источников энергии на территории Республики Саха (Якутия) смонтированы ветродизельный комплекс в пос. Тикси и ветроэлектростанция на полуострове Быков Мыс, которые продемонстрировали эффективную работу в условиях арктической зимы. Такие ветровые электростанции имеют свои преимущества и недостатки [3], системы развиваются при государственной поддержке не только в РС(Я) [4], но и в других труднодоступных регионах АЗ РФ [5].

Другим перспективным направлением создания системы эффективной энергообеспеченности АЗ и снижения зависимости от северного завоза топлива является освоение угольных месторождений, близких к потребителям. Как отмечается исследователями данного вопроса, для арктических районов Якутии проблемы повышения эффективности использования местных запасов углей взамен привозных в настоящее время вышли за рамки исключительно экономической сферы и имеют важное значение в рам-

ках социального, демографического развития, а также энергобезопасности населения [6, 7].

Для районов АЗ Якутии уголь остается жизненно важным топливно-энергетическим ресурсом, значение которого только возрастает для удаленных и труднодоступных районов. Анализ месторождений угля Арктической зоны Республики Саха (Якутия) [8, 9] показал, что месторождения, подготовленные к разработке, на этой территории отсутствуют, а следовательно, уголь все еще завозится и будет завозиться в рамках северного завоза из угледобывающих центральных, южных районов РС(Я) или других регионов РФ.

Доставка большей части углей в АЗ РС(Я) осуществляется в рамках северного завоза в летнее время года морским и речным транспортом, далее по зимникам в труднодоступные населенные пункты. При этом сложился следующий порядок обеспечения углем: дальность доставки до 2,7–2,9 тыс. км; многозвенная – до 2,5–3 лет – логистика; одновременность начала и окончания работы автозимников, навигаций рекой и морем; кратное превышение стоимости угля на месте потребления в сравнении с его стоимостью в месте отгрузки [10]. Огромные расстояния, распутица, ограниченная навигация, слаборазвитая береговая инфраструктура затрудняют доставку грузов. Но доставка грузов в районные центры – это лишь часть задачи, далее производится распределение в мелкие населенные пункты. В этих условиях угли проходят несколько перегрузок и имеют большие сроки хранения как в промежуточных складах, так и в конечной точке. Следовательно, уголь измельчается и снижается эффективность его использования в энергетических целях. Для рационального использования таких углей необходимо их брикетирование [11–13], которое может быть осуществлено как до вовлечения углей в логистику перевозки, так и непосредственно на месте применения, причем для последнего случая очевидна актуальность применения в качестве связующих веществ местных видов сырья.

Связующее вещество должно отвечать комплексу требований [14], среди которых: низкая себестоимость, свободный доступ в приобретении, улучшение энергетических свойств, уменьшение (или по крайней мере незначительное увеличение) зольности, придание брикету достаточной механической прочности и влагостойкости.

Разнообразие связующих веществ очень велико, и их перечень постоянно расширяется за счет новых научных изысканий. Например, связующими веществами в топливных брикетах могут быть: крахмал, сахар, целлюлоза, патока, портландцемент, глина, гипс, известь, декстран, декстрин, полисахарид, отходы винодельческого, сахарного, целлюлозно-бумажного, крахмального производства, кубовые остатки нефтепереработки, лигносульфонат, меласса, поливиниловый спирт, остатки ректификации таллового масла, сульфитно-дрожжевая бражка, полиэтилен, нефтебитум и другие [15–26].

Для большинства связующих веществ необходим нагрев брикетируемой смеси для перевода связующего в текучее состояние и возможности равномерного перемешивания смеси. Другой вариант связующих веществ – неорганические, такие, например, как жидкое стекло, известь, цемент. Такие связующие вещества снижают теплотехнические характеристики получаемых брикетов за счет увеличения зольности. Связующие вещества, относящиеся к продуктам химической переработки нефти, угля, сланцев, древесины, довольно эффективны, но в той или иной степени представляют опасность для окружающей среды как при производстве, так и при использовании в быту.

В соответствии с вышеописанными предпосылками, основная идея исследования заключалась в поиске связующих веществ, обеспечивающих прочную связь между частицами угля, не снижающих теплотехнические характеристики, экологически чистых и способных образовывать прочный угольный брикет без дополнительного теплового воздействия, с минимальным экологическим ущербом и имеющихся в наличии в местах брикетирования.

Таким образом, если рассматривать брикетирование угля непосредственно в местах его применения в АЗ РС(Я), то интересным вариантом связующего вещества мог бы быть картон, который поступает даже в отдаленные населенные пункты в качестве упаковочного материала вместе с разнообразными грузами и впоследствии утилизируется на местах. При этом технология брикетирования должна быть максимально простой и без привлечения дополнительных энергоресурсов. Учитывая хрупкость природы Арктики, переработка картона в связующее вещество для получения угольных брикетов также будет способствовать снижению накопления мусора на этих территориях.

Материалы и методы исследования

На качество брикета влияют физико-химические свойства исходного материала. Бурые угли относительно хорошо брикетируются. Каменные угли по сравнению с бурыми брикетируются труднее, поскольку обладают меньшей способностью к пластическим деформациям, которые и определяют способность к брикетированию.

В данной серии экспериментов в качестве сырья для получения топлива использовался бурый уголь Кангаласского месторождения (Ленский бассейн) и каменный уголь Денисовского месторождения (Южно-Якутский бассейн). Качество углей Южно-Якутского бассейна и их технологические свойства определяются степенью метаморфизма, которая обеспечила формирование в бассейне широкой марочной гаммы – от газовых (Г) до тощих (Т), с преобладанием коксующихся углей ряда Ж–КЖ–К. Но при их добыче и переработке возникает некоторое количество мелких классов, которые малопригодны как для коксования, так и для энергетического использования, и могут служить сырьем для получения брикетов.

Картон перед применением его в качестве связующего вещества для брикетирования угля необходимо заранее подготовить: измельчить, а затем замочить в воде. После полного набухания дать стечь лишней жидкости и измельчить до получения однородной пастообразной массы.

Брикетиrowание угля в лабораторных условиях проводилось при температуре 20–25 °С на испытательном гидравлическом прессе П-10 с максимальным удельным давлением 78 МПа. После удаления брикета из матрицы и до испытания его механической прочности он выдерживался для завершения процессов структурообразования и упрочнения. После этого проводилось испытание брикетов на прочность сжатием в соответствии с ГОСТ 21289-75 и на водопоглощение по ГОСТ 21290-2018.

Качественные характеристики брикетов должны соответствовать техническим показателям, предъявляемым потребителями к ним. Основными характеристиками являются показатели технического анализа (влаги, зольности, выход летучих веществ), теплотехнические характеристики (теплота сгорания) и прочностные (в том числе влагостойкость, т. е. остаточная прочность после контакта брикетов с водой). Первые две категории оцениваемых свойств в большой сте-

пени зависят от качества поступающего на брикетирование угля и категории связующего вещества. Прочностные характеристики брикетов определялись путем испытания брикетов на сжатие. Механическая прочность на сжатие брикетов по требованиям должна быть не менее 7,8 МПа [14], поэтому в дальнейших исследованиях при определении приемлемости брикетов по прочности и оценке эффективности процесса брикетирования проводилось сравнение экспериментальных данных с этим значением. Водопоглощение показывает, насколько увеличилась масса брикета, нормированное водопоглощение для брикетов составляет 3 %. Кроме того, при испытании брикетов на водопоглощение брикеты считаются водостойчивыми, если они после пребывания в воде сохраняют остаточную прочность не менее 40 % от первоначальной.

Результаты и обсуждение

Брикетиrowание бурого угля с картоном в качестве связующего. Эксперименты по брикетированию были проведены на пробе Кангаласского бурого угля крупностью 0–3 мм со следующими показателями технического анализа: влага лабораторная 7,3 %, зольность на сухую массу 11,8 %, выход летучих веществ на сухую беззольную массу 52,3 %, низшая теплота сгорания 22,38 МДж/кг. Механическая прочность на сжатие брикетов без добавления связующих веществ не превышает 2,0 МПа, что является очень низким показателем, при хранении и испытании на водопоглощение такие брикеты полностью теряют прочность и разрушаются.

Результаты испытаний брикетов с добавкой картона в количестве от 4,8 до 16,7 % на сухую массу угля приведены в табл. 1. В ходе проведения экспериментальных исследований было установлено, что максимальную прочность брикеты приобретали по истечении 5–7 суток после изготовления. Брикет, содержащий более 9,1 % картона на сухую массу, имел достаточную прочность. Теплота сгорания брикета с максимальным содержанием картона снизилась незначительно и составила 21,3 МДж/кг. Однако после пребывания в воде все исследуемые брикеты увеличили массу на 40–60 % и имели низкую остаточную прочность.

Брикетиrowание каменного угля с картоном в качестве связующего. Эксперименты по брикетированию были проведены на пробе Денисовского каменного угля (марка КЖ) крупностью

Таблица 1

Состав и свойства брикетов из бурого угля Кангаласского месторождения

Table 1

Composition and properties of briquettes from Kangalas deposit lignite

Показатель	Номер эксперимента			
	1	2	3	4
Масса сухого картона на 1 кг угля, г	50	100	150	200
Содержание связующего вещества в смеси, %	4,8	9,1	13,0	16,7
Механическая прочность брикетов на сжатие, МПа:				
сразу после брикетирования	1,8	2,0	2,1	2,3
через 1 сутки	4,8	5,7	6,9	8,1
через 3 суток	5,6	6,3	7,5	9,2
через 5 суток	6,3	7,9	9,3	10,5
через 7 суток	6,9	8,1	9,8	11,0
через 15 суток	6,7	8,0	9,6	11,1
через 30 суток	6,8	8,0	9,7	10,8
Водопоглощение, %	60,2	58,8	56,3	42,6
Остаточная прочность на сжатие, МПа	2,5	2,5	2,8	2,9

Таблица 2

Состав брикуетируемых смесей из каменного угля
Денисовского месторождения с картоном в качестве связующего

Table 2

Composition of briquetting mixtures
from Denisovskoye deposit bituminous coal with cardboard as a binder

Номера экспериментов	Содержание картона, %	Т : Ж (картон : вода)	Масса компонентов смеси, г		
			уголь	картон	вода
1, 5, 9, 14, 15	5	1 : 7,14	280	14	100
2, 10, 16	5	1 : 14,29	280	14	200
3, 6, 7, 8, 11, 13, 17	10	1 : 7,14	280	28	200
4, 12, 18	10	1 : 10,71	280	28	300

0-3 мм со следующими показателями технического анализа: влага лабораторная 3,5 %, зольность на сухую массу 26,2 %, выход летучих веществ на сухую беззольную массу 25,5 %, низшая теплота сгорания 26,7 МДж/кг. Механическая прочность на сжатие брикетов из каменного угля Денисовского месторождения без добавления связующих веществ не превышает 2,4 МПа. При хранении и испытании на водопоглощение брикеты полностью разрушаются. Состав брикуетируемых смесей из каменного угля с картоном в качестве связующего приведен в табл. 2, результаты испытания прочности брикетов на сжатие – в табл. 3.

Брикеты с 5%-м содержанием картона, имеющие прочность не менее 7,8 МПа (эксперименты

16 и 10), получены при содержании воды на размачивание картона (соотношение Т : Ж (картон : вода) 1 : 14). Брикеты с 10%-м содержанием картона имеют прочность выше 7,8 МПа, как при соотношении Т : Ж (картон : вода) 1 : 7, так и при 1 : 14 (эксперименты 4, 8, 11–13, 17, 18).

На рисунке показано изменение механической прочности на сжатие для брикетов с добавлением картона 5 и 10 % и соотношением Т : Ж (картон : вода) 1 : 7. Брикеты с 5%-м содержанием картона, имеют прочность ниже 7,8 МПа, с 10%-м содержанием – выше 7,8 МПа, причем максимальные значения прочности брикетов достигаются на 3–5 сутки выдержки в условиях комнатной температуры, при этом отмечена интенсивная потеря массы брикетов (см. рисунок)

Таблица 3
Прочностные характеристики брикетов
из каменного угля с картоном

Table 3

Strength characteristics
of bituminous coal briquettes with cardboard

Номер эксперимента	Время выдержки перед испытанием, сутки	Механическая прочность на сжатие, МПа	Потеря массы брикета, %
1	1	3,61	5,8
2	1	5,32	5,3
3	1	6,52	5,9
4	1	11,89	6,6
5	1	2,36	5,0
6	1	6,24	5,4
7	1	6,71	6,7
8	3	8,60	7,7
9	3	4,89	5,9
10	5	9,43	6,8
11	5	9,48	7,3
12	5	15,72	7,1
13	6	9,30	6,9
14	7	4,72	6,2
15	7	4,76	7,0
16	7	9,25	6,6
17	7	8,74	8,3
18	7	15,50	7,8

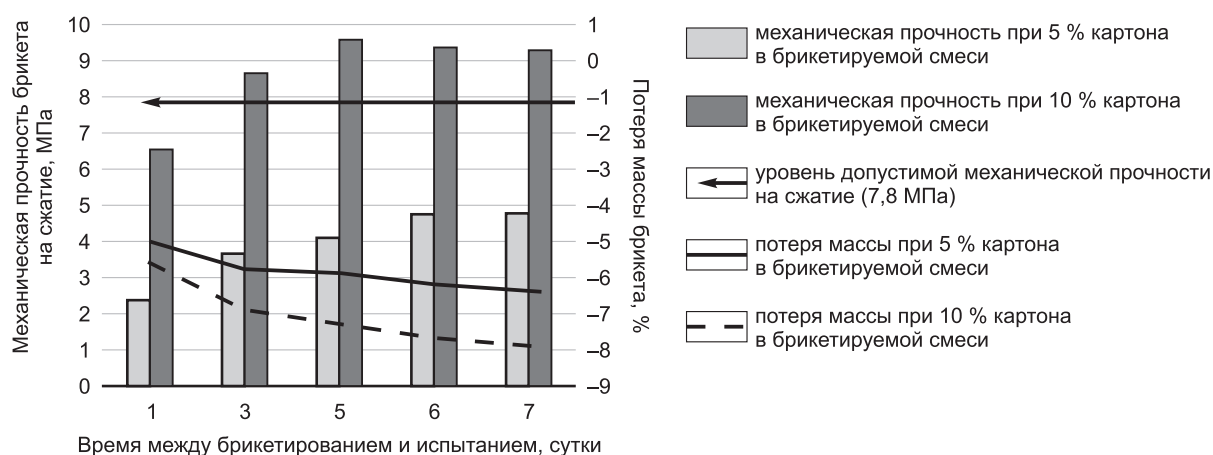
в течение первых трех суток, что объясняется снижением их влажности.

Для брикетов из каменного угля Денисовского месторождения низшая теплота сгорания при влажности брикета 1,1 % составляет 25,2 МДж/кг,

сопоставимые с этим показателем для исходного угля, и говорит о том, что связующее на основе картона не снижает теплотворную способность. Испытания каменноугольных брикетов на водопоглощение показали, что брикеты после 30-минутного нахождения в воде не разрушаются, при этом влагоемкость брикетов из каменного угля ниже, чем из бурого, и составляет 40–50 %. Однако остаточная механическая прочность брикетов достаточно низкая (2,5–3,6 МПа), но выше, чем прочность брикетов без связующего.

Возможные варианты реализации технологии брикетирования углей с картоном в качестве связующего в районах Арктической зоны. В общем виде технология брикетирования углей с применением связующих реализуется по следующей схеме (в скобках указан номер технологической операции): прием исходного материала (1), шихтовка (2), классификация (3) и измельчение (4) углей; сушка угля (5); подготовка связующего вещества (6) (измельчение, расплавление и т. п., что зависит от его вида); дозирование и смешение угля со связующим (7) (эта операция чаще всего сопряжена с нагревом смеси); формование брикетов на прессе (8); сушка и охлаждение брикетов (9); отгрузка брикетов потребителям (10).

Анализируя эту цепочку технологических операций, можно заключить, что при брикетировании в условиях Арктической зоны при организации брикетных работ операции (1)–(5) будут в минимальном объеме, так как уголь уже мелкий и пролежавший некоторое время на складе. Операции (6) и (7) в разрабатываемой технологии лучше проводить без дополнительных на-



Изменение механической прочности на сжатие и массы брикетов из каменного угля со связующим на основе картона
Change in mechanical compressive strength and mass of coal briquettes with cardboard-based binder

гревов связующего вещества, исходного сырья и смеси, так как в условиях АЗ нет лишних ресурсов энергии. Операцию сушки (9) также необходимо предусмотреть без дополнительного нагрева, в естественных условиях. Таким образом, технология брикетирования угля с применением картона в качестве связующего вещества будет состоять из следующих операций: прием сырья; классификация исходного угля по крупности –3 мм; подготовка связующего вещества; дозирование и смешение угля со связующим; формование брикетов на прессе; сушка брикетов в естественных условиях; упаковка, складирование или отгрузка брикетов потребителям. При организации производства непосредственно возле мест потребления брикетов в приеме сырья и отгрузке брикетов нет необходимости.

Для реализации предлагаемой технологической схемы брикетирования необходимо выбрать соответствующее оборудование и механизмы. На стадии приема сырья необходим грохот, обеспечивающий рассев поступающего угля на два класса крупности: –3 мм и +3 мм. В результате отсева уголь крупностью более 3 мм может сразу отгружаться потребителям. Уголь мелкого класса направляется на следующую стадию технологического цикла – смешивание со связующим. Для перемещения угля необходимо предусмотреть ленточные конвейеры соответствующих мощности и производительности. На стадии подготовки связующего необходим измельчитель (шредер) картона, позволяющий получить мелкую фракцию при измельчении (размер кусков картона после измельчения не более 1–2 см). После измельчения картона полученную фракцию необходимо замочить в воде для набухания. На основании проведенных лабораторных исследований данный процесс занимает, как правило, 24 ч. Набухший картон необходимо тщательно измельчить до получения однородной пастообразной массы при помощи высокоскоростного роторного смесителя. Полученная масса подается в шнековый смеситель, перемешивается с углем и далее шнековым питателем подается на брикетный пресс. Брикетирование полученной смеси осуществляется на штемпельном прессе с кривошипно-шатунным механизмом привода рабочего органа. Данный вид брикетных прессов обеспечивает достаточное удельное давление брикетирования. Заключительной стадией процесса является складирование на хранение

под навесы при расположении брикетного производства в непосредственной близости к месту использования или тарирование готовой продукции при необходимости транспортировки. Тарирование может осуществляться в различную тару, например, в мешки по 50 кг или так называемые биг-бэги весом наполнения от 0,2 до 2 т. Основным условием тары является обеспечение герметичности внутреннего содержимого. Предлагаемая технологическая схема вполне реализуема в модульном виде. На сегодня на рынке имеется все необходимое оборудование для комплектации и организации модульного мобильного комплекса брикетирования угля различной производительности.

Данные комплексы могут эксплуатироваться (в том числе и сезонно) в отдаленных населенных пунктах, снабжающихся углем в рамках северного завоза, что позволит вернуть в промышленное производство угли, подвергшиеся самоизмельчению при доставке и длительном хранении.

В дальнейшем, при переходе с привозного угля на уголь из местных месторождений проблема самоизмельчения и снижения качества углей при их хранении и транспортировке останется, соответственно, наличие комплексов по брикетированию углей позволит снизить потери мелких классов углей, и, если в поселке был смонтирован и запущен в эксплуатацию комплекс для брикетирования мелких классов привозного угля, он легко может быть перепрофилирован для брикетирования другого угля путем корректировки количества связующего в смеси.

Авторы готовы предоставить заинтересованным организациям более детализированную информацию по экспериментальным и технологическим вопросам, связанным с брикетированием угля, а также по подбору оборудования на основе проведенных исследований.

Заключение

В результате экспериментальных исследований процесса брикетирования бурых и каменных углей с картоном в качестве связующего установлено, что возможно получение прочных брикетов из бурого угля с добавлением 9–13 % картона на сухую массу угля и из каменного угля при добавлении 9–10 % картона на сухую массу угля. При этом буроугольные брикеты на 5–7 суток и каменноугольные на 3–5 суток после брикетирования приобретают достаточную механическую прочность. Применение данного связующего

не снижает теплотехнические свойства, позволяет утилизировать картон, не вредит экологии. Недостатком данного метода брикетирования является высокое водопоглощение брикетов при длительном нахождении в воде и, следовательно, значительная потеря механической прочности. Однако влияние этого фактора возможно снизить путем организации такого брикетного производства непосредственно на месте использования брикетов с обустройством места складирования под навесами, что позволит минимизировать контакт брикетов с атмосферными осадками. Брикетирование ведется без дополнительного расхода энергии на нагрев угля, связующих веществ или смеси, что является приемлемым для условий АЗ Республики Саха (Якутия), где возможно организовать на местах брикетные производства для мелкого угля, полученного в рамках северного завоза.

Таким образом, в результате экспериментальных исследований разработан новый способ брикетирования бурых и каменных углей с применением картона в качестве связующего вещества, позволяющий снизить потери и вернуть в промышленное производство угли мелких классов. Способ может стать основой для создания модульного мобильного комплекса по брикетированию угля в населенных пунктах Арктической зоны Республики Саха (Якутия).

Список литературы / References

1. Костюченко С.Л. Минерально-сырьевая база как основа формирования социально-экономической политики в Арктике. *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. 2017;(5):27–35.
2. Kostyuchenko S.L. Mineral resource base as the basis for the formation of social and economic policy in the Arctic. *Mineral Resources of Russia. Economics & Management*. 2017;(5):27–35. (In Russ.)
3. Павленко В.И., Куценко С.Ю. Минерально-сырьевая база Арктической зоны Российской Федерации в системе обеспечения стратегических целей развития страны. *Власть*. 2025;33(1):93–99.
4. Pavlenko V.I., Kutsenko S.Y. Mineral resource base of the Arctic Zone of the Russian Federation in the system of maintenance of strategic targets of development of the country. *Vlast' (The Authority)*. 2025;33(1):93–99. (In Russ.)
5. Попель О.С., Фрид С.Е., Лисицкая Н.В. и др. Анализ энергетической эффективности использования ветроэнергетических ресурсов в России, включая Арктику. *Арктика: экология и экономика*. 2025;15(3):103–115. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2025-3-103-115>.
6. Popel O.S., Frid S.E., Lisitskaya N.V., et al. Analysis of energy efficiency of wind energy resources in Russia, including the Arctic. *Arctic: Ecology and Economy*. 2025;15(3):103–115. (In Russ.) <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2025-3-103-115>.
7. Salonen H. All habits die hard: Exploring the path dependence and lock-ins of outdated energy systems in the Russian Arctic. *Energy Research & Social Science*. 2021;78:102–149. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102149>.
8. Минин В.А., Целищева М.А. Ресурсы ветра западного сектора Арктической зоны Российской Федерации и возможные направления их использования. *Арктика: экология и экономика*. 2023;3(1):72–84. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-1-72-84>.
9. Minin V.A., Tselishcheva M.A. Wind resources of the western sector of the Arctic zone of the Russian Federation and possible directions of their use. *Arctic: Ecology and Economy*. 2023;3(1):72–84. (In Russ.) <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-1-72-84>.
10. Ткач С.М., Гаврилов В.Л. Предпосылки эффективного освоения угольных месторождений центральных и арктических районов Якутии. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2013;(S4):95–102.
11. Tkach S.M., Gavrillov V.L. Productive coal mining background in central and Arctic Yakutia. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2013;(S4):95–102. (In Russ.)
12. Батугина Н.С., Гаврилов В.Л., Хоютанов Е.А., Попова К.С. Оценка вариантов завоза и использования угля при освоении месторождений золота Арктической зоны Республики Саха (Якутия). *Арктика: экология и экономика*. 2021;11(2):152–163. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-2-152-163>.
13. Batugina N.S., Gavrillov V.L., Khoitutanov E.A., Popova K.S. Assessment of coal supply and use in the development of gold deposits in the Arctic zone of the Republic of Sakha (Yakutia). *Arctic: Ecology and Economy*. 2021;11(2):152–163. (In Russ.) <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-2-152-163>.
14. Батугина Н.С. Использование местных и привозных углей при освоении месторождений Арктической зоны Республики Саха (Якутия) В кн.: Григорьева Е.Э. (ред.) *Устойчивый Север: общество, экономика, экология, политика: Сборник трудов VII Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 100-летию образования Якутской АССР*. Якутск: Изд-во СВФУ им. М.К. Аммосова; 2022. С. 25–35.
15. Batugina N.S. The use of local and imported coals in the development of deposits in the Arctic zone of the Republic of Sakha (Yakutia). In: Grigorieva E.E. (ed.) *Sustainable North: society, economics, ecology, politics: Collection of proceedings of the 7th All-Russian scientific and practical conference dedicated to the 100th anniversary of the formation of the Yakut Autonomous Soviet Socialist Republic*. Yakutsk: NEFU Publishing House; 2022, pp. 25–35. (In Russ.)
16. Кошкарев М.В. Анализ основных показателей добычи каменного угля на континентальных территориях арктической зоны Российской Федерации в период 2000–2020 гг. *Экономические науки*. 2021;(205):59–64. <https://doi.org/10.14451/1.20559>.
17. Koshkarev M.V. Analysis of the main indicators of mining of stone coal in the territories of the Arctic zone of the Russian Federation in the period 2000–2020. *Economic Sciences*. 2021;(205):59–64. (In Russ.) <https://doi.org/10.14451/1.20559>.
18. Батугина Н.С., Хоютанов Е.А., Гаврилов В.Л., Федоров В.И. Экономическое обоснование выбора наиболее перспективных месторождений угля для обеспечения топливом арктических районов Республики Саха (Якутия). *Горная промышленность*. 2025;(4S):12–17. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4S-12-17>.

Batugina N.S., Khoiutanov E.A., Gavrilov V.L., Fedorov V.I. Economic justification for selecting the most promising coal deposits to supply fuel to the Arctic regions of the Republic of Sakha (Yakutia). *Russian Mining Industry*. 2025;(4S):12–17. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4S-12-17>

11. Матвеев А.И., Попова К.С. Проблема повышения эффективности использования углей для потребителей в условиях Крайнего Севера. *Успехи современного естествознания*. 2022;(12):175–180. <https://doi.org/10.17513/use.37967>

Matveev A.I., Popova K.S. The problem of increasing the efficiency of coal use for consumers in the Far North. *Advances in Modern Natural Science*. 2022;(12):175–180. (In Russ.) <https://doi.org/10.17513/use.37967>

12. Жалгасулы Н.Ж., Бектибаев У.А., Исмаилова А.А. Перспективы разработки и переработки бурых углей Казахстана. *Известия Национальной Академии наук Кыргызской Республики*. 2023;(S8):427–432.

Zhalgasuly N.Zh., Bektiybaev U.A., Ismailova A.A. Prospects for development and processing of Kazakhstan brown coals. *Bulletin of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic*. 2023;(S8):427–432. (In Russ.)

13. Сайфутдинов Д.Р., Заречнев А.В., Нарский В.А. Применение технологии брикетирования угля на примере угольной компании Кузбасса. В кн.: *Рекультивация выработанного пространства: проблемы и перспективы: Сборник статей участников VI Международной научно-практической Интернет-конференции, г. Белово, 14–18 декабря 2020 г.* Белово, Кемерово, Новосибирск, Шумен, Велико Тырново: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева; 2021. С. 87–90.

Saifutdinov D.R., Zarechnev A.V., Narsky V.A. Application of coal briquetting technology on the example of a Kuzbass coal company. In: *Reclamation of mined-out spaces: problems and prospects: Collection of articles by participants of the 6th International Scientific and Practical Internet Conference, Belovo, December 14–18, 2020*. Kemerovo: Kuzbass State Technical University named after T. F. Gorbachev; 2021, pp. 87–90. (In Russ.)

14. Елишевич А.Т. *Брикетирование полезных ископаемых*. М: Недра; 1989. 300 с.

Elishevich A.T. *Briquetting of minerals*. Moscow: Nedra; 1989. 300 p. (In Russ.)

15. Попов С.Н., Заровняев Б.Н., Буренина О.Н., Николаева Л.А. и др. Особенности брикетирования бурых углей Якутии. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2014;(9):405–412.

Popov S.N., Zarovnyaev B.N., Burenina O.N., Nikolaeva L.A. Features of lignite briquetting in Yakutia. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2014;(9):405–412. (In Russ.)

16. Патент № 2147029 Российская Федерация, МПК C10L 5/12, 5/14, 5/16, 5/40. C1.Топливный брикет и способ его получения : № 99107373/04 : заявл. 05.04.1999; опубл. 27.03.2000 / Лурый В.Г. 5 с.

Patent No. 2147029, Russian Federation, IPC C10L 5/12, 5/14, 5/16, 5/40. C1. Fuel briquette and method for producing it: No. 99107373/04; registered 05.04.1999; published 27.03.2000 / Lury V.G. 5 p.

17. Патент № 2661881 Российская Федерация, МПК C10L 5/08. Способ брикетирования угля : № 2018114844 : заявл. 20.04.2018; опубл. 20.07.2018 / Альшанская А.А., Демченко И.И., Цыбульский С.И. 5 с.

Patent No. 2661881, Russian Federation, IPC C10L 5/08. Method of coal briquetting: No. 2018114844; registered

20.04.2018; published 20.07.2018 / Alshanskaya A.A., Demchenko I.I., Tsybulsky S.I. 5 p.

18. Патент № 2847039 Российская Федерация, МПК C10L 5/14. Способ получения угольных брикетов : № 2024103396 : заявл. 09.02.2024; опубл. 24.09.2025 / Михеев В.А., Москаленко Т.В., Ворсина Е.В. 5 с.

Patent No. 2847039, Russian Federation, IPC C10L 5/14. Method for producing coal briquettes: No. 2024103396: registered 09.02.2024; published 24.09.2025 / Mikhchev V.A., Moskalenko T.V., Vorsina E.V. 5 p.

19. Москаленко Т.В., Михеев В.А., Ворсина Е.В. Перспективы внедрения брикетирования углей в Республике Саха (Якутия). *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018;(S39):3–11. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-7-39-3-11>.

Moskalenko T.V., Mikhchev V.A., Vorsina E.V. Development of briquetting in the Republic Sakha (Yakutia). *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2018;(S39):3–11. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-7-39-3-11>.

20. Буравчук Н.И., Гурьянова О.В. Брикетирование мелкозернистого угольного сырья со связующими. *Химия твердого топлива*. 2021;(3):18–23. <https://doi.org/10.31857/S0023117721030051>.

Buravchuk N.I., Guryanova O.V. Briquetting of fine-grained coal raw materials with binders. *Chemistry of Solid Fuel*. 2021;(3):18–23. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0023117721030051>.

21. Размахнин К.К., Хаткова А.Н., Шумилова Л.В., Номоконова Т.С. Разработка технологии брикетирования отходов добычи бурых углей. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(9-1):288–298. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_288.

Razmakhnin K.K., Khatkova A.N., Shumilova L.V., Nomokonova T.S. Development of technology for briquetting brown coal mining waste. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2023;(9-1):288–298. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_288.

22. Джолдошева Т.Д., Осоров И.А., Абдумомун Уулу С., Айтбаева А.А. Разработка технологии брикетирования Кожокеленского угля на основе продуктов дикорастущей растительности. *Известия Ошского технологического университета*. 2025;(1):23–32.

Dzholdosheva T.D., Osorov I.A., Abdumomun Uulu S., Aitbaeva A.A. Development of briquetting technology for Kozhokelen coal based on wild plant products. *Bulletin of the Osh Technological University*. 2025;(1):23–32. (In Russ.)

23. Жукова А.Р. Подбор связующего в производстве угольных брикетов. *Естественные и технические науки*. 2024;189(2):221–224.

Zhukova A.R. Selection of a binder in the production of coal briquettes. *Natural and Technical Sciences*. 2024;189(2):221–224. (In Russ.)

24. Батухтин С.Г., Кобылкин М.В., Риккер Ю.О., Рудой В.И. Обогащение угольной мелочи путем брикетирования с добавлением природного связующего компонента. В кн.: Халин А.Н. (ред.) *Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе: Материалы Национальной с международным участием научно-практической конференции студентов, аспирантов, ученых и специалистов, г. Тюмень, 20–22 декабря 2022 г.* Тюмень: Тюменский индустриальный университет; 2022. С. 148–151.

Batukhtin S.G., Kobylkin M.V., Rikker Yu.O., Rudoy V.I. Coal fines beneficiation by briquetting with the addition of

a natural binding component. In: Khalin A.N. (ed.) *Energy saving and innovative technologies in the fuel and energy complex: Proceedings of the National scientific and practical conference with international participation of students, graduate students, scientists and specialists, Tyumen, December 20–22, 2022*. Tyumen: Tyumen Industrial University; 2022, pp. 148–151. (In Russ.)

25. Ким С.В., Богоявленская О.А., Кударинов С.Х. Получение брикетированного бездымного топлива из термообработанной мелочи энергетических углей. *Уголь*. 2020;1131(6):41–45. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-6-41-45>.

Kim S.V., Bogoyavlenskaya O.A., Kudarinov S.Kh. Production of briquetted smokeless fuel from heat-treated fines of power-generating coals. *Coal*. 2020;1131(6):41–45. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-6-41-45>.

26. Хакимов А.А., Салиханова Д.С., Абдурахимов А.Х., Жумаева Д.Ж. Использование местных отходов в производстве угольных брикетов. *Universum: химия и биология*. 2020;70(4).17–2123.

Khakimov A.A., Salikhanova D.S., Abdurakhimov A.Kh., Zhumaeva D.Zh. Use of local waste in the production of coal briquettes. *Universum: chemistry and biology*. 2020;70(4).17–21. (In Russ.)

Об авторах

МОСКАЛЕНКО Татьяна Владимировна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-2782-2488>, ResearcherID: AFN-8465-2022, Scopus Author ID: 6603241867, SPIN: 2511-1371, e-mail: labkiy@mail.ru

МИХЕЕВ Валерий Александрович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0009-0009-1531-4516>, ResearcherID: LPQ-0824-2024, Scopus Author ID: 57198098218, SPIN: 2112-1576, e-mail: labkiy@mail.ru

Вклад авторов

Москаленко Т.В. – проведение исследования, проведение статистического анализа, редактирование рукописи; **Михеев В.А.** – разработка концепции, проведение исследования, ресурсное обеспечение исследования, редактирование рукописи

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

MOSKALENKO, Tatiana Vladimirovna, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-2782-2488>, ResearcherID: AFN-8465-2022, Scopus Author ID: 6603241867, SPIN: 2511-1371, e-mail: labkiy@mail.ru

MIKHEEV, Valery Alexandrovich, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0009-0009-1531-4516>, ResearcherID: LPQ-0824-2024, Scopus Author ID: 57198098218, SPIN: 2112-1576 e-mail: labkiy@mail.ru

Authors' contribution

Moskalenko T.V. – investigation, formal analysis, writing – review & editing; **Mikheev V.A.** – conceptualization, investigation, resources, writing – review & editing

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 18.09.2025

Поступила после рецензирования / Revised 12.11.2025

Принята к публикации / Accepted 04.12.2025

Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

УДК 624.130:51.313

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-609-617>



Оригинальная статья

Высокоэффективная теплоизоляция грунтовой дамбы в г. Якутск

О. И. Алексеева^{✉,1}, К. Н. Большев², А. В. Литовко¹

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

²Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

✉o.i.alekseeva@mpi.ysn.ru

Аннотация

Высокоэффективные теплоизоляционные материалы широко используются при строительстве в криолитозоне для тепловой защиты лдотехнических сооружений (плотин, дамб, хранилищ, аэродромов, дорог и др.), а также в целях управления природными и техногенными криогенными процессами и явлениями (наледееобразованием, сезонным промерзанием-протаиванием и др.). Исследование этих процессов является важным и актуальным для регионов Арктики и Субарктики. Целью эксперимента в 1982–1986 гг. было создание противофильтрационной мерзлотной завесы в теле и основании грунтовой дамбы на территории Института мерзлотоведения СО АН СССР (РАН) (г. Якутск) с помощью совместного действия термосифонов (СОУ) и высокоэффективной теплоизоляции (ПХВ-1). В 2024 г. после 40 лет эксплуатации дамбы с ее поверхности были взяты образцы пенопласта для исследования его остаточных теплофизических свойств. Исследования были проведены расчетным способом, а также методами двухточечного анализа и стационарного теплового режима на установке Netzsh HFM 436 Lambda. Исследования показали, что материал достаточно хорошо сохранил теплоизоляционные свойства и целостность, что говорит о высокой надежности и долговечности пенопласта ПХВ-1 в качестве грунтового теплоизоляционного слоя в климатических условиях Якутии. Это позволило сделать вывод о том, что более современные теплоизоляционные материалы, применяемые для сохранения мерзлого состояния грунтовых оснований и создания мерзлотных завес, теоретически могут иметь длительный срок службы (более 50 лет).

Ключевые слова: грунтовая дамба, мерзлотная завеса, теплофизические свойства, пенопласт, термосифон, высокоэффективный теплоизолятор

Финансирование. Исследования выполнены при поддержке комплексной Программы фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 годы) по проекту ИМЗ СО РАН (рег. № 122011800076-2), а также в рамках госзадания (рег. № 1023030900073-8-2.3.3, научная тема № FWRS-2024-0032).

Для цитирования: Алексеева О. И., Большев К. Н., Литовко А. В. Высокоэффективная теплоизоляция грунтовой дамбы в г. Якутск. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(4):609–617. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-609-617>

Original article

High-efficiency thermal insulation for an embankment dike in Yakutsk

Olga I. Alekseeva^{✉,1}, Konstantin N. Bolshev², Andrey V. Litovko¹

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

²Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

✉o.i.alekseeva@mpi.ysn.ru

Abstract

High-efficiency thermal insulation materials are widely used in permafrost engineering for the thermal protection of ice-rich structures (dams, levees, storage facilities, airfields, roads, etc.) and for controlling natural and anthropogenic cryogenic processes and hazards (e.g., icings, seasonal freeze-thaw cycles). Investigating these processes is

highly relevant task for Arctic and Subarctic regions. From 1982 to 1986, a full-scale field experiment was conducted on a dyke adjacent to the Permafrost Institute in Yakutsk. The objective was to create an impermeable frozen core within its embankment and foundation using a combination of thermosyphons and high-efficiency thermal insulation (PVC-1 foam). In 2024, a PVC-1 foam sample was retrieved from the crest of the dyke to assess its residual thermophysical properties after 40 years of service. The investigation employed thermal analysis, two-probe measurements, and steady-state technique evaluations using a Netzsch HFM 436 Lambda apparatus. The results demonstrate that the material has maintained its structural integrity and insulating performance remarkably well, confirming that PVC-1 foam constitutes a reliable and durable insulating layer under the climatic conditions of Yakutia. This finding suggests that more advanced insulating materials used to maintain foundation soils in a frozen state or to form frozen dam cores can potentially achieve a very long service life (exceeding 50 years).

Keywords: embankment dyke, frozen core, thermal properties, plastic foam, thermosyphon, high efficiency thermal insulator

Funding. This study was supported by the Comprehensive Program of Fundamental Scientific Research in the Russian Federation for the long-term period (2021–2030) under project No. 122011800076-2 of the Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. The research was also conducted under a state assignment (reg. No. 1023030900073-8-2.3.3, theme No. FWRS-2024-0032).

For citation: Alekseeva O.I., Bolshev K.N., Litovko A.V. High-efficiency thermal insulation for an embankment dike in Yakutsk. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(4):609–617. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-609-617>

Введение

В 1982–1986 гг. был проведен уникальный натурный эксперимент по созданию противотрассовой мерзлотной завесы в теле и основании дамбы с помощью совместного действия термосифонов (СОУ) и высокоэффективной теплоизоляции [1–3]. Эксперимент был проведен при создании оградительной грунтовой дамбы, представляющей собой низконапорный гидроузел (рис. 1), у искусственного озера Круглое на территории Института мерзлотоведения СО АН СССР (СО РАН) (далее института) (г. Якутск).

Для создания мерзлотной завесы в центральной 110-метровой части дамбы вдоль гребня летом 1982 г. было установлено 39 термосифонов системы В.И. Макарова на глубину 9,5–11,0 м.

Летом 1984 г. участок дамбы длиной 18 м, охватывающий зону действия семи термосифонов, был покрыт теплоизоляцией (ПХВ-1). Плиты пенопласта размером 0,5×0,5 м, толщиной 0,06 м были закреплены кольшками и засыпаны грунтом слоем 0,1 м. Теплоизолирующий слой был расположен на гребне, низовом и верховом откосах дамбы до уреза воды. Теплофизические свойства пенопласта следующие: марка пенопласта – ПХВ-1, плотность – 69 кг/м³, температура 20 °С, теплопроводность – 0,036 Вт/(м·К), удельная теплоемкость – 1,716 кДж/(кг·К), объемная теплоемкость – 118 кДж/(м³·К), температуропроводность – 0,30 м²/с.

Из опыта применения теплоизоляторов для грунтов

Теплоизоляционными называют материалы, которые имеют небольшой коэффициент теплопроводности. Для грунта теплоизоляционными считаются материалы, имеющие коэффициент теплопроводности в 5–20 раз меньше коэффициента теплопроводности самого грунта [4].

В целях защиты грунтов от промерзания-протаивания издавна применяют естественные теплоизоляторы: мох, торф, опилки, хвою, валежник, настилы из веток кустарника и др. В районах с суровым климатом для теплоизоляции мерзлотных завес применяют хлопчатобумажную вату, войлок, древесную кору, картон, пробковые и торфяные плиты, деревянные щиты. Коэффициент теплопроводности этих материалов колеблется от 0,046 до 0,35 Вт/(м·°С). Из неорганических материалов применяют плиты и маты из минеральной ваты и стекловолокна, коэффициент теплопроводности которых колеблется от 0,4 до 0,07 Вт/(м·°С) [5–7]. Более устойчивыми во времени являются высокоэффективные теплоизоляционные материалы типа пенопластов. Это материалы с системой изолированных, не сообщающихся между собой ячеек, содержащих газ или смесь газов и разделенных тонкими стенками. Наиболее известны полистирольные пенопласты марок ПСБ, ПХВ-1, ПХВ-2. Широкое распространение в строительстве получили пенополистиролы марок ПС-1, ПС-4 и ПС-5 в виде плит длиной и шириной 450, 500 и 550 мм при



Рис. 1. План озера и дамбы, сентябрь 1982 г. (а): 1 – пикетаж, 2 – термосифоны, 3 – глубина воды в озере (август 1982 г.), 4 – реперный знак; и космоснимок озера и дамбы, 2000 г. (б)

Fig. 1. *a)* Plan of the lake and dyke, September 1982: 1 – staking; 2 – thermosyphons; 3 – lake water depth (August 1982); 4 – bench mark; *b)* Satellite image of the lake and dyke, 2000

толщине от 30 до 100 мм и более, а также пенополиуретаны – трудновоспламеняемые материалы, обладающие хорошими физико-механическими и теплоизоляционными свойствами. Так, 2,5-сантиметровый слой пенопласта по теплоизоляционным свойствам соответствует 52 см кирпичной кладки, 15 см дерева и 130 см железобетона.

Теплоизоляционный слой, введенный в насыпное основание, препятствует поступлению тепла с поверхности и снижает в летний период расход холода, аккумулированного в мерзлом массиве. Причем пенопласт, обладая малой теплоемкостью, выполняет в основном функции отражения тепла. Использование пенопластов в строительстве развивает идеи теплоизоляции грунтового основания (рис. 2) [8]. Натурные наблюдения на грунтовой дамбе в Якутске и прогнозный расчет показали, что именно за счет использования пенопласта ПХВ-1 в сочетании с термосифонами в теле и основании дамбы была создана практически полнопрофильная противифльтрационная мерзлотная завеса. На практике это позволяет повысить уровень воды в водохранилище.

Экспериментальные исследования, проведенные [9–15] для районов Амдермы, Диксона и других регионов криолитозоны, показали, что использование высокоэффективных материалов позволяет полностью исключить сезонное оттаивание грунтов под зданием с проветриваемым подпольем. Отмечено, что применение пенопластов в этих целях наиболее целесообразно в районах со среднегодовой температурой грунтов ($\theta_{с.г.}$) ниже 3 °С, причем меньшая толщина теплоизоляции требуется в районах с более низкими значениями $\theta_{с.г.}$

Сейчас в строительстве разработаны и широко применяются более современные и эффективные теплоизоляционные материалы, такие как конструкционно-теплоизоляционные бетоны, для изоляции и повышения устойчивости мерзлых грунтов оснований, в том числе совместно с СОУ. Рациональное соотношение компонентов наномодифицированной пеностеклобетонной смеси обеспечивает создание высокоподвижной смеси, обладающей хорошей удобоукладываемостью, и на ее основе формируется уникальный теплоизоляционно-конструкционный материал с характеристикой $\lambda = 0,14 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{С}$, который целесообразен для суровых регионов.

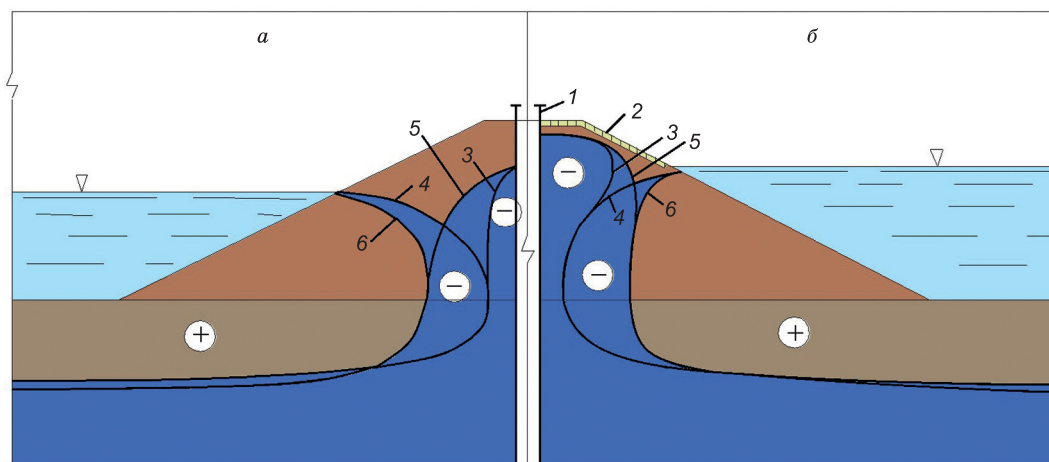


Рис. 2. Сезонное движение нулевой изотермы (расчетное) в верхней призме плотины: *а* – без пенопластового покрытия; *б* – с покрытием; 1 – термосифон; 2 – пенопластовое покрытие. Положение нулевой изотермы: 3 – в марте 1-го года после начала работы замораживающей системы; 4 – в сентябре 1-го года; 5 – в марте 10-го года; 6 – в сентябре 10-го года

Fig. 2. Modelled seasonal dynamics of the 0 °C isotherm in the upper prism: *a*) without plastic foam insulation; *б*) with plastic foam insulation; 1 – thermosyphon; 2 – plastic foam insulation. 0 °C isotherm position: 3 – March of the 1st year of thermosyphon operation; 4 – September of the 1st year; 5 – March of the 10th year; 6 – September of the 10th year

Многие компании занимаются разработкой таких материалов. Так, российская компания «ПЕНОПЛЭКС», которая начала свою деятельность в 1998 г. с запуска первой в России производственной линии по изготовлению теплоизоляционных материалов из экструзионного пенополистирола под торговой маркой «ПЕНОПЛЭКС», сегодня имеет в своем составе 13 заводов (10 в российских городах и 3 за рубежом). Экструзионный пенополистирол получают путем смешивания гранул полистирола при повышенной температуре и давлении с введением вспенивающего агента и последующим выдавливанием из экструдера. [16–19].

Преимущества этого материала для применения в качестве теплоизоляционного слоя на мерзлых грунтах следующие: очень низкая теплопроводность (0,034 Вт/м·К), обеспечивающая надежный заслон передаче тепла от фундамента или другого источника до грунта, который сохранит свое мерзлое состояние на весь период эксплуатации; высокая прочность (20 т/м²), теоретически длительный срок службы.

Исследование пенопласта ПХВ-1

В рамках работ лаборатории инженерной геокриологии (ЛИГ) института по базовому проекту «Устойчивость природно-технических систем в криолитозоне и разработка технологий использования криогенных ресурсов», в числе прочих

задач 2024 г., необходимо было установить теплофизические свойства пенопласта ПХВ-1 после 40 лет его использования в качестве теплоизоляционного слоя на грунтовой дамбе для сравнения с их начальными значениями (см. выше).

В августе 2024 г. были взяты образцы пенопласта (рис. 3) с гребня грунтовой дамбы для определения его современных теплофизических свойств после 40 лет эксплуатации. Свойства были определены в лаборатории теплофизики Института физико-технических проблем Севера СО РАН [20].

Для исследования был предоставлен образец полихлорвинилового пенопласта средней толщины 0,485 мм размером 550 на 550 мм.

Определялись следующие характеристики материала: плотность, кг/м³; влажность, %; теплопроводность, Вт/(м·°C); теплоемкость удельная, кДж/(кг·K); теплоемкость объемная, кДж/(м³·K); температуропроводность, м²/с.

Для сравнения результатов определение теплопроводности проводилось тремя способами: 1) расчетным способом через определение сопротивления теплопередаче; 2) методом двухточечного зондирования (компаратор Калинина); 3) методом стационарного теплового режима на установке Netzsh HFM 436 Lambda.

1. Расчетный способ. Расчеты производились в соответствии с ГОСТ Р 56623 (Контроль неразрушающий. Метод определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций).



Рис. 3. Фрагменты взятия образца пенопластовой плиты с поверхности дамбы на территории института. Сентябрь 2024 г.

Fig. 3. Sampling of the PVC-1 board from the dyke crest, September 2024

Расчет сопротивления теплопередаче R_k производился по формуле

$$R_k = \frac{t_1 - t_2}{q_{\phi}},$$

где t_1 и t_2 – температура на теплой и холодной поверхностях образца; q_{ϕ} – средняя фактическая плотность теплового потока, определяемая по формуле

$$q_{\phi} = \frac{q(t_1 - t_2)}{(t_1 - t_2) - q(2R_T + R_c)_{\phi}},$$

где q – средняя за расчетный период измеренная плотность теплового потока, Вт/м², R_T – термическое сопротивление преобразователя теплового потока (0,004 (м²·К)/Вт), R_c – термическое сопротивление воздушной прослойки между тепломером и материалом (~ 0,002 (м²·К)/Вт)

Расчет теплопроводности материала производится по формуле

$$\lambda = d/R_k,$$

где d – толщина материала, м.

2. Метод двухточечного зондирования (компаратор Калинина).

Работа прибора основана на двухточечном тепловом зондировании поверхности образца

двумя термозондами. В ходе измерений регистрируется разность температуры в двух точках зонда, характеризующей теплообмен между зондом и образцом через зону их соприкосновения в режиме, близком к стационарному. Величина теплопроводности определяется путем сравнения с результатами измерений на стандартных образцах с известной теплопроводностью, т. е. метод определения теплопроводности относится к относительным.

3. Метод стационарного теплового режима на установке Netzsh HFM 436 Lambda.

Для определения теплопроводности методом стационарного теплового режима использовался анализатор теплопроводности строительных изоляционных материалов HFM 436 Lambda производства компании Netzsch. Калибровка прибора производится с помощью сертифицированного эталонного стандарта NIST с известной теплопроводностью. Диапазон измеряемой теплопроводности исследуемых материалов составляет соответственно от 0,03 до 0,5 Вт/(м·К) и термического сопротивления от 0,02 до 7 (м²·К)/Вт. Предел допускаемой относительной погрешности определения теплопроводности составляет ±5 %.

Таблица 1
Результаты определений влажности, плотности и теплоемкости материала

Table 1
Determination of moisture content, density and heat capacity of the material

Характеристика	Полученное значение
Влажность, %	4,3
Плотность, кг/м ³	170
Удельная теплоемкость, кДж/(кг·К) (при влажности материала 4,3 %)	При T = 23,5 °C 1,26 При T = 25 °C 1,45 Ср. знач. 1,355
Объемная теплоемкость, кДж/(м ³ ·К)	При T = 23,5 °C 214,2 При T = 25 °C 246,5 Ср. знач. 230,35

Определение удельной теплоемкости проводилось на дифференциально-сканирующем калориметре Setaram Sensys EVO TG-DSC. Объемная теплоемкость рассчитывалась по формуле

$$c_v = \rho \cdot c,$$

где c – удельная теплоемкость, ρ – плотность материала.

Температуропроводность материала рассчитывалась по формуле

$$a = \lambda / (\rho \cdot c),$$

где λ – теплопроводность.

Результаты исследований приведены в таблицах 1 и 2.

Сравнение значений теплофизических свойств пенопласта производилось для температуры воздуха 20,0–23,5 °C (табл. 4).

Можно видеть, что за 40 лет свойства пенопласта ПХВ-1 изменились, но в части теплопроводности и температуропроводности незначительно: теплопроводность увеличилась в среднем всего на 0,02 Вт/(м·°C), а температуропроводность – на 0,04 м²/с, что говорит о достаточно высокой надежности и долговечности пенопласта ПХВ-1.

Пенопласт, находясь в деятельном слое грунта, подвергается регулярным циклическим температурным воздействиям с фазовыми переходами поровой влаги. Влага, проникая в материал и расширяясь в процессе промерзания, постепенно разрушает структуру, заполняя пустоты, и существенно ухудшает характеристики влагопроницаемости. Наблюдаемое по результатам измерений значительное изменение плотности и теплоемкости (более чем в 2 раза) можно объяснить тем, что по мере увеличения влагопроницаемости материала вместе с влагой в структуру проникают мелкодисперсные минеральные частицы, органика, соли и прочие компоненты вмещающего грунта, увеличивая его плотность и, соответственно, изменяя теплофизические характеристики. Тем не менее, полученные результаты показывают, что после 40 лет эксплуатации исследуемый материал достаточно хорошо сохранил теплоизоляционные свойства и целостность, что говорит о высокой надежности и долговечности

Результаты определений теплопроводности материала

Determinations of the thermal conductivity of the material

Метод определения/установка	Средняя температура, °C	Полученное значение теплопроводности, Вт/(м·°C)	Рассчитанное значение температуропроводности м ² /с
Расчет теплопроводности через определение сопротивления теплопередаче	–2,7	0,05	0,217
Расчет теплопроводности через определение сопротивления теплопередаче	–3,1	0,051	0,221
Метод двухточечного зондирования/компаратор Калинина	22	0,06	0,26
Метод стационарного теплового режима/Netzsh HFM 436 Lambda	0,56	0,056	0,243
Метод стационарного теплового режима/Netzsh HFM 436 Lambda	20	0,06	0,26
Метод стационарного теплового режима/Netzsh HFM 436 Lambda	20	0,056	0,243

Таблица 3

Сравнение теплофизических свойств полихлорвинилового пенопласта (ПХВ-1)

Table 3

Comparison of thermophysical properties of polyvinyl chloride foam (PVC-1)

Номер	Марка пенопласта	Плотность, кг/м ³	Температура, °С	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Удельная теплоемкость, кДж/(кг·К)	Объемная теплоемкость, кДж/(м ³ ·К)	Температуропроводность, м ² /с
1	ПХВ-1	69	20	0,036	1,716	118	0,30
2	ПХВ -1	170	20	0,060	1,350	230	0,26

Примечание: 1 – перед укладкой пенопласта на дамбе в 1984 г.; 2 – после 40 лет эксплуатации в 2024 г.
Note: 1 – before the foam insulation was laid on the dyke in 1984; 2 – after 40 years of service in 2024.

сти пенопласта ПХВ-1 в качестве грунтового теплоизоляционного слоя в климатических условиях Якутии.

Заключение

Проведен уникальный эксперимент по исследованию теплофизических свойств пенопласта ПХВ-1, находившегося в течение 40 лет в качестве теплоизоляционного материала на гребне грунтовой дамбы в Якутске. Исследования показали, что за 40 лет теплоизоляционные свойства пенопласта ПХВ-1 изменились незначительно, что говорит о достаточно высокой надежности и долговечности высокоэффективного теплоизоляционного материала для условий Якутии. Это позволяет сделать вывод о том, что более современные теплоизоляционные материалы, применяемые для сохранения мерзлого состояния грунтовых оснований и создания мерзлотных завес, теоретически могут иметь длительный срок службы (более 50 лет).

Список литературы / References

1. Алексеева О.И. Экспериментальные исследования замораживающей системы. В кн.: Климовский И.В., Кузьмин Г.П. (ред.) *Исследования мерзлых толщ и криогенных явлений*. Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения СО АН СССР; 1988. С.101–108.
Alekseeva O.I. Experimental studies of the freezing system. In: Klimovsky I.V., Kuzmin G.P. (eds.) *Studies of frozen ground and cryogenic phenomena*. Yakutsk: Publishing House of the Permafrost Institute SB USSR Academy of Sciences; 1988, pp. 101–108. (In Russ.)
2. Алексеева О.И. *Инженерные сооружения на мерзлых основаниях. Учебное пособие*. Якутск: Изд-во ФГБУН Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН; 2022. 153 с.
Alekseeva O.I. *Engineering structures on frozen foundation soils: textbook*. Yakutsk: Melnikov Permafrost Institute SB RAS; 2022. 153 p. (In Russ.)
3. Алексеева О.И. *Сезоннодействующие охлаждающие устройства (СОУ) для мерзлых оснований: аналити-*

ческий обзор. Якутск: ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН; 2024. 152 с.
Alekseeva O.I. *Seasonally operating devices (SOD) for frozen foundation soils: Analytical review*. Yakutsk: Melnikov Permafrost Institute SB RAS; 2024. 82 p. (In Russ.)
4. Павлов А.В. *Расчет и регулирование мерзлотного режима почвы*. Новосибирск: Наука; 1980. 240 с.
Pavlov A.V. *Calculation and regulation of the permafrost regime of the soil*. Novosibirsk: Nauka; 1980. 240 p. (In Russ.)
5. Перльштейн Г.З. *Водно-тепловая мелиорация мерзлых пород на северо-востоке СССР*. Новосибирск: Наука; 1979. 304 с.
Perlshstein G.Z. *Hydrothermal reclamation of permafrost in the northeast of the USSR*. Novosibirsk: Nauka; 1979. 304 p. (In Russ.)
6. Кацнельсон Н.Ю., Балаев Г.А. *Пластические массы*. Л.: Химия; 1978. 383 с.
Katsnelson N.Yu., Balaev G.A. *Plastics*. Leningrad: Khimya Publ.; 1978. 383 p. (In Russ.)
7. Шамаева А.П., Тимошенко А.Г. Теплофизические свойства пеноуретана марки «Рипор-12 ТН». В кн.: Иванов Н.С. и др. (ред.) *Тепловая защита инженерных сооружений и коммуникаций Крайнего Севера*. Якутск: ЯГУ; 1980. С.172–177.
Shamaeva A.P., Timoshenko A.G. Thermophysical properties of the “Ripor-12 TN” brand polyurethane foam. In: Ivanov N.S., et al. (eds.) *Thermal protection of engineering structures and utilities in the Far North*. Yakutsk: Yakut State University; 1980, pp. 172–177. (In Russ.)
8. Алексеева О.И. Исследование температурного режима низконапорных мерзлых плотин при совместном использовании термосифонов и пенопластовой теплоизоляции. В кн.: *Инженерно-геологические проблемы Забайкалья*. Чита; 1987. С. 99.
Alekseeva O.I. Investigation of the temperature regime of low-head frozen dams using thermosyphons and foam insulation in combination. In: *Engineering and Geological Problems of Transbaikalia*. Chita; 1987, p. 99. (In Russ.)
9. Чжан Р.В. Современное представление о работе грунтовых плотин среднего и низкого напоров в криолитозоне в условиях потепления климата. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2019;24(1):52–66. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-1-52-66>
Zhang R.V. Current understanding of the performance of medium and small embankment dams on permafrost in a warming climate. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2019;24(1): 52–66. (In Russ.) [https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-1-](https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-1-52-66)

10. Чжан Р.В., Якимов А.А., Чжан А.А., Заболотник П.С. К оценке устойчивости ограждающей дамбы г. Якутск. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(1):56–67. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-56-67>
- Zhang R.V., Yakimov A.A., Zhang A.A., Zabolotnik P.S. Assessment of flood-control dam stability in Yakutsk (Russia). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(1):56–67. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-56-67>
11. Герасимов А.С. Золотарь А.И. Устройство теплоизоляции, исключающей сезонное оттаивание грунтов и фундаментов. В кн.: *Конструкции и фундаменты зданий для Арктики*. Л.; 1974. С. 59–64.
- Gerasimov A.S., Zolotarev A.I. Installation of thermal insulation preventing seasonal thawing of soils and foundations. In: *Constructions and foundations of buildings for the Arctic*. Leningrad; 1974, pp. 59–64. (In Russ.)
12. Галкин А.Ф., Железняк М.Н., Жирков А.Ф., Балута В.И. Геотермический критерий оценки устойчивости многолетнемерзлых пород слоя годовых теплооборотов. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(4):543–552. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-543-552>
- Galkin A.F., Zheleznyak M.N., Zhirkov A.F., Baluta V.I. Geothermal criterion for assessing the stability of frozen soils in seasonally active permafrost. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(4):543–552. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-543-552>
13. Чжан Р.В., Павлова Н.А., Огонеров В.В. и др. Инженерное освоение низких пойм рек криолитозоны под гражданское строительство: опыт, проблемы, перспективы. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2020;25(2):89–97. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-2-7>
- Zhang R.V., Pavlova N.A., Ogonerov V.V., et al. Civil construction on low floodplains in permafrost regions: experience, problems, prospects. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2020;25(2):89–97. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-2-7>
14. Железняк М.Н., Литовко А.В., Жирков А.Ф. и др. Организация мониторинговых площадок на автодорогах в криолитозоне. *Дороги России XXI века: общественно-публицистический, научно-технический журнал*. 2022;129(3):70–75.
- Zheleznyak M.N., Litovko A.V., Zhirkov A.F., et al. Establishment of monitoring sites on highways in the permafrost zone. *Roads of Russia in the 21st Century: Socio-Political and Scientific-Technical Journal*. 2022;129(3):70–75. (In Russ.)
15. Патент № 2795153 Российская Федерация, МПК G01W 1/00 (2006.01); E02D 1/00 (2006.01). Способ геокриологического мониторинга и оценки состояния автомобильных дорог в криолитозоне : №2021139196 : заявл. 28.12.2021 : опубл. 28.04.2023 / А. В. Литовко, А. Ф. Жирков, И. И. Сыромятников, М. Н. Железняк ; патентообладатель ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН. 7 с.
- Patent No. 2795153 Russian Federation, IPC G01W 1/00 (2006.01); E02D 1/00 (2006.01). A method of geocryological monitoring and condition assessment of the roads in the permafrost zone: No. 2021139196, registered 28.12.2021; published 28.04.2023 / A. V. Litovko, A. F. Zhirkov, I. I. Syromyatnikov, M. N. Zheleznyak; patent holder Melnikov Permafrost Institute SB RAS. 7 p.
16. Экструзионный пенополистирол «ПЕНОПЛЭКС» Режим доступа: <https://www.penoplex.ru/lib/stati/teploizolyatsiya-fundamentov-na-vechnomerzlykh-gruntakh/>.
- Extruded polystyrene foam “PENOPLEX” Available at: <https://www.penoplex.ru/lib/stati/teploizolyatsiya-fundamentov-na-vechnomerzlykh-gruntakh/>.
17. Применение экструзионных пенополистиролов в дорожном строительстве в зоне вечной мерзлоты. Режим доступа: <https://rapex-org.ru/images/>
- Application of extruded polystyrene foam in road construction in permafrost zones. Available at: <https://rapex-org.ru/images/>
18. Звездов А.А. Эффективность применения экструзионного пенополистирола при зимнем бетонировании методом термоса. В кн.: *Актуальные проблемы и перспективы развития геокриологии: Материалы VIII Всероссийского научного молодежного геокриологического форума с международным участием, посвященного 125-летию и 115-летию ученых-мерзлотоведов Николая Александровича Цытовича и Петра Филимоновича Швецова, г. Мирный, 25 июня – 03 июля 2025 г.* С. 21–24.
- Zvezdov A.A. Effectiveness of extruded polystyrene foam in winter concreting using the thermos method. In: *Current issues and prospects of geocryology development: proceedings of the 8th All-Russian Scientific Youth Geocryological Forum with international participation, dedicated to the 125th and 115th anniversaries of permafrost scientists Nikolai A. Tsytovich and Petr F. Shvetsov, Mirny, June 25 – July 3, 2025*, pp. 21–24. (In Russ.)
19. Галкин А.Ф., Железняк М.Н., Жирков А.Ф. и др. Экономическая эффективность использования новых теплоизоляционных материалов в холодных регионах. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(3):404–415. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-404-415>
- Galkin A.F., Zheleznyak M.N., Zhirkov A.F., et al. The economic efficiency of using new thermal insulation materials in cold climate. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(3):404–415. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-404-415>
20. Большев К.Н., Алексеев А.А., Иванов В.А. и др. Измерительные комплексы для натурных экспериментов. Методики и результаты. *Приборы*. 2020;245(11):30–37.
- Bolshev K.N., Alekseev A.A., Ivanov V.A., et al. Measuring complexes for field experiments. Methods and results. *Pribory*. 2020;245(11):30–37. (In Russ.)

Об авторах

АЛЕКСЕЕВА Ольга Ивановна, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-3721-9204>, ResearcherID: V-5829-2018, Scopus Author ID: 17343442100, SPIN: 2136-9939, e-mail: o.i.alekseeva@mpi.ysn.ru

БОЛЬШЕВ Константин Николаевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-6348-962X>, ResearcherID: ABH-5088-2020, Scopus Author ID: 55877388400, SPIN: 6435-1792, e-mail: k.bolshev@mail.ru

ЛИТОВКО Андрей Владимирович, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-2874-4576>, Scopus Author ID: 56966735000, SPIN: 6522-8912, e-mail: lav_84@mail.ru

Вклад авторов

Алексеева О.И. – разработка концепции, методология, проведение исследования, редактирование рукописи; **Большев К.Н.** – проведение исследования, верификация данных, проведение статистического анализа; **Литовко А.В.** – проведение исследования, верификация данных, визуализация

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

ALEKSEEVA, Olga Ivanovna, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-3721-9204>, ResearcherID: V-5829-2018, Scopus Author ID: 17343442100, SPIN: 2136-9939, e-mail: o.i.alekseeva@mpi.ysn.ru

BOLSHEV, Konstantin Nikolaevich, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-6348-962X>, ResearcherID: ABH-5088-2020, Scopus Author ID: 55877388400, SPIN: 6435-1792, e-mail: k.bolshev@mail.ru

LITOVKO, Andrey Vladimirovich, Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-2874-4576>, Scopus Author ID: 56966735000, SPIN: 6522-8912, e-mail: lav_84@mail.ru

Authors' contribution

Alekseeva O.I. – conceptualization, methodology, investigation, writing – review & editing; **Bolshev K.N.** – investigation, validation, formal analysis; **Litovko A.V.** – investigation, validation, visualization

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 10.09.2025

Поступила после рецензирования / Revised 12.11.2025

Принята к публикации / Accepted 02.12.2025

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Экология

УДК 581.522.62:581.141(571.56)

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-618-629>



Оригинальная статья

Дальность разлета семян анемохорных деревьев Якутии

А. П. Исаев[✉], Л. П. Габышева, И. И. Чикидов

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

[✉]alex_isaev@mail.ru

Аннотация

Процесс естественного восстановления древесной растительности на нарушенных лесных территориях во многом зависит от обеспеченности нарушенных площадей семенным материалом, выраженности частоты семеношения (плодоношения) и успешности распространения семян. В связи с этим весьма актуально изучение дальности разлета семян основных древесных пород как одного из важнейших факторов лесовозобновления. В статье приведены результаты изучения полета семян основных анемохорных деревьев Якутии – лиственницы, сосны и березы. Экспериментальные данные получены в лабораторных условиях запуском семян с высоты 3,6 м в идеальных безветренных условиях. Замерены скорости парашютирования семян, на основе чего выведены коэффициенты полетных качеств семян сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L., лиственниц Гмелина *Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr и Каяндера *L. cajanderi* Mayr, березы повислой или плосколистной *Betula pendula* ssp. *platyphylla* Sukacz. (в дальнейшем применен синоним «береза плосколистная»), собранных в разное время в разных районах Центральной Якутии. Установлено, что формула, предложенная для анемохорных хвойных, справедлива для всех видов анемохорных пород деревьев, семена которых оснащены крылатками и являются летучими. В эксперименте наименее летучими у изученных пород оказались семена лиственницы, затем идут семена сосны и березы (коэффициенты полетных качеств $1,01 \pm 0,03$ у лиственницы, $0,61 \pm 0,01$ у сосны и $0,50 \pm 0,01$ м/с у березы). Рассчитано процентное соотношение семян анемохорных хвойных, «отлетающих» на разное расстояние от семенного дерева при разной скорости ветра. На основе проведенных расчетов составлены таблицы распространения основной массы и максимальной дальности разлета семян основных древесных пород Якутии с различной высоты (от 10 до 30 м) и при ветре разной скорости. Разработанные таблицы позволяют практически для каждого лесного выдела объективно оценить дальность разлета семян, более точно определить ширину и направление лесосеки с учетом конкретных условий, грамотно подобрать лесохозяйственные мероприятия.

Ключевые слова: анемохория, Якутия, распространение семян древесных растений, полетные качества, дальность разлета семян

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки России по проектам «Растительный покров криолитозоны таежной Якутии: биоразнообразие, средообразующие функции, охрана и рациональное использование (код научной темы: FWRS-2021-0023; № AAAA-A21-121012190038-0) и с применением оборудования ЦКП ФИЦ «ЯНЦ СО РАН» (№ 13. ЦКП.21.0016).

Для цитирования: Исаев А.П., Габышева Л.П., Чикидов И.И. Дальность разлета семян анемохорных деревьев Якутии. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(4):618–629. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-618-629>

Dispersal distance of anemochorous tree seeds in Yakutia

Alexander P. Isaev✉, Lyudmila P. Gabysheva, Ivan I. Chikidov

Institute for Biological Problems of Cryolithozone,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation
✉alex_isaev@mail.ru

Abstract

This article presents the results of an experimental study on the flight characteristics of seeds from the primary anemochorous tree species of Yakutia—larch, pine, and birch. Experiments were conducted under controlled laboratory conditions, where seeds were released from a height of 3.6 meters in calm, windless conditions. The parachuting speeds of the seeds were measured, enabling the calculation of flight performance coefficients for seeds of *Pinus sylvestris*, *Larix gmelinii* and *Larix cajanderi*, and *Betula pendula* ssp. *platyphylla* Sukacz., collected at various times and locations across Central Yakutia. The study confirms that the derived formula for anemochorous conifers applies to all tree species possessing winged, flight-capable seeds. Furthermore, the seeds with the lowest flight performance among the studied species were those of larch, followed by pine and birch (flight performance coefficients of 1.01 ± 0.03 for larch, 0.61 ± 0.01 for pine, and 0.50 ± 0.01 m/s for birch). The percentage of anemochorous conifer seeds dispersing at various distances from the parent tree under different wind speeds was calculated. Based on these calculations, tables were compiled showing the distribution of the majority of seeds and the maximum seed dispersal distances for the main tree species of Yakutia from different release heights (ranging from 10 to 30 meters) and at varying wind speeds. Therefore, the compiled data provide a basis for the objective assessment of seed dispersal ranges for nearly any forest stand. As a result, this facilitates more accurate planning of felling area dimensions and orientation according to site-specific conditions and supports the informed selection of appropriate silvicultural measures.

Keywords: anemochory, Yakutia, seed dispersal, flight characteristics, seed range

Funding. This study was conducted within the framework of the state assignment from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the project “Vegetation cover of the cryolithozone of the taiga Yakutia: biodiversity, habitat-forming functions, protection, and rational use” (theme No. FWRS-2021-0023, reg. No. AAAA-A21-121012190038-0), using equipment from the Core Shared Research Facilities of the Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences” (No. 13. CSRF.21.0016).

For citation: Isaev A.P., Gabysheva L.P., Chikidov I.I. Dispersal distance of anemochorous tree seeds in Yakutia. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(4):618–629. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-618-629>

Введение

Как известно, успех естественного восстановления древесной растительности на нарушенных лесных территориях во многом зависит от частоты семеношения (плодоношения) и успешности распространения семян [1–4]. Изучению разных аспектов семеношения древесных пород Якутии посвящены работы зоологической тематики [5, 6], специализированные статьи о биологии и экологии лиственницы [7–12], сосны [9, 13] и другие публикации [14, 15].

Установлено, что в условиях Якутии семеношение у сосны и березы бывает почти ежегодно, но разной степени урожайности. В то же время у лиственниц отмечаются годы практически полного отсутствия семеношения на больших площадях [6, 8, 14].

К важным составляющим лесовозобновления на нарушенных территориях относится их обеспеченность семенным материалом. В связи с этим весьма актуальны работы по изучению разлета семян основных древесных пород. Изучение процессов диссеминации древесных пород в основном проводилось в отношении к плодоношению (семеношению) и способам распространения семян [16–18]. Изучалась также дальность разлета семян анемохорных древесных пород в естественных условиях [19–21], в том числе и на территории Якутии [7, 22].

Оптимальные расстояния разлета основной массы семян у хвойных следующие: до 100 м у ели, до 73 м у сосны и до 50 у лиственницы [21]. Близкие результаты сообщает И.С. Мелехов [1] – оптимальный разлет семян ели, как и сосны, про-

исходит на удалении 50–70 м, за эти пределы попадает лишь небольшая часть семян. В Якутии максимальное количество самосева лиственницы на вырубках и гарях среднетаежной подзоны Якутии приходится на расстояния 50–80 (100) м от опушки леса [15, 23].

Разработке математических моделей, описывающих разлет семян некоторых видов деревьев, посвящены работы А.К. Денисова [19], С.А. Денисова [17], А.П. Исаева, Н.М. Ситникова [9], Т.А. Комаровой [18], О.И. Евстигнеева и др. [20], С.Н. Орловского и др. [24].

А.К. и С.А. Денисовыми [17] изучены аэродинамические свойства семян сосны, выявлена зависимость между весом семени и скоростью его парашютирования, установлено, что семена, имеющие большую скорость падения/парашютирования, отлетают от материнского дерева на меньшее расстояние. Также авторами экспериментально установлен факт, что падение/парашютирование семян сосны представляет образец парашютирования и подчиняется законам равномерного движения.

Попытка теоретически рассчитать траекторию и дальность разлета семян лиственницы сибирской приведена в статье С.Н. Орловского и др. [24], однако, как отмечают сами разработчики, расчеты проведены без учета парусности семян лиственницы, в связи с чем авторы констатируют необходимость в экспериментальном исследовании в лабораторных условиях. К тому же авторы в расчетах по существу исходили из того, что парашютирование семян лиственницы сибирской представляет собой равноускоренное движение, в связи с чем учитывали показатель ускорения свободного падения.

В представленной работе исследована дальность разлета семян основных анемохорных деревьев Якутии, проведен эксперимент по полету семян и вычислена расчетная дальность разлета основной массы семян древесных пород при разной скорости ветра.

Материалы и методы

А.П. Исаевым, Н.М. Ситниковым [9] и в ряде других работ якутских авторов [10, 25, 26] на основе принятия постулата о равномерности падения/парашютирования семян, оснащенных крылатками, была предложена и использовалась довольно простая методика расчета дальности разлета семян сосны и лиственницы основных хвойных пород Якутии. Впрочем, скорость вер-

тикального движения семени на разных отрезках падения практически одинакова у всех деревьев, семена которых оснащены крылатками.

По мере парашютирования семени лиственницы и сосны крылатка способствует его раскручиванию по вертикали, гасит ускорение, причем если на начальном отрезке пути положение семени практически вертикальное, то в последующем по мере раскручивания быстро переходит в почти горизонтальное (рис. 1). В вертикальном движении семени можно выделить три основные фазы полета. На начальном отрезке (0–20 см) оно представляет собой свободное падение, затем по мере раскручивания семена находятся в процессе ускоряющейся ротации почти в горизонтальном положении, а падение переходит в парашютирование – движение становится практически равномерным.

Предложенная в более ранних наших работах формула для вычисления дальности разлета семян учитывает полетные качества семян (K_p), среднюю высоту древостоя (H , м) и скорость господствующих во время массового вылета семян ветров (v_w , м/с). Коэффициент полетных качеств (K_p) семян вычисляется как обратная величина скорости парашютирования семян. Таким образом, дальность разлета вычисляется по экспериментально установленной скорости падения/парашютирования семени, пущенного с определенной высоты в «идеальной» воздушной среде (внутри помещения).

Экспериментальные данные получены в лабораторных условиях запуском семян с высоты 3,6 м в идеальных безветренных условиях. В экспериментах по определению полетных качеств семян были использованы семена лиственницы Каяндера, собранные в лесах разных районов Якутии (Центральная и Северная Якутия), лиственницы Гмелина (Западная Якутия), сосны обыкновенной (Центральная и Северная Якутия), березы плосколистной (Центральная Якутия).

Результаты и обсуждение

В лабораторных условиях экспериментально замерены скорости парашютирования семян (v_p , м/с), на основе чего выведены коэффициенты полетных качеств семян сосны обыкновенной и лиственниц Гмелина и Каяндера, собранных в разное время в разных районах Якутии (табл. 1). Формула, используемая для анемохорных хвойных, справедлива для всех видов анемохорных пород деревьев, семена которых оснащены крылатками и являются летучими. В Якутии

это также лиственница сибирская, ель сибирская, ель аянская и пихта сибирская. С определенными оговорками она справедлива и к «якутским» видам берез (березы пушистая, плосколистная и шерстистая). Поэтому, несмотря на иной характер полета (не парашютирование семян, а их планирование), проведен расчет и по скорости падения семян березы плосколистной. Экспериментальные измерения скорости падения семян березы показали, что этот процесс, как и у исследованных хвойных пород, представляет собой почти равномерное движение, подчиняющееся классической формуле, т. е. пройденный путь (S , м) равен произведению скорости движения (v , м/с) и времени в пути (t , с).

В табл. 2 для сравнения приведены скорости парения и показатели полетных качеств семян сосны и березы бородавчатой (*Betula pendula* Roth) из Марий Эл [17, 19]. Если скорости парашютирования и коэффициенты полетных качеств семян березы из этих отдаленных друг от друга регионов практически совпадают, то по сосне данные заметно расходятся, что очевидно зависит от морфологических различий семян, собранных в разных географических районах.

Ранее было выявлено, что значение коэффициента полетных качеств (K_f) зависит от размера и веса семян, размера крылатки (табл. 3), а эти показатели, в свою очередь, зависят от вида дерева, его местопрорастания, морфометрических качеств семян урожая конкретного года [10, 27]. В то же время показатель полетных качеств семян в большей степени зависит от вида древесной породы и географически обусловленных морфологических свойств семян, в связи с чем его можно рассматривать как характерную для того или иного вида географически обусловленную константу. Парусность семян обеспечивается наличием у них широкого крыла, площадь которого, несомненно, влияет на полетные качества диаспоры. Не менее важен такой показатель как вес семени, хорошо коррелирующий с коэффициентом полетных качеств семян.

Основные древесные породы Якутии (лиственница, сосна и береза) имеют анемохорный способ распространения семян, и ветер как основной фактор распространения семян в лесах Якутии играет важную роль. Дальность распространения семян зависит также от формы крылатки семени. Семена сосны и лиственницы относятся к планирующим авторотирующим эванемохорам. Крылатки у них одиночные, резко асимметричны относительно центра тяжести. Береза же имеет

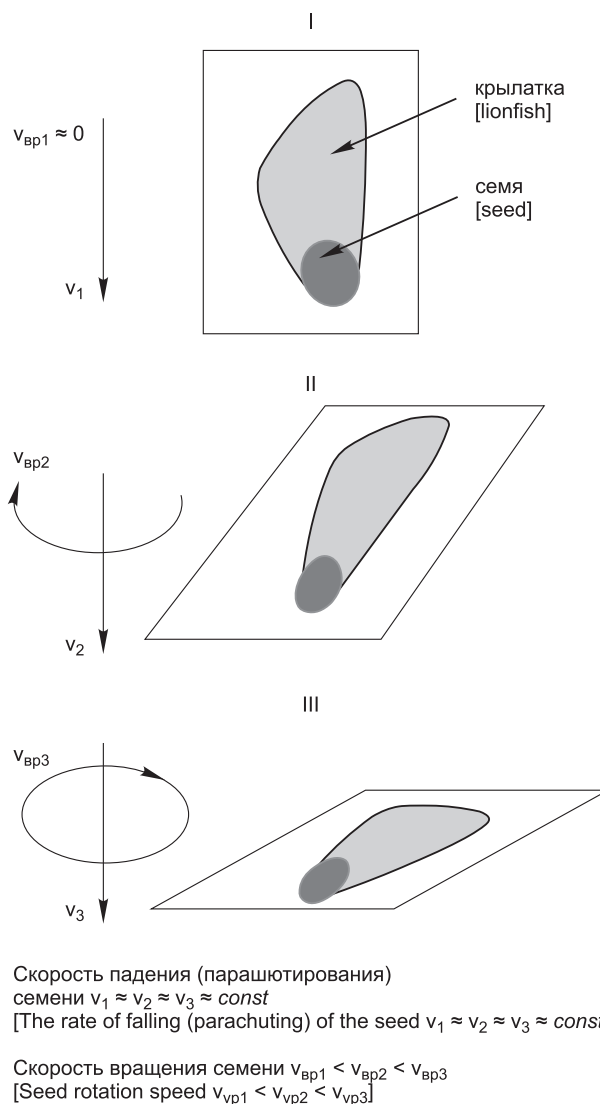


Рис. 1. Изменение характера полета/парашютирования семян анемохорных деревьев.

I–III – фазы полета: I – свободное падение, менее 1 с; II – переходная от падения к парашютированию, менее 1 с; III – парашютирование, оставшееся время

Fig. 1. Changes in the flight/parachuting mechanisms of anemochorous tree seeds

Phase I (Free Fall): Duration < 1 second. Phase II (Transition): The shift from free fall to parachuting descent. Duration < 1 second. Phase III (Parachuting): Stable descent phase, comprising the remainder of the flight time

два симметричных крыла [16], относится к видам с высокими аэродинамическими качествами [20].

Из табл. 4 видно, что по средней скорости парашютирования наименее летучи у изученных пород семена лиственницы, затем идут семена сосны и березы ($1,01 \pm 0,03$ у лиственницы, $0,61 \pm 0,01$ у сосны и $0,50 \pm 0,01$ м/с у березы). Такая же ситуация по максимальной скорости.

Таблица 1

Скорость парашютирования (v , м/с) и коэффициент полетных качеств (K_f) семян основных древесных пород Якутии

Table 1

Parachuting speed (v , m/s) and flight quality coefficient (K_f) of seeds from major tree species in Yakutia

Год	Место сбора семян	Древесные породы								Источник информации
		лиственница Каяндера		лиственница Гмелина		сосна обыкновенная		береза плосколистная		
		<i>v</i>	<i>K_f</i>	<i>v</i>	<i>K_f</i>	<i>v</i>	<i>K_f</i>	<i>v</i>	<i>K_f</i>	
Центральная Якутия										
1990	Усть-Майский район	0,9	1,1	–	–	–	–	–	–	[9]
1991	г. Якутск	0,8	1,3	–	–	0,58	1,72	–	–	[9]
2000	г. Якутск	1,0	1,0	–	–	–	–	–	–	[26]
2000	Таттинский район	0,9	1,1	–	–	–	–	–	–	[10]
2000	Чурапчинский район	1,0	1,1	–	–	–	–	–	–	[10]
2004	г. Якутск	0,9	1,1	–	–	–	–	–	–	[10]
2012	г. Якутск	1,0	1,0	–	–	–	–	–	–	[26]
2012	Намский район	1,2	0,8	–	–	–	–	–	–	[26]
2024	г. Якутск	1,0	1,0	–	–	0,6	1,6	0,5	2,0	Неопубликованные данные
Северная Якутия										
2002	Булунский район, бассейн р. Молодо	–	–	0,8	1,2	–	–	–	–	[10]
2009	Булунский район, остров Тит-Ары	0,8	1,3	–	–	–	–	–	–	[14]
2009	Булунский район, Хараулахский хребет	0,9	1,1	–	–	–	–	–	–	[14]
2012	Жиганский район	–	–	–	–	0,5	1,9	–	–	[25]
Западная Якутия										
2003	г. Мирный	–	–	0,8	1,3	–	–	–	–	[14]
	в среднем	0,9	1,1	0,8	1,2	0,6	1,7	0,5	2,0	

Таблица 2

Скорость парашютирования (v , м/с) и коэффициенты полетных качеств (K) семян сосны обыкновенной и березы бородавчатой в Марий Эл

Table 2

Parachuting speed (v , m/s) and flight quality coefficients (K) of Scots pine and warty birch seeds in Marii El

Год	Древесная порода				Источник информации
	Сосна обыкновенная		Береза бородавчатая		
	v	K_f^*	v	K_f^*	
1971	0,8–2,6	0,4–1,2	—	—	[17]
1973	—	—	0,3–0,7	1,3–2,9	[19]

* Вычислено по данным, приведенным в статьях Денисова А.К., Денисова С.А. [17], Денисова А.К. и др. [19].

* The calculations were performed using the data presented in the studies by A.K. Denisov, S.A. Denisov [17], and A.K. Denisov, et al. [19].

Важны для обеспечения разноса семян сроки вылета семян. У лиственницы Каяндера в Центральной Якутии это происходит во второй–третьей

декаде августа. Лишь в отдельные дождливые годы сроки могут быть смещены на более позднее время. В других районах Якутии семена у ли-

Таблица 3

Влияние морфометрических показателей семян лиственницы на их полетные качества

Table 3

The influence of morphometric parameters of larch seeds on their flight characteristics

Характеристика семян	Центральная Якутия		Северная Якутия	Западная Якутия	r – коэффициент корреляции с K_f
	Чычымах	Якутск	Молодо	Мирный	
Коэффициент полетных качеств	1,08	1,29	1,20	1,27	
Площадь крыла, мм ²	20,33	22,00	15,20	21,07	0,26
Вес 1000 семян, г	2,60	2,00	1,80	1,50	–0,80
Вес / площадь крыла, г/мм ²	0,13	0,09	0,12	0,07	–0,85

Таблица 4

Скорость полета семян основных древесных пород

Table 4

The flight speed of seeds from the major tree species

Показатель		Древесная порода		
		лиственница Каяндера	сосна обыкновенная	береза плосколистная
Скорость полета (парашютирования) семян по породам	M±m, м/с	1,01±0,03	0,61±0,01	0,50±0,01
	Max, м/с	2,14	0,84	0,79
	Min, м/с	0,72	0,48	0,38
	σ	0,23	0,08	0,08
	V, %	22,8	13,0	16,4
Коэффициент полетных качеств (K_f)		0,99	1,63	2,00
в т.ч. плохо парящих семян		0,47	1,19	1,27
легко парящих семян		1,39	2,08	2,63

Таблица 5

Средняя скорость ветра в разных населенных пунктах Якутии по месяцам, м/с (среднее за 2015–2024 гг.), ([https://yandex.ru/pogoda/...](https://yandex.ru/pogoda/))

Table 5

Average wind speed in various localities of Yakutia by month, measured in meters per second (m/s), averaged over the period 2015-2024 (Source: [https://yandex.ru/pogoda/...](https://yandex.ru/pogoda/))

Населенный пункт	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Центральная Якутия												
г. Якутск	1,9	2,0	2,5	2,8	3,5	2,7	2,5	2,6	2,8	2,5	2,2	1,8
с. Чычымах	1,3	3,5	2,0	2,4	2,7	2,5	2,3	2,3	2,4	2,0	1,5	1,3
Западная Якутия												
г. Мирный	2,8	2,7	2,8	3,0	3,0	2,8	2,6	2,7	2,9	3,0	2,8	2,8
Северная Якутия												
пос. Кюсюр	3,2	3,1	3,2	3,8	3,9	3,9	3,9	3,8	3,6	3,4	3,1	3,1

ственницы Каяндера высыпаются преимущественно в начале–середине сентября. У сосны, березы, лиственниц Гмелина и сибирской ярко выраженных сроков вылета семян нет [5, 8]. Часто весь урожай сохраняется до будущей весны. Большая часть семян высыпается обычно: у бе-

резы – в марте–апреле, лиственниц Гмелина, сибирской и сосны обыкновенной – в июне следующего после созревания семян года.

В лесах среднетаежной и северотаежной подзона Якутии большую часть времени года господствует маловетренная погода (табл. 5). В июне,

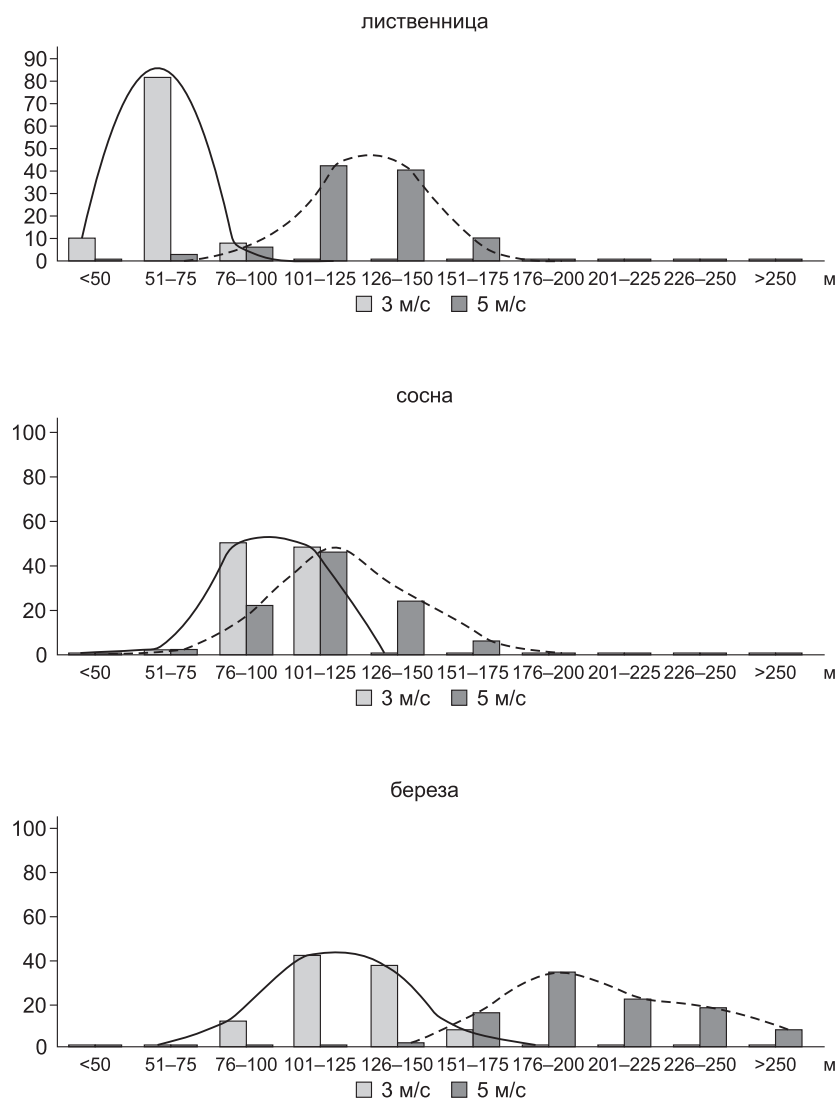


Рис. 2. Распределение семян (в процентах) по дальности разлета семян от деревьев основных лесообразующих пород Якутии при разной скорости ветра

Fig. 2. Distribution of seeds (percentage) by seed range from trees of the major forest-forming species in Yakutia at different wind speeds

когда преимущественно высыпаются семена у сосны обыкновенной и лиственницы Гмелина (г. Мирный), скорость ветра за последние 10 лет (2015–2024 гг.) составила в среднем 2,8 м/с. В августе, когда в Центральной Якутии происходит массовое высыпание у лиственницы Каяндера, этот показатель равен 2,3 (с. Чычымах) и 2,6 м/с (г. Якутск). В зимние месяцы, когда наблюдается разлет семян у березы, скорость ветра не превышает 3,5 м/с. Таким образом, вероятность ветра со скоростью выше 5 м/с в любой из периодов диссеминации изучаемых пород деревьев в условиях большей части Якутии близка к нулю.

Мы рассчитали процентное соотношение семян анемохорных хвойных, «отлетающих» на разное расстояние от семенного дерева при разной скорости ветра (табл. 6). У лиственницы при скорости ветра 3 м/с основная масса семян (90 %) выпадает в зоне 50–100 м от стены леса, у сосны 98 % семян долетает до 76–125 м. При скорости ветра 5 м/с – зона выпадения основной массы семян заметно отдалается – до 100–150 м у лиственницы и сосны.

Полученные расчетным путем данные вполне согласуются с материалами, изложенными в разных литературных источниках. Опыты, проведенные в северной и юго-западной Якутии с семено-

Таблица 6

Расчетная дальность разлета основной массы семян древесных пород при разной скорости ветра.
Окрестности г. Якутск

Table 6

The estimated dispersal distance for the bulk of seeds from tree species at different wind speeds.
Vicinity of Yakutsk

Скорость ветра, м/с	Средняя высота господствующего яруса древостоя, м										
	Лиственница Каяндера										
	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
1	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
2	20	24	28	32	36	40	44	48	52	55	59
3	30	36	42	48	54	59	65	71	77	83	89
4	40	48	55	63	71	79	87	95	103	111	119
5	50	59	69	79	89	99	109	119	129	139	149
6	59	71	83	95	107	119	131	143	155	166	178
7	69	83	97	111	125	139	153	166	180	194	208
8	79	95	111	127	143	159	174	190	206	222	238
9	89	107	125	143	161	178	196	214	232	250	268
10	99	119	139	159	178	198	218	238	258	277	297
	Сосна обыкновенная										
1	16	20	23	26	29	33	36	39	42	46	49
2	33	39	46	52	59	65	72	78	85	91	98
3	49	59	68	78	88	98	107	117	127	137	147
4	65	78	91	104	117	130	143	156	169	182	195
5	81	98	114	130	147	163	179	195	212	228	244
6	98	117	137	156	176	195	215	235	254	274	293
7	114	137	160	182	205	228	251	274	296	319	342
8	130	156	182	208	235	261	287	313	339	365	391
9	147	176	205	235	264	293	322	352	381	410	440
10	163	195	228	261	293	326	358	391	423	456	489
	Береза плосколистная										
1	20	24	20	32	36	40	44	48	52	56	60
2	40	48	56	64	72	80	88	96	104	112	120
3	60	72	84	96	108	120	132	144	156	168	180
4	80	96	112	128	144	160	176	192	208	224	240
5	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300
6	120	144	168	192	216	240	264	288	312	336	360
7	140	168	196	224	252	280	308	336	364	392	420
8	160	192	224	256	288	320	352	384	416	448	480
9	180	216	252	288	324	360	396	432	468	504	540
10	200	240	280	320	360	400	440	480	520	560	600

мерами, расставленными на разных расстояниях от стены леса [23], и пример удачно сложившихся условий изучения дальности разлета по выпавшему снегу [7] показали, что массовый разброс семян лиственницы приходится на удаление 35–60 (100) м от стены леса. Учет самосева сосны, ели и лиственницы, проведенный на забро-

шенной пашне в Олекминском районе (Н.С. Борисов, неопубликованные данные), показал, что основное количество самосева размещается на удалении 40–60 м от стены леса.

Заметно дальше распространяет свои семена береза (рис. 2). У нее 80 % всех семян отлетает на 100–150 м при скорости ветра 3 м/с, при ско-

Таблица 7

**Расчетная максимальная дальность разлета семян древесных пород
при разной скорости ветра. Окрестности г. Якутск**

Table 7

The estimated maximum seed dispersal distance for tree species at different wind speeds. Vicinity of Yakutsk

Скорость ветра, м/с	Средняя высота господствующего яруса древостоя, м										
	Лиственница Каяндера										
	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
1	14	17	19	22	25	28	31	33	36	39	42
2	28	33	39	44	50	56	61	67	72	78	83
3	42	50	58	67	75	83	92	100	108	117	125
4	56	67	78	89	100	111	122	133	145	156	167
5	70	83	97	111	125	139	153	167	181	195	209
6	83	100	117	133	150	167	183	200	217	234	250
7	97	117	136	156	175	195	214	234	253	272	292
8	111	133	156	178	200	222	245	267	289	311	334
9	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375
10	139	167	195	222	250	278	306	334	361	389	417
	Сосна обыкновенная										
1	21	20	23	26	29	33	36	39	42	46	49
2	33	39	46	52	59	65	72	78	85	91	98
3	49	59	68	78	88	98	107	117	127	137	147
4	65	78	91	104	117	130	143	156	169	182	195
5	81	98	114	130	147	163	179	195	212	228	244
6	98	117	137	156	176	195	215	235	254	274	293
7	114	137	160	182	205	228	251	274	296	319	342
8	130	156	182	208	235	261	287	313	339	365	391
9	147	176	205	235	264	293	322	352	381	410	440
10	163	195	228	261	293	326	358	391	423	456	489
	Береза плосколистная										
1	26	32	26	42	47	53	58	63	68	74	79
2	53	63	53	84	95	105	116	126	137	147	158
3	79	95	79	126	142	158	174	189	205	221	237
4	105	126	105	168	189	210	231	252	274	295	316
5	132	158	132	210	237	263	289	316	342	368	395
6	158	189	158	252	284	316	347	379	410	442	473
7	184	221	184	295	331	368	405	442	479	515	552
8	210	252	210	337	379	421	463	505	547	589	631
9	237	284	237	379	426	473	521	568	615	663	710
10	263	316	263	421	473	526	579	631	684	736	789

рости ветра 5 м/с – зона выпадения основной массы семян заметно отдалится до 200–250 м. Исследования подтвердили, что береза является видом с высокими аэродинамическими качествами диаспор [20] и показывает наибольшее расстояние разлета семян. Исследование с помощью семеномеров показало, что основная масса семян этой древесной породы выпадает на

расстоянии до 125–160 м от леса, а значительное их количество обнаруживается и на удалении 350–375 м. Дальность разлета основной массы семян березы определена в 200 м. Исходя из скорости парашютирования семян С.А. Денисов [28] расчетным путем определил, что на территории Марий Эл основная часть семян березы в спелых древостоях высотой 24 м при

средней скорости ветра 3,5 м/с распространяется на расстояние 250 м от стены леса, а березы пушистой – до 175 м. В то же время порывами ветра до 15 м/с семена березы повислой могут разноситься на расстояние до 1 км, а березы пушистой – до 750 м. Б.Е. Чижев и др. [29] на основании плотности самосева березы при разном удалении от стен леса на заброшенной пашне установил, что семена рассеиваются на расстоянии до 125 м, дальше этой величины семена не разлетаются.

На основе проведенных расчетов составлены таблицы распространения основной массы семян (см. табл. 6) и максимальной дальности разлета семян основных древесных пород Якутии с различной высоты (от 10 до 30 м) и при ветре разной скорости (табл. 7). С учетом того, что при высоких скоростях ветра аэродинамические свойства семян нарушаются, расчетная дальность разлета семян при скорости ветра выше 10 м/с не оценена.

Стандартные таблицы для расчета расстояния разлета семян могут быть использованы в практике лесного хозяйства и будут научным обоснованием при проведении лесохозяйственных мероприятий, в частности, лесовозобновительных работ на нарушенных территориях Якутии [30, 31] и сопредельных регионов [32–34].

Заключение

Таким образом, показано, что предложенная формула для вычисления дальности разлета семян, учитывающая полетные качества семян, среднюю высоту древостоя и скорость господствующих во время массового вылета семян ветров, вполне объективно описывает характер разлета семян большинства анемохорных деревьев Якутии. В экспериментах по определению полетных качеств семян лиственницы Каяндера, лиственницы Гмелина, сосны обыкновенной, березы плосколистной показано, что наименее летучи из изученных пород семена лиственницы, затем идут семена сосны и березы. Вычисленные расчетным методом для основных древесных пород Якутии расстояния разлета основной массы семян и максимальной дальности разлета семян с различной высоты (от 10 до 30 м) и при ветре разной скорости позволяют разработать стандартные таблицы, использование которых позволит практически для каждого лесного выдела объективно оценить дальность разлета семян, более точно определить ширину и направление лесосеки с учетом конкретных условий, грамотно подобрать те или иные лесохозяйственные мероприятия.

Список литературы / References

1. Мелехов И.С. *Лесоведение: Учебник для вузов*. М.: Лесная промышленность; 1980. 408 с.
2. Melekhov I.S. *Forestry: Textbook for universities*. Moscow: Lesnaya promyshlennost'; 1980. 408 p. (In Russ.)
3. Rodin A.P., Rodin S.A., Kalashnikova E.A. и др. *Лесные культуры. Учебник*. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана; 2020. 210 с.
4. Rodin A.R., Rodin S.A., Kalashnikova E.A., et al. *Forest crops. Textbook*. Moscow: Bauman Moscow State Technical University; 2020. 210 p. (In Russ.)
5. Луферов А.О. Распространение естественного возобновления сосны обыкновенной в зависимости от расстояния до потенциальных источников обсеменения. *Труды БГТУ. Сер. I, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов*. 2022;1(252):26–35.
6. Luferov A.O. Distribution of natural regeneration of Pinus Sylvestris L. depending on the distance to potential seed sources. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*. 2022;1(252):26–35. (In Russ.)
7. Егоров О.В. *Экология и промысел якутской белки*. М.: Изд-во АН СССР; 1961. 266 с.
8. Egorov O.V. *Ecology and fishing of the Yakut squirrel*. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1961. 266 p. (In Russ.)
9. Бельк В.И. Некоторые данные по плодоношению даурской лиственницы в Якутии. В кн.: *Лиственница. Т. 2. Сб. 34*. Красноярск; 1964. С. 144–147.
10. Belyk V.I. Some data on the fruiting of the Daur larch in Yakutia. In: *Larch. V. 2. Coll. 34*. Krasnoyarsk; 1964, pp. 144–147. (In Russ.)
11. Поздняков Л.К. *Даурская лиственница*. М.: Наука; 1975. 312 с.
12. Pozdnyakov L.K. *Daurian larch*. Moscow: Nauka; 1975. 312 p. (In Russ.)
13. Карпель Б.А., Медведева Н.С. *Плодоношение лиственницы даурской в Якутии*. Новосибирск: Наука; 1977. 118 с.
14. Karpel B.A., Medvedeva N.S. *Fruiting of Daurian larch in Yakutia*. Novosibirsk: Nauka; 1977. 118 p. (In Russ.)
15. Исаев А.П., Ситников Н.М. Определение дальности разлета семян лиственницы и сосны. В кн.: *Экология растительного мира Якутии: Материалы научно-практич. конференций молодых ученых*. Якутск; 1992. С. 23–24.
16. Isaev A.P., Sitnikov N.M. Determination of the flight distance of larch and pine seeds. In: *Ecology of the plant world of Yakutia: Materials of scientific and practical conferences of young scientists*. Yakutsk; 1992, pp. 23–24. (In Russ.)
17. Лыткина Л.П., Исаев А.П., Чикидов И.И. Дальность разлета семян лиственницы в лесах Якутии. *Наука и образование*. 2005;2:16–17.
18. Lytkina L.P., Isaev A.P., Chikidov I.I. The distance of dispersal of larch seeds in the forests of Yakutia. *Nauka i Obrazovanie*. 2005;2:16–17. (In Russ.)
19. Барченков А.П., Милютин Л.И., Исаев А.П. Изменчивость семян сибирских видов лиственницы. *Лесоведение*. 2007;2:65–69.
20. Barchenkov A.P., Milyutin L.I., Isaev A.P. Variability of seeds of Siberian larch species. *Lesovedenie*. 2007;2:65–69. (In Russ.)
21. Орешкова Н.В., Барченков А.П. Популяционно-генетическая изменчивость лиственницы Каяндера (Larix са-

- janderi Mayr) в Республике Саха Якутия). *Вестник СВНЦ ДВО РАН*. 2009;1:81–87.
- Oreshkova N.V., Barchenkov A.P. Population and genetic variability of Cayander larch (*Larix cajanderi* Mayr) in the Republic of Sakha Yakutia). *Bulletin of the North-East Science Center FEB RAS*. 2009;1:81–87. (In Russ.)
13. Санников С.Н., Абдуллина Д.С., Петрова И.В. и др. Репродуктивная изоляция и геогеографическая дифференциация популяций *Pinus sylvestris* L. в Якутии. В кн.: *Генетика, экология и география дендропопуляций и ценоэкосистем. Сборник научных трудов*. Екатеринбург: УрО РАН, 2010. С. 39–45.
- Sannikov S.N., Abdullina D.S., Petrova I.V., et al. Reproductive isolation and geogeographic differentiation of populations of *Pinus sylvestris* L. in Yakutia. In: *Genetics, ecology and geography of dendropopulations and cenoecosystems. Collection of scientific works*. Yekaterinburg: Ural Branch of the RAS; 2010, pp. 39–45. (In Russ.)
14. Исаев А.П. Естественная и антропогенная динамика лиственничных лесов криолитозоны (на примере Якутии): Автореф. дисс. ... докт. биол. наук. Якутск, 2011. 52 с.
- Isaev A.P. Natural and anthropogenic dynamics of larch forests of the cryolithozone (on the example of Yakutia): Abstr. ... Diss. Doct. Sci., Yakutsk. 2011. 52 p. (In Russ.)
15. Тимофеев П.А., Исаев А.П., Щербаков И.П. и др. *Леса среднетаежной подзоны Якутии*. Якутск: ЯНЦ СО РАН; 1994. 140 с.
- Timofeev P.A., Isaev A.P., Shcherbakov I.P. et al. *Forests of the middle-slope subzone of Yakutia*. Yakutsk: YaSC SB RAS; 1994. 140 p. (In Russ.)
16. Левина Р.Е. *Способы распространения плодов и семян*. М.: Изд-во Моск. университета; 1957. 360 с.
- Levina R.E. *Fruit and seed dispersal mechanisms*. Moscow: Publ. Moscow University; 1957. 360 p. (In Russ.)
17. Денисов А.К., Денисов С.А. Взаимосвязь аэродинамических и посевных свойств семян сосны и ее влияние на обсеменение вырубок. *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 1971;4:9–12.
- Denisov A.K., Denisov S.A. The relationship between aerodynamic and sowing properties of pine seeds and its influence on insemination of cuttings. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*. 1971;4:9–12. (In Russ.)
18. Комарова Т.А. Семенное возобновление растений на свежих гарях (леса Южного Сихотэ-Алиня). Владивосток: ДВНЦ АН СССР; 1986. 221 с.
- Komarova T.A. *Seed regeneration of plants on fresh fields (forests of Southern Sikhote-Alinya)*. Vladivostok: FESC AS USSR; 1986. 221 p. (In Russ.)
19. Денисов А.К., Денисов С.А., Кудрявцев Е.К. Анемохория берез пушистой и бородавчатой. *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 1973;3:6–9.
- Denisov A.K., Denisov S.A., Kudryavtsev E.K. Anemochoria of the fluffy and warty birch. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*. 1973;3:6–9. (In Russ.)
20. Евстигнеев О.И., Мурашев И.А., Коротков В.Н. Анемохория и дальность рассеивания семян деревьев восточноевропейских лесов. *Лесоведение*. 2017;1:45–52.
- Evstigneev O.I., Murashev I.A., Korotkov V.N. Anemochory and dispersal distance of tree seeds of Eastern European forests. *Lesovedenie*. 2017;1:45–52. (In Russ.)
21. Мельник Л.П., Голубенкова Н.В. Дальность диссеминации лиственницы европейской в условиях лесной среды. В кн.: *Аграрная наука – сельскому хозяйству. Сборник материалов XVII Международной научно-практической конференции*. Барнаул; 2022. С. 354–355.
- Melnik L.P., Golubenkova N.V. Dissemination distance of European larch in forest conditions. In: *Agrarian science – agriculture. Collection of materials of the 17th International Scientific and Practical Conference*. Barnaul; 2022, pp. 354–355. (In Russ.)
22. Щербаков И.П., Михалева В.М., Чугунова Р.В. и др. *Формирование растительного покрова в связи с рубками в лесах Юго-Западной Якутии*. Новосибирск: Наука; 1977. 296 с.
- Shcherbakov I.P., Mikhaleva V.M., Chugunova R.V., et al. *Formation of vegetation cover in connection with felling in the forests of South-Western Yakutia*. Novosibirsk: Nauka; 1977. 296 p. (In Russ.)
23. Щербаков И.П., Чугунова Р.В. Леса юго-западных приленских районов Якутии и меры содействия лесовозобновлению на лесосеках и гарях. В кн.: *Материалы о лесах Якутии. Труды ИБ ЯФ СО АН СССР*, вып. 7. М.: Изд-во АН СССР, 1961. С. 5–161.
- Shcherbakov I.P., Chugunova R.V. Forests of the south-western Prilensky districts of Yakutia and measures to promote reforestation on forests and forests. In: *Materials on forests of Yakutia. Proceedings of the IB YAF SO AN USSR*, issue 7. Moscow: Publ. AN USSR; 1961, pp. 5–161. (In Russ.)
24. Орловский С.Н., Карнаухова А.И., Войнаш С.А. и др. Дальность разлета семян лиственницы под воздействием силы тяжести, ветрового напора. В кн.: *Сборник I Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки и практики в исследованиях молодых ученых»*, Новосибирск, 21–22 мая 2024 г. Новосибирск: ИЦ НГАУ «Золотой Колос»; 2024. С. 316–323.
- Orlovsky S.N., Karnaukhov A.I., Voynash S.A., et al. Distance of flight of larch seeds under the influence of gravity, wind pressure. In: *Proceedings of the 1st International Scientific-Practical Conference “Actual Problems of Science and Practice in Research of Young Scientists”* (Novosibirsk, 21–22 May, 2024). Novosibirsk: IC NGAU “Golden Colossus”; 2024, pp. 316–323.
25. Филиппова Н.П. Изучение полетных качеств семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*), собранных в лесах Жиганского улуса (Северная Якутия). *Успехи современного естествознания*. 2014;8:26–28.
- Filippova N.P. Study of flight qualities of seeds of common pine (*Pinus sylvestris*) collected in the forests of Zhigansky district (Northern Yakutia). *Advances in Current Natural Sciences*. 2014;8:26–28. (In Russ.)
26. База данных № 2024620821. *Морфометрическая характеристика семян лиственниц Каяндера и Гмелина в Якутии*. Заявка № 2024621713. Дата поступления : 06 мая 2024 г. Номер регистрации : 2024621986. Дата государственной регистрации : 08 мая 2024 г. / Габышева Л.П., Исаев А.П.; заявитель, патентообладатель ИБПК СО РАН.
- Database No 2024620821. *Morphometric characteristics of seeds of larches Kayander and Gmelin in Yakutia*. Application No. 2024621713. Date received : 06 May 2024 Registration Number : 2024621986. Date of State Registration : 08 May 2024 / Gabysheva L.P., Isaev A.P.; applicant, patent holder IBPC SB RAS. (In Russ.)
27. Лыткина Л.П. *Лесовосстановление на гарях Лено-Амгинского междуречья (Центральная Якутия)*. Новосибирск: Наука; 2010. 118 с.
- Lytkina L.P. *Reforestation in the burnt areas of the Lena-Amga interfluvium (Central Yakutia)*. Novosibirsk: Nauka; 2010. 118 p. (In Russ.)
28. Денисов С.А. *Лесоведение. Смена пород: Учеб. пособие*. Йошкар-Ола : Мар. гос. техн. ун-т; 1999. 77 с.

Denisov S.A. *Forestry. Change of species: Textbook for students*. Yoshkar-Ola: Marii state tech. univ; 1999. 77 p. (In Russ.)

29. Чижов Б.Е., Иванова Р.И., Штоль В.А. и др. Особенности семенного возобновления берез повислой *Betula verrucosa* Ehrh. и пушистой *Betula pubescens* Ehrh. в условиях подтайги и лесостепи Западной Сибири. *Сибирский лесной журнал*. 2016;6:49–59

Chizhov B.E., Ivanova R.I., Shtol V.A., et al. Features of seed regeneration of drooping birches *Betula verrucosa* Ehrh. and downy birch *Betula pubescens* Ehrh. in the conditions of subtaiga and forest-steppe of Western Siberia. *Sibirskij Lesnoj Zhurnal (Sib. J. For. Sci.)*. 2016;6:49–59. (In Russ.)

30. Блашкевич О.Х., Горохова Н.Е., Назаров А.А. и др. Оценка лесовосстановления в Республике Саха (Якутия). *Вестник АГТУ*. 2024;4(16):67–137.

Blashkevich O.Kh., Gorokhova N.E., Nazarov A.A., et al. Assessment of reforestation in the Republic of Sakha (Yakutia). *Bulletin of AGATU*. 2024;4(16):67–137. (In Russ.)

31. Шемякина А.В., Голубев Д.А., Гула К.Е., Каюмов Н.А. Оценка естественного возобновления древесных пород на сплошных вырубках в Алданском лесничестве Республики Саха (Якутия). *Природообустройство*. 2025;(3):127–134.

Schemyakina A.V., Golubev D.A., Gula K.E., Kayumov N.A. Assessment of natural regeneration of tree species in clear cuttings in the Aldan forestry of the Republic of Sakha (Yakutia). *Prirodoobustroystvo*. 2025;(3):127–134. (In Russ.)

32. Шемякина А.В. Влияние рубок на лесовосстановление в районах с многолетней мерзлотой и экологические последствия. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*.

2025;17(1):93–112. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-1-1029>

Shemyakina A.V. The Impact of Logging on Reforestation in Permafrost Areas and Environmental Consequences. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2025;17(1):93–112. (In Russ.). <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-1-1029>

33. Башегуров К.А., Гавриленко А.Н., Розинкина Е.П. и др. Естественное лесовосстановление на вырубках в северо-таежном равнинном районе Западной Сибири. *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2025;(1):58–70. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-58-70>

Bashegurov K.A., Gavrilenko A.N., Rozinkina E.P., et al. Natural Reforestation in Cleared Areas in the Northern Taiga Plain Region of Western Siberia. *News of Higher Educational Institutions. Forestry Journal*. 2025;(1):58–70. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-58-70>

34. Кобец Д.Л., Кобец М.Л. Комбинированное лесовосстановление гарей на примере Кавалеровского лесничества, Приморский край. В кн.: *Лесные экосистемы: состояние, проблемы и пути их решения в современных условиях. Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 65-летию Института лесного и лесопаркового хозяйства*. Уссурийск; 2023. С. 29–32.

Kobets D.L., Kobets M.L. Combined Reforestation of Burnt-Out Areas: The Case of Kavalеровskoye Forestry, Primorsky Krai. In: *Forest Ecosystems: Status, Problems, and Solutions in Modern Conditions. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 65th anniversary of the Institute of Forestry and Forest Park Management*. Ussuriysk; 2023, pp. 29–32.

Об авторах

ИСАЕВ Александр Петрович, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-4488-0228>, ResearcherID: E-9570-2016, Scopus Author ID: 7101845572, SPIN: 2977-2322, e-mail: alex_isaev@mail.ru

ГАБЫШЕВА Людмила Петровна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-0537-2466>, ResearcherID: Q-4246-2016, Scopus Author ID: 57392856500, SPIN: 3705-0179, e-mail: llp77@yandex.ru

ЧИКИДОВ Иван Иванович, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-8945-4505>, ResearcherID: AGZ-1498-2022, Scopus Author ID: 57290962800, SPIN: 2121-2053, e-mail: chikidov@rambler.ru

Вклад авторов

Исаев А.П. – разработка концепции, обоснование методологии, проведение исследования, написание и редактирование статьи; **Габышева Л.П.** – верификация данных, проведение исследования, создание черновика рукописи; **Чикидов И.И.** – сбор семенного материала, проведение эксперимента, администрирование проекта, написание черновика рукописи

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

ISAEV, Alexander Petrovich, Dr. Sci. (Biol.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-4488-0228>, ResearcherID: E-9570-2016, Scopus Author ID: 7101845572, SPIN: 2977-2322, e-mail: alex_isaev@mail.ru

GABYSHEVA, Lyudmila Petrovna, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-0537-2466>, ResearcherID: Q-4246-2016, Scopus Author ID: 57392856500, SPIN: 3705-0179, e-mail: llp77@yandex.ru

CHIKIDOV, Ivan Ivanovich, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-8945-4505>, ResearcherID: AGZ-1498-2022, Scopus Author ID: 57290962800, SPIN: 2121-2053, e-mail: chikidov@rambler.ru

Authors' contribution

Isaev A.P. – conceptualization, methodology, investigation, writing – original draft, writing – review & editing; **Gabysheva L.P.** – validation, investigation, writing – original draft; **Chikidov I.I.** – resources, investigation, data curation, writing – original draft

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 08.07.2025

Поступила после рецензирования / Revised 28.10.2025

Принята к публикации / Accepted 14.11.2025



Оригинальная статья

Накопление тяжелых металлов в почках и печени полевковых и бурозубок в зоне влияния Норильского промышленного района

Р. Б. Чысыма✉, А. В. Прокудин, О. К. Сергеева

НИИ сельского хозяйства и экологии Арктики –
филиал ФГБНУ «ФИЦ Красноярский научный центр СО РАН», г. Норильск, Российская Федерация
✉chysyma@mail.ru

Аннотация

Проблема техногенного загрязнения территории Норильского промышленного района и не снижающегося негативного воздействия на экосистему определяет необходимость проведения исследований по динамике поступления и аккумуляции различных химических веществ в живых организмах. Целью настоящей работы стал анализ накопления тяжелых металлов (Zn, Cu, Cd и Pb) в почках и печени полевков и бурозубок в районе Надеждинского металлургического и Медного заводов Норильского промышленного района. Исследуемыми видами являлись грызуны: сибирская красная полевка (*Myodes rutilus* (Pallas, 1779)), полевка-экономка (*Microtus oeconomus* (Pallas, 1776)) и полевка Миддендорфа (*Microtus middendorffii* (Poljakow, 1881)), и бурозубки: средняя (*Sorex caecutiens* (Laxmann, 1788)) и тундровая (*Sorex tundrensis* (Merriam, 1900)). Удаленность мест обитания животных от источников техногенного загрязнения составляла в среднем 9,2 км. Материалом для исследования являлись пробы почек и печени, отобранные от полевков и бурозубок. Концентрацию химических элементов определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии плазменной и электротермической атомизацией. Анализ накопления тяжелых металлов в почках и печени мелких млекопитающих показал более равномерное распределение цинка в органах полевков и бурозубок. Изменчивость концентрации Zn оказалась в 3,8 – 10,5 раза ниже по сравнению с другими элементами. Наиболее высокая изменчивость концентрации меди отмечалась в почках. Максимально высокий коэффициент вариации выявлен у концентрации токсичных элементов. Отмечаются различия распределения тяжелых металлов разных органах. Почки полевков и насекомоядных характеризовались более высоким уровнем содержания меди, кадмия и свинца ($P < 0,01$ – $< 0,001$), чем печень. Накопление тяжелых металлов зависит от вида органа и типа питания. У бурозубок выявлено повышенное содержание в органах меди, кадмия и свинца по сравнению с мышами-полевками. Полученные данные могут представлять интерес в разработке ориентировочных критериев для мелких млекопитающих, испытывающих антропогенное воздействие промышленных предприятий.

Ключевые слова: мелкие млекопитающие, рода *Myodes*, *Microtus* и *Sorex*, промышленное загрязнение, цинк, медь, кадмий, свинец, Норильский промышленный район

Финансирование. Исследования выполнены в рамках госзадания Минобрнауки России: «Этап 2. Влияние климатических изменений и антропологической нагрузки на экосистемы Арктической зоны Восточной Сибири» (№ 125020501490-7).

Для цитирования: Чысыма Р.Б., Прокудин А.В., Сергеева О.К. Накопление тяжелых металлов в почках и печени полевковых и бурозубок в зоне влияния Норильского промышленного района. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(4):630–637. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-630-637>

Original article

Accumulation of heavy metals in the kidneys and liver of voles and shrews from the influence zone of the Norilsk industrial region

Rosa B. Chysyma✉, Alexandr V. Prokudin, Olga K. Sergeeva

Research Institute of Arctic Agriculture and Ecology –
branch of the Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Norilsk, Russian Federation
✉chysyma@mail.ru

Abstract

The industrial pollution in the Norilsk industrial region and its continuous adverse impact on the local ecosystem underscore the need to study how chemical substances enter and accumulate in living organisms. This study aimed to

investigate the accumulation of heavy metals (Zn, Cu, Cd, and Pb) in the kidneys and livers of voles and shrews inhabiting areas adjacent to the Nadezhdinsky Metallurgical Plant and the Copper Plant. Animals were captured at sites located an average of 9.2 km from industrial emission sources. A total of 48 kidney and liver samples were analyzed, comprising 24 samples from voles and 24 from shrews. Heavy metal concentrations were determined by atomic absorption spectrometry with plasma and electrothermal atomization using a Kvant-2mt spectrometer. The results indicated that zinc was distributed more homogeneously in the organs of both voles and shrews than the other metals, with its concentration varying 3.8 to 10.5 times less. In contrast, copper exhibited the greatest variability, particularly in renal tissue, reflecting considerable individual variation in kidney Cu accumulation. Variability analysis further confirmed that the toxic elements exhibited the highest coefficients of variation. Furthermore, pronounced organ-specific differences in metal accumulation were observed. The kidneys of both voles and insectivores contained significantly higher levels of copper, cadmium, and lead ($P < 0.01$ – 0.001) than their livers. Diet also influenced accumulation patterns, as insectivorous shrews showed elevated concentrations of Cu, Cd, and Pb in their organs relative to herbivorous voles. Consequently, these findings provide valuable baseline data for assessing the impact of industrial pollution on small mammals and can inform future environmental monitoring in affected areas.

Keywords: small mammals, genus *Myodes*, *Microtus* and *Sorex*, industrial pollution, zinc, copper, cadmium, lead, Norilsk industrial region

Funding. This study was conducted within the framework of the state assignment from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation: “Stage 2: The impact of climate change and anthropological pressure on ecosystems of the Arctic Zone of Eastern Siberia” (Project No. 125020501490-7).

For citation: Chysyma R.B., Prokudin A.V., Sergeeva O.K. Accumulation of heavy metals in the kidneys and liver of voles and shrews from the influence zone of the Norilsk industrial region. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(4):630–637. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-630-637>

Введение

В настоящее время экосистемы северных регионов сталкиваются с серьезными угрозами из-за изменения климата и антропогенной нагрузки, что представляет серьезную опасность для жизни и здоровья человека [1]. По итогам Большой Норильской экспедиции для более десятка водоемов в 10–15-километровой зоне воздействия Норильского промышленного района установлены превышения содержания ряда металлов (медь, цинк, железо, никель, кобальт, алюминий, кадмий, молибден и др.) [2, 3]. Одними из основных источников загрязнения атмосферного воздуха (1 671,5 тыс. т) [4] являются предприятия металлургического кластера: Надеждинский металлургический завод (НМЗ) и Медный завод (МЗ).

Общепризнанным способом контроля воздействия тяжелых металлов на окружающую среду является мониторинг популяций, для этого в качестве объектов исследований используют мелких млекопитающих [5], что позволяет охарактеризовать токсическую нагрузку, а данные в органах депо служат ее маркером на уровне организма.

Аккумуляция тяжелых металлов в органах и тканях животных может варьировать в зависимости от вида, типа органа и характеризуется видовой и органной специфичностью, что связа-

но с различиями в обменных процессах даже в пределах одного вида [6].

В этой связи мониторинг состояния разных представителей мелких млекопитающих, находящихся на загрязненных территориях, является актуальным, предоставляя возможность оценить характер воздействия загрязняющих веществ на живые организмы и прогнозировать дальнейшие изменения [7].

Цель исследования – изучить накопление тяжелых металлов в органах и тканях у полевков и бурозубок, подверженных воздействию металлургических предприятий Норильского промышленного района.

Объекты, район и методы исследования

Объектами для исследований послужили представители грызунов и насекомоядных: полевки и бурозубки. Отлов животных проведен в период с 17 мая по 20 июня 2025 года. Материал для исследования был собран с учетом частоты распространения и уровня разнообразия зверьков. Были исследованы образцы от 24 животных, относящихся к трем видам полевковых: сибирская красная полевка (*Myodes rutilus* (Pallas, 1779)), полевка-экономка (*Microtus oeconomus* (Pallas, 1776)) и полевка Миддендорфа (*Microtus midden-*



Рис. 1. Карта района отлова животных

■ – участки отлова животных, ● – г. Норильск

Fig. 1. Map of the area of animal capture

■ – animal trapping areas, ● – Norilsk city

dorffii (Poljakow, 1881)), а также к двум видам бурозубок: средняя бурозубка (*Sorex caecutiens* (Laxmann, 1788) и тундровая бурозубка (*Sorex tundrensis* (Merriam, 1900)).

Участки сбора материалов расположены на загрязненных участках, находящихся в непосредственной близости от предприятий металлургического кластера Норильского промышленного района. Участок района Оганер расположен на удалении 4,1 км от г. Норильск (координаты N 69°21'10.5" E 88°17'20.4"). Участок района Талнах находился в 17,5 км к северу от г. Норильск (координаты N 69° 21'10.0" E 88°17'23.2) (рис. 1).

Удаленность мест обитания животных от источника промышленного загрязнения составляла в среднем 9,2 км. Отлов животных проводили методом ловчих канавок [8, 9]. Учет численности грызунов проводили в соответствии с руководством Ю.Н. Литвинова [10]. Видовую идентификацию грызунов, в том числе по одонтологическим показателям, проводили по определителю И.М. Громова с соавторами и А.В. Бородин [11, 12]. Видовая идентификация бурозубок проведена по морфологическим признакам [13].

Материалом для исследования являлись 48 проб почек и печени, отобранные от полевков (24) и бурозубок (24). Подготовка проб органов для анализов проводили в химико-технологической ла-

боратории НИИСХ и ЭА НИИСХ ФКНЦ СО РАН. Содержание тяжелых металлов в образцах органов определяли в ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск). Образцы органов хранили в замороженном состоянии в морозильной камере при температуре –18 °С. Для подготовки образцов для исследования пробы почек и печени сушили в сушильном шкафу при температуре 75 °С. Дальнейшие действия включали в себя извлечение химических элементов и перевод их в растворимые формы: навеску с пробами обрабатывали концентрированной HNO₃. После озоления раствор охлаждали и доводили до необходимого объема деионизированной водой и готовили стандартные растворы для калибровки. Концентрацию химических элементов определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии плазменной и электротермической атомизацией на спектрометре «Квант-2мт» (ФГУП ВНИИОФИ, Россия). Полученные данные были статистически обработаны с использованием пакета программ прикладной статистики «Snedecor V4».

Обсуждение и результаты

Результаты определения уровней концентраций тяжелых металлов в изученных органах грызунов и насекомоядных приведены в таблице.

Распределение цинка в почках и печени у полевков и бурозубок более равномерное и составляло в почках полевков 83,50±3,04, бурозубок 100,3±5,79, в печени – 86,20±3,65 и 108,5±6,37 мг/кг соответственно. Уровень изменчивости Zn варьировал незначительно. Медь обнаруживалась в почках и печени полевков в интервале от 32,08±4,39 и 15,46±0,58 мг/кг, у бурозубок концентрация меди в почках составляла 54,25±8,04 мг/кг, в печени 39,73±2,72 мг/кг, что превышает показатели полевков в 1,7 и 2,6 раза (P<0,001) (см. таблицу, рис. 2). Однако уровень изменчивости Cu варьировал в зависимости от органа, и коэффициент вариации в почках полевков и бурозубок был соответственно в 3,6 и 2,2 раза выше, чем в печени.

Наиболее значимые различия в уровнях концентраций химических элементов между сравниваемыми животными были выявлены по токсичным элементам: кадмию и свинцу (см. таблицу, рис. 3).

Так, содержание кадмия в почках полевков было 1,71±0,39 мг/кг, в печени 0,47±0,21 мг/кг. У бурозубок эти показатели оказались значительно выше:

Концентрация тяжелых металлов в почках и печени мелких млекопитающих, мг/кг

Concentration of metals in kidneys and liver of small mammals, mg/kg

Химический элемент		Грызуны, n = 12			Насекомоядные, n = 12		
		$\bar{X} \pm Sx$	Cv, %	limit	$\bar{X} \pm Sx$	Cv, %	limit
Zn	Почки	83,50±3,04	11,5	71,00–100	100,30±5,79	20,0	81,00–132
	Печень	86,20±3,65	13,4	68,00–105	108,50±6,37	20,4	91,00–144
Cu	Почки	32,08±4,39	43,3	16,90–53,0	54,25±8,04*	51,4	33,00–100
	Печень	15,46±0,58	12,0	13,20–18,30	39,73±2,72**	23,8	31,70–54,0
Cd	Почки	1,71±0,39	73,5	0,20–4,00	15,98±3,271***	70,9	0,50–26,6
	Печень	0,47±0,21	141,0	0,05–2,13	12,87±3,01***	81,2	2,20–29,30
Pb	Почки	4,19±0,77	58,8	1,34–8,60	23,40±3,66***	54,2	9,80–36,0
	Печень	0,65±0,14	70,4	0,25–1,62	4,30±0,44***	35,4	2,70–6,60

Примечания. Достоверность различий в концентрациях ТМ между полевыми и бурозубками: *P < 0,05; **P < 0,01; ***P < 0,001

Notes. Significance of differences in heavy metal (HM) concentrations between voles and shrews: *P < 0.05, **P < 0.01, ***P < 0.001.

15,98±3,27 мг/кг в почках и 12,87±3,01 мг/кг в печени, что превышает показатели полевок в 9,3 и 27,4 раза (P < 0,001). Концентрации свинца в почках полевок составили 4,19±0,77 мг/кг, в печени 0,65±0,14 мг/кг. У бурозубок 23,40±3,66 мг/кг в почках и 4,30±0,44 мг/кг в печени, что выше, чем у полевок, в 5,6 и 6,6 раза (P < 0,001). Следует подчеркнуть очень высокий уровень изменчивости концентраций кадмия и свинца. Разброс значений коэффициента вариации этих элементов в органах варьировал до 141 %, что, вероятно, связано с неоднородностью геохимической обстановки территории и подвижностью ее обитателей, а также является результатом многообразного взаимодействия загрязняющих факторов и разных путей поступления металлов в организм животных [14, 15]. Отметим, что в наших исследованиях, выполненных в 2024 г. на раз-

ных участках Норильского промышленного комплекса, минимальные концентрации тяжелых металлов в почках и печени мелких млекопитающих, зафиксированные в фоновой зоне, были значимо ниже, чем в загрязненной зоне: в 3,4–2,8 раза по свинцу, в 2,7–2,5 раза по кадмию и в 1,3 раза по меди [16].

При сравнении показателей содержания тяжелых металлов в почках и печени у полевок и бурозубок обнаружена характерная органо-специфичность их накопления. Так, концентрации меди у полевок и бурозубок в почках были в 2,1 и в 1,4 раза выше, чем в печени, кадмия – в 3,6 и в 1,2 раза, свинца – в 6,4 и 5,4 раза соответственно (см. рис. 2, 3). Полученные данные о предрасположенности тканей почек к накоплению химических элементов подтверждаются литературными сведениями [17, 18], так как важ-

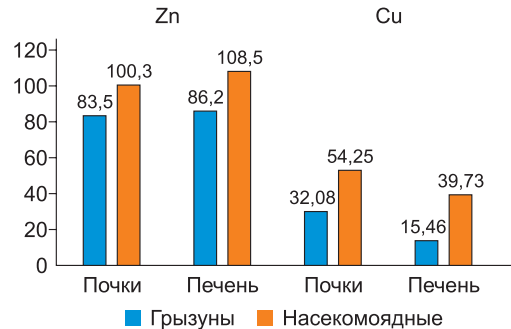


Рис. 2. Содержание Zn и Cu в почках и печени полевок и бурозубок, мг/кг

Fig. 2. Content of Zn and Cu in kidneys and liver of voles and shrews, mg/kg

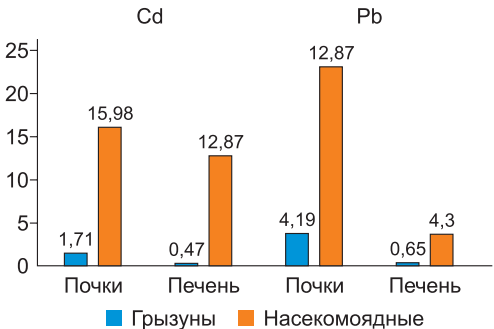


Рис. 3. Содержание Cd и Pb в почках и печени полевок и бурозубок, мг/кг

Fig. 3. Content of Cd and Pb in the kidneys and liver of voles and shrews, mg/kg

нейшая функция почек по выведению ненужных продуктов обмена связана с их ролью главного фильтра организма, очищающего кровь от токсинов, лишней жидкости и продуктов распада. Почки как основные органы-мишени крайне чувствительны к воздействию токсичных элементов, хроническое поступление последних в организм вызывает повреждение почечных сосудов и клубочков, с помощью которых почки выполняют свою фильтрационную функцию [19].

В целом, выявленные различия накопления тяжелых металлов между полевыми и бурозубками могут быть обусловлены особенностями их пищевой специализации, различиями в рационе питания и в уровне метаболизма в организме. Для бурозубок характерны высокая метаболическая активность и значительная потребность в пище [20, 21]. По характеру питания они – типичные энтомофаги [22], и по своей природе эти животные активные и чрезвычайно прожорливые, благодаря высокому обмену веществ суточное потребление корма средней бурозубкой может составлять 170–242 % к массе тела [23]. Основу рациона бурозубок составляют обитающие на поверхности почвы насекомые и дождевые черви, пищеварительный тракт которых в загрязненных территориях содержит частицы загрязненной почвы [24]. В отличие от них, у мышевидных грызунов основным пищевым ресурсом являются семена и вегетативные органы травянистых и древесных растений. Возможно, выявленные нами превышения уровней концентрации тяжелых металлов у бурозубок зависят от содержания элементов в почве. Так, по итогам Большой Норильской экспедиции районы вблизи Норильска до дельты реки Амбарная по уровню загрязнения почв отнесены к первой зоне как наиболее трансформированные территории, имеющие неудовлетворительное состояние.

Наши результаты о разности аккумуляции тяжелых металлов в органах мелких млекопитающих подтверждаются данными других авторов. В частности, Е.В. Кохоновым [25] при проведении сравнительного анализа накопления химических элементов в органах обыкновенной бурозубки и красной полевки юга Сибири установлена видовая и трофическая специфика их накопления в органах.

При количественном определении ряда химических элементов в печени и почках землероек (*Crocidura russula*), обитающих на загрязненном участке пиритовой шахты в Португалии, были об-

наружены высокие уровни мышьяка и кадмия [26]. Аналогичные результаты по накоплению ртути приведены в работе Е.В. Антоновой и др. [27]: концентрация данного элемента в органах насекомых была значительно выше, чем у мышевидных полевков. Различия в аккумуляции химических элементов в органах и тканях организма у отдельных видов и пород животных может свидетельствовать об определенной роли наследственности, определяющей процесс дальнейшего развития организма [28].

Заключение

На трансформированных территориях Норильского промышленного района исследованы особенности аккумуляции тяжелых металлов в основных паренхиматозных органах-депо полевков и бурозубок. В результате проведенного сравнительного анализа концентрации тяжелых металлов у полевков и бурозубок установлено наличие статистически достоверных межвидовых различий. Уровни концентраций меди в почках и печени у бурозубок были выше, чем у полевков в 1,7 и 2,6 раза ($P < 0,01$), кадмия в почках 9,3 и печени 27,4 раза ($P < 0,001$) и свинца в 5,6 и 6,6 раза ($P < 0,001$) соответственно. У полевков и бурозубок выявлена высокая изменчивость концентрации меди, кадмия и свинца, что отражено в более широком интервале коэффициента вариации. Основным паренхиматозным органом, аккумулирующим тяжелые металлы, являются почки, из-за их ключевой роли в детоксикации и экскреции различных веществ из организма. Повышенную способность мелких млекопитающих накапливать в органах тяжелые металлы можно объяснить разными пищевыми стратегиями полевков и бурозубок и вероятностью накопления тяжелых металлов в почве. Для обеспечения высокого метаболизма насекомоядные употребляют животные корма, пищеварительный тракт которых содержит частицы загрязненной почвы. Так, районы вблизи Норильска до дельты реки Амбарная по уровню загрязнения почв отнесены к первой зоне как наиболее трансформированные территории, имеющие неудовлетворительное состояние.

Полученные данные могут быть учтены при разработке ориентировочных норм для мелких млекопитающих, испытывающих антропогенное воздействие от промышленных предприятий. Дальнейшее продолжение исследований в пределах промышленных предприятий комплекса

и в прилегающих районах позволит уточнить и дополнить выявленные сведения об экологическом состоянии мелких млекопитающих на загрязненных территориях.

Список литературы / References

1. Загитова Г.Т., Горшков В.В. Оценка уровня загрязнения окружающей среды в прибрежных зонах северных территорий с использованием лишайников в качестве биоиндикаторов. *Арктика и инновации*. 2025;3(1):77–81. <https://doi.org/10.21443/3034-1434-2025-3-1-77-8>.
2. Zagitova G.T., Gorshkov V.V. Assessment of environmental pollution in coastal areas of northern seas using lichens as bioindicators. *Arctic and Innovations*. 2025;3(1):77–81. (In Russ.). <https://doi.org/10.21443/3034-1434-2025-3-1-77-8>.
3. Юркевич Н.В., Ельцов И.Н., Гуреев В.Н. и др. Техногенное воздействие на окружающую среду в Российской Арктике на примере Норильского промышленного района. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2021;332(12):230–249.
4. Yurkevich N.V., Eltsov I.N., Gureev V.N., et al. Technogenic effect on the environment in the Russian Arctic by the example of the Norilsk industrial area. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2021;332(12): 230–249. (In Russ.)
5. «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2023 году»: Государственный доклад Министерства экологии Красноярского края. Красноярск; 2024. 386 с.
6. "On the state and protection of the environment in the Krasnoyarsk Krai in 2023": State report of the Ministry of Ecology of the Krasnoyarsk Krai. Krasnoyarsk; 2024. 386 p. (In Russ.)
7. Мухачева С.В. Многолетняя динамика концентрации тяжелых металлов в корме и организме рыжей полевки (*Myodes glareolus*) в период снижения выбросов медеплавильного завода. *Экология*. 2017;(6):461–471.
8. Mukhacheva S.V. Long-term dynamics of heavy metal concentrations in the food and liver of bank voles (*myodes glareolus*) in the period of reduction of emissions from a copper smelter. *Russian Journal of Ecology*. 2017;48(6):559–568. <https://doi.org/10.1134/S1067413617060078>
9. Дерягин В.В., Назаренко Н.Н., Девятова Е.В. Аккумуляция тяжелых металлов представителями семейства *Lymnaeidae* как отклик на критические уровни техногенного загрязнения водоемов Южного Урала. *Самарский научный вестник*. 2019;3(8):31–38. <https://doi.org/10.24411/2309-4370-2019-13104>
10. Deryagin V.V., Nazarenko N.N., Devyatova E.V. Accumulation of heavy metals by family Lymnaeidae representatives as response to anthropogenic pollution critical levels of South Ural reservoirs. *Samara Journal of Science*. 2019;3(8):31–38. (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/2309-4370-2019-13104>
11. Иванов А. И. Использование живых организмов различных таксономических групп для биоиндикации состояния окружающей среды. *Теоретическая и прикладная экология*. 2007;(2):73–78.
12. Ivanov A. I. The use of living organisms of different taxonomic groups in the environmental bio-indication. *Theoretical and Applied Ecology*. 2007;(2):73–78. (In Russ.)
13. Наумов Н.П. Изучение подвижности и численности мелких млекопитающих с помощью ловчих канавок. В кн.: Выгодчиков Г.В., Петрищева П.А., Олсуфьев Н.Г. (ред.) *Вопросы краевой, общей и экспериментальной паразитологии и медицинской зоологии*. Том IX. М.: Изд-во АМН СССР; 1955. С. 179–202.
14. Naumov N.P. Study of the mobility and abundance of small mammals using trap grooves. In: Vygodchikov G.V., Petrishcheva P.A., Olsufyev N.G. (eds.) *Issues of Regional, General, and Experimental Parasitology and Medical Zoology. Volume 9*. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Medical Sciences; 1955, pp. 179–202. (In Russ.)
15. Юдин Б.С. Экология бурозубок (род *Sorex*) Западной Сибири. В кн.: Черепанов А.И. (ред.) *Тр. Биол. ин-та СО АН СССР*. Том 8. Новосибирск: Издательство Сибирского отделения АН СССР; 1962. С. 33–134.
16. Yudin B.S. Ecology of shrews (genus *Sorex*) in Western Siberia. In: Cherepanov A.I. (ed.) *Proceedings of the Biological Institute of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences*. Volume 8. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences; 1962, pp. 33–134. (In Russ.)
17. Литвинов Ю.Н. Сообщества и популяции мелких млекопитающих в экосистемах Сибири. Новосибирск: Цэрис; 2001. 126 с.
18. Litvinov Yu.N. *Communities and populations of small mammals in the ecosystems of Siberia*. Novosibirsk: Tseris; 2001. 126 p. (In Russ.)
19. Громов И.М., Гуреев А.А., Новиков Г.А. и др. *Млекопитающие фауны СССР*. Ч. (1). М.; Л.: Издательство Академии наук СССР; 1963. 640 с.
20. Gromov I.M., Gureev A.A., Novikov G.A., et al. *Mammals of the USSR fauna*. Moscow; Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1963. 640 p. (In Russ.)
21. Бородин А.В. *Определитель зубов полевков Урала и Западной Сибири (поздний плейстоцен – современность)*. Екатеринбург: УрО РАН; 2009. 98 с.
22. Borodin A.V. *Identification of teeth of voles of the Urals and Western Siberia (late pleistocene – present)*. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2009. 98 p. (In Russ.)
23. Зайцев М.В., Войта Л.Л., Шефтель Б.И. *Млекопитающие фауны России и сопредельных территорий. Насекомоядные*. СПб.: Наука; 2014. 390 с.
24. Zaitsev M.V., Voita L.L., Sheftel B.I. *The Mammals of Russia and adjacent territories. Lipotyphlans*. St. Petersburg: Nauka; 2014. 390 p. (In Russ.)
25. Беляновская А.И. *Элементный состав организма млекопитающих природно-техногенных территорий и их ранжирование с использованием модели Usetox*: Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Томск-Бордо. 2019. 157 с.
26. Belyanovskaya A.I. *Elemental composition of the organism of mammals of natural and man-made territories and their ranking using the Usetox model*: Diss. ... Cand. Sci. Tomsk-Bordeaux. 2019. 157 p. (In Russ.)
27. Ткачев Ю.А., Юдович Я.Э., Приходько Ю.Н. и др. *Статистическая обработка геохимических данных*. Л.: Наука; 1975. 233 с.
28. Tkachev Yu.A., Yudovich Ya.E., Prikhodko Yu.N., et al. *Statistical processing of geochemical data*. Leningrad: Nauka; 1975. 233 p. (In Russ.)

16. Чысыма Р.Б., Прокудин А.В., Сергеева О.К. Накопление тяжелых металлов мелкими млекопитающими Норило-Пясинской экосистемы. *Вестник НГАСУ (Новосибирский государственный аграрный университет)*. 2024;(4)73:280–289. <https://doi.org/10.31677/2072-6724-2024-73-4-280-289>.
- Chysyma R.B., Prokudin A.V., Sergeeva O.K. Accumulation of heavy metals in small mammals of the NoriloPyasinsky ecosystem. *Bulletin of NSAU (Novosibirsk State Agrarian University)*. 2024; (4) 73: 280–289. (In Russ.) <https://doi.org/10.31677/2072-6724-2024-73-4-280-289>.
17. Зайко О.А., Коновалова Т.В., Петухов В.Л. Уровень кадмия в parenхиматозных органах свиней породы ландрас. *Вестник НГАСУ (Новосибирский государственный аграрный университет)*. 2024;(1):185–195. <https://doi.org/10.31677/2072-6724-2024-70-1-185-195>
- Zaiko O.A., Kononova T.V., Petukhov V.L. Cadmium level in parenchymatous organs of landrace pigs. *Bulletin of NSAU (Novosibirsk State Agrarian University)*. 2024;(1):185–195. <https://doi.org/10.31677/2072-6724-2024-70-1-185-195>. (In Russ.)
18. Mueller P.W. Detecting the renal effects of cadmium toxicity. *Clinical chemistry*. 1993;39(5):743–745. <https://doi.org/10.1093/clinchem/39.5.743>
19. Onan E., Ulu S., Güngör Ö. Heavy metals and kidney. *Turkish Journal of Nephrology*. 2024;33(3):244–251.
20. Мухачева С.В. Многолетняя динамика концентраций тяжелых металлов в организме землероек рода *Sorex* в периоды высоких и сниженных выбросов медеплавильного завода. *Экология*. 2022;(5):370–384. <https://doi.org/10.31857/S0367059722050092>
- Mukhacheva S.V. Long-term dynamics of heavy metal concentrations in *Sorex* shrews during periods of high and low copper smelter emissions. *Ecology*. 2022;(5):370–384. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0367059722050092>
21. Быкова Е.А., Гашев С.Н. Особенности накопления микроэлементов в организме мелких млекопитающих в условиях урбанизации. *Известия Самарского научного центра РАН*. 2014;16(1):1144–1148.
- Bykova E.A., Gashev S.N. Peculiarities of microelements accumulation in the organism of small mammals in the urbanization conditions. *Izvestia of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2014;16(1):1144–1148. (In Russ.)
22. Ивантер Э.В. К популяционной экологии средней бурузубки (*Sorex caecutiens* (Laxmann, 1788) в европейской части ареала, сообщение 2. Территориальность, участки обитания. *Экология питания. Принципы экологии*. 2022;3(45):17–30.
- Ivanter E.V. To the population ecology of the masked mouse (*Sorex caecutiens* Laxm.) in the European part of its area. Communication II. Territorialism, habitat areas. Feeding ecology. *Principy ekologii*. 2022;45(3):17–30. (In Russ.)
23. Порошин Е.А. Трофические связи и межвидовая конкуренция в питании насекомоядных млекопитающих бассейна верхней Печоры. *Вестник Института биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН*. 2009;144(10):15–19.
- Poroshin E.A. Trophic links and interspecific competition for food insectivorous mammals of the upper pechora region. *Bulletin of the Institute of Biology of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2009;144(10):15–19. (In Russ.)
24. Мухачева С.В. Многолетняя динамика концентраций тяжелых металлов в организме землероек рода *Sorex* в периоды высоких и сниженных выбросов медеплавильного завода. *Экология*. 2022;(5):370–384. <https://doi.org/10.31857/S0367059722050092>
- Mukhacheva S.V. Long-term dynamics of heavy metal concentrations in the food and liver of shrews (g. *Sorex*) during high and reduced emissions periods from the copper smelter. *Russian Journal of Ecology*. 2022;53(5):381–395.
25. Кохонов Е.В. Содержание и особенности накопления химических элементов в организме мелких млекопитающих Юга Западной Сибири: Дис. ...канд. биол. наук. Томск; 2005. 169 с.
- Kokhonov E.V. Content and features of accumulation of chemical elements in the body of small mammals of the South of Western Siberia: Diss. ... Cand. Sci., Tomsk; 2005. 169 p. (In Russ.)
26. Sánchez-Chardi A., Marques C.C., Nadal J., et al. Metal bioaccumulation in the greater white-toothed shrew, *Crocidura russula*, inhabiting an abandoned pyrite mine site. *Chemosphere*. 2007;67(1):121–130. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.09.009>
27. Антонова Е.П., Илюха В.А., Комов В.Т. и др. Содержание ртути и антиоксидантная система у насекомоядных (insectivora, mammalia) и грызунов (rodentia, mammalia) различного эогенеза. *Поволжский экологический журнал*. 2016;(4):371–380.
- Antonova E.P., Ilyukha V.A., Komov V.T., et al. Mercury content and antioxidant system in insectivores (Insectivora, Mammalia) and rodents (Rodentia, Mammalia) of different ecogenesis. *Povolzhskiy Journal of Ecology*. 2016;(4):371–380. (In Russ.)
28. Hernández-Acosta E., Mondragón-Romero E., Cristobal-Acevedo D., et al. Vegetación, residuos de mina y elementos potencialmente tóxicos de un jal de Pachuca, Hidalgo, México. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del ambiente*. 2009;15(2):109–114.

Об авторах

ЧЫСЫМА Роза Байындыевна, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-6437-0164>, ResearcherID: I-4165-2016, Scopus Author ID: 7801604213, SPIN: 8516-4988, e-mail: chysyma@mail.ru

ПРОКУДИН Александр Викторович, кандидат ветеринарных наук, директор, <https://orcid.org/0000-0003-4279-8420>, ResearcherID: O-239-2013, SPIN: 3107-8320, e-mail: al.prokudin@mail.ru

СЕРГЕЕВА Ольга Константиновна, научный сотрудник, SPIN: 2194-9585, e-mail: ols-78@mail.ru

Вклад авторов

Чысыма Р.Б. – разработка концепции, методология, статистический анализ, создание черновика рукописи, редактирование рукописи; **Прокудин А.В.** – руководство исследованием, проведение исследования, разработка концепции, методология, ресурсное обеспечение, редактирование рукописи; **Сергеева О.К.** – проведение исследования, методология, ресурсное обеспечение

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

CHYSYMA, Rosa Baiendievna, Dr. Sci. (Biol.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-6437-0164>, ResearcherID: I-4165-2016, Scopus Author ID: 7801604213, SPIN: 8516-4988, e-mail: chysyma@mail.ru

PROKUDIN, Alexandr Viktorovich, Cand. Sci. (Vet.), Director, <https://orcid.org/0000-0003-4279-8420>, ResearcherID: O-239-2013, SPIN: 3107-8320, e-mail: al.prokudin@mail.ru

SERGEEVA, Olga Konstantinovna, SPIN: 2194-9585, e-mail: ols-78@mail.ru

Authors' contribution

Chysyma R.B. – conceptualization, methodology, writing – original draft, writing – review & editing; **Prokudin A.V.** – supervision, investigation, conceptualization, methodology, resources, writing – review & editing; **Sergeeva O.K.** – investigation, methodology, resources

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 26.07.2025

Поступила после рецензирования / Revised 28.11.2025

Принята к публикации / Accepted 09.12.2025

Биологические ресурсы

УДК 58.009:58.01/07:634.739

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-638-648>



Оригинальная статья

Черника Смолла (*Vaccinium smallii* a. Gray): биологические особенности и отбор форм из природных популяций острова Сахалин

В. В. Шейко¹, Д. В. Лебедев¹, В. Н. Сорокопудов^{✉,2}, О. А. Сорокопудова³

¹Ботанический сад-институт ДВО РАН, отдел Сахалинский ботанический сад,
г. Южно-Сахалинск, Российская Федерация

²ВНИИ люпина – филиал «ВИК им. В.Р. Вильямса»,
комплексное научно-исследовательское отделение направления плодоводства,
пос. Мичуринский, Российская Федерация

³Всероссийский научно-исследовательский институт лекарственных и ароматических растений,
г. Москва, Российская Федерация

✉ sorokopud2301@mail.ru

Аннотация

Ягодный кустарник черника Смолла (*Vaccinium smallii*) – вид, распространенный, кроме северной части Японии, на островах Сахалин, Кунашир и Итуруп и в Советско-Гаванском районе Хабаровского края. Впервые проводится исследование ценопопуляций *V. smallii* на о. Сахалин. Объектом исследования были произрастающие там растения черники Смолла, отборные формы с комплексом хозяйственно-ценных признаков, а также интродуцированные формы в условиях отдела Сахалинский ботанический сад Ботанического сада-института Дальневосточного отделения РАН. Исследования проводятся с 2019 г. в природных условиях о. Сахалин и на стационаре в Ботаническом саду. Сад расположен в зоне холодно-умеренного климата в области влияния восточноазиатских океанических муссонов. Исследована биология вида *V. smallii*. Помимо фенологических наблюдений и оценки реакции растений на лимитирующие факторы и характеристики биотопов, исследовали химический состав плодов, листьев и однолетних побегов, а также особенности семенного размножения. Предпочтение видом освещенных участков, позднее начало вегетации и цветения, нивелирующее поздние заморозки, нетребовательность к почвам, влагообеспеченности, устойчивость к болезням и вредителям, постепенная акклиматизация образцов на полностью освещенном экспериментальном участке, превосходство над рядом известных окультуренных видов по качеству плодов, а также широкий диапазон изменчивости некоторых характеристик плодов позволяют рассматривать этот вид как перспективный к введению в культуру и для селекционных исследований. Выявлена более чем 15-кратная разница между типичной и отборной формами по содержанию в плодах сахаров, а по витамину С – в 4,1 раза. Введение *V. smallii* в культуру следует рассматривать как актуальную задачу. Изучение выделенных отборных форм с комплексом хозяйственно-ценных признаков в природных условиях и культуре, параллельная селекция этого вида с созданием новых наиболее продуктивных сортов будут способствовать разработке агротехнологий возделывания *V. smallii* как новой нетрадиционной ягодной культуры.

Ключевые слова: Сахалин, *Vaccinium smallii* A. Gray, отбор, аскорбиновая кислота, сахара, каротиноиды, продуктивность, феноритм

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания «Введение в культуру, изучение и сохранение генетических ресурсов хозяйственно ценных растений Восточной Азии» (№ 122040800086-1), в рамках госзадания согласно плану НИР «Оценка современного биологического разнообразия и ресурсного потенциала флоры Восточной Азии» (проект № АААА-А20-120031990009-4) и «Аборигенная и инвазионная флора Восточной Азии: трансформация в условиях возрастающей антропогенной нагрузки на экосистемы» (НИОКТР № 122040800085-4); в соответствии с темой НИР «Определение ресурсного потенциала дикорастущих видов лекарственных растений, разработка адаптивных агротехнологий и создание устойчивых сортов лекарственных культур» (№ FGUU-2025-0006).

Благодарности. Выражаем благодарность Ботаническому саду-институту ДВО РАН за финансовую поддержку.

Для цитирования: Шейко В.В., Лебедев Д.В., Сорокопудов В.Н., Сорокопудова О.А. Черника Смолла (*Vaccinium smallii* a. Gray): биологические особенности и отбор форм из природных популяций острова Сахалин. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(4):638–648. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-638-648>

Original article

Small's blueberry (*Vaccinium smallii* A. Gray): Biological characteristics and selection of forms from natural populations on Sakhalin Island

Viktor V. Sheiko¹, Dmitry V. Lebedev¹, Vladimir N. Sorokopudov^{✉,2},
Olga A. Sorokopudova³

¹Botanical Garden-Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
Sakhalin Botanical Garden Department, Yuzhno-Sakhalinsk, Russian Federation

²All-Russian Research Institute of Lupine – Branch of the Federal Scientific Center
“Williams Research of Forage Production and Agroecology”, Michurinsky settlement, Russian Federation

³All-Russian Research Institute of Medicinal and Aromatic Plants, Moscow, Russian Federation

✉sorokopud2301@mail.ru

Abstract

Small's blueberry (*Vaccinium smallii*) is a berry shrub species widely distributed in northern Japan, Sakhalin Island, the Kunashir and Iturup islands, and the Sovetsko-Gavansky district of Khabarovsk Krai. This study presents the first investigation of *V. smallii* coenopopulations on Sakhalin Island. Research focused on native plants, selected forms exhibiting economically valuable traits, and introduced cultivars maintained at the Sakhalin Botanical Garden Department of the Botanical Garden-Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. Field studies on Sakhalin Island, complemented by stationary research at the Botanical Garden conducted since 2019, have characterized the species' biology. *V. smallii* shows a preference for well-lit habitats, a late vegetation and flowering onset that reduces late frost damage, low soil and moisture requirements, disease and pest resistance, and successful acclimatization in full-light experimental plots. The fruits exhibit superior quality compared to several cultivated species, with notable variability in key traits, indicating high potential for introduction into cultivation and selection research. Analysis revealed a more than 15-fold difference in sugar content and 4,1-fold difference in vitamin C in fruits between typical and selected fruit forms. Therefore, the introduction of *V. smallii* into cultivation is a timely and important objective. Future research on high-value selected forms under both natural and cultivated conditions, combined with parallel efforts to develop improved varieties, will advance the cultivation of *V. smallii* as a promising novel berry crop.

Keywords: Sakhalin Island, *Vaccinium smallii* A. Gray, selection, ascorbic acid, sugars, carotenoids, productivity, phenorhythm

Funding. This study was conducted within the framework of the state assignment “Introduction to the culture, study and conservation of genetic resources of economically valuable plants of East Asia” (No. 122040800086-1). It also aligns with the state assignment under the research plan “Assessment of modern biological diversity and resource potential of the flora of East Asia” (No. AAAA-A20-120031990009-4) and the research plan “Aboriginal and invasive flora of East Asia: transformation in the context of increasing anthropogenic load on ecosystems” (No. 122040800085-4). Additionally, it was conducted within the framework of the research plan “Determination of the resource potential of wild species of medicinal plants, development of adaptive agricultural technologies and creation of resistant varieties of medicinal crops” (No. FGUU-2025-0006).

Acknowledgements. We would like to express our gratitude to the Botanical Garden-Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences for their financial support.

For citation: Sheiko V.V., Lebedev D.V., Sorokopudov V.N., Sorokopudova O.A. Small's blueberry (*Vaccinium smallii* A. Gray): Biological characteristics and selection of forms from natural populations on Sakhalin Island. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(4):638–648. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-638-648>

Введение

Широкораспространенный на о. Сахалин и южных Курильских островах ягодный кустарник черника Смолла – *Vaccinium smallii* A. Gray описан в 1859 г. Эйсой Греем по образцу, собранному Чарльзом Райтом в Японии. Образец был собран в цветущем состоянии и с тремя недоразвитыми плодами [1], и это породило противоречия в понимании вида. Советские авторы и составители Plants of the World Online [2; и др.] рассматривают его как вид *V. hirtum* Thunb. 1784, который был описан К.П. Тунбергом по образцу, собранному в апреле тоже в цветущем состоянии [3, р. 155]. Японский автор J. Ohwi [4] рассматривал последний вид как кустарник с красными плодами, распространенный по всей Японии. Согласно последним исследованиям [5], красная окраска плодов у трибы Vaccinieae, по видимому, была первичной, смещаясь к темной из-за повышения концентрации антоцианов, необходимых для адаптации к яркому освещению и патогенам, особенно грибам (но не к предпочтениям животных-распространителей семян).

В то же время составители Global Biodiversity Information Facility, признавая *V. smallii* в качестве самостоятельного вида, рассматривают его как вид, распространенный, кроме России, на всех основных Японских островах (на о. Кюсю – лишь на наиболее высоких горах). Это приводит к путанице в указаниях ареала вида *V. smallii*, которую до сих пор иногда указывают как вид, произрастающий, кроме островов, включая юг Японии, также в Северной и Южной Корее. При этом авторы статей с такой трактовкой ссылаются на одну из основополагающих работ по молекулярной филогении *Vaccinium* [6], где ареал для *V. smallii* указан как Япония, Северная и Южная Корея, для *V. hirtum* – Япония и Южная Корея, для *V. praestans* – «SE Asia» – т. е. Юго-Восточная, а не Северо-Восточная Азия, а источники информации об ареалах не указаны. Родственные отношения вида продолжают исследовать методом анализа участка ITS (Internal Transcribed Spacer) ядерного генома и гена matK (Maturase K) хлоропластного генома [7]. Т. Мияшита [8] указывает *V. hirtum*, *V. smallii* и *V. uliginosum* L. как полиплоиды 4n или выше. А.В. Громадин и А.Н. Сахоненко [9], отождествляющие оба первых вида с упоминанием черных плодов, указывают для них 48 хромосом в качестве 2n.

Мы, вслед за В.Ю. Баркаловым и А.А. Тара-ном [10], рассматриваем *V. smallii* в понимании

J. Ohwi [4]. Кроме северной части Японии, вид распространен на южной (2/3) части о. Сахалин, островах Кунашир и Итуруп и в Советско-Гаванском районе Хабаровского края [2], где располагается анклав нескольких видов сахалино-хоккайдской флоры.

В Японии вид встречается в районах с обильным снегом. В юго-западной части Хоккайдо этот вид обитает в лесах из *Fagus crenata* Blume. В Северных Японских Альпах (вблизи западного побережья о. Хонсю), в самых многоснежных районах Японии *V. smallii* встречается в продуваемом ветрами сообществе альпийских кустарников, в горах центральных районов этого острова – в качестве подлеска в субальпийских лесах из пихты. В Японии вид *V. smallii* связан в основном с грибами порядка Helotiales. Н. Toju, A.S. Tanabe и H.S. Ishii выдвигают гипотезу, что вересковые растения в суровых условиях могут содержать неожиданно разнообразные корневые грибные таксоны, составляя сети, структуры которых похожи на структуры ранее описанных эктомикоризных сетей, но не на структуры арбускулярных микоризных сетей [11; и др.]. Вредителем плодов *Vaccinium*, включая *V. smallii*, в Японии является *Drosophila suzukii*. В качестве перспективного средства борьбы с этим видом дрозифилы рассматривают неописанный вид наездника *Asobara* sp. TK1 (Braconidae), специализирующийся только на *Drosophila suzukii* [12].

V. smallii – это листопадный кустарник до 2 м высотой с лежащим типом составных скелетных осей. Многолетние побеги блестящие, гладкие, коричневого цвета, которые, старея, приобретают серый цвет, с отшелушивающейся чешуйками корой. Стебли однолетних побегов зеленые, округлые в поперечном сечении, блестящие, к осени розовеющие до пурпура вместе с листвой. Листья простые кожистые, правильной овально-ланцетной формы с мелкозубчатым краем и хорошо заметными вдавленными жилками. Снизу лист светлее. Цветки собраны в малоцветковых кистях (соцветия представляют собой однобокую кисть). Первоначальная закладка цветков происходит по спирали, но в процессе развития генеративного побега зачатки цветков смещаются на одну сторону от центральной оси побега. В соцветии обычно 5–7 (максимально до 9) цветков, закладывающихся и раскрывающихся в акропетальной последовательности; когда первая завязь начала разрастаться, а последний цветок еще не раскрывается [13].

Интродукцией и селекцией *V. smallii* занимаются в разных странах. Так, в Латвии исследовали влияние повышенного содержания углекислого газа (1000 мг/л) на рост недревесневших черенков *V. smallii* и сортов американского вида *V. corymbosum* L. (черника, или голубика щитковая), высаженных в камерах роста во влажный торфяной мох [14]. Эффект оказался положительным, но у *V. smallii* слабее, чем у американских сортов. В Японии вид *V. smallii* был успешно скрещен с *V. corymbosum* [8]. По мнению G.J. Galletta [15], при межвидовой гибридизации в роде *Vaccinium* обычно легко получить гибриды между гомотриплоидами (2х–2х, 4х–4х, 6х–6х), но сложно между гетеротриплоидами.

Цель исследований – выявить биологические особенности перспективных форм *Vaccinium smallii* для введения в культуру и селекционных исследований в условиях о. Сахалин.

Материалы и методы исследования

Объектом изучения биологии вида в естественных условиях служили растения *V. smallii* из природных популяций разных районов и высотных поясов южного Сахалина и пересаженные в питомник отдела Сахалинский ботанический сад Ботанического сада-института ДВО РАН отборные формы. Одна из отборных форм представлена 18 клонами с пересадкой их в питомник 12 октября 2023 г. Исходная особь произрастала в природе в условиях кустарниково-разнотравного редколесья, сформированного березами с примесью *Sorbus commixta* Hedl. и искусственных насаждений *Larix cajanderi* Mayr. Ботанический сад располагается на восточной окраине г. Южно-Сахалинск на пологом шлейфе горного хребта, сформированном рыхлыми и маломощными плиоценовыми отложениями, смытыми со склонов гор в ходе денудационных процессов и скопившимися в виде четвертичных осадков. На них преобладают буро-таежные почвы. Сад расположен в зоне холодно-умеренного климата в области влияния восточноазиатских муссонов, для типичного варианта которых характерно чередование дождливого и сухого периодов. Термический максимум, как и во всей Восточной Азии, на Сахалине смещен на вторую половину лета.

Особенностью Сахалина является то, что он, как и Япония, располагается вблизи границы муссонного и океанического климатов. Поэтому влияние сухого зимнего муссона на этой территории ослаблено. Наоборот, нередко подходы

тропических циклонов, вызывающих в Японии сильные дожди, а на Сахалине – обильные снегопады. В результате снежный покров зимой на острове значительно мощнее, чем даже в большинстве районов северо-западной части Евразии с умеренно-континентальным климатом. А в горах существует высотный градиент осадков, приводя к кратному (иногда до 4 м) увеличению глубины снежного покрова в сравнении с долинами. Зима на Сахалине более мягкая, а лето, наоборот, более прохладное, чем на прилегающих территориях материка. Летней прохлуде способствуют также позднее стаивание накопившегося за зиму глубокого снега и преобладание облачной погоды.

Среднемесячная температура января в Южно-Сахалинске –13,5 °С, августа +17,5 °С. Абсолютный минимум –39 °С, абсолютный максимум +34,7 °С. Среднегодовая сумма осадков 840 мм. Продолжительность периода с положительными температурами 7,1 месяца, с температурами выше +5 °С – 5,6 месяца. Сумма положительных среднесуточных температур за год в Южно-Сахалинске составляет в среднем 2150 °С, сумма эффективных температур выше +5 °С – 2035, выше +10 °С – 1621, выше +15 °С – 767 °С [16]. Достаточно низкая географическая широта (46°56') обуславливает высокое положение солнца весной и, как следствие его сочетания с затяжной весной, – резкие суточные перепады температуры (до 30 °С).

При интродукции растений из природы в условия культуры создавали благоприятные условия для микоризообразующих грибов путем мульчирования смесью влажных ферментированных опилок и продуктов дробления веток шредером.

Для оценки влияния снега на разных высотах совершали с помощью снегоступов зимние и весенние восхождения на среднегорные изучаемые местообитания вида, отмечая места формирования лавинных козырьков, нивальных (долгоснежных) участков и ранних проталин. В ботаническом саду с той же целью за 20-летний период проводили регулярные (примерно раз в декаду) измерения глубины снега на разных участках.

Для сравнения урожайности и обилия цветения подсчитывали среднее количество цветков/плодов на 50 побегов каждого растения. Зимостойкость оценивали по 7-балльной шкале [17]. В этой методике баллы, именуемые баллами зимостойкости, отражают интенсивность зимних повреждений. Низшая зимостойкость – это 7 баллов (вымерзание), максимальная – 1 балл (отсут-

ствие повреждений). Регулярные фенонаблюдения за растениями в ботаническом саду вели по наиболее популярной в ботанических садах России методике [17].

Для оценки всхожести свежесобранные или подвергнутые холодной стратификации семена поверхностно высевали в емкости с двумя видами субстратов: в торфо-песочную смесь, составленную в равных пропорциях, и в торфо-песочно-перегнойную смесь, с помещением этих емкостей в условия легкого притенения. С интервалом 7–15 дней подсчитывали количество всходов и измеряли их высоту.

Осенью оценивали степень одревеснения главных побегов и подсчитывали количество пар листьев, весной оценивали зимостойкость по 7-балльной шкале. Время начала формирования флоральной меристемы в генеративных почках определяли исследованием анатомии почек с помощью стереомикроскопа МБС-9. Сравнение плодов по вкусу и консистенции проводили по 5-балльной шкале. Плоды, листья и побеги для сравнительного анализа брали из природных популяций (для отборной формы – до ее пересадки в ботанический сад). Химический состав плодов, листьев и однолетних побегов оценивали в соответствии со следующими государственными стандартами: массовая доля сухих веществ – по ГОСТ 28561-90 «Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения сухих веществ или влаги»; титруемая кислотность – по ГОСТ ISO 750-2013 «Продукты переработки фруктов и овощей. Определение титруемой кислотности»; массовая доля растворимых углеводов (сахаров) – по ГОСТ 26176-2019 «Корма, комбикорма. Методы определения растворимых и легкогидролизуемых углеводов»; массовая концентрация каротиноидов – по ГОСТ Р 54058-2010 «Продукты пищевые функциональные. Метод определения каротиноидов»; массовая доля витамина С – по ГОСТ 24556-89 «Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения витамина С».

Результаты и обсуждение

Черника Смолла предпочитает освещенные участки, имеющие, как правило, пирогенное происхождение, где благодаря ксилоризомам может формировать обширные куртины-клоны. Наиболее плотные заросли отмечаются вдоль водоразделов на подветренных, чаще южных склонах – местах формирования лавинных козырьков. Наибольшая

урожайность *V. smallii* отмечена в предгорьях при хорошем, но не полном освещении (безлесный северо-западный склон, редколесье на южном склоне), где она также образует заросли. На открытых солнцу ветробойных участках *V. smallii* может образовывать обширные низкорослые куртины сенильных растений с сильным обмерзанием скелетных осей. На тех открытых участках, где велика вероятность выдувания снега, растения, независимо от возраста и урожайности, отличаются низкорослостью. В горах этот вид обычно не поднимается выше 830 м н.у.м. Но на юго-восточном краю Сусунайского хребта – самой южной из горных гряд Сахалина высотой более 1000 м, плодоносящие куртины *V. smallii* встречаются и на высоте 1000 м. Близ теплого юго-западного побережья острова кустарник встречается в подлеске широколиственно-хвойных лесов в зарослях некрупных бамбуков рода *Sasa* и вечнозеленых растений *Skimmia repens* Nakai (Rutaceae) на сравнительно богатых рыхлых горно-лесных бурых почвах, где из-за затенения плодоносит редко.

Кустарник, адаптированный к многоснежным островным зимам, в малоснежные зимы обмерзает до высоты снежного покрова. Весной после малоснежной зимы 2023 г. снег в отделе Сахалинский ботанический сад Ботанического сада-института ДВО РАН сошел 30 марта при среднемноголетнем сроке 20 апреля. В периоды с 10 апреля по 12 мая дважды фиксировали теплые дни с максимальной дневной температурой до 8–18 °С и трижды – периоды ночных заморозков до –4...–8 °С. Вегетация у *V. smallii* началась 4 мая, отрастание побегов – 15 мая. Цветение в этот год происходило с 18 по 27 июня. При этом урожайность на побегах, не затронутых обмерзанием, не отличалась заметно от типичной. С 18 молодых генеративных кустов-рамет одного клона собрали около 250 г, или около 390 штук плодов. Слабая степень влияния температурных контрастов на урожайность связана с поздним началом вегетации и цветения у этого вида, предохраняющим растения от аномальных перепадов температуры после раннего схода снега в малоснежную зиму.

Зима 2023/24 гг., хотя и была многоснежной, завершилась аномально сильным заморозком в горах, где 3–4 мая, спустя неделю после разрушения снежного покрова, вновь лег снег, сохранявшийся в течение 2 дней. У *V. smallii* обмерзаний генеративной сферы после этого не

было отмечено, в отличие от распространенного в тех же биотопах вида *V. ovalifolium*, цветки которого обмерзали на протяжении обоих лет наблюдений в связи с более ранним началом вегетации и цветения – на 11–13 (вегетация) и 24–39 (цветение) суток раньше, чем у *V. smallii*.

Фенологические наблюдения в предгорьях вели за двумя образцами *V. smallii*, высаженными на экспозицию ботанического сада в 2021 г. (рис. 1).

Формирование генеративных почек начинается в конце июля–начале августа предшествующего цветению вегетационного периода. Цветение длится около месяца. К началу раскрытия цветков (рис. 2), несмотря на отмеченную нами протоандрию, рыльце пестика либо начинает раздвигать конус из пыльников, либо появляется над его верхушкой. Длина столбика в бутоне составляет 4,4 мм, при распускании венчика возрастает до 5 мм, к концу цветения варьирует от 5 до 5,3 мм.

В 2023 г. во время окрашивания первых бутонов были заизолированы три ветви с кистями бутонов, изоляты периодически встряхивали (раз в три дня), но плодов не завязалось. У другого бутона, позже изолированного у того же образца, плод сформировался, созрел 16 августа, но семена (73 % которых были невыполненными) не взошли. Семена, посеянные нами от свободного опыления, взятые из естественных популяций, дали полноценные всходы, и сеянцы благополучно развиваются (рис. 3). В природе наблюдается нормальное плодоношение растений с достаточно крупными для рода плодами (рис. 4).

На юге о. Сахалин плоды созревают в августе–начале сентября. Ягоды 7–10 мм длины, пурпурно-черные, без воскового налета, с остающимися зубцами чашечки на верхушке, форма варьирует от круглой до удлинённой. Ягоды имеют плотную консистенцию – тверже, чем у распространенной в культуре черники щитковой (*Vaccinium corymbosum* L.), но мягче, чем у брусники (*V. vitis-idaea* L.) до заморозков. По нашему мнению, консистенцию можно оценить на 5 баллов. Местное население массово заготавливает ягоды для использования в пищу в сыром виде и приготовления варенья с очень приятным специфическим вкусом.

В 2024 г. проведены лабораторные исследования содержания основных биологически активных веществ в листьях и однолетних побегах *V. smallii*, собранных в природе на момент полного созревания ягод (29 августа). Результаты

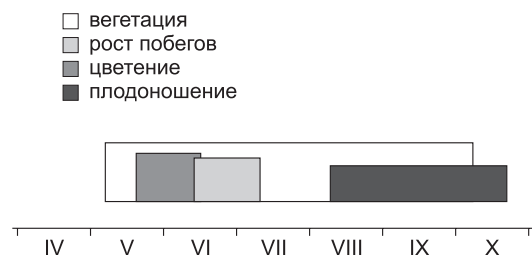


Рис. 1. Феноритмы *Vaccinium smallii* в 2024 г.

Fig. 1. Phenological rhythms of *Vaccinium smallii* in 2024

анализов демонстрируют на момент созревания плодов у черники Смолла высокую ассимиляционную активность листьев, в листьях содержалось в два раза больше сахаров, чем в ягодах (1,6 и 0,8 г/100 г соответственно), в побегах – в три раза больше (2,4 г/100 г). По-видимому, имеет место известный механизм, когда активно образующиеся углеводы и другие ассимилянты в листьях и микоризованных корнях транспортируются к созревающим семенам. В этот момент в листьях в 25 раз больше каротиноидов, чем в ягодах (170,4 и 7,3 г/100 г соответственно), но близкое содержание витамина С (12,9 и 11,8 мг/100 г соответственно). То есть аскорбиновая кислота, ассимилируясь в листьях, накапливается в плодах. Кроме листьев, ценным сырьем для фармакологического и пищевого использования могут служить однолетние побеги *V. smallii* в период созревания плодов, содержащие углеводы, витамин С, а также каротиноиды, концентрация которых более чем в 5 раз превышает содержание в ягодах (39 и 7,3 мг/кг соответственно).

Ранее другими авторами [18, 19] из экстракта листьев *V. smallii* были структурно идентифицированы и изучены *in vitro* как потенциальные средства профилактики рака 10 вторичных метаболитов, включая флавоноиды, кофейную и хлорогеновую кислоты. Результаты показали, что они ингибировали вызванную EGF неопластическую трансформацию мышинных клеток JB6 Cl 41 P+ в мягком агаре с концентрацией ингибирования (концентрация, ингибирующая злокачественную трансформацию 50 % клеток) 20–80 мкм. Более того, все эти натуральные продукты были нетоксичны против клеток JB6 Cl 41 P+ вплоть до концентрации 200 мкм. Н.С. Фурса, Д.С. Круглов и М.М. Белокуров исследовали содержание макро- и микроэлементов в листьях различных видов *Vaccinium*, включая *V. smallii* [20]. У *V. smallii*, наряду с другими видами черник,

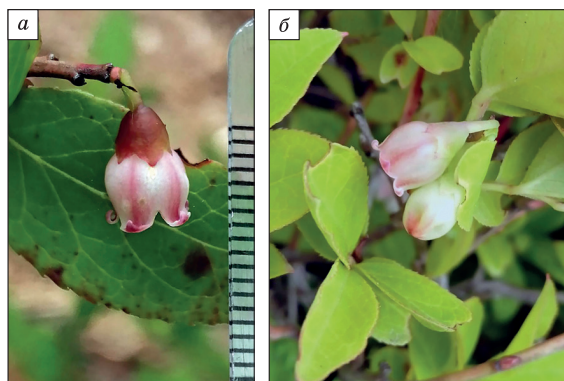


Рис. 2. Цветки (а, б) и бутоны (б) отборной формы *Vaccinium smallii*, 09.07.2024 г.

Fig. 2. Flowers (a, б) and buds (б) of the selected *Vaccinium smallii*, 09.07.2024



Рис. 3. Однолетние сеянцы *Vaccinium smallii*

Fig. 3. One-year-old seedlings of *Vaccinium smallii*

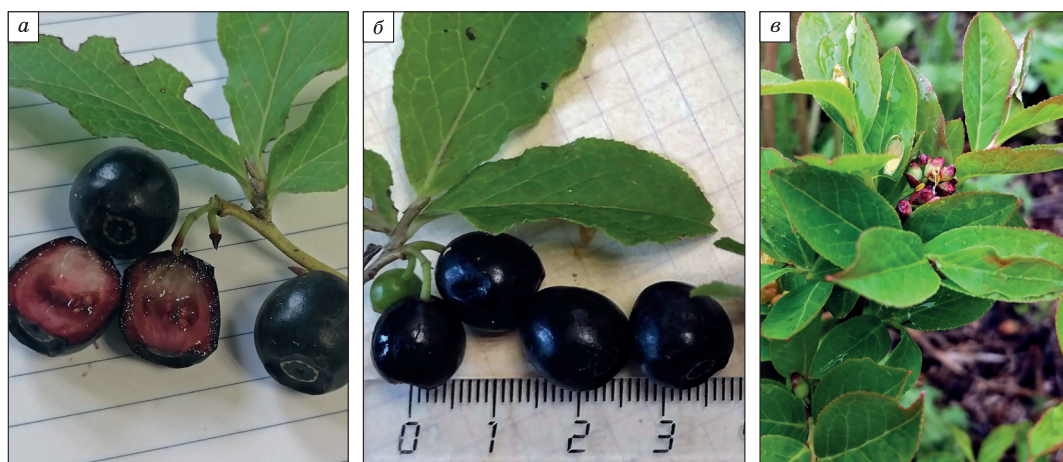


Рис. 4. Плоды отборной формы *Vaccinium smallii*: а – в разрезе, б – с масштабной линейкой, в – на растении

Fig. 4. Fruits of the selected *Vaccinium smallii*: а – in cross-section, б – with scale ruler, в – on the plant

оказалось очень высокое содержание марганца (1169 мкг/кг). По мнению авторов, это связано, вероятно, с обитанием растений на слабокислых почвах и более интенсивным усвоением этого элемента, участвующего в регулировании окислительно-восстановительных процессов в растительных клетках и способствующего биосинтезу веществ с высоким восстановительным потенциалом, таких как фенольные соединения [20].

При изучении содержания отдельных компонентов в плодах *V. smallii* в качестве отборного образца этого вида были взяты 18 экземпляров, составляющих клон, занимавший участок $4,8 \times 4,5$ м. Высота растений варьировала от 50 до 85 см, диаметр кроны – от 15 до 60 см. Плоды у отборной формы отличались лучшими, чем у типичных растений в природе, вкусовыми каче-

ствами (4 балла против 3). Их средний размер составлял 11×9 мм, масса 0,76 г, тогда как у типичной формы эти показатели были меньше: 6×5 мм и 0,34 г соответственно. Характеристики состава плодов приведены в таблице.

При сравнении показателей у различных форм *V. smallii* наблюдается явное превосходство отборной формы по содержанию сахаров – в 15,5 раза и витамина С – в 4,1 раза. Это свидетельствует о сильном варьировании показателей в популяции и целесообразности ведения селекции не только на продуктивность, устойчивость к факторам среды, но и на качество плодов.

Сравнение этих данных с аналогичными у сортов распространенных в культуре видов – культуре североамериканской черники щитковой (*Vaccinium corymbosum* L.) [21, 22] и жимолости

Содержание различных компонентов в плодах отборной формы и типичной *Vaccinium smallii*, произраставших в природных условиях

Average data on fruit composition in selected and typical forms of *Vaccinium smallii* from natural conditions

Показатель	Отборная форма	Типичная форма
Массовая доля сахаров (%)	12,4±0,3	0,8±0,3
Сахаро-кислотный индекс	4,8±0,3	–
Кислотность (%)	2,6±0,2	–
Содержание витамина С (мг/100 г)	53,0±4,1	12,9±0,3
Содержание каротиноидов (мг/100 г)	5,3±1,0	7,3±1,0
Массовая доля антиоксидантов (мг/100 г)	876,0±61,0	–
Массовая концентрация суммы антоцианинов (мг/100 г)	612,0±43,0	–
Массовая доля сухого вещества (%)	13,5±0,4	10,9±0,4

Примечание. Прочерк – определение не проводили.

Note. A dash (–) indicates that the parameter was not determined.

синей (*Lonicera caerulea* L.) [23, 24] выявило: варьирование содержания сахаров типичной и отборной формами *V. smallii* гораздо выше, чем между сортами *V. corymbosum* (от 10,1 до 17,4 %) и *L. caerulea* (от 6,4 до 14,2 %); сахаро-кислотный индекс у отборного образца *V. smallii* близок к лучшим сортам жимолости синей (5,86) [25]; по содержанию витамина С отборный образец *V. smallii* превышает показатели *Lonicera caerulea* в 1,3 раза, по содержанию каротиноидов – в 10–12 раз при сравнении с данными А.В. Тимошина [26].

Размеры (рис. 5) и форма плодов образцов *V. smallii* в питомнике ботанического сада от-

личались разнообразием. Форма отмечена грушевидная, полусферическая, реже овальная или неправильная.

Семена *Vaccinium smallii* имеют оболочку бурого цвета, покрытую выступающими узкими складками или ребрами, которые делят ее на вытянутые ячейки. Зародыш узкоцилиндрической формы длиной 0,7–0,8 мм, шириной около 0,17 мм, располагается со стороны микропиле, занимая около 60 % длины семени, около 25 % его ширины и около 20 % площади среза. У отборного образца в одном плоде насчитывалось в среднем около 50 семян, 82 % из них были полноценными.

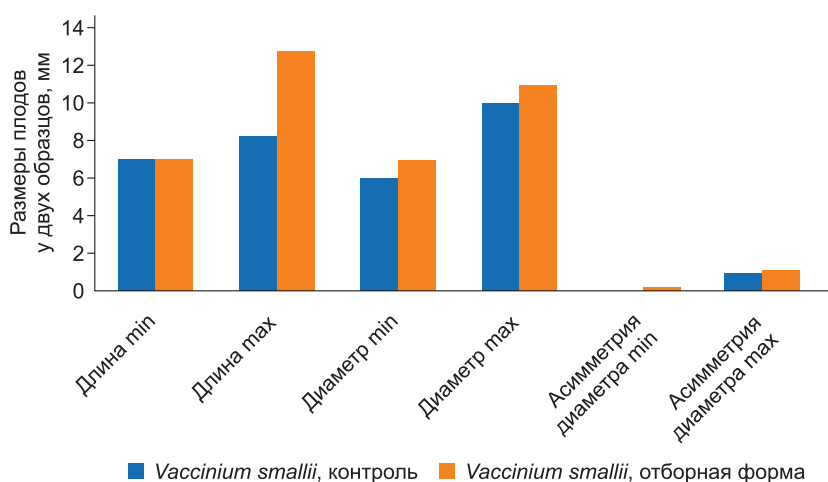


Рис. 5. Вариационный размах размеров плодов у двух образцов *Vaccinium smallii*; min и max – минимальные и максимальные значения

Fig. 5. Range of fruit sizes in two forms of *Vaccinium smallii*; min and max represent the minimum and maximum values, respectively.

Все свежесобранные семена отборной формы были высеяны поверхностно в торфо-песочную смесь в посевном ящике на открытом воздухе 11 сентября 2023 г. Всходы появились 31 мая следующего года, продолжая появляться в течение 4,5 месяцев. Первый настоящий лист был отмечен спустя 11 суток, первичный побег – еще через 2 суток, высота сеянцев не превышала 1 см. Всхожесть составила 7,1 %.

Аналогичное исследование с более длительными наблюдениями, проведенное на другом образце из природы, но после посева в более плотный субстрат, состоящий из равных пропорций торфа, песка и перегноя, показало наличие еще одной, хотя и крайне незначительной, волны всходов – на третий год, во второй половине лета. Но в целом всхожесть за весь период наблюдений у другого образца была в 5,5 раза меньше.

Урожайность отборного образца *V. smallii* составила около 150 кг/га. Следует отметить, что по мере нивелирования постпересадочного стресса урожайность образцов *V. smallii* на экспериментальном участке год от года кратно возрастает.

А.М. Ивлев, классифицировавший почвы Сахалина [25], предлагает использовать для выращивания аборигенных для Сахалина видов черники горно-лесные кислые гумусо-иллювиальные оподзоленные почвы, занимающие крутые горные склоны в высотном поясе каменноберезовых лесов на высотах 600–800 м над уровнем моря. Неустойчивость к малоснежным зимам, предпочтение условий подлеска и условий среднегорья у наиболее массового вида черники – *V. ovalifolium* заставляют рассматривать такие заведомо нерентабельные для сельхозиндустрии высотные территории как единственно возможные с точки зрения биологии вида. Но это не относится к исследуемому нами *V. smallii*.

Заключение

Предпочтение *V. smallii* освещенных участков, позднее начало вегетации и цветения, нивелирующее поздние заморозки, нетребовательность к почвам, влагообеспеченности, устойчивость к болезням и вредителям, постепенная акклиматизация образцов на полностью освещенном экспериментальном участке, превосходство над рядом известных окультуренных видов по качеству плодов, а также широкий диапазон изменчивости некоторых из этих характеристик

позволяют рассматривать этот вид как перспективный к введению в культуру и для селекции. Благоприятным условием для отборов является более чем 15-кратная разница между типичной и отборной формами по содержанию в плодах сахаров, а по витамину С – в 4,1 раза. Введение *V. smallii* в культуру следует рассматривать как актуальную задачу. Об актуальности этого направления свидетельствуют также исследования, проводившиеся с данным видом в других странах. Изучение выделенных отборных форм с комплексом хозяйственно-ценных признаков в природных условиях и культуре, параллельная селекция этого вида с созданием новых наиболее продуктивных сортов будут способствовать разработке агротехнологий возделывания *V. smallii* как новой нетрадиционной ягодной культуры.

Список литературы / References

1. World Flora Online Plant List. Snapshots of the taxonomy. June 2023. Available at: https://powo.science.kew.org/taxon/859141-1?_gl=1*q66cnt*_ga*MTQ0NDI4MDc4Ni4xNjc5Mzc5ODEy*_ga_ZVV2HNW7P6*MTY5OTI0NjYxMi41LjEuMTY5OTI0NjYzOS4wLjAuMA (accessed: 12.08.2025)
2. Мазуренко М.Т., Хохряков А.П. Сем. 68. ВЕРЕСКО-ВЫЕ – ERICACEAE Juss. В кн.: *Сосудистые растения Советского Дальнего Востока*. СПб.: Наука; 1991. С. 119–166.
3. Mazurenko M.T., Khokhryakov A.P. Family 68. Heather – Ericaceae Juss. *Vascular plants of the Soviet Far East*. Saint Petersburg: Nauka; 1991, pp. 119–166. (In Russ.)
4. Thunberg C.T. *Flora japonica sistens plantas insularum japonicarum secundum systema sexuale emendatum redactas ad XX classes, ordines, genera et species*. Bibliopolio I.G. Mølleriano: Lipsiae; 1784. 418 p. Available at: <https://www.biodiversitylibrary.org/page/50709923#page/253/mode/1up> (accessed: 07.10.2024)
5. Ohwi J. *Flora of Japan (in English). A combined, much revised, and extended translation by the author of his Flora of Japan (1953) and Flora of Japan – Pteridophyta (1957)*. Washington: Smithsonian Institution; 1965. 1067 p. Available at: <https://www.biodiversitylibrary.org/item/95083#page/542/mode/1up> (accessed: 07.10.2024)
6. Becker A.L., Crowl A.A., Luteyn J.L., et al. A global blueberry phylogeny: Evolution, diversification, and biogeography of Vaccinieae (Ericaceae). *Molecular Phylogenetics and Evolution*. 2024;201:108202. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2024.108202>
7. Powell E.A., Kron K.A. Hawaiian blueberries and their relatives – a phylogenetic analysis of *Vaccinium* sections *Macropelma*, *Myrtillus*, and *Hemimyrtillus* (Ericaceae). *Systematic Botany*. 2002;(27):768–779. <https://doi.org/10.1043/0363-6445-27.4.768>
8. Жидкин Р.Р., Матвеева Т.В. Проблемы филогении рода *Vaccinium* L. и пути их решения. *Экологическая генетика*. 2022;20(2):151–164. <https://doi.org/10.17816/ecogen109142>
9. Zhidkin R.R., Matveeva T.V. Problems of phylogeny of the genus *Vaccinium* L. and ways of their solution. *Ecological Genetics*. 2022;20(2):151–164. (In Russ.) <https://doi.org/10.17816/ecogen109142>

8. Мияшита Т. Анализ генетических связей между видами *Vaccinium*, включая чернику и местные японские дикие виды, а также использование межвидовых гибридов в селекции. *AgriKnowledge (A database providing information on agricultural science and technology of Japan)*. 2017;(12):1–58. (Яп.) <https://agriknowledge.affrc.go.jp/RN/2010911470>
- Miyashita T. Analysis of genetic relationships among *Vaccinium* species including blueberry and Japanese local wild species, and the use of interspecific hybrids in breeding. Available at: *AgriKnowledge (A database providing information on agricultural science and technology of Japan)*. 2017;(12):1–58. (In Japanese) <https://agriknowledge.affrc.go.jp/RN/2010911470>
9. Громадин А.В., Сахоненко А.Н. Дендрологический справочник. *Деревья и кустарники, пригодные для культивирования в открытом грунте на территории России*. М.: Т-во научных изданий КМК; 2025. 695 с.
- Gromadin A.V., Sakhonenko A.N. *Dendrological reference book. Trees and shrubs suitable for cultivation in open ground on the territory of Russia*. Moscow: KMK; 2025. 695 p. (In Russ.)
10. Баркалов В.Ю., Таран А.А. Список видов сосудистых растений острова Сахалин. В кн.: *Растительный и животный мир острова Сахалин (Материалы Международного сахалинского проекта)*. Ч. 1. Владивосток: Дальнаука; 2004. С. 39–66.
- Barkalov V.Yu., Taran A.A. List of species of vascular plants of Sakhalin Island. In: *Flora and fauna of Sakhalin Island (Materials of the International Sakhalin Project)*. Part 1. Vladivostok: Dalnauka; 2004, pp. 39–66. (In Russ.)
11. Toju H., Tanabe A.S., Ishii H.S. Ericaceous plant-fungus network in a harsh alpine-subalpine environment. *Molecular Ecology*. 2016;25(13):3242–3257. <https://doi.org/10.1111/mec.13680>
12. Nomano F.Y., Mitsui H., Kimura M.T. Capacity of Japanese *Asobara* species (Hymenoptera; Braconidae) to parasitize a fruit pest *Drosophila suzukii* (Diptera; Drosophilidae). *Journal of Applied Entomology*. 2015;139(1-2):105–113. <https://doi.org/10.1111/jen.12141>
13. Копанина А.В. Биология, экология и хозяйственное значение черники овалнолистной (*Vaccinium ovalifolium* Smith) на Сахалине. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Владивосток; 2005. 19 с.
- Kopanina A.V. Biology, ecology and economic importance of blueberry (*Vaccinium ovalifolium* Smith) on Sakhalin. Abstr. ... Diss. Cand. Sci. Vladivostok; 2005. 19 p. (In Russ.)
14. Prokaj E., Saigusa M., Kitamura K., Suzuki K. The effect of atmospheric carbon dioxide enrichment on the growth of blueberry softwood cuttings atmosféras CO₂ bagātināšanas ietekme uz krūmmelleņu lapoto spraudēņu augšanu. *Agromijas vēstis (Latvian Journal of Agronomy)*. 2006;(9):124–129. <https://lufb.llu.lv/conference/agrvestis/content/n9/AgrVestis-Nr9.pdf>
15. Galletta G.J. Blueberries and cranberries. In: Janick J., Moore J.N. (eds). *Advances in Fruit Breeding*. Purdue Univ. Press, West Lafayette; 1975, pp. 154–196.
16. *Климат Южно-Сахалинска*. Ц.А. Швер, Д.Ф. Лазарева (ред.). Л.: Гидрометеиздат; 1982. 256 с.
- Climate of Yuzhno-Sakhalinsk*. Shver Ts.A., Lazareva D.F. (eds.). Leningrad: Gidrometeoizdat; 1982. 256 p. (In Russ.)
17. Методика фенологических наблюдений в ботанических садах СССР. *Бюл. Главн. ботан. сада*. 1979;113:3–11.
- Methodology of phenological observations in botanical gardens of the USSR. *Bull. of the Main Botanical Garden*. 1979;113:3–11. (In Russ.)
18. Mechikova G.Ya., Kuzmich A.S., Ponomarenko L.P., et al. Cancer-preventive activities of secondary metabolites from leaves of the bilberry *Vaccinium smallii* A. Gray. *Phytoterapy Research*. 2010;24(11):1730–1732. <https://doi.org/10.1002/ptr.3282>
19. Ferlemi A.-V., Lamari F.N. Berry Leaves: An Alternative Source of Bioactive Natural Products of Nutritional and Medicinal Value. *Antioxidants (Basel)*. 2016;5(2):17. <https://doi.org/10.3390/antiox5020017>
20. Фурса Н.С., Круглов Д.С., Белокуров М.М. Элементный состав листьев растений рода вакциниум. *Фармация. Фармацевтическая химия и фармакогнозия*. 2017;66(1):33–36. <https://pharmaciyajournal.ru/sites/default/files/fulltext-pdf/25419218-2017-01-08.pdf>
- Fursa N.S., Kruglov D.S., Belokurov M.M. Elemental composition of leaves of plants of the genus *Vaccinium*. *Pharmacy. Pharmaceutical chemistry and pharmacognosy*. 2017;66(1):33–36. (In Russ.) <https://pharmaciyajournal.ru/sites/default/files/fulltext-pdf/25419218-2017-01-08.pdf>
21. Симахин М.В., Ладыженская О.В., Донских В.Г. и др. Сравнительный анализ плодов у сортов голубики высокорослой (*Vaccinium corymbosum* L.) в условиях Московской области. *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. 2022;(9):98–101.
- Simakhin M.V., Ladyzhenskaya O.V., Donskikh V.G., et al. Comparative analysis of fruits in highbush blueberry varieties (*Vaccinium corymbosum* L.) in the Moscow region. *Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy*. 2022; 9:98–101. (In Russ.)
22. Рупасова Ж.А., Василевская Т.И., Криницкая Н.Б. и др. Сравнительная оценка биохимического состава плодов новых интродуцированных сортов голубики высокорослой (*Vaccinium corymbosum* L.) в условиях Беларуси. *Плодоводство*. 2017;29:117–123.
- Rupasova Zh.A., Vasilevskaya T.I., Krinitckaya N.B., et al. Comparative assessment of the biochemical composition of fruits of new introduced varieties of highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) in the conditions of Belarus. *Fruit growing*. 2017;29:117–123. (In Russ.)
23. Богданова Ю.С., Данилин С.И. Жимолость – перспективное сырье для получения продуктов функционального назначения. В кн.: Григорьева Л.В. (ред.). *Приоритетные направления развития садоводства (I Потаповские чтения). Материалы Национальной научно-практической конференции, посвященной 85-й годовщине со дня рождения профессора, доктора сельскохозяйственных наук, лауреата Государственной премии Потапова Виктора Александровича*. Michurinsk: Мичуринский ГАУ; 2019. С. 145–149.
- Bogdanova Yu.S., Danilin S.I. Honeysuckle – a promising raw material for obtaining functional products. In: Grigorieva L.V. (ed.). *Priority areas for the development of horticulture (I Potapov Readings). Proceedings of the National Scientific and Practical Conference dedicated to the 85th anniversary of the birth of Professor, Doctor of Agricultural Sciences, State Prize Laureate Viktor Aleksandrovich Potapov*. Michurinsk: Michurinsk State Agrarian University; 2019, pp. 145–149. (In Russ.)
24. Богатырёв А.Н., Степанова Н.Ю. Технологическая оценка разных сортов жимолости для замораживания и сушки. *Пищевая промышленность*. 2016;3:44–47.
- Bogatyrev A.N., Stepanova N.Yu. Technological evaluation of different varieties of honeysuckle for freezing and drying. *Food industry*. 2016;3:44–47. (In Russ.)
25. Уфимцева Л.В., Глаз Н.В., Лёзин М.С. Сахаро-кислотный индекс при оценке вкусовых качеств сортообразцов жимолости. *Ученые записки Челябинского отделения Русского ботанического общества. Сборник статей*. 2020;3: 123–127.

Ufimtseva L.V., Glaz N.V., Lezin M.S. The use of sugar-acid index in the evaluation of varieties taste of honeyberry. *Scientific notes of the Chelyabinsk branch of the Russian Botanical Society*. 2020;3:123–127. (In Russ.)

26. Тимошин А.В. Качественный состав плодов жимолости различных сортов, введенных в культуру в Красноярском крае. *Вестник КрасГУ*. 2010;(7):52–54.

Timoshin A.V. Qualitative composition of honeysuckle fruits of different varieties introduced into cultivation in Krasnoyarsk Krai. *Vestnik Krasnoyarsk State University*. 2010;7:52–54. (In Russ.)

27. Ивлев А.М. *Почвы Сахалина*. М.: Наука; 1965. 115 с.
Ivlev A.M. *Soils of Sakhalin*. Moscow: Nauka; 1965. 115 p. (In Russ.)

Об авторах

ШЕЙКО Виктор Витальевич, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-8042-656X>, ResearcherID: AAC-8496-2022, Scopus Author ID: 57210289900, SPIN: 8150-4978, e-mail: viktorsheiko@mail.ru

ЛЕБЕДЕВ Дмитрий Валерьевич, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0009-0009-0063-0540>, Scopus Author ID: 58688262900, SPIN: 5514-5669, e-mail: dimitriileb@yandex.ru

СОРОКОПУДОВ Владимир Николаевич, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-0133-6919>, ResearcherID: B-1520-2018, SPIN: 6202-7770, e-mail: sorokopud2301@mail.ru

СОРОКОПУДОВА Ольга Анатольевна, доктор биологических наук, профессор, SPIN: 5139-3029, e-mail: osorokopudova@yandex.ru

Вклад авторов

Шейко В.В. – разработка концепции, методология, верификация данных, проведение исследования, создание черновика рукописи, редактирование рукописи, визуализация, руководство исследованием; **Лебедев Д.В.** – разработка концепции, методология, верификация данных, проведение исследования, выполнение статистического анализа, ресурсное обеспечение исследования, визуализация, редактирование рукописи, администрирование проекта, получение финансирования; **Сорокопудов В.Н.** – руководство исследованием, администрирование данных, редактирование рукописи, администрирование проекта; **Сорокопудова О.А.** – администрирование данных, редактирование рукописи, администрирование проекта

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

SHEIKO, Viktor Vitalievich, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-8042-656X>, ResearcherID: AAC-8496-2022, Scopus Author ID: 57210289900, SPIN: 8150-4978, e-mail: viktorsheiko@mail.ru

LEBEDEV, Dmitry Valerievich, Junior Researcher, <https://orcid.org/0009-0009-0063-0540>, Scopus Author ID: 58688262900, SPIN: 5514-5669, e-mail: dimitriileb@yandex.ru

SOROKOPUDOV, Vladimir Nikolaevich, Dr. Sci. (Agr.), Professor, Chief Researcher, ResearcherID: B-1520-2018, <https://orcid.org/0000-0002-0133-6919>, SPIN: 6202-7770, e-mail: sorokopud2301@mail.ru

SOROKOPUDOVA, Olga Anatolyevna, Dr. Sci. (Biol.), Professor, <https://orcid.org/0000-0002-5774-6271>, ResearcherID: Y-8452-2018, Scopus Author ID: 24528900600, SPIN: 5139-3029, e-mail: osorokopudova@yandex.ru

Authors' contribution

Sheiko V.V. – conceptualization, methodology, validation, investigation writing – original draft, writing – review & editing, visualization, supervision;; **Lebedev D.V.** – conceptualization, methodology, validation, investigation, formal analysis, resources, visualization, writing – review & editing, project administration, funding acquisition; **Sorokopudov V.N.** – supervision, data curation, writing – review & editing, project administration; **Sorokopudova O.A.** – data curation, writing – review & editing, project administration

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 03.09.2025

Поступила после рецензирования / Revised 17.10.2025

Принята к публикации / Accepted 20.11.2025



Оригинальная статья

Морфобиологические особенности смородинно-крыжовникового гибрида в условиях Северо-Востока России

Т. С. Коробкова

*Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация
korobkova_t@list.ru*

Аннотация

Приводятся данные первичной интродукции смородинно-крыжовникового гибрида йошты в Якутском ботаническом саду в 2019–2024 гг. Материалом для исследования служили саженцы, полученные из семян гибрида йошты, собранных с оригинальных кустов питомника «Сады Сибири» (Иркутск). Изучены морфологические, биологические и хозяйственно-ценные признаки йошты в условиях Северо-Востока России. Описаны морфологические особенности листа, цветков, плодов, габитус гибрида, полученного семенным способом. Сроки наступления основных фенофаз определены с учетом требуемых эффективных температур в условиях данного региона. Установлено, что фенологический ритм йошты близок к раннему феноритму якутских видов смородины. Начало вегетации отмечалось на месяц позже, чем у йошты, культивируемой в северо-западных районах России. Быстрое нарастание эффективных температур в Якутии привело к сокращению межфазовых периодов, созревание плодов в Центральной Якутии и Республике Коми протекало в одинаковые сроки, конец июля–середина августа, тогда как начальные фазы отставали на 20–30 дней. Верхушечная почка на однолетних побегах не успевает сформироваться к концу вегетации, часть побегов не вызревают, что ведет к обмерзанию и формирует габитус куста: в середине ветви прямостоячие, по краям куст распадается. Зимостойкость – 2 балла. Масса плодов была самым изменчивым признаком и варьировала от 0,69 г до 2,1 г, коэффициент вариации составил 12–30. Положительными качествами гибрида в условиях Центральной Якутии оказались высокая степень завязывания плодов (75–80 %), устойчивость к болезням и вредителям. Смородинно-крыжовниковые гибриды перспективны в любительском садоводстве, так как имеют потенциал увеличения урожайности, неприхотливы, достаточно зимостойки.

Ключевые слова: смородинно-крыжовниковый гибрид, йошта, фенология, морфология, эффективные температуры, компоненты урожайности

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки России по проекту «Растительный покров криолитозоны таежной Якутии: биоразнообразие, средообразующие функции, охрана и рациональное использование» (рег. № AAAA-A21-121012190038-0).

Для цитирования: Коробкова Т. С. Морфобиологические особенности смородинно-крыжовникового гибрида в условиях Северо-Востока России. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(4):649–656. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-649-656>

Original article

Morphological and biological features of currant-gooseberry hybrid in North-Eastern Russia

Tatiana S. Korobkova

*Institute for Biological Problems of Cryolithozone, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yakutsk, Russian Federation
korobkova_t@list.ru*

Abstract

This study investigates the initial introduction of the currant-gooseberry hybrid yoshta at the Yakut Botanical Garden from 2019 to 2024. Specifically, experimental plant material comprised seedlings propagated from seeds sourced from original stock at the “Gardens of Siberia” Irkutsk. Morphological, biological, and agronomic characteristics of yoshta

were evaluated under the environmental conditions of North-Eastern Russia; these descriptions include leaf, flower, and fruit morphology, as well as overall plant growth form. Furthermore, the timing of key phenophases was established relative to accumulated effective temperatures for the region. While the phenological rhythm of yoshta closely aligns with the early phenological rhythm of native species from Yakutia, the initiation of spring vegetation in Yakutia occurred approximately one month later than reported for yoshta grown in northwestern Russia. Moreover, the rapid seasonal rise in effective temperatures in Yakutia resulted in compressed interphase periods. Thus, although fruit ripening in Central Yakutia and the Komi Republic occurred concurrently from late July to mid-August, initial phenophases exhibited a delay of 20–30 days. Additionally, incomplete apical bud development and insufficient shoot lignification by the end of the growing season were observed, which resulted in partial winter dieback and contributing to a distinct shrub morphology characterized by upright central branches and a sprawling peripheral habit. Regarding plant performance, winter hardiness was rated at 2 points on a standardized scale, and fruit weight exhibited the greatest variability, ranging from 0.69 g to 2.1 g, with a coefficient of variation of 12–30 %. Notably, favorable traits observed under Central Yakutia conditions included a high fruit set rate (75–80 %) and resistance to major diseases and pests. These findings indicate that currant-gooseberry hybrids are promising for cultivation in challenging northern climates due to their yield potential, environmental resilience, and suitability for small-scale horticulture.

Keywords: currant-gooseberry hybrid, yoshta, phenology, morphology, effective temperatures, yield components

Funding. This study was supported by the state assignment from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the project “Vegetation cover of the taiga cryolithozone in Yakutia: Biodiversity, environment-forming functions, conservation, and sustainable use” (reg. No. AAAA-A21-121012190038-0).

For citation: Korobkova T.S. Morphological and biological features of currant-gooseberry hybrid in North-Eastern Russia. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(4):649–656. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-649-656>

Введение

Промышленное производство ягодных культур практически не развито даже в тех районах Якутии, которые считаются сельскохозяйственными (Южная, Центральная Якутия). Любительское садоводство в то же время процветает: выращивают смородину, малину, землянику, жимолость. Выращивание данных культур связано в первую очередь с тем, что во флоре Якутии произрастают дикорастущие виды [1]. Появление местных сортов смородины черной сделало ее самой востребованной культурой в Якутии. Современные якутские сорта выведены путем скрещивания отобранных образцов аборигенных видов смородин (*R. pauciflorum* Turcz. ex Pojark, *R. procumbens* Pall., *R. dikuscha* Fisch. ex Turcz.) с сортами сибирской селекции [2, 3]. Дикорастущий крыжовник во флоре Якутии не произрастает, однако в условиях интродукции культивируется крыжовник обыкновенный, *Ribes úva-crispa*, а на приусадебных участках – его сорта.

На протяжении нескольких веков целью садоводов было получение гибрида смородины и крыжовника, совмещающего лучшие качества крыжовника (устойчивость к болезням и вредителям, высокую урожайность, крупноплодность) и смородины черной (высокое содержание витаминов, отсутствие шипов на побегах). В систематике смородины и крыжовника долгое время преобладала концепция одного рода, сформулированная Э. Янчевским, позволяющая скрещивание видов. Однако, само скрещивание давалось с трудом, гибриды оказывались стерильными.

Первые удачные скрещивания между смородиной и крыжовником были выполнены в Йоркшире Кульвервеллом в 1883 г. Через 12 лет Уилсон также получил похожие гибриды, которые имели стерильную пыльцу [4]. Это дало основание Л. Бербанку для заключения, что смородина и крыжовник, несмотря на ботаническое сходство родов, являются таксонами, значительно удаленными друг от друга в систематическом отношении. Однако многообразие видов в родах позволяет найти более близкородственные и получить смородинно-крыжовниковые гибриды [5]. Современная систематика цветковых растений рассматривает положение рода *Ribes* L. по А. Тахтаджяну [6]: отдел – Magnoliophyta (Angiospermae), класс – Magnoliopsida (Dicotyledones), подкласс – F. Rosidae, надпорядок – Rosanae, порядок – Saxifragales, семейство – Grossulariaceae. Семейство Grossulariaceae – крыжовниковые включает два рода: *Ribes* L. – смородина и *Grossularia* (L.) Mill. – крыжовник [7,8].

В России первые скрещивания крыжовника и смородины произвел И.В. Мичурин, исходя из разработанной им теории скрещивания отдаленных форм растений. Он скрестил сорт крыжовника Штамбовый с сортом смородины черной Сеянец Крандаля (*Ribes odoratum* Wendl.) [9]. Полученные сеянцы оказались практически бесплодными. Плодоносящие гибриды были выведены на Московской плодово-ягодной станции Н.К. Смольяниновой, на Новосибирской плодово-ягодной станции Д.А. Андрейченко [10]. Полученные ими, а также другими исследователями смородинно-крыжовниковые гибриды или ока-

зывались стерильными, или завязывали небольшое количество ягод [11].

Проблема фертильных гибридов была решена методами экспериментальной полиплоидии [12, 13]. При скрещивании смородины черной с крыжовником растопыренным и крыжовником обыкновенным (*Ribes nidigrolaria* = *Ribes nigrum* × *Ribes divaricatum* × *Ribes uva-crispa*) Р. Бауэром в Германии был получен гибрид йошта, получивший название от первых букв названий растений, *Johannisbeere* и *Stachelbeere* (нем.) В ГДР, в Институте селекции плодовых культур Х. Муравски были выведены сорта Jochina и Jochelina, Мого, в Швеции Ф. Нильсоном – гибрид Kroma, в Венгрии А. Порпацы создан сорт Riko [14, 15]. В садоводстве европейских стран, а также США сорта йошты используется широко, в ряде случаев, вытесняя смородину черную. В Россию (СССР) гибрид был завезен в начале 1980-х годов, культивируется садоводами с 1986 г., в основном используются зарубежные сорта. Известные отечественные сорта – смородинно-крыжовниковый гибрид Т.С. Звягиной, полученный в СССР во Всероссийском НИИ садоводства им. И.В. Мичурина и сорт Рекст (Rext), также выведенный в Мичуринске. Сорта отличаются компактными кустами, до 1,5 г.; масса ягоды около 3–5 г, ягоды темного цвета, овальной формы; устойчивы к мучнистой росе и почковому клещу [16]. В Государственный Реестр сорта не входят [17].

Имеющиеся в литературе данные об устойчивости, урожайности гибрида скудные и противоречивые. Известно, что в Закарпатье сорт Jošta хорошо переносит зиму, устойчив к мучнистой росе и антракнозу, но цветки могут поражаться весенними заморозками [18]. На Алтае, по сведениям Л.С. Санкина, сорта Jošta и Kroma наоборот, поражаются грибами и не зимостойки [19]. В Коми отмечаются подмерзание кустов до 4 баллов, плодоношение единичное [20]. Сведения о возделывании культуры йошты на Северо-Востоке России отсутствуют.

Нами была поставлена цель обогащения культурной флоры Якутии новой культурой, смородинно-крыжовниковым гибридом. В задачи входило изучение морфобиологических характеристик йошты, ее хозяйственно-ценных показателей в условиях Северо-Востока.

Материалы и методы

Работы по изучению смородинно-крыжовникового гибрида проводили на открытом участке плодово-ягодного питомника Ботанического сада

Института биологических проблем криолитозоны (БС ИБПК) СО РАН в течение 2019–2024 гг.

Материалом для исследования послужили саженцы, полученные из семян йошты, собранных с оригинальных кустов питомника «Сады Сибири» (Иркутск).

Йошта – гибрид смородины черной и крыжовника, представляет собой многолетний ягодный кустарник высотой более 1,5 м с прямостоячими побегами без шипов. Листья крупные, темно-зеленые без железок, расположены на опушенных черенках. Цветки крупные, бордовые, собраны в средние и короткие малоцветковые кисти (3–5). Ягода черная с фиолетовым отливом, округлая или удлиненная.

Семена были высеяны под зиму в короба высотой 40 см с плодородной почвой (дерновая земля:перегной:песок, 2:1:1). Посевы дополнительно не укрывались. В первой декаде июня 2020 г. появились всходы. В сентябре часть всходов были оставлены в коробе, часть высажены в открытый грунт, расстояние между кустами 1,5 м, между рядами 2,0 м, всего 24 куста. Почва опытного участка – мерзлотная лугово-черноземная малогумусная низко обеспеченная подвижными формами калия и азота, и высоко – фосфора. При посадке саженцев вносили под перекопку полное комплексное минеральное удобрение, г действующего вещества: N – 6, P₂O₅ – 6, K – 10 на 1 м², а также 4 кг перегноя под каждый саженец. Уход за сеянцами и саженцами был одинаков для всех растений.

Ботанический сад расположен на Центрально-Якутской равнине в пределах современной долины р. Лена, в долине «Туймаада» [21]. Согласно агроклиматическому районированию земель сельскохозяйственной зоны Якутской АССР [22], этот район (IVa) характеризуется как засушливый, где все сельскохозяйственные культуры возделываются только на фоне орошения. Климат ботанического сада характеризуется по гидротермическим показателям метеостанции Якутск и укладывается в показатели Центральной Якутии. Средняя годовая температура – 10,2 °С, января – –42,6, июля +18,7 °С. Осадков выпадает 234 мм в год. Распределение осадков неравномерное, на май–конец октября приходится 61–66 % осадков.

Морфологические описания были сделаны на основе описания сортов смородины и крыжовника с использованием издания ВНИИСПК [23].

Изучение биоморфологических признаков, компонентов продуктивности, фенологии развития, зимостойкости, устойчивости к болезням и вредителям проводили по общепризнанным методикам [24]. Урожайность измеряли с каждого куста, не менее 12 кустов. Листья, кисти брали со средней части куста. Определение сумм эффективных температур вычисляли по данным метеостанции г. Якутск и собственным метеоданным. Математическая обработка данных проводилась по методике Г.Н. Зайцева, с использованием статистической программы PAST [25, 26].

Результаты и обсуждение

В 2021 г. вегетация йошты в открытом грунте началась 12 мая, у не пересаженных сеянцев – в начале мая. В конце сезона высота саженцев составила от 6 до 29 см при среднем значении 14 см. Куст прямостоячий. Заложено от 1 до 5 боковых побегов, в среднем 1,9 на одном саженце. В условиях короба сеянцы сформировали высокие раскидистые кусты, высотой от 33 до 53 см, в среднем 42,5 см; заложено от 5 до 7 боковых побегов, в среднем 4,3. Длина боковых распростертых побегов достигала 47 см.

Изучение сроков прохождения основных фенологических фаз в условиях Центральной Якутии в 2022–2024 гг. показало, что начало вегетации йошты отмечали в сроки 9–26 мая при средней дате 15 мая. Сумма активных температур выше 5 °С на эту дату составляла 31,0–155,9 °С, в среднем 97,6 °С. Цветение йошты проходило при сумме эффективных температур от 277,0 до 446,8 °С, в среднем – 361,9. Средняя дата цветения за годы наблюдений составила 8 июня, варьируя с 4 по 11 июня. В Центральной Якутии эффективные температуры нарастают очень быстро и продолжительность межфазных периодов значительно сокращается. Созревание плодов начиналось во второй половине июля, а с 1 по 14 августа отмечали массовое созревание плодов при средней сумме эффективных температур 1528,5 °С, варьирование накопленных сумм по годам составило 1397,3–1659,7 °С. Сравнение наших данных с показателями развития йошты 4–6-летнего возраста в Республике Коми показало, что если вегетация в условиях Центральной Якутии начинается примерно на месяц позже (Коми: 22.04–20.05), цветение – позже на 2 недели или в те же сроки (17.05–11.06), то созревание плодов происходит примерно в те же сроки (27.07–12.08), что свидетельствует о более

быстром прохождении фенологических фаз [20]. При сравнении теплообеспеченности фаз развития эффективными температурами выше 5 градусов, то в Павловске Ленинградской обл. требуется меньшая сумма, чем в окрестности г. Якутск [4], где на среднюю дату начала вегетации (14.04) накапливается $39,2 \pm 13,8$ °С эффективных температур выше 5 °С, цветение происходит в среднем 19.05 при сумме температур $335,1 \pm 37,6$ °С, массовое созревание плодов – 1.08 (сумма температур 1479,7 °С). При этом в Якутском ботаническом саду разница накопленных сумм температур фазы «начало вегетации» почти на 60° С меньше чем в Павловске, а фазы созревания ягод меньше всего на 20–35 °С. Несмотря на достаточное накопление эффективных температур, продолжительность их воздействия оказывается недостаточной, верхушечная почка на однолетних побегах не успевает сформироваться, часть побегов не вызревают полностью, что ведет к обмерзанию и формирует габитус куста: в середине ветви прямостоячие, по краям куст распадается. Максимальная высота 4-летнего куста составляла 86 см, ширина куста в рядовом промежутке – 120 см, в направлении между рядами – 160 см.

Таким образом, габитус изучаемого смородинно-крыжовникового гибрида – компактный куст с прямыми побегами в центре и несколькими распростертыми ветвями в стороны, что соответствует внешним признакам куста сорта Йошта. Цвет коры более старых ветвей коричневый с бурым оттенком, однолетние побеги светло-коричневые.

Лист изучаемого гибрида некрупный, плотный, верхняя сторона темно-зеленая, нижняя более светлая, блестящий 5-лопастной с выделяющейся изогнутой средней лопастью, верхушка которой направлена вниз (рис. 1).

По центральной жилке и жилкам боковых лопастей лист как бы сворачивается. Молодые листья прямые. Угол между боковыми лопастями 150°, между центральной и боковой лопастью 70–75°. Эфирно-масляные железы на поверхности листа отсутствуют, вследствие чего отсутствует характерный запах смородины черной. Опушения нет или оно очень редкое, незаметное, только на черешке встречаются редкие рыжие волоски, достигающие 3 мм. Черешки сверху могут иметь вишневый оттенок, снизу светло-зеленые. Края крупно-городчатые с белыми «коготками». Основание листа сердцевидное или почковидное (табл. 1).

Цветки йошты широко-бокальчатой формы, до 1,0 см в диаметре, собраны в короткие кисти. Чашелистики отогнуты, 0,5–0,7 мм в длину, 0,3 мм в ширину, от светло-розовых в начале цветения до темно-вишневых изогнутых дугой в конце, лепестки мелкие 0,2–0,3 мм зеленовато-желтые, иногда с вишневыми полосками по краям, прямые с острыми вершинами. Соцветие – кисть короткая, изогнутая с 3–6 ягодами.

Ягоды овальной или округлой формы (рис. 2) массой в среднем 1,5 г, темно-фиолетовые, почти черные с остатком засохшей чашечки длиной до 0,6 см., не опадают.

Кожица тонкая, но жесткая. Мякоть ягоды очень густая, зеленого цвета с розовым оттенком. Вкус кисловато-сладкий. Среди ягод урожая 2024 г. встречались единичные ягоды массой до 2,1 г. Из средней пробы такие ягоды исключались в соответствии с методикой.

Первое единичное плодоношение наблюдали в 2022 г. у 3-летних растений, в 2023 г. урожайность варьировала от 248 до 560 г, в среднем с куста 248 г. В 2024 г. средний урожай с куста составил 1200 г, максимальный 2100 г. Завязываемость плодов йошты была высокой (70–80 %). (табл. 2).

Между кустами йошты наблюдалась повышенная изменчивость длины кисти, количества цветков в кисти и завязавшихся ягод в 2023 г., в 2024 г. показатели были более однородными, изменчивость средняя. Внутривидовая изменчивость наблюдалась для качественных и количественных признаков самих плодов (табл. 3).

Масса плодов была самым изменчивым признаком и варьировала от 0,69 до 2,1 г. Меньше



Рис. 1. Листья со средней части куста смородинно-крыжовникового гибрида йошта. Якутский ботанический сад, 2024 г.

Fig. 1. Leaves from the middle part of the bush of the currant-gooseberry hybrid yoshta. Yakutsk Botanical Garden, 2024

изменялась форма ягод, в основном наблюдалось превышение высоты над диаметром, хотя встречались ягоды округлой формы и вытянутые как капля к основанию (до 30 % случаев). Цвет ягод также был преимущественно темно-фиолетовым почти черным, но встречались плоды черные, глянцевые с редкими железками на кожице.

Количество семян в ягоде в 2023 г. составило от 24 до 40 при среднем значении 31 шт., в 2024 г. – от 15 до 60, среднее – 37,2, что намного пре-

Таблица 1

Параметры листа смородинно-крыжовникового гибрида йошты у плодоносящих кустов

Table 1

Leaf morphology indicators for fruit-bearing shrubs of the currant-gooseberry hybrid yoshta

Год	Длина листа, см		Ширина листа, см		Длина черешка, см	
	M± m* lim	CV	M± m lim	CV	M± m lim	CV
2023	<u>7,35 ±0,29</u> 5,3–8,5	14,0	<u>9,07 ±0,41</u> 7,2–11	15,8	<u>4,70 ±0,30</u> 4,5–6,4	21,5
2024	<u>7,7 ±0,29</u> 6,5–8,7	14,0	<u>10,2 ±0,35</u> 7,5–12,3	16,5	<u>4,75 ±0,28</u> 4,5–6,7	20,5

* В числителе среднее значение признака, в знаменателе – его предел.

* The numerator represents the average value of a feature, while the denominator represents its limits.



Рис. 2. Ягоды смородинно-крыжовникового гибрида Йошта. Якутский ботанический сад, 2024 г.

Fig. 2. Berries of the currant-gooseberry hybrid yoshta. Yakutsk Botanical Garden, 2024

вышает количество семян, указанное для йошты в других источниках (от 6 до 9). Такое значительное количество семян может объяснить семенным происхождением материала исследования. Из семян, собранных в 2022 и 2023 гг., получены сеянцы, всхожесть полевая была высокой 75–87 %.

Определяющим свойством генотипа в резко-континентальном холодном климате Якутии является зимостойкость, позволяющая переносить

не только морозы, но и другие неблагоприятные зимние условия. Надо отметить, что за последние десятилетия в Якутии произошло изменение погодных условий, которое привело к уменьшению продолжительности крайне морозной (ниже $-45,2^{\circ}\text{C}$) и жестко-морозной погоды (от $-35,5$ до $-42,4^{\circ}\text{C}$), увеличению безморозного периода. Начало вегетации смородины черной отмечается в более ранние сроки, в конце апреля–начале мая. Фазы цветения, созревания ягод проходят при более высоких суммах температур. По своему ритму развития йошта близка к ранним аборигенным видам смородин, но из-за продолжительного роста побегов они не успевают вызреть, и наблюдается подмерзание верхушек однолетних побегов. Зимостойкость – 2 балла. В то же время побеги йошты отличаются высокой восстановительной и возобновляющей способностью, за счет чего весной куст практически восстанавливается.

Важным свойством смородинно-крыжовникового гибрида является его устойчивость к болезням и вредителям. За период испытания йошты нами не отмечены факты заражения или болезней.

Заключение

Смородинно-крыжовниковый гибрид, культивируемый в Ботаническом саду, соответствует

Средние показатели компонентов урожайности смородинно-крыжовникового гибрида

Table 2

Average indicators of black current-gooseberry hybrids yield

Год	Длина кисти, см		Количество				Завязалось ягод, %
			цветков, шт.		ягод, шт.		
	$\bar{x} \pm m$	CV	$\bar{x} \pm m$	CV	$\bar{x} \pm m$	CV	
2023	3,39 ±0,13	27,69	6,80 ±0,23	22,52	4,73 ±0,22	22,52	70
2024	3,08±0,18	17,43	6,62 ±0,46	19,65	5,5 ±0,32	16,83	80

Элементы продуктивности смородинно-крыжовникового гибрида

Table 3

The elements of black current-gooseberry hybrids productivity

Номер куста	Масса ягоды, г		Высота ягоды, см		Диаметр ягоды, см	
	$M \pm m$	CV	$M \pm m$	CV	$M \pm m$	CV
7.1.2.	1,18 $\pm$ 0,08	22,65	1,34 $\pm$ 0,06	12,05	1,2 $\pm$ 0,01	4,81
7.1.1.	1,37 $\pm$ 0,05	14,93	1,49 $\pm$ 0,02	5,87	1,3 $\pm$ 0,01	5,12
7.1.3.	1,50 $\pm$ 0,03	12,0	1,3 $\pm$ 0,01	3,62	1,27 $\pm$ 0,01	3,80
7.1.4.	0,69 $\pm$ 0,06	27,39	1,42 $\pm$ 0,09	16,05	1,46 $\pm$ 0,06	
7.2.3	1,12 $\pm$ 0,07	30,23	1,42 $\pm$ 0,09	16,05	1,46 $\pm$ 0,06	10,38

морфологическим показателям сорта Jošta. Об этом свидетельствуют габитус с прямостоячими ветвями в середине куста и распростертыми по краям; форма листа, при которой средняя часть листа вогнута и лист как бы сворачивается; отсутствие опушенности, эфирно-масляных железок на листовых пластинках.

В условиях Центральной Якутии обеспеченность эффективными температурами вегетации достаточна. Продолжительность самого вегетационного периода мала, побеги имели затяжной рост, вследствие чего древесина не успевала вызреть, верхушечная почка не успевала сформироваться к концу вегетации, зимой верхняя треть побегов повреждалась морозами.

В целом, смородинно-крыжовниковый гибрид сорт Йошта показал перспективность выращивания в любительском садоводстве и может быть использован в дальнейшей селекции, так как имеет потенциал увеличения урожайности, неприхотлив, достаточно зимостоек и устойчив к болезням и вредителям. Положительным качеством оказалась высокая степень завязывания плодов (75–80 %), что обеспечивает хороший урожай при любой погоде. Целесообразно провести сортоиспытание других имеющихся сортов смородинно-крыжовникового гибрида для выделения зимостойких и урожайных сортов в условиях Центральной Якутии.

Список литературы / References

1. Данилова Н.С., Коробкова Т.С. *Дикие родичи культурных растений Якутии*. Новосибирск: Наука; 2013. 38 с. Danilova N.S., Korobkova T.S. *Wild relatives of cultivated plants*. Novosibirsk: Nauka; 2013. 38 p. (In Russ.)
2. *Полный сортовой каталог России. Ягодные культуры*. М.: ЭКСМО-пресс, Лик-пресс; 2001. 414 с. The Varietal Catalog of Russia. Berry Crops. Moscow: EKSMO-Press, Lik-Press Publ.; 2001. 414 p. (In Russ.)
3. Габышева Н.С. Оценка межвидовых гибридов смородины черной в Якутии. *Аграрный вестник Урала*. 2022;216(1): 56–65. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2022-216-01-56-65> Gabysheva N.S. Evaluation of interspecific hybrids of black currant in Yakutia. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2022;216(1): 56–65. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2022-216-01-56-65> (In Russ.)
4. Тихонова О.А., Гаврилова О.А., Пупкова Н.А. Морфобиологические особенности смородинно-крыжовниковых гибридов в условиях северо-запада России. *Современное садоводство - Contemporary horticulture*. 2015;4:42–60. Tikhonova O.A., Gavrilova O.A., Pupkova N.A. Morphobiological features of black currant – gooseberry hybrids in the North-West of Russia. *Contemporary horticulture*. 2015;4:42–60 (In Russ.)
5. Сергеева К.Д. *Крыжовник*. М.: Агропромиздат; 1989. 208 с. Sergeeva K.D. *Gooseberries*. Moscow: Agropromizdat Publ.; 1989. 208 p. (In Russ.)

6. Тахтаджян А.Л. *Система магнолиофитов = Systema magnoliophorum*. Л.: Наука; 1987. 439 с. Takhtadzhian A.L. *Systema magnoliophorum*. Leningrad: Nauka; 1987. 439 p. (In Russ.)
7. *Конспект флоры Сибири. Сосудистые растения = Conspectus florae Sibiriae. Plantae vasculares*. Новосибирск: Наука; 2005. 361 с. *Conspectus florae Sibiriae. Plantae vasculares*. Novosibirsk: Nauka; 2005. 361 p. (In Russ.)
8. Горбунов И.В. Современное состояние систематики рода *Ribes* L. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2012;37(5):246–248. Gorbunov I.V. Present-day state of *Ribes* L. genus taxonomy. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2012;37(5): 246–248. (In Russ.)
9. Павлова Н.М. *Черная смородина*. М.; Л.: Сельхозгиз; 1955. 277 с. Pavlova N.M. *Black currant*. Moscow; Leningrad: Sel'hozgiz Publ.; 1955. 277 p. (In Russ.)
10. Кантор Т.С. К проблеме стерильности смородинно-крыжовниковых гибридов. В кн.: *Культура черной смородины в СССР*. М.; 1972. С. 448–455. Kantor T.S. About the problem of sterility black currant – gooseberry hybrids. In: *Black currant in the USSR*. Moscow; 1972, pp. 448–455 (In Russ.)
11. Бавтута Г.А. Обогащение генофонда и создание исходного материала плодово-ягодных культур на основе экспериментальной полиплоидии и мутагенеза: Автореф дис. ... докт. биол. наук. Тарту; 1980. 49 с. Bavtuto G.A. The enrichment of the gene pool and the establishment of the initial material of fruit crops on the basis of experimental polyploidy and mutagenesis: Abstr. ... Dis. Doc. Sci. Tartu; 1980. 49 p. (In Russ.)
12. Неброй К.Ю. Современные направления селекционных исследований культуры смородины черной и возможные пути их реализации. *Современное садоводство – Contemporary horticulture*. 2023;1:15–25. https://www.doi.org/10.52415/23126701_2023_0102 Nebroy K.Y. Modern directions in black currant breeding research and possible ways of their implementation. *Contemporary horticulture*. 2023;1:15–25. (In Russ.). https://www.doi.org/10.52415/23126701_2023_0102
13. Бученков И.Э., Чернецкая А.Г. Использование аллополиплоидии в селекции смородины черной и крыжовника. *Вестник ПолесГУ. Сер. Природоведческих наук*. 2013;1:3–99. Buchenkov I.E., Cherneckaya A.G. Use of allopolyploidy selection of black currants and gooseberry. *Bulletin of Polesky State University. Series in Natural Sciences*. 2013;1:3–9. (In Russ.)
14. Пикунова А.В., Мартиросян Е.В., Князев С.Д., Рыжова Н.Н. Применение RAPD-анализа для изучения генетического полиморфизма и филогенетических связей у представителей рода *Ribes* L. *Экологическая генетика*. 2011;9(2):34–44. Pikunova A.V., Martirosyan E.V., Knyazev S.D., Ryzhova N.N. Molecular analysis of genetic polymorphism and phylogenetic relationships in *Ribes* L. *Ecological genetics*. 2011; 9(2):34–44. (In Russ.)
15. Trajkovski V., Hjalmarsson I., Wallace B. Gooseberry and black currant breeding in Sweden. В кн.: Трунов Ю.В. (ред.) *Современное состояние культур смородины и крыжовника*. Мичуринск: Всероссийский научно-исследовательский институт садоводства им. И.В. Мичурина; 2007. С. 201–205. (In Eng.)

Trajkovski V., Hjalmarsson I., Wallace B. Gooseberry and black currant breeding in Sweden. In: Trunov Yu.V. (ed.) *Modern state of currant and gooseberry crops*. 2007: 201–205.

16. Жбанова Е.В., Жидехина Т.В., Акимов М.Ю. и др. Плоды сортов ягодных и нетрадиционных садовых культур, выращенных в Черноземье – ценные источники незаменимых микронутриентов. *Пищевая промышленность*. 2021;(3):8–11. <https://doi.org/10.24412/0235-2486-2021-3-0020>.

Zhbanova E.V., Zhidekhina T.V., Akimov M.Yu., et al. The fruits varieties of berry-like and nontraditional horticultural crops grown in Black Soil zone are the valuable sources of indispensable micronutrients. *Food processing industry = Pischevaya promyshlennost'*. 2021;(3):8–11. <https://doi.org/10.24412/0235-2486-2021-3-0020>. (In Russ.)

17. Голяева О.Д., Курашев О.В., Князев С.Д., Бахотская А.Ю. Новые сорта смородины и крыжовника селекции ВНИИСПК. *Вестник Российский сельскохозяйственной науки*. 2020;(4):41–46. <https://doi.org/10.30850/vrsn/2020/4/41-46>.

Golyaeva O.D., Kurashev O.V., Knyazev S.D., Bakhotskaya A.Yu. New varieties of currants and gooseberry breeding plants. *Vestnik of Russian Agricultural Science*. 2020;(4):41–46. <https://doi.org/10.30850/vrsn/2020/4/41-46>. (In Russ.)

18. Фогел И.Ю. Биологические особенности, продуктивность и размножение Йошты в условиях Закарпатья: Дис. ... канд. с.-х. наук. Самохваловичи; 1993. 26 с.

Fogel I.Yu. Biological features, productivity and propagation «Jošta» in conditions of Subcarpathian Ruthenia: Diss Agri. Cand. Sci. Samokhvalovich; 1993. 26 p. (In Russ.)

19. Санкин Л.С. Селекция смородинно-крыжовниковых гибридов на Алтае. В кн.: Гудковский В.А. (ред.) *Состояние и перспективы развития ягодоводства в СССР*. Мичуринск: ВНИИС; 1990. С. 60–63.

Sankin L.S. Breeding of black currant – gooseberries hybrids in conditions of Altai. In: Gudkovsky V.A. (ed.) *Status and prospects of development of berry-culture in the USSR*. Mikhurinsk; 1990, pp. 60–63. (In Russ.)

20. Тимушева О.К., Рябинина М.Л. Итоги интродукции: плодово-ягодные растения. *Вестник Института биологии Коми НЦ УБО РАН*. 2011;6:37–44.

Timusheva O.K., Ryabinina M.L. Introduction results: fruit and berry plants. *Vestnik instituta biologii Komi NTs UrO RAN [Herald of The Institute of Biology Komi Research center of Ural Division of the Russian Academy of Sciences]* 2011;6:37–44. (In Russ.)

21. Чевычелов А.П., Горохов А.Н., Николаева О.А. и др. Почвенно-растительный покров Якутского ботанического сада. Новосибирск: СО РАН; 2022. 164 с.

Chevychelov A.P., Gorokhov A.N., Nikolaeva O.A., et al. *Soil and vegetation cover of the Yakut Botanical Garden*. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch; 2022. 164 p.

22. Зональная система земледелия Якутской АССР. Якутск; 1982. 253 с.

The zonal farming system of the Yakut ASSR. Yakutsk; 1982. 253 p. (In Russ.)

23. Помология. В 5 томах. Т. 4 Смородина. Крыжовник. Орел: ВНИИСПК; 2009. 468 с.

Pomology in 5 Volumes. Gooseberry. Volume 4. Orel: VNIICPK Publ.; 2009. 468 p. (In Russ.)

24. Программа и методика сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур. Орел: ВНИИСПК; 1999. С. 351–373.

Program And Methods Of Variety Investigation Of Fruit, Berry And Nut Crops. Orel: VNIICPK Publ.; 1999, pp. 351–373. (In Russ.)

25. Зайцев Г.Н. Методика биометрических расчетов. Математическая статистика в экспериментальной ботанике. М.: Наука; 1973. 256 с.

Zaytsev G.N. The Methodology Of Biometric Calculations. Mathematical Statistics In Experimental Botany. Moscow: Nauka; 1973. 256 p.

26. Hammer H., Harper D.A.T., Ryan P.D. Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Paleontologica Electronica*. 2001;4(1):1–9.

Об авторе

КОРОБКОВА Татьяна Сергеевна, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, и.о. заведующего отдела Ботанический сад, <https://orcid.org/0009-0004-9358-8778>, ResearcherID: J-7915-2018, Scopus Author ID: 57393153600, SPIN: 5758-7936, e-mail: korobkova_t@list.ru

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

About the author

KOROBKOVA, Tatiana Sergeevna, Cand. Sci. (Biol.), Leading Researcher, Head of the Botanical Garden, <https://orcid.org/0009-0004-9358-8778>, ResearcherID: J-7915-2018, Scopus Author ID: 57393153600, SPIN: 5758-7936, e-mail: korobkova_t@list.ru

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 21.02.2025

Поступила после рецензирования / Revised 11.09.2025

Принята к публикации / Accepted 17.10.2025



Краткое сообщение

Биоресурсная коллекция генетического материала современных диких млекопитающих Северо-Востока России

Н. А. Соловьева[✉], И. М. Охлопков, Н. И. Павлова, А. В. Артемьева, О. И. Кычкина,
М. М. Сидоров, М. И. Сазонова, Н. А. Михайлова, Н. В. Мамаев

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

[✉]sonata60878@yandex.ru

Аннотация

Представлена информация о единой централизованной биоресурсной коллекции (БРК) генетического материала диких видов современных млекопитающих из числа обитающих на территории Северо-Востока России. БРК сформирована на базе Института биологических проблем криолитозоны СО РАН методом объединения локальных коллекций в единое систематизированное хранилище первичного биологического материала, образцов ДНК и сопряженных с ними баз данных различных видов млекопитающих. Коллекционный фонд БРК составил порядка 5 тыс. единиц хранения и представлен 45 дикими видами млекопитающих из 70 обитающих в регионе, в коллекции также присутствуют образцы гибридов волка и собаки. Сформированная единая БРК представляет собой комплекс инструментов для выполнения молекулярно-генетических исследований, направленных на генетическую идентификацию, уточнение систематической принадлежности, а также построение эволюционных схем.

Ключевые слова: биоресурсная коллекция, генетические ресурсы, ДНК, видовое разнообразие, млекопитающие
Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки России 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» (№ 121020500194-9) и проекту «Изучение и развитие биологических (биоресурсных) коллекций как основа сохранения биоразнообразия Северо-Востока Азии» (№ 125102712105) с применением оборудования ЦКП ЯНЦ СО РАН (грант № 13.ЦКП.21.0016).

Для цитирования: Соловьева Н.А., Охлопков И.М., Павлова Н.И., Артемьева А.В., Кычкина О.И., Сидоров М.М., Сазонова М.И., Михайлова Н.А., Мамаев Н.В. Биоресурсная коллекция генетического материала современных диких млекопитающих Северо-Востока России. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(4):657–663. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-657-663>

Short communication

Bioresource collection of genetic material from modern wild mammals in North-Eastern Russia

Natalia A. Solovyeva[✉], Innokentiy M. Okhlopov, Naryyana I. Pavlova,
Anna V. Artemyeva, Oksana I. Kychkina, Mihail M. Sidorov,
Mariya I. Sazonova, Nyurguiaana A. Mikhailova, Nikolay V. Mamaev

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

[✉]sonata60878@yandex.ru

Abstract

This article describes the unified, centralized Bioresource Collection (BRC) of genetic material from modern wild mammalian species of Northeastern Russia. This BRC was established at the Institute of Biological Problems of the Cryolithozone of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences by consolidating local collections into a single, systematized repository comprising primary biological materials, DNA samples, and associated databases for

various species. The BRC currently contains approximately 5,000 items representing 45 wild mammal species out of the 70 species native to the region. Additionally, the collection includes samples of wolf-dog hybrids. This unified BRC serves as a comprehensive resource for molecular genetic studies aimed at genetic identification, clarification of systematic affiliations, and the construction of evolutionary frameworks.

Keywords: bioresource collection, genetic resources, DNA, species diversity, mammals

Funding. This study was conducted within the framework of the state assignments from the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, specifically under the project titled “Populations and communities of animals of aquatic and terrestrial ecosystems of the Cryolithozone in the Eastern Sector of the Russian Arctic and Subarctic: diversity, structure and sustainability under natural and anthropogenic influences” (No. 121020500194-9). Additionally, it was supported by the project “Study and development of biological (bioresource) collections as a basis for the conservation of biodiversity in North-Eastern Asia” (No. 125102712105) using the equipment from the Core Shared Research Facilities of the Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences” (grant No. 13.CSRF.21.0016).

For citation: Solovyeva N.A., Okhlopov I.M., Pavlova N.I., Artemyeva A.V., Kychkina O.I., Sidorov M. M., Sazonova M.I., Mikhailova N.A., Mamaev N.V. Bioresource collection of genetic material from modern wild mammals in North-Eastern Russia. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(4):657–663. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-657-663>

Введение

Изучение животного разнообразия требует немалых ресурсов не только при сборе материала, но и для его хранения в виде систематизированных хранилищ – коллекций [1, 2]. По данным Минобрнауки России, в 2023 г. в РФ функционировало более 120 уникальных научных биоресурсных коллекций, в их числе коллекция генетических ресурсов мировой фауны Зоологического института РАН (Санкт-Петербург), коллекция генетических ресурсов культурных растений и их диких родичей ВИР им. Н.И. Вавилова (Санкт-Петербург) и др.

Учитывая активное использование генетических технологий, разрабатываемых на материалах ранее собранных и вновь пополняемых биоресурсных коллекций (БРК), в 2024 г. Президентом России В.В.Путиным был подписан федеральный закон, формирующий правовые основы создания и сохранения биологических (биоресурсных) коллекций, находящихся в собственности РФ, образования биоресурсных центров и организации их деятельности [3].

Вместе с тем, несмотря на достигнутые успехи в развитии БРК, ряд проблем все еще сохраняется. Прежде всего это отсутствие специализированной инфраструктуры, предназначенной для хранения коллекционных фондов генетических материалов, а также отсутствие унифицированных форм документов, регламентирующих работу с ними.

Республика Саха (Якутия) – один из крупных и уникальных в плане климатогеографических условий регионов России, на его территории обитает порядка 70 видов диких млекопитаю-

щих [4, 5], изучением которых занимаются как региональные, так и федеральные научные и образовательные учреждения. Как правило, ученые поддерживают свои исследовательские коллекции и работают с ними самостоятельно и часто не владеют полной информацией о имеющихся в учреждении коллекциях. Такой принцип работы может не только снижать конкурентоспособность института в целом, но и приводить к частичной или полной потере как самой коллекции, так и ее пригодности для использования современных лабораторных методов в связи с разными условиями хранения.

Являясь одним из ведущих научных институтов, расположенных на территории Якутии, занимающихся изучением млекопитающих как компонента мерзлотных экосистем, понимая преимущества систематизированных коллекций большого объема, содержащих паспортизированные образцы хорошего качества, пригодные для проведения комплексных исследований с применением современных технологий и методов, с 2022 г. ИБПК СО РАН проводит работу по объединению локальных исследовательских биоколлекций млекопитающих, представленных в институте. Целью объединения локальных исследовательских коллекций является формирование единой централизованной биоресурсной коллекции генетических материалов современных диких млекопитающих, обитающих на территории Северо-Востока России, для последующего проведения научных молекулярно-генетических исследований, направленных на разработку и внедрение в практику методов генетической идентификации, уточнения систематической принадлежности, построе-

ния эволюционных схем формирования таксонов и установления родственных связей между ними, определения полиморфных вариантов генов, определяющих адаптационные возможности и механизмы выживания животных в экстремальных климатических условиях.

Материалы и методы

Сбор локальных коллекций проводился с 2008 по 2024 г., в том числе по охотничьим видам в рамках квот добычи в научно-исследовательских целях института и по любительским разрешениям от охотников, отловам мышевидных грызунов при экспедиционных исследованиях, отдельные пробы по охотничьим млекопитающим отбирались в ходе выполнения экспертизы для федеральных и региональных контрольно-надзорных органов по фактам незаконной добычи.

Для успешного формирования единой централизованной БРК генетических материалов на базе ИБПК СО РАН был создан Локальный этический комитет, контролирующий соблюдение этических норм при заборе биологического материала и проведении научно-исследовательских работ; разработано положение, регламентирующее оборот биологических материалов БРК как внутри института, так и при совместном проведении работ со сторонними организациями; разработаны унифицированные формы документов, необходимые для соблюдения единых требований к сбору, пробоподготовке и паспортизации образцов. Сформирован коллектив, закуплен комплекс оборудования, позволяющий проводить выделение образцов геномной ДНК с последующей оценкой ее качества и проведением молекулярно-генетического анализа.

Результаты и обсуждение

На сегодня день единая централизованная БРК генетического материала диких видов современных млекопитающих из числа обитающих на территории Северо-Востока России, собранная на базе ИБПК СО РАН, состоит из БРК первичного биологического материала и Банка ДНК. Коллекционный фонд содержит порядка 5 тыс. образцов и представлен 45 дикими видами млекопитающих, также в коллекции присутствуют образцы гибридов волков и собак. Фонд первичных материалов коллекции постоянно пополняется, сбор образцов проводится научными сотрудниками ИБПК СО РАН, охотниками родовых общин и контрольно-надзорных органов по раз-

решениям на добычу охотничьих животных в научно-исследовательских целях. Факты передачи образцов биологических материалов в фонд БРК ИБПК СО РАН подтверждаются актами передачи согласно положению о БРК ИБПК СО РАН. Каждый из переданных оригинальных образцов первичного материала, представленный венозной кровью, мышечной/хрящевой тканью, проходит оценку физических качеств, после чего ему присваивается идентификационный номер БРК ИБПК СО РАН. Включенные в фонд образцы депонируются на длительное хранение в морозильные установки при температуре -80°C .

Все образцы, включаемые в фонд БРК, паспортизованы, обладают общим набором специфических характеристик, хранятся в контролируемых условиях с соблюдением генетической чистоты, целостности и аутентичности. Сопреженные с образцами базы данных содержат: комплексную информацию, касающуюся идентификационных номеров; цифровые снимки, сделанные при отборе особи, подтверждающие принадлежность к виду; указание вида согласно классификации; отобранный тип биологического материала; пол; возраст; место и время отбора; морфометрические и краниометрические данные особи; условия транспортировки и хранения образцов; тип фиксирующего раствора для отобранных тканей; способ выделения ДНК; параметры качества образцов ДНК; результаты генотипирования; результаты 3D сканирования черепов крупных млекопитающих.

В таблице указаны названия и систематическая принадлежность, приведенная по относительно последней полной сводке «Млекопитающие России: систематико-географический справочник» [6].

В данном сообщении даются только видовые названия без подразделения на подвидовые принадлежности.

Материалы из фонда БРК ИБПК СО РАН активно используются в научно-исследовательской работе сотрудников при выполнении молекулярно-генетических исследований в лаборатории института, при проведении совместных работ с российскими и зарубежными институтами по грантам и договорам. С использованием материалов из фонда БРК сотрудниками лаборатории молекулярной генетики ИБПК СО РАН разрабатываются и внедряются методики, направленные на проведение генетической идентификации и уточнение систематической принадлежности.

Видовое разнообразие биоресурсной коллекции ИБПК СО РАН

Species diversity within the IBPC SB RAS bioresource collection

Номер	Отряд/семейство/вид Squad/family/species	Географические районы сбора Collection points
Отряд Парнокопытные / Семейство Оленьи		
1	Американский лось (<i>Alces (alces) americanus</i> C., 1822)	Центральная Якутия, Западная Якутия, Северо-Восточная Якутия
2	Дикий северный олень (<i>Rangifer tarandus</i> L., 1758)	Тундровые популяции Северной Якутии, таежная популяция Северо-Восточной Якутии
3	Изюбрь; Марал (<i>Cervus (elaphus) canadensis</i> E., 1777)	Центральная Якутия, Юго-Западная Якутия
4	Сибирская косуля (<i>Capreolus (capreolus) pygargus</i> P., 1771)	Центральная Якутия
Семейство Кабарговые		
5	Кабарга (<i>Moschus moschiferus</i> L., 1758)	Северо-Восточная Якутия
Семейство Полорогие		
6	Снежный баран (<i>Ovis nivicola</i> E., 1829)	Хараулахский хребет, хребет Орулган, хребет Сунтар-Хаята, хребет Черского, Момский хребет
Отряд Хищные / Семейство Медвежьи		
7	Бурый медведь (<i>Ursus (Ursus) arctos</i> L., 1758)	Центральная Якутия, Западная Якутия и Юго-Западная Якутия
Семейство Псовые		
8	Волк (<i>Canis (Canis) lupus</i> L., 1758)	Центральная Якутия, Западная Якутия, Северо-Западная Якутия, Северо-Восточная Якутия, Северная Якутия
9	Обыкновенная лисица (<i>Vulpes (Vulpes) vulpes</i> L., 1758)	Центральная Якутия
10	Песец (<i>Vulpes (Alopex) lagopus</i> L., 1758)	Северная Якутия, Северо-Восточная Якутия
Семейство Кошачьи		
11	Рысь (<i>Lynx lynx</i> L., 1758)	Центральная Якутия
Семейство Настоящие тюлени		
12	Кольчатая нерпа (<i>Pusa hispida</i> S., 1775)	Море Лаптевых
Семейство Куны		
13	Росомаха (<i>Gulo gulo</i> L., 1758)	Северная Якутия, Северо-Восточная Якутия, Юго-Восточная Якутия
14	Соболь (<i>Martes (Martes) zibellina</i> L., 1758)	Центральная Якутия, Юго-Восточная Якутия, Южная Якутия, Северо-Западная Якутия, Западная Якутия, Юго-Западная Якутия, Северо-Восточная Якутия
15	Американская норка (<i>Neovison vison</i> S., 1777)	Интродуцированный с 1961–1963 гг. в Якутии вид, Центральная Якутия, Южная Якутия, Западная Якутия
16	Горностай (<i>Mustela (Mustela) erminea</i> L., 1758)	Центральная Якутия
17	Колонок (<i>Mustela sibirica</i> P., 1773)	Центральная Якутия
18	Ласка (<i>Mustela nivalis</i> L., 1766)	Южная Якутия, Северо-Восточная Якутия
Отряд Зайцеобразные / Семейство Зайцевые		
19	Заяц-беяк (<i>Lepus timidus</i> L., 1758)	Северо-Восточная Якутия
Семейство Пищуховые		
20	Северная пищуха (<i>Ochotona (Pika) hiperborea</i> Pallas, 1811)	Северо-Восточная Якутия
21	Туруханская пищуха (<i>Ochotona (Pika) turuchanensis</i> Naumov, 1934)	Юго-Восточная Якутия
Отряд Насекомоядные		
22	Тундряная (тундровая) бурозубка (<i>Sorex tundrensis</i> Merriam, 1900)	Северо-Западная Якутия

Номер	Отряд/семейство/вид Squad/family/species	Географические районы сбора Collection points
23	Крупнозубая бурозубка (<i>Sorex daphaenodon</i> Thomas, 1907)	Центральная Якутия
24	Средняя бурозубка (<i>Sorex caecutiens</i> Laxmann, 1785 (1788))	Центральная Якутия, Северо-Западная Якутия
25	Равнозубая бурозубка (<i>Sorex isodon</i> Turov, 1924)	Южная и Юго-Западная Якутия
26	Плоскочерепная (бурая) бурозубка (<i>Sorex roboratus</i> Hollister, 1913)	Центральная Якутия, Северо-Западная Якутия
27	Крошечная бурозубка (<i>Sorex minutissimus</i> Zimmermann, 1780)	Центральная Якутия
Отряд Рукокрылые/Семейство Гладконосые (Кожановые)		
28	Кожанок северный (<i>Eptesicus nilsoni</i> Keyserling et Blasius, 1839)	Центральная Якутия
Отряд Грызуны /Семейство Беличи		
29	Обыкновенная белка (<i>Sciurus (Sciurus) vulgaris</i> L., 1758)	Северо-Восточная Якутия, Юго-Восточная Якутия, Центральная Якутия
30	Обыкновенная летяга (<i>Pteromys volans</i> L., 1758)	Юго-Восточная Якутия
31	Азиатский бурундук (<i>Tamias (Eutamias) sibiricus</i> Laxmann, 1769)	Центральная Якутия
32	Восточный длиннохвостый суслик (<i>Uroditellus (undulatus) undulatus</i> Pallas, 1779)	Центральная Якутия
33	Берингийский суслик (<i>Uroditellus parryi</i> Richardson, 1825)	Северо-Восточная Якутия
34	Камчатский (черношапочный) сурок (<i>Marmota camtschatica</i> Pallas, 1811)	Северо-Восточная Якутия
Семейство Хомяковые		
35	Красная полевка (<i>Myodes rutilus</i> Pallas, 1779)	Центральная Якутия, Южная Якутия, Юго-Западная Якутия, Северо-Западная Якутия
36	Красно-серая полевка (<i>Craseomys rufocanus</i> Sundevall, 1846)	Южная Якутия, Юго-Западная Якутия
37	Лемминговидная полевка (<i>Alticola (Aschizomys) lemmings</i> Miller, 1899)	Северо-Восточная Якутия, Южная Якутия
38	Узкочерепная полевка (<i>Lasiopodomys (Stenocranius) gregalis</i> Pallas, 1779)	Центральная Якутия, Юго-Западная Якутия
39	Полевка-экономка (<i>Alexandromys (gr. «oeconomus»)</i> oeconomus Pallas, 1776)	Центральная Якутия
40	Лесной лемминг (<i>Myopus schisticolor</i> Lilljeborg, 1844)	Северо-Западная Якутия
41	Сибирский лемминг (<i>Lemmus sibiricus</i> Kerr, 1792)	Северная Якутия
42	Копытный лемминг (<i>Dicrostonyx (Misothermus) torquatus</i> Pallas, 1778)	Северная Якутия
43	Ондатра (<i>Ondatra zibethicus</i> Linnaeus, 1766)	Центральная Якутия
Семейство Мышиные		
44	Мышь-малютка (<i>Micromys minutus</i> Pallas, 1771)	Северо-Западная Якутия
45	Восточноазиатская мышь (<i>Apodemus (Alsomys) peninsulae</i> Thomas, 1907)	Центральная Якутия
Гибриды – волкособы		
Отряд Хищные /Семейство Псовые		
46	Гибрид волка (<i>Canis lupus</i> L., 1758) и домашней собаки (<i>Canis (Canis) familiaris</i> L., 1758)	Центральная Якутия, Северо-Восточная Якутия

Заключение

Таким образом, на сегодня сформированная на базе ИБПК СО РАН единая централизованная

биоресурсная коллекция генетических материалов, включающая почти 70 % диких современных млекопитающих, обитающих на террито-

рии Северо-Востока России, представляет собой инструмент для комплексного изучения генетического разнообразия животного мира. Для решения актуальных вопросов экологии, эволюционной биологии и охраны природы планируется дальнейшее развитие БРК ИБПК СО РАН путем увеличения числа видов с охватом всех обитающих в регионе млекопитающих, в том числе занесенных в Красные книги России и Якутии, с использованием гуманных видов изъятия биобразцов.

Список литературы / References

1. Айбазов А.М., Мамонтова Т.В. Создание биоресурсных коллекций – необходимое условие сохранения и рационального использования генетических ресурсов животных. *Сельскохозяйственный журнал*. 2018;11(2):54–62.
2. Aibazov A.M., Mamontova T.V. Creation of bioresource collections is a necessary condition for the preservation and rational use of animal genetic resources. *Agricultural Journal*. 2018;11(2):54–62. (In Russ.)
3. Лашин С.А., Афонников Д.А., Генаев М.А. Информационная система по биоресурсным коллекциям институтов ФАНО России. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2018;22(3):386–393. <https://doi.org/10.18699/VJ18.360>.
4. Lachine S.A., Afonnikov D.A., Genayev M.A. Information System on the Bioresources Collections of the Russian FASO Institutes. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2018;22(3):386–393. (In Russ.) <https://doi.org/10.18699/VJ18.360>.
5. ФЗ «О биоресурсных центрах и биологических (биоресурсных) коллекциях и о внесении изменений в статью 29 Федерального закона “О животном мире”» от 30.11.2024 № 428-ФЗ.
6. Federal Law “On bioresources centers and biological (bioresources) collections and on amendments to Article 29 of the Federal Law “On Animal World” dated 30.11.2024, No. 428-FZ. (In Russ.)
7. Вольперт Я.Л., Шадрин Е.Г., Охлопков И.М. Млекопитающие Якутии: изменения представлений о составе териофауны за последние 50 лет и аннотированный список. Ч. 1. Насекомоядные, Рукокрылые, Зайцеобразные, Грызуны. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;27(3):393–404. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-393-404>
8. Volpert Ya.L., Shadrina E.G., Okhlopkov I.M. Mammals of Yakutia: Changes in the Composition of the Theriophage over the Past 50 Years and an Annotated List. Part 1. Insectivores, Bats, Lagomorphs, Rodents. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(3):393–404. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-393-404>
9. Вольперт Я.Л., Шадрин Е.Г., Охлопков И.М. Млекопитающие Якутии: изменения представлений о составе териофауны за последние 50 лет и аннотированный список. Ч. 2. Хищные, Китообразные, Парнокопытные. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(1):117–127. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-117-127>.
10. Volpert Ya.L., Shadrina E.G., Okhlopkov I.M. Mammals of Yakutia: Changes in the understanding of the composition of the mammal fauna over the past 50 years and an Annotated List. Part 2. Carnivorous, Cetaceans, and Artiodactyls. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(1):117–127. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-117-127>.
11. Павлинов И.Я., Лисовский А.А. *Млекопитающие России: систематико-географический справочник*. М.: Т-во науч. изданий КМК; 2012. 604 с.
12. Pavlinov I.Ya., Lisovsky A.A. *Mammals of Russia: taxonomicogeographic reference book*. Moscow: KMK; 2012. 604 p. (In Russ.)

Об авторах

- СОЛОВЬЕВА Наталья Алексеевна**, кандидат медицинских наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-3570-2585>, ResearcherID: Q-9965-2018, Scopus Author ID: 57142280900, SPIN: 8946-2025, e-mail: sonata60878@yandex.ru
- ОХЛОПКОВ Иннокентий Михайлович**, кандидат биологических наук, директор, <https://orcid.org/0000-0002-6227-5216>, ResearcherID: K-2889-2018, Scopus Author ID: 24171643500, SPIN: 9031-6218; e-mail: imokhlopkov@yandex.ru
- ПАВЛОВА Нарыйа Иннокентьевна**, лаборант-исследователь, <https://orcid.org/0000-0002-6335-4901>, Scopus Author ID: 1268552, SPIN: 4846-3006, e-mail: naryya.pavlova@mail.ru
- АРТЕМЬЕВА Анна Викторовна**, лаборант-исследователь, <https://orcid.org/0009-0009-0373-5719>, e-mail: artemavvv@mail.ru
- КЫЧКИНА Оксана Иннокентьевна**, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0009-0003-9121-1435>, Scopus Author ID: 1291490, SPIN: 5420-7295, e-mail: oksa.sav.75@gmail.com
- СИДОРОВ Михаил Михайлович**, кандидат биологических наук, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-0333-261X>, Scopus Author ID: 728311, SPIN: 6092-4060, e-mail: sidorov_mikhail86@mail.ru
- САЗОНОВА Мария Иннокентьевна**, лаборант-исследователь, <https://orcid.org/0009-0002-9698-0631>, ResearcherID: NGS-8840-2025, SPIN: 8558-7404, e-mail: sazono2104@gmail.com
- МИХАЙЛОВА Нюргуйна Аяааловна**, лаборант-исследователь, <https://orcid.org/0009-0004-2081-7031>, ResearcherID: NGS-8831-2025, SPIN: 8520-6399; e-mail: nurguyana94@gmail.com
- МАМАЕВ Николай Викторович**, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-5168-4113>, ResearcherID: R-7952-2018, Scopus Author ID: 57191052875, SPIN: 1253-2053, e-mail: mamaev_88@bk.ru

Вклад авторов

Соловьева Н.А. – разработка концепции, методология, верификация данных, проведение статистического анализа, проведение исследования, создание черновика рукописи, редактирование рукописи, визуализация; **Охлопков И.М.** – разработка концепции, ресурсное обеспечение, редактирование рукописи, руководство исследованием, администрирование проекта,

получение финансирования; **Павлова Н.И.** – верификация данных, проведение статистического анализа, проведение исследования, создание черновика рукописи, визуализация; **Артемьева А.В.** – верификация данных, проведение статистического анализа, проведение исследования, создание черновика рукописи; **Кычкина О.И.** – проведение статистического анализа, администрирование данных; **Сидоров М.М.** – ресурсное обеспечение исследования, администрирование данных; **Сазонова М.И.** – проведение исследования, ресурсное обеспечение исследования, создание черновика рукописи; **Михайлова Н.А.** – проведение исследования, ресурсное обеспечение исследования; **Мамаев Н.В.** – ресурсное обеспечение исследования, проведение исследования

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

SOLOVYOVA, Natalia Alekseevna, Cand. Sci. (Med.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-3570-2585>, ResearcherID: Q-9965-2018, Scopus Author ID: 57142280900, SPIN: 8946-2025, e-mail: sonata60878@yandex.ru

OKHLOPKOV, Innokenty Mikhailovich, Cand. Sci. (Biol.), Director, <https://orcid.org/0000-0002-6227-5216>, ResearcherID: K-2889-2018, Scopus Author ID: 24171643500, SPIN: 9031-6218; e-mail: imokhlopkov@yandex.ru

PAVLOVA, Narya Innokentievna, Laboratory Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-6335-4901>, Scopus Author ID: 1268552, SPIN: 4846-3006, e-mail: naryya.pavlova@mail.ru

ARTEMYEVA, Anna Viktorovna, Laboratory Researcher, <https://orcid.org/0009-0009-0373-5719>, e-mail: artemavvv@mail.ru

KYCHKINA, Oksana Innokentievna, Junior Researcher, <https://orcid.org/0009-0003-9121-1435>, Scopus Author ID: 1291490, SPIN: 5420-7295, e-mail: oksa.sav.75@gmail.com

SIDOROV, Mikhail Mikhailovich, Cand. Sci. (Biol.), Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-0333-261X>, Scopus Author ID: 728311, SPIN: 6092-4060, e-mail: sidorov_mikhail86@mail.ru

SAZONOVA, Maria Innokentievna, Laboratory Researcher, <https://orcid.org/0009-0002-9698-0631>, ResearcherID: NGS-8840-2025, SPIN: 8558-7404, e-mail: sazonoval2104@gmail.com

MIKHAILOVA, Nyurguyana Ayaalovna, Laboratory Researcher, <https://orcid.org/0009-0004-2081-7031>, ResearcherID: NGS-8831-2025, SPIN: 8520-6399, e-mail: nurguyana94@gmail.com

MAMAIEV, Nikolay Viktorovich, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-5168-4113>, ResearcherID: R-7952-2018, Scopus Author ID: 57191052875, SPIN: 1253-2053, e-mail: mamaev_88@bk.ru

Authors' contribution

Solovyeva N.A. – conceptualization, methodology, validation, formal analysis, investigation, writing – original draft, writing – review & editing, visualization; **Okhlopov I.M.** – conceptualization, resources, writing – review & editing, supervision, project administration, funding acquisition; **Pavlova N.I.** – validation, formal analysis, Investigation, writing – original draft, visualization; **Artemyeva A.V.** – validation, formal analysis, Investigation, writing – original draft; **Kychkina O.I.** – formal analysis, data curation; **Sidorov M. M.** – resources, data curation; **Sazonova M.I.** – investigation, resources, writing – original draft; **Mikhailova N. A.** – investigation, resources; **Mamaev N. V.** – resources, investigation

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 27.08.2025

Поступила после рецензирования / Revised 22.10.2025

Принята к публикации / Accepted 05.11.2025

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 678.026.3+678:691

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-644-672>



Оригинальная статья

Климатическая деградация базальтопластиковых композиционных материалов плоской формы: предельные значения пористости и статистическое моделирование ее формирования

А. К. Кычкин[✉], Н. Ф. Стручков, Г. Г. Винокуров

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН,

г. Якутск, Российская Федерация

[✉]kychkinplasma@mail.ru

Аннотация

Армированные полимерные композиционные материалы (ПКМ), содержащие различные виды волокон, широко применяются во многих отраслях промышленности. ПКМ имеют известные преимущества перед традиционными материалами, но практика показывает, что под длительным воздействием экстремальных климатических условий происходит их старение с ухудшением упругопрочностных характеристик. Одним из основных требований при конструировании изделий из ПКМ для условий холодного климата является низкий уровень влагопоглощения, что напрямую связано с пористостью материала. В данной работе исследовано формирование пористости при старении базальтопластиковых материалов (БП) плоской формы в экстремальных условиях Севера, оценены предельные значения пористости. Для выявления предельных значений пористости учитывается слоистая структура БП с плоскопараллельной симметрией. Формирование пористости при климатической деградации материалов происходит, начиная с внешней наружной поверхности БП. Для описания закономерностей порообразования разработана статистическая модель формирования открытой пористости БП плоской формы. Распределение пористости слоев рассматривается как двумерная кластерная структура на квадратной решетке, далее выявляются совпадающие элементы двумерных кластеров пористости нескольких (двух, трех и более) плоских слоев БП. Результаты проведенных оценочных и статистических расчетов сравнивались с экспериментальными данными, которые были получены в результате изучения открытой пористости многослойных панелей БП. Эти панели подвергались открытому экспонированию в природно-климатических условиях г. Якутск. Разработанная статистическая модель формирования пористости многослойных базальтопластиковых композиционных материалов может быть использована при конструировании ПКМ для эксплуатации в климатических условиях Арктики и Субарктики.

Ключевые слова: базальтопластиковые композиционные материалы, климатические испытания, деградация, пористость, статистическое моделирование

Финансирование. Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда № 25-69-00009, <https://rscf.ru/project/25-69-00009/> с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ «ЯНЦ СО РАН».

Для цитирования: Кычкин А.К., Стручков Н.Ф., Винокуров Г.Г. Климатическая деградация базальтопластиковых композиционных материалов плоской формы: предельные значения пористости и статистическое моделирование ее формирования. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(4):644–672. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-644-672>

Climatic degradation of flat basalt-plastic composites: Limiting porosity values and statistical modeling of pore formation

Anatoly K. Kychkin^{✉1}, Nikolay F. Struchkov¹, Gennady G. Vinokurov¹

¹*Institute of Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yakutsk, Russian Federation*

[✉]*kychkinplasma@mail.ru*

Abstract

Reinforced polymer composite materials (PCMs), incorporating diverse fiber types, are extensively utilized across multiple industrial sectors. While PCMs possess acknowledged advantages over conventional materials, empirical evidence indicates that prolonged exposure to extreme climatic conditions induces material ageing, leading to a deterioration of elastic and strength properties. A primary design criterion for PCM components intended for cold-climate applications is a low moisture absorption, a property intrinsically linked to material porosity. This study examines pore formation during the environmental ageing of flat basalt-plastic (BP) composites under extreme northern conditions and estimates threshold porosity values. The identification of these limiting values accounts for the layered structure of BP, which exhibits plane-parallel symmetry. Porosity formation during climatic degradation initiates at the external surface of the composite. In order to describe pore formation mechanisms, a statistical model for the formation of open porosity in flat BP materials was developed. The porosity distribution across material layers is treated as a two-dimensional cluster structure on a square lattice. Furthermore, the analysis subsequently identifies coincident elements of these two-dimensional porosity clusters across multiple BP layers (two, three, or more). The outcomes of the evaluative and statistical computations were compared against experimental data derived from studies of open porosity in multilayer BP panels. These panels underwent open-air weathering exposure in the natural climatic environment of Yakutsk. Thus, the developed statistical model for porosity formation in multilayer basalt-plastic composite materials can be applied in the design of PCMs for service in Arctic and Subarctic climatic zones.

Keywords: basalt-plastic composites, climatic tests, degradation, porosity, statistical modeling

Funding. This study was funded by the Russian Science Foundation, grant number 25-69-00009 (<https://rscf.ru/project/25-69-00009/>), and was conducted using the facilities 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., Struchkov N.F., Vinokurov G.G. Climatic degradation of flat basalt-plastic composites: Limiting porosity values and statistical modeling of pore formation. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(4):644–672. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-644-672>

Введение

Как показывают научные исследования и практика применения, полимерные композиционные материалы (ПКМ) конструкционного назначения отличаются высокими эксплуатационными характеристиками [1–12]. Однако, как отмечено выше, при эксплуатации изделий из ПКМ под длительным воздействием внешней среды происходит их климатическое старение, характеристики прочности необратимо ухудшаются с течением времени [4–7]. Поэтому при проектировании изделий из ПКМ необходимо обеспечить их долговечность при длительном воздействии внешних факторов. ПКМ подвергаются агрессивному воздействию природно-климатических условий, которое определяется множеством факторов, вклю-

чая температуру, влажность, осадки, ветер, солнечное излучение и загрязнения воздуха, различные химические вещества в виде осадков [6, 7]. Многими авторами проводятся исследования, посвященные прогнозированию прочности ПКМ при их старении в различных климатических условиях, но эта проблема остается не решенной и актуальной [8–12]. Таким образом, климатическая деградация ПКМ зависит от вышеприведенных многочисленных случайных факторов, поэтому для ее описания целесообразным становится использование методов статистического моделирования.

Ранее авторами исследовалось формирование пористости в базальтопластиковых материалах (БП) круглого сечения при их открытом экспо-

нировании в экстремальных условиях Севера [13]. Актуально развитие исследований в этом направлении для оценки предельных значений пористости при длительной климатической деградации БП плоской формы и описания формирования открытой пористости с их внешней поверхности.

Для данной работы, чтобы провести статистическое моделирование старения композитов, была рассмотрена структурная схема плоских многослойных панелей с плоскопараллельной симметрией. Выбранная схема описывает структуру экспонированных стеклобазальтопластиков (СП и БП) в условиях г. Якутск.

Исследуемые полимерные материалы, полученные методом вакуумной инфузии, технологически имеют исходную пористость, достигающую 4 %. Далее, принимая во внимание симметрию слоистой структуры, на основе данных исходной пористости можно предположить ее дальнейший рост при деградации внутренних слоев и тем самым использовать полученные результаты для прогнозирования остаточного ресурса и долговечности БП в экстремальных условиях Севера.

Целью данной работы является оценка предельной пористости БП плоской формы при их длительной климатической деградации в условиях Севера и развитие статистического моделирования формирования открытой пористости.

Материалы и методика экспериментальных исследований

В качестве материалов для исследования были использованы плоские многослойные панели с параллельной симметрией БП (13 слоев базальтовой ткани БТ-11П-кв-12 и два поверхностных слоя из ткани ТБК-100П-кв-12 с плетением «саржа») и СП (13 слоев стеклоткани Ортекс-560 с полотняным плетением). Содержание эпоксид-

ного связующего в данных композитах соответственно $20 \pm 0,5$ % и $13 \pm 0,5$ % от общей массы.

Данные композиционные материалы были представлены на открытом полигоне ИФТПС СО РАН для проведения климатических испытаний в условиях Севера (г. Якутск) в течение 24 месяцев.

В работе анализ структуры БП и СП проведен на оптических микроскопах «Neophot-32», «Stemi2000-C» и «Axio Observer D1m». В результате аналитических исследований установлено, что процесс климатической деградации многослойных панелей с плоскопараллельной симметрией на начальном этапе сопровождается образованием дефектов и микрорастрескиваний на поверхностном слое материалов. Дальнейшая деградация ПКМ преимущественно происходит в области границ раздела между армирующим материалом и матрицей, формируя расслоение и образование внутренней пористости. Эта особенность процесса деградации ПКМ плоской формы учитывается при проведении оценочных расчетов предельной пористости и статистическом моделировании ее формирования.

Для установления предельных значений пористости по схеме многослойных панелей необходимым допущением является равномерное распределение армирующих элементов по сечению композиционного материала.

В работе для определения открытой пористости композиционных материалов применялся известный метод гидростатического взвешивания [14].

Предельная пористость БП и СП плоскопараллельной формы

Как было отмечено выше, все исследованные БП и СП, полученные методом вакуумной инфузии, в исходном состоянии поставки характеризуются начальной пористостью, обусловленной технологическими особенностями их производства и деградацией поверхностных слоев при их хранении. Предполагается, что значение начальной пористости в исходном состоянии представляет собой нижний предел пористости. В таком случае можно считать, что верхней оценкой предельной пористости будет считаться пористость при теоретически полном расслоении всех слоев многослойных ПКМ в результате длительных климатических испытаний. Для упрощения расчетов схема многослойных панелей с плоскопараллельной симметрией представляется бес-

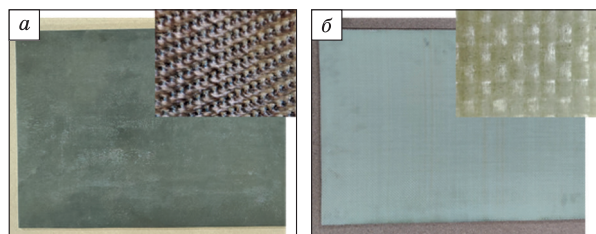


Рис.1. Плоские многослойные панели: а – базальтопластик; б – стеклопластик; увеличение области $100\times$

Fig. 1. Flat multilayer panels: а) basalt textolite; б) fiberglass. Magnification: $100\times$

конечной областью толщины D с одинаковыми армирующими материалами между двумя внешними граничными плоскостями (рис. 2, а). Можно предположить, что деградация многослойных панелей ПКМ происходит одновременно с двух внешних плоскостей, как представлено на рисунке, с обеих сторон достигая ровно середины ПКМ (штриховая вертикальная линия). Таким образом, при статистическом моделировании рассматривается один вид ПКМ, из которого вырезаны образцы разной толщины D , но одинаковой длины L и ширины (координата ширины направлена перпендикулярно к плоскости рис. 2, а). Данный методологический подход обосновывается допущением, что локальная пористость ПКМ описывается статистически однородной случайной величиной, зависящей от вида симметрии. Таким образом, локальная пористость многослойных панелей с плоскопараллельной симметрией представляется случайной функцией одной переменной – поперечной координатой по толщине (см.рис. 2, а).

Для оценки исходной пористости введем параметр d_0 , который будет обозначать глубину приповерхностных слоев, подверженных начальной деградации при хранении. Допустим, что глубина этого слоя d_0 одинакова для всех многослойных панелей с плоскопараллельной симметрией (см. рис. 2, а). Данная глубина будет одного порядка с обеих внешних поверхностей для данного вида ПКМ. Тогда начальная пористость (нижняя оценка предельной пористости) $Po_{исх}$ для многослойных панелей с плоскопараллельной симметрией пропорциональна количеству армирующих материалов в обоих деградированных приповерхностных слоях с одинаковыми толщинами d_0 и будет определяться следующим выражением:

$$Po_{исх} \sim nS = 2n[d_0L], \quad (1)$$

где n – концентрация армирующих материалов, S – площадь поперечного сечения, d_0 – толщина деградированного приповерхностного слоя и L – длина поперечного сечения многослойных панелей с плоскопараллельной симметрией (см. рис. 2, а).

В данном выражении (1) множитель 2 учитывает симметрию при одинаковой деградации плоских образцов с обоих противоположных направлений. Значения количества армирующих элементов n , толщины d_0 и длины L являются одинаковыми для всех ПКМ плоской формы.

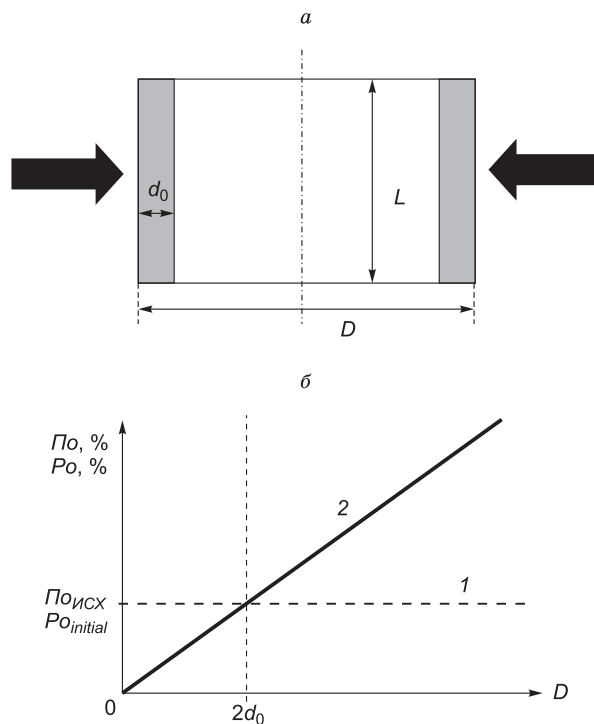


Рис. 2. Схемы для плоских многослойных панелей с параллельной симметрией: а – начальная деградация наружного слоя поперечного сечения; б – оценка предельных значений пористости, 1, 2 см. в тексте.

Fig. 2. Schemes for flat multilayer panels with parallel symmetry: а) initial degradation of the outer layer of the cross-section; б) assessment of limiting porosity values. 1, 2 see in text

В таком случае начальная пористость (1) не зависит от толщины D плоских ПКМ. Тогда по формуле (1) Po будет представлять собой горизонтальную линию, параллельную оси абсцисс на графике пористость–толщина D (рис. 2, б, линия 1).

В дальнейшем проводится анализ максимального уровня пористости, соответствующего гипотетически полному разрушению ПКМ. Также допустим, что при полной деградации материала общая пористость многослойных панелей с плоскопараллельной симметрией пропорциональна количеству армирующих элементов во всем материале, что будет соответствовать полному расслоению всех слоев материала (см. рис. 2, а). Подставив $d_0 = D/2$ в формулу (1), мы получим оценку максимального уровня пористости Po :

$$Po \sim nS = n[DL], \quad (1)$$

где D –толщина поперечного сечения плоского ПКМ (см. рис. 2, а).

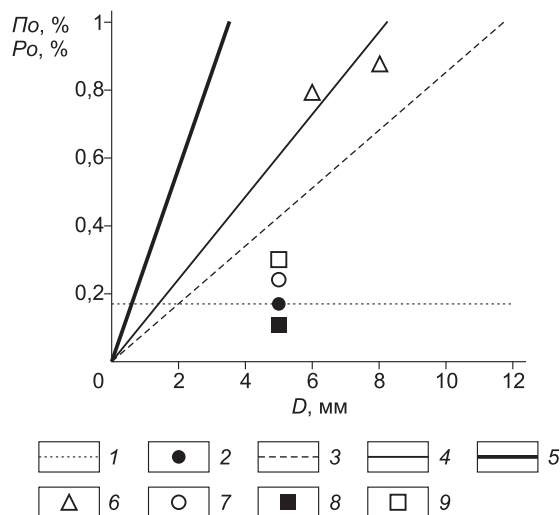


Рис. 3. Пористость плоских многослойных панелей с параллельной симметрией. 1–9 см. в тексте

Fig. 3. Porosity of flat multilayer panels with parallel symmetry. 1–9 see in text.

В формуле (2) величины концентрации n и длины L одинаковы для всех образцов плоского композита. Из формулы видно, что верхняя оценка максимального уровня пористости линейно зависит от толщины поперечного сечения D . Зная начальную пористость образцов, можно определить параметры уравнения (2) и построить линейную зависимость пористости от толщины D плоских композитов (см. рис. 2, б, линия 2).

Таким образом, на основе проведенного анализа предлагается метод оценки максимального уровня пористости плоских многослойных панелей с параллельной симметрией (см. рис. 2, б).

1. На графике Po – следует провести прямую линию 1, параллельную оси абсцисс. При этом для оценки начальной пористости плоских многослойных панелей с параллельной симметрией $Po_{исх}$ надо использовать экспериментальные данные пористости исходных образцов. Прямая линия 1 представляет собой нижнюю оценку предельной пористости плоских многослойных панелей с параллельной симметрией.

2. Через начало координат графика Po – D и точку $(2d_0; Po_{исх})$ нужно провести наклонную прямую линию 2, которая представляет собой предельную пористость при полной деградации всех слоев плоских многослойных панелей с параллельной симметрией. Для определения величины d_0 начальной деградации надо использовать экспериментальные данные исходной структуры

материала. Для построения прямой 2 допускается, что по выражению (2) при $D \rightarrow 0$ получается $Po \rightarrow 0$. Прямая линия 2 представляет собой верхнюю оценку предельной пористости базальтопластикового материала.

Таким образом, по данной схеме на рис. 2, б можно оценивать величины предельной пористости плоских многослойных панелей с параллельной симметрией. Для этого необходимы только следующие данные: d_0 – толщина начального деградированного приповерхностного слоя и исходная пористость плоских образцов $Po_{исх}$ в состоянии поставки.

На рис. 3 представлены оценочные предельные значения пористости панелей БП в зависимости от их толщины. Эти значения были определены как в исходном состоянии, так и после теоретической полной деградации БП после длительных климатических испытаний. Прежде всего, необходимо построить зависимость (1) – уровень значений начальной пористости (график 1), используя экспериментальные данные (маркер 2). Для сравнения на рис. 3 также приведена экспериментальная исходная пористость плоскопараллельного образца СП (маркер 8).

В дальнейшем, с помощью наклонных линий 3–5 представлены линейные зависимости (2), отражающие теоретическую полную деградацию БП при различных начальных толщинах деградации $d_0 = 1$ мм, $d_0 = 0,7$ мм и $d_0 = 0,3$ мм соответственно. Значение $d_0 = 0,3$ мм определено на основе технологических характеристик панелей ПКМ как отношение толщины образца к числу армирующих элементов.

Как видно из графиков на рис. 3, открытая пористость плоских БП после деградации в течение 24 месяцев значительно возрастает (маркер 7), но остается в пределах допустимых значений.

Для сравнения на рис. 3 также представлены экспериментальные результаты исследования пористости БП круглого сечения после климатических испытаний в течение 51 месяца (маркеры 6) и пористости плоского СП после испытаний в течение 24 месяцев (маркер 9).

Как можно видеть на рис. 3, верхние границы пористости значительно превышают экспериментальные данные, что позволяет использовать их для прогнозирования срока службы и остаточного ресурса композитов. Более высокие показатели пористости БП круглого сечения (график 6) объясняются более длительным ис-

пытанием и квадратичной зависимостью верхних оценок предельных значений пористости от диаметра цилиндрических образцов. Экспериментальные данные открытой пористости плоских композитов СП и БП после 24 месяцев климатических испытаний находятся в пределах, определенных расчетами.

Статистическая модель формирования открытой пористости при климатическом старении плоских многослойных панелей

В своих предыдущих работах авторы предложили статистические методы для описания изменения пористости БП при их климатическом старении [13]. Методы статистического моделирования структуры материалов основаны на теории марковских процессов, теории двумерных кластеров и др., которые подробно разработаны и имеют многочисленные приложения [15, 16]. В настоящее время методы статистического моделирования в материаловедении интенсивно развиваются, расчеты проводятся с использованием искусственных нейронных сетей [17].

Для статистического моделирования деградации многослойных панелей с плоскопараллельной симметрией рассмотрена схема структуры БП, состоящая из нескольких слоев. В этой схеме распределение пористости на каждом слое рассматривается как двумерная кластерная структура на квадратной решетке. Количественные характеристики этой структуры могут быть использованы для описания пористости при начальном климатическом старении.

Актуальным является продолжение и развитие исследований по данному направлению, когда при дальнейшей климатической деградации пористость внешнего слоя распространяется вглубь, в процессе формирования композиционного материала происходит образование открытых пор в его глубинных слоях.

Для математического описания этого процесса необходимо определить совпадающие элементы двумерных кластеров пористости в нескольких (двух, трех и более) слоях БП плоской формы.

С помощью статистического моделирования на основе теории двумерных кластеров можно выявить закономерности формирования открытой пористости различных многослойных панелей с плоскопараллельной симметрией при их климатическом старении.

При таком подходе распределение пористости каждого плоского слоя задается реализацией

случайной структуры двумерных кластеров, для которой проводятся выделение и маркировка двумерных кластеров методом многократной маркировки. Тогда совпадающие элементы двумерных кластеров пористости N слоев описывают формирование открытой пористости глубиной N слоев. При этом открытая пористость может иметь сложную конфигурацию в зависимости от структуры кластеров внутренних слоев (типа развитой пещеры).

В исследовании были проведены вычисления распределения открытой пористости с применением специально созданной компьютерной программы, написанной на языке Visual Basic. В процессе работы использовались различные вероятности заполнения (от 0 до 1) и размеры матрицы до 20×20 .

На рис. 4 приведены формирование и количество кластеров пористости первого слоя БП; матрица 20×20 , количество элементов пористости 100, пористость составляет $Po = 0,25$. Черными ячейками обозначены элементы пористости, которые совпадают с кластерами второго слоя, таким образом, происходит образование открытой пористости второго слоя. Далее, с учетом совпадающих элементов пористости первого слоя происходит формирование кластеров открытой пористости второго слоя композиционного материала (рис. 5). Черными ячейками также обозначены элементы пористости, которые совпадают с кластерами третьего слоя, происходит образование открытой пористости третьего слоя. Как видно из рис. 5, количество элементов пористости уменьшается до 54, соответственно снижается и открытая пористость второго слоя до $Po_{откр} = 0,135$.

Далее таким же образом, по данному алгоритму учета совпадающих элементов кластеров пористости слоев описывается формирование кластеров открытой пористости внутренних слоев БП. Происходит дальнейшее распространение открытой пористости вглубь многослойного композиционного материала. При этом наблюдается монотонное уменьшение количества элементов пористости, соответственно снижается и открытая пористость. Статистическим моделированием по данному алгоритму установлено, что открытая пористость уменьшается до уровня $Po_{откр} = 0,085$ для третьего слоя, $Po_{откр} = 0,0275$ для четвертого слоя и $Po_{откр} = 0,02$ для пятого слоя. Таким образом, для пятого слоя открытая пористость снижается практически на порядок.

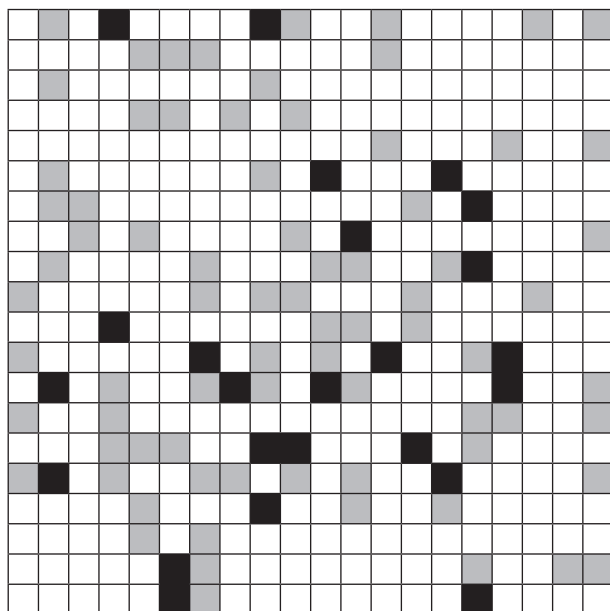


Рис. 4. Формирование пористости первого слоя БП; матрица 20×20 , количество частиц 100, $P_o = 0,25$. Черными ячейками обозначены проникновения элементов пористости во второй слой

Fig. 4. Porosity formation in the first layer of a basalt-plastic composite. Matrix: 20×20 , number of particles: 100, $P_o = 0.25$. Black cells mark the areas where porosity elements penetrate into the second layer

Таким образом, статистическое моделирование на основе теории двумерных кластеров позволяет выявить основные закономерности формирования открытой пористости внутренних слоев многослойных панелей с плоскопараллельной симметрией при их климатическом старении.

Безусловно, предложенную статистическую модель, как и любую аналогичную, следует оценивать методами верификации – методом моментов, максимального правдоподобия с использованием известных критериев согласия. Для этого необходимо накопление большого объема экспериментальных результатов открытой пористости БП при разных условиях получения и экспонирования: технологических, климатических и др.

Заключение

1. Проведены оценочные расчеты предельных значений пористости БП плоской формы при их климатической деградации в природно-климатических условиях Севера. При оценочных расчетах учитывается плоскопараллельная симметрия слоистой структуры БП. Предлагается нижняя оценка предельной пористости как исходная пористость БП в состоянии поставки. Величины

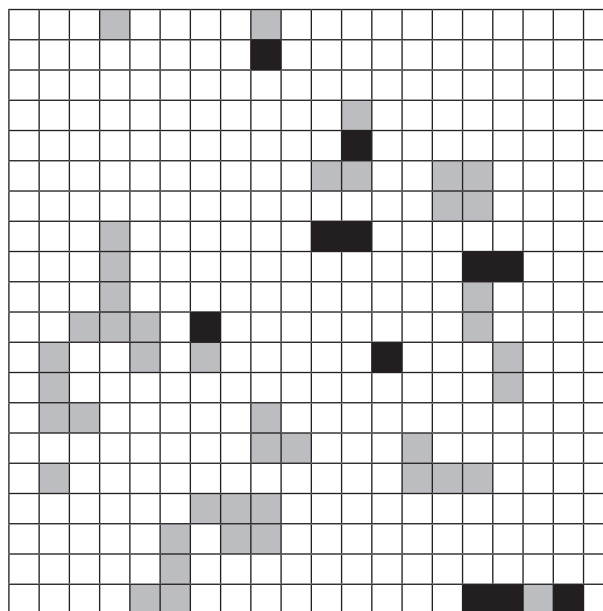


Рис. 5. Формирование пористости второго слоя БП; матрица 20×20 , количество частиц 54, $P_{o_{откр}} = 0,135$. Черными ячейками обозначены проникновения элементов пористости в третий слой

Fig. 5. Porosity formation in the second layer of a basalt-plastic composite. Matrix: 20×20 , number of particles: 54, $P_{o_{откр}} = 0.135$. Black cells mark the areas where porosity elements penetrate into the third layer

глубин исходных деградированных слоев оцениваются из результатов аналитических исследований. В качестве верхней оценки предельной пористости предлагается пористость при теоретической полной деградации всех внутренних слоев БП.

2. Для многослойных панелей с плоскопараллельной симметрией пористость в исходном состоянии не зависит от толщины материала, а максимальная пористость линейно возрастает с увеличением толщины. Экспериментальные данные открытой пористости СП и БП плоских форм после 24 месяцев климатических испытаний находятся в пределах, установленных оценочными расчетами. Верхние границы пористости значительно превышают экспериментальные данные, что позволяет использовать их для прогнозирования срока службы и остаточного ресурса БП в условиях Севера.

3. Предложена статистическая модель, которая позволяет описать, как изменяется открытая пористость плоских многослойных панелей с параллельной симметрией при их разрушении под воздействием окружающей среды. Распределение пористости слоев рассматривается как

двумерная кластерная структура на квадратной решетке. Для описания изменения открытой пористости выявляются совпадающие элементы двумерных кластеров пористости нескольких (двух, трех и более) плоских слоев БП.

4. При формировании открытой пористости глубинных слоев происходит уменьшение размеров и количества случайных кластеров, соответственно снижается и открытая пористость. Так, статистическим моделированием показано, что при начальной пористости наружного слоя $По_{откр} = 0,25$ происходит монотонное снижение открытой пористости до уровня $По_{откр} = 0,135$ для второго слоя, $По_{откр} = 0,085$ для третьего слоя, $По_{откр} = 0,0275$ для четвертого слоя и $По_{откр} = 0,02$ для пятого слоя.

Разработанная статистическая модель формирования пористости многослойных базальтопластиковых композиционных материалов позволяет выявить основные закономерности формирования пористости при старении ПКМ и может быть использована при их конструировании для эксплуатации в климатических условиях Арктики и Субарктики.

Список литературы / References

1. Старцев О.В., Аниховская Л.И., Литвинов А.А., Кротов А.С. Повышение достоверности прогнозирования свойств полимерных композиционных материалов при термовлажностном старении. *Доклады Академии наук*. 2009;428(1):56–60. Startsev O.V., Anikhovskaya L.I., Litvinov A.A., Krotov A.S. Increasing the reliability of predicting the properties of polymer composites in hgrothermal aging. *Doklady Chemistry*. 2009;428(1):228–232. <https://doi.org/10.1134/S0012500809090079>
2. Старцев В.О., Молоков М.В., Гребенева Т.А., Ткачук А.И. Динамический механический и термомеханический анализ обратимой пластификации влажной системы эпоксидная диановая смола–диаминодифенилсульфон. *Высокомолекулярные соединения. Серия А*. 2017;59(5):420–429. <https://doi.org/10.7868/S2308112017050157>
3. Startsev V.O., Molokov M.V., Grebeneva T.A., Tkachuk A.I. Dynamic mechanical and thermomechanical analysis of reversible plasticization of epoxy-diane resin-diaminodiphenylsulfon system by moisture. *Polymer Science, Series A*. 2017;59(5):640–648. <https://doi.org/10.1134/S0965545X17050157>
4. Каблов Е.Н. Конструкционные композиционные материалы. М.: ФГУП «ВИАМ»; 2012. 58 с. Kablov E.N. *Structural composite materials*. Moscow: VIAM; 2012. P. 58. (In Russ.)
5. Sai Krishna Golla, Prasanthi P. Prediction of micromechanical behavior of fiber (glass/basalt) reinforced polymer composites. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2016;3(7):1557–1563.
6. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года». *Авиационные материалы и технологии*. 2015;34(1):3–33. <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33>
7. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE “VIAM” SSC of RF on realization of “Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030. *Aviation Materials and Technologies*. 2015;1(34):3–33. (In Russ.) <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33>
8. Pochiraju K.V., Tandon G.P., Schoeppner G.A. *Long-term durability of polymeric matrix composites*. Springer; 2012. P. 677. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9308-3>
9. White C.C., White K.M., Pickett L.E. *Service life prediction of polymers and plastics exposed to outdoor weathering*. William Andrew Publ; 2017. P. 342.
10. Bhide S.J., Zurale, M.M. Durability aspects of fibre reinforced composites. In: *Proceedings of the Eighth International Conference on Durability of Building Materials and Components 8, Vancouver, Canada, May 30–June 3 1999*, Ottawa: NRC Research Press; 1999, pp. 1382–1391.
11. Vodicka R. Environmental exposure of boron-epoxy composite material DSTOTN-0309. Melbourne: *DSTO Aeronautical and Maritime Research Lab.*; 2000. P. 24.
12. Martin R. *Ageing of composites*. Cambridge University Press; 2008. P. 544.
13. Nishizaki I., Sakurada H., Tomiyama T. Durability of pultruded GFRP through ten-year outdoor exposure test. *Polymers*. 2015;7:2494–2503. <https://doi.org/10.3390/polym7121525>
14. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников. *Авиационные материалы и технологии*. 2018;(2):47–58. <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2018-0-2-40-46>
15. Kablov E.N., Startsev V.O. Systematic analysis of the influence of climate on the mechanical properties of polymer composite materials according to data from domestic and foreign sources. *Aviation Materials and Technologies*. 2018;(2):47–58. (In Russ.) <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2018-0-2-40-46>
16. Кычкин А.К., Стручков Н.Ф., Винокуров Г.Г. Формирование пористости базальтопластиковых композиционных материалов при климатических испытаниях в условиях Севера. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2021;26(1):145–154. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-1-14>
17. Kychkin A.K., Struchkov N.F., Vinokurov G.G. Formation of the porosity of basalt-plastic composite materials during climatic tests under the conditions of the North. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2021;26(1):145–154. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-1-14>
18. Исакаев Э.Х., Мордынский В.Б., Подымова Н.Б. и др. Определение пористости газотермических покрытий. *Физика и химия обработки материалов*. 2010;(5):71–77.
19. Isakaev E.Kh., Mordynsky V.B., Podymova N.B., et al. Determination of porosity of gas-thermal coatings. *Physics and Chemistry of Materials Treatment*. 2010;(5):71–77. (In Russ.)
20. Тихонов В.И., Миронов М.А. *Марковские процессы*. М.: Советское радио; 1977: С.489.
21. Tikhonov V.I., Mironov M.A. *Markov processes*. Moscow: Sovetskoe Radio Publ.; 1977: P. 489. (In Russ.)
22. Тарасевич Ю.Ю. Перколяция: теория, приложения, алгоритмы. М.: Едиториал УРСС; 2002. 112 с. Tarasevich Yu.Yu. *Percolation: Theory, Applications, Algorithms*. Moscow: Editorial URSS; 2002. 112 p. (In Russ.)
23. Тягунов А.Г., Мильдер О.Б., Тарасов Д.А., Сергеев А.П. Применение искусственных нейронных сетей в материаловедении. Учеб. пособие РФ. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та; 2021. 68 с.

Tyagunov A.G., Milder O.B., Tarasov D.A., Sergeev A.P. Textbook. Ekaterinburg: Ural University Publishing House; Application of artificial neural networks in materials science. 2021. 68 p. (In Russ.)

Об авторах

КЫЧКИН Анатолий Константинович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-5276-5713>, ResearcherID: D-9234-2014, Scopus Author ID: 35300061400, SPIN: 2885-9914, e-mail: kychkinplasma@mail.ru

СТРУЧКОВ Николай Федорович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-3078-0709>, ResearcherID: C-7166-2014, Scopus Author ID: 35335217600, SPIN: 4524-7540, e-mail: struchkov_n@rambler.ru

ВИНОКУРОВ Геннадий Георгиевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-1454-6293>, ResearcherID: ADD-8377-2021, Scopus Author ID: 7004132009, SPIN: 8932-6460, e-mail: g_g_vinokurov@iptpn.ysn.ru

Вклад авторов

Кычкин А.К. – разработка концепции, методология, верификация данных, ресурсное обеспечение исследования, руководство исследованием, администрирование проекта, получение финансирования; **Стручков Н.Ф.** – проведение исследования, администрирование данных, визуализация; **Винокуров Г.Г.** – проведение статистического анализа, создание черновика рукописи, редактирование рукописи

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

KYCHKIN, Anatoly Konstantinovich, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5276-5713>, ResearcherID: D-9234-2014, Scopus Author ID: 35300061400, SPIN: 2885-9914, e-mail: kychkinplasma@mail.ru

STRUCHKOV, Nikolay Fedorovich, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-3078-0709>, ResearcherID: C-7166-2014, Scopus Author ID: 35335217600, SPIN: 4524-7540, e-mail: struchkov_n@rambler.ru

VINOKUROV, Gennady Georgievich, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-1454-6293>, ResearcherID: ADD-8377-2021, Scopus Author ID: 7004132009, SPIN: 8932-6460, e-mail: g_g_vinokurov@iptpn.ysn.ru

Authors' contribution

Kychkin A.K. – conceptualization, methodology, validation, resources, project administration, funding acquisition; **Struchkov N.F.** – investigation, data curation, visualization; **Vinokurov G.G.** – formal analysis, writing – original draft, writing – review & editing

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 30.06.2025

Поступила после рецензирования / Revised 20.10.2025

Принята к публикации / Accepted 25.11.2025

Влияние поверхностной обработки армирующих тканей на физико-механические свойства эластомерных композитов

А. Е. Марков^{✉,1}, А. А. Дьяконов^{1,2}, А. Г. Туисов¹, А. А. Охлопкова²

¹Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр СО РАН», г. Якутск, Российская Федерация

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

[✉]aital.markov@gmail.com

Аннотация

При создании композиционных материалов одной из проблем является слабое адгезионное взаимодействие между матрицей и наполнителем, что резко снижает надежность и долговечность изделия. Для ее решения применяют химическую и физическую модификацию поверхности наполнителя, чтобы создать прочную связь на границе раздела фаз. В работе рассматривается взаимодействие модифицированных высокомолекулярных волокон и эластомерной матрицы. Исследовано влияние поверхностной обработки базальтовых (БТ) и углеродных (УТ) тканей на свойства эластомерных композитов на основе бутадиенового каучука. Изучалось два метода поверхностной обработки: раствором резиновой смеси в толуоле (РС) и адгезивом Хемосил 411. Микроструктурный анализ выявил, что необработанные образцы расслаиваются на границе контакта БТ с УТ из-за плохой адгезии между тканями, тогда как обработанные образцы характеризуются высокой адгезией между армирующими волокнами. Зарегистрировано формирование плотного контакта БТ и УТ с эластомерной матрицей за счет диффузии макромолекул каучука, происходящей в процессе вулканизации. Упругопрочностные испытания свидетельствуют о том, что комбинированное армирование БТ совместно с УТ повышает прочность композитов в 4,9 раза по сравнению с исходным эластомером в связи с распределением нагрузки на волокна. Нанесение на поверхность армирующих тканей РС обеспечивает наибольшую прочность, а обработка Хемосилом – высокую устойчивость в среде гидравлического масла. Адгезионные испытания подтвердили, что Хемосил сохраняет прочность сцепления между БТ и УТ после воздействия углеводородной среды благодаря защитному барьерному эффекту каркаса из адгезива. При длительном термическом воздействии происходит снижение адгезионной прочности всех образцов вследствие деструкции полимерной матрицы и клеевого слоя, а также увеличивается их твердость за счет образования дополнительных связей между макромолекулами каучука из-за довулканизации. Полученные результаты доказывают, что предварительная обработка базальтовых и углеродных волокон адгезивами эффективна при создании композитов на основе эластомерной матрицы и высокомолекулярных волокон.

Ключевые слова: базальтовая ткань, углеродная ткань, эластомер, адгезия, растворенная резиновая смесь, Хемосил

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (код научной темы: № FWRS-2025-0027 и № FSRG-2023-0026).

Для цитирования: Марков А.Е., Дьяконов А.А., Туисов А.Г., Охлопкова А.А. Влияние поверхностной обработки армирующих тканей на физико-механические свойства эластомерных композитов. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(4):673–682. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-673-682>

Original article

Effect of reinforcement surface treatment on the physico-mechanical properties of elastomeric composites

Aital E. Markov^{✉,1}, Afanasiy A. Dyakonov^{1,2}, Aleksei G. Tuisov¹, Aitalina A. Okhlopkova²

¹Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Yakutsk, Russian Federation

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

[✉]aital.markov@gmail.com

Abstract

A fundamental challenge in composite materials engineering is insufficient adhesive bonding between the matrix and the filler, which significantly reduces product reliability and durability. To address this problem, chemical and physical

surface modification of the filler is employed so that a strong bond can be created at the phase interface. This study examines the interaction between modified high-modulus fibers and an elastomeric matrix, specifically investigating the influence of surface treatment for basalt (BF) and carbon (CF) fabrics on the properties of elastomeric composites based on butadiene rubber. Two surface treatment methods were studied: a rubber compound solution in toluene (RCS) and Chemosil 411 adhesive. Microstructural analysis revealed that untreated samples delaminate at the BF/CF interface due to poor adhesion between the fabrics, whereas treated samples exhibit strong adhesion between the reinforcing fibers. Furthermore, the formation of a dense contact between the fibers and the elastomeric matrix was registered, which is attributed to the diffusion of rubber macromolecules during vulcanization. Mechanical testing demonstrates that combined reinforcement with BF and CF increases composite strength by 4.9 times compared to the original elastomer, as this is related to effective load distribution across the fibers. While applying RCS to the fabric surface provides the highest strength, treatment with Chemosil ensures high stability in a hydraulic oil environment. Adhesion tests confirmed that Chemosil maintains the bond strength between BF and CF after hydrocarbon exposure because the adhesive layer acts as a protective barrier. However, under prolonged thermal exposure, all samples show reduced adhesive strength due to the degradation of both the polymer matrix and the adhesive layer; additionally, their hardness increases since additional cross-linking between rubber macromolecules occurs via post-vulcanization. In conclusion, the results prove that pre-treating basalt and carbon fibers with adhesives is effective for creating composites based on an elastomeric matrix and high-modulus fibers.

Keywords: basalt fabric, carbon fabric, elastomer, adhesion, dissolved rubber compound, Chemosil

Funding. This study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. FWRS-2025-0027 and FSRG-2023-0026).

For citation: Markov A.E., Dyakonov A.A., Tuisov A.G., Okhlopko A.A. Effect of reinforcement surface treatment on the physico-mechanical properties of elastomeric composites. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(4):673–682. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-673-682>

Введение

Исследование и разработка новых полимерных композиционных материалов составляют одну из основ современного материаловедения. Полимерные композиты обладают рядом уникальных свойств в зависимости от используемых компонентов. В настоящее время существует множество вариантов и методов создания подобных материалов [1–5].

Наиболее востребованными для армирования различных полимерных матриц являются ткани из базальто-, стекло- и углеволокон [6–10]. Их использование в качестве армирующих ингредиентов полимерных материалов существенно повышает прочностные характеристики композитов. Также эти ткани характеризуются хорошей химической стойкостью вследствие образования защитной пленки на поверхности базальтового волокна за счет частичного растворения последнего [11], а углеволокно при стандартных условиях проявляет химическую инертность [12, 13]. Главной проблемой таких материалов является надежность адгезионного взаимодействия с полимерным связующим.

Армированный эластомерный композит представляет собой ткань, обрешеченную с двух сторон. Прочность их соединения может зависеть от состава замасливателя, который препятствует адгезионному взаимодействию. Поверхностная обработка может улучшить адгезию между ар-

мирующими наполнителями и полимерной матрицей, что в свою очередь повышает надежность соединения [14, 15]. Также существует способ модификации поверхности волокон путем прямого фторирования [16]. Данный способ в основном подходит для фенольных смол, где важна смачиваемость волокон. Таким образом увеличивается химическая активность поверхности волокна и повышается адгезионная прочность на границе раздела фаз между материалами.

В исследовании [17] поверхностную пропитку волокон производили раствором резиновой смеси (РС) в толуоле. Данный способ позволил повысить прочность соединения на 24 % за счет улучшения адгезии между базальтовой тканью (БТ) и эластомерной матрицей, которая составила 0,85 Н/мм. Также в работах [18–20] приводится обработка волокон клеем Хемосил, что увеличивает адгезионную прочность соединения до 9 Н/мм, а это в 10,6 раза больше по сравнению с обработкой РС. Улучшение адгезионных характеристик двух и более материалов является актуальной проблемой.

Целью данного исследования является изучение влияния растворенной резиновой смеси и клея Хемосил на адгезионную прочность между базальтовыми и углеродными волокнами в эластомерной матрице, а также оценка их воздействия на физико-механические свойства композита.

Материалы и методы

Объектом исследования является эластомер, армированный базальтовой и углеродной тканями. В качестве армирующего наполнителя применялись базальтовая ткань (БТ) марки БТ-11 (Фабрика технических тканей, Россия) с поверхностной плотностью 351 г/м² и саржевым переплетением 5/3, углеродная ткань (УТ) марки 2/2–1000–12К-400 (Препрег-СКМ, Россия) с плотностью 407 г/м² и саржевым переплетением 2/2. В качестве полимерного связующего использовали резиновую смесь на основе бутадиенового каучука марки СКД-В (СИБУР, Россия), содержащую не менее 90 % 1,4 цис-звеньев. Рецепт-ура резиновой смеси и процесс смешения: сначала вводится 100 мас.ч. каучука СКД-В с 2 мас.ч. стеариновой кислоты; на 2-й минуте добавляется 50 мас.ч. технического углерода N550; на 5-й минуте вводится 3 мас.ч. оксида цинка; на 10-й минуте добавляется 0,9 мас.ч. сульфенамида Ц; на 12-й минуте вводится 1,5 мас.ч. серы. Смешение ингредиентов производили в лабораторном резиносмесителе закрытого типа PL-2200 (Brabender, Германия), общее время смешения 20 мин при начальной температуре валков 40 °С.

Для усиления адгезионного взаимодействия между связующим и армирующими тканями проводили поверхностную обработку волокон, так как исходная поверхность армирующих волокон не образует прочного соединения с эластомерной матрицей:

- растворенной резиновой смесью (РС) в толуоле (Протон, Россия) в соотношении 1:2. Раствор резиновой смеси наносили на БТ и УТ с последующей сушкой в термошкафу при температуре 45 °С в течение 15 мин.;

- адгезивом Хемосил 411 (Henkel, Германия), представляющим собой смесь для склеивания резины к металлу. Адгезив Хемосил 411 наносили на БТ и УТ с сушкой в термошкафу при температуре 45 °С в течение 15 мин.

На рис. 1 приведены схемы укладки армирующих наполнителей в эластомерную матрицу. Для исследования влияния различных методов обработки тканей на адгезионную прочность соединения БТ с УТ сравнивали три варианта укладки: исходная базальто-углеродная ткань между слоями эластомера без обработки (рис. 1, а) (СКД-БТ/УТ); ткань, предварительно обработанная растворенной резиновой смесью, размещенная между эластомерными слоями (рис. 1, б) (СКД-БТ/УТ(РС)); ткань с нанесенным адгези-



Рис. 1. Схема укладки армирующего наполнителя в эластомер: а – исходная БТ с УТ, уложенные между слоями эластомера; б – обработанные растворенной смесью БТ с УТ, уложенные между слоями эластомера; в – обработанные адгезивом Хемосил БТ с УТ, уложенные между слоями эластомера

Fig. 1. Schematic layout of the reinforcing filler in the elastomer: а) untreated basalt (BF) and carbon fiber (CF) layers embedded between elastomer; б) BF and CF treated with a dissolved mixture and embedded; в) BF and CF treated with Xemosil adhesive and embedded

вом Хемосил, уложенная между слоями эластомера (рис. 1, в) (СКД-БТ/УТ(Хем)).

Вулканизацию эластомеров (СКД) и эластомерных композитов проводили в термогидрав-

лическом прессе ПКМВ-100 (Импульс, Россия) при 155 °С в течение 20 мин под давлением 10 МПа.

Упругопрочностные и адгезионные свойства исходных образцов после выдержки в течение 72 ч в гидравлическом масле АМГ-10 при комнатной температуре и в термощкафу при температуре 100 °С определяли на универсальной испытательной машине Autograph (Shimadzu, Япония). Упругопрочностные свойства исследовали в соответствии со стандартом ISO 37-2020 при комнатной температуре со скоростью растяжения 500 мм/мин. Прочность адгезионного соединения определяли по стандарту ISO 36-2017 при скорости передвижения захватов 50 мм/мин. Определение твердости Шор А эластомеров и композитов осуществляли по стандарту ISO 7619-1-2009. Исследование надмолекулярной структуры среза образцов проводили при помощи сканирующего электронного микроскопа JSM-7800F (JEOL, Япония) в режиме вторичных электронов.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлен снимок образца СКД-БТ/УТ без предварительной поверхностной обработки. Как видно из фотографии, между слоями БТ и УТ не произошло взаимодействия, вследствие чего расслоение проявилось на границе контакта при минимальном механическом воздействии. Это свидетельствует о крайне низкой адгезионной прочности соединения. Учитывая отсутствие сцепления между материалами, дальнейшее исследование свойств данного композита не проводилось.

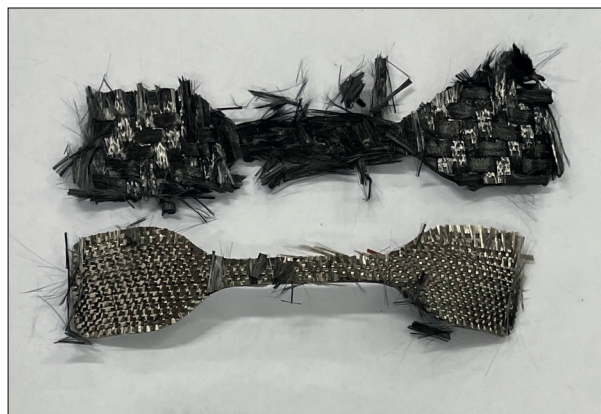


Рис. 2. Расслоившийся образец СКД-БТ/УТ без предварительной поверхностной обработки волокон

Fig. 2. Delamination in a specimen of hybrid SKD-BF/CF composite without prior fiber surface treatment

На рис. 3 приведены результаты исследования предела прочности эластомера и композитов до, после выдержки в гидравлическом масле АМГ-10 и термического старения. Анализ механических свойств композитных материалов выявил, что исходный образец СКД-БТ/УТ(РС) демонстрирует максимальную прочность при растяжении, превышающую показатели эластомера СКД в 4,9 раза благодаря армирующему эффекту базальтовых и углеродных волокон. Сравнение образцов СКД-БТ/УТ(РС) и СКД-БТ/УТ(Хем) свидетельствует о сопоставимых значениях прочности с незначительным разбросом, обусловленным погрешностью измерений. Воздействие гидравлического масла приводит к снижению прочности всех образцов вследствие набухания и частичной деструкции эластомерной матрицы [21], при этом наименьшее снижение наблюдается у образца СКД-БТ/УТ(Хем) благодаря защитному действию клея Хемосил, препятствующего проникновению масла. Термическое воздействие на образцы приводит к разным изменениям: снижению прочности эластомера из-за термоокислительной деструкции, увеличению прочности СКД-БТ/УТ(РС) вследствие перераспределения нагрузки на армирующие волокна при уменьшении подвижности матрицы и сохранению стабильных характеристик СКД-БТ/УТ(Хем).

На рис. 4 приведены результаты исследования относительного удлинения эластомера и композитов до, после выдержки в гидравлическом масле АМГ-10 и термического старения. В результате армирования эластомерной матрицы БТ и УТ происходит снижение относительного удлинения композитов в 23,5 и 63 раза из-за ограничения деформационной способности высокомолекулярными волокнами по сравнению с исходной резиной. При этом у образца СКД-БТ/УТ(РС) зарегистрировано большее удлинение благодаря высокой подвижности эластомера по сравнению с жесткой структурой образца СКД-БТ/УТ(Хем). Воздействие гидравлического масла АМГ-10 приводит к пластификации и набуханию эластомера, что создает внутренние напряжения, вследствие чего снижается относительное удлинение [22]. При термическом старении происходит дополнительная вулканизация, которая снижает подвижность макромолекул, из-за чего уменьшаются показатели относительного удлинения.

На рис. 5 приведены результаты исследования твердости по Шор А эластомера и композитов до,

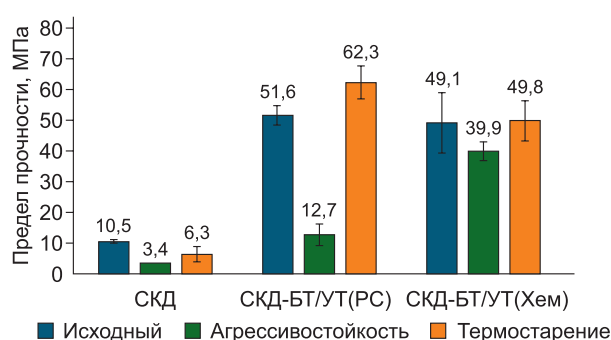


Рис. 3. Диаграмма предела прочности эластомера и композитов до, после выдержки в гидравлическом масле АМГ-10 и термического старения

Fig. 3. Diagram of the tensile strength of elastomers and composites before and after exposure to AMG-10 hydraulic oil and thermal aging

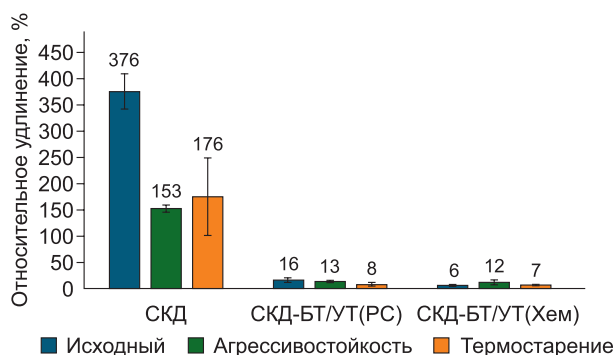


Рис. 4. Диаграмма относительного удлинения эластомера и композитов до, после выдержки в гидравлическом масле АМГ-10 и термического старения

Fig. 4. Diagram of relative elongation of elastomer and composites before and after exposure to AMG-10 hydraulic oil and thermal aging

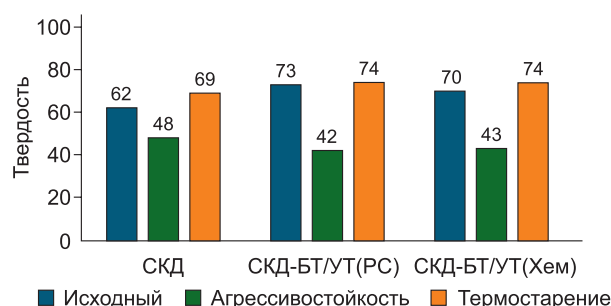


Рис. 5. Диаграмма твердости по Шор А эластомера и композитов до, после выдержки в гидравлическом масле АМГ-10 и термического старения

Fig. 5. Diagram of the shore A hardness of elastomer and composites before and after exposure to AMG-10 hydraulic oil and thermal aging

после выдержки в гидравлическом масле АМГ-10 и термического старения. Твердость исходных образцов СКД-БТ/УТ(РС) и СКД-БТ/УТ(Хем) увеличилась на 12–15 % за счет армирования эластомерной матрицы БТ и УТ по сравнению с эластомерным образцом СКД. Углеводородная среда гидравлического масла вызывает размягчение резины вследствие пластифицирующего действия масла [23]. Термическое воздействие приводит к дополнительной вулканизации эластомерной матрицы, что снижает подвижность макромолекул каучука и, как следствие, увеличивает твердость по сравнению с исходными образцами [24]. При этом образцы СКД-БТ/УТ(РС) и СКД-БТ/УТ(Хем) продемонстрировали одинаковые значения твердости.

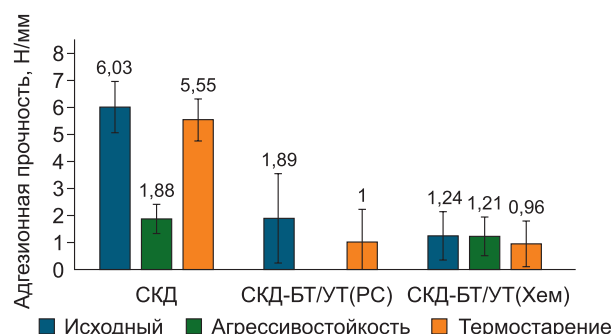


Рис. 6. Диаграмма прочности адгезионного взаимодействия между слоями БТ и УТ в композите до, после выдержки в гидравлическом масле АМГ-10 и термического старения

Fig. 6. Diagram of the adhesive interaction strength between the BF and CF layers in the composite before and after exposure to AMG-10 hydraulic oil and thermal aging

Результаты оценки прочности адгезии между слоями БТ и УТ в эластомерных композитах до и после испытаний представлены на рис. 6. Сравнение адгезионной прочности композитных систем показало, что исходные образцы эластомера обладают в 2,3 и 4,9 раза более высокой устойчивостью к расслоению по сравнению со слоями композитов между БТ с УТ, причем величина различия зависит от способа обработки волокон. Исследование выявило крайне низкую адгезию в системе с базальто- и углетканями, что обусловлено их разной химической природой [25, 26]. Воздействие масла АМГ-10 привело к набуханию эластомера и снижению его когезионной прочности, при этом образец СКД-БТ/УТ(РС) полностью потерял адгезионную связь

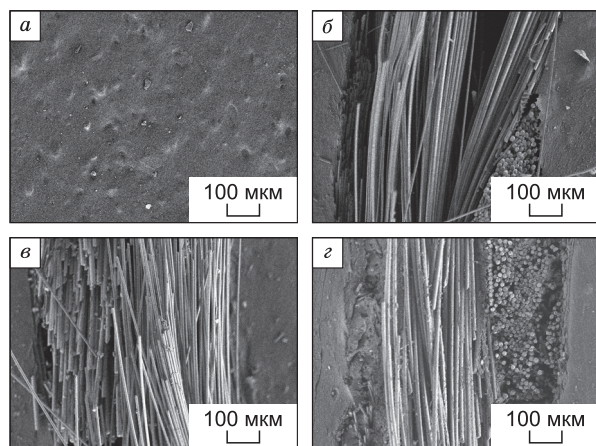


Рис. 7. Микрофотографии структуры срезов эластомера и межфазных границ: *а* – исходного эластомера; *б* – СКД-БТ/УТ; *в* – СКД-БТ/УТ(РС); *г* – СКД-БТ/УТ(Хем)

Fig. 7. Micrographs of the structure of elastomer sections and interphase boundaries: *a*) original elastomer; *б*) SKD- BF/ CF; *в*) SKD- BF/ CF(RS); *г*) SKD- BF/ CF(Chem)

на границе раздела фаз, тогда как система с клеем Хемосил сохранила стабильность благодаря устойчивости адгезива к углеводородам. Термическое воздействие вызвало деструкцию эластомерной матрицы и снижение адгезионных характеристик во всех образцах: в случае СКД-БТ/УТ(РС) за счет термической дестабилизации резинового связующего, а для СКД-БТ/УТ(Хем) вследствие деструкции клеевого слоя.

На рис. 7 приведены микрофотографии структуры срезов исходного эластомера, композитов на границе контакта УТ и БТ в эластомерной матрице. Исходный эластомер (см. рис. 7, *а*) имеет типичную однородную структуру без видимых дефектов или включений, что характерно для однородных резиновых смесей [27, 28]. Микроструктура образца СКД-БТ/УТ без обработки (см. рис. 7, *б*) демонстрирует четко выраженную границу раздела между базальтовыми и углеродными волокнами. При этом со стороны эластомерной матрицы наблюдается плотный контакт с волокнами, что объясняется процессом диффузии макромолекул каучука в поверхностные слои армирующих элементов. Образовавшийся межфазный зазор между БТ и УТ обусловлен различием химической природы волокон и высокой жесткостью их структуры, препятствующей взаимной диффузии. Данный дефект структуры привел к преждевременному отслаиванию уже на этапе подготовки образцов к испытаниям (см. рис. 2). У образца СКД-БТ/УТ(РС) (см.

рис. 7, *в*) наблюдается плотный контакт между полимерной матрицей и самими армирующими наполнителями. Эффект достигается за счет активного проникновения РС в поверхностные слои волокон при обработке и последующего надежного сцепления в процессе вулканизации. В результате формируется прочное соединение между БТ и УТ, а также между волокнами и эластомерной матрицей. Применение клеевого состава Хемосил обеспечивает образование качественных межфазных границ в образце СКД-БТ/УТ(Хем) (см.рис. 7, *г*). На микрофотографии видно, что клеевое покрытие образует каркасную структуру равномерно по поверхности волокон. Такая структура способствует эффективному перераспределению нагрузок и обеспечивает надежное соединение всех компонентов композита, а также защиту от воздействия углеводородных сред.

Заключение

Исследование влияния поверхностной обработки базальтовых и углеродных тканей при их комбинированном введении в эластомерную матрицу выявило, что отсутствие предварительной обработки тканей приводит к полному расслоению композита при минимальном механическом воздействии из-за низкой адгезии соединения, в то время как введение армирующего наполнителя значительно увеличивает прочность. Воздействие гидравлического масла АМГ-10 на композиты обусловлено пластификацией и набуханием связующего, что приводит к снижению прочности и удлинения, а термическое старение, напротив, приводит к дополнительной вулканизации с увеличением твердости; при этом адгезионная прочность между БТ и УТ, обработанными клеем Хемосил, стабильна в масле, но происходит снижение адгезии при термическом воздействии. Предварительная обработка обеспечивает плотный контакт БТ с УТ, по сравнению с необработанными образцами с четкой границей раздела, что наглядно доказывает: поверхностная обработка волокон улучшает адгезионное взаимодействие на межфазной границе базальтовых и углеродных волокон.

Список литературы / References

1. Серкова Е.А., Хмельницкий В.В., Застрогина О.Б. Полимерные материалы для антифрикционных покрытий (обзор). *Труды ВИАМ*. 2021;99(5):56–63. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2021-0-5-56-63>

- Serkova E.A., Hmel'nikskiy V.V., Zastrogina O.B. Polymer materials for antifriction coatings (overview). *Trudi VIAM*. 2021;99(5):56–63. (In Russ.) <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2021-0-5-56-63>
2. Лебедева О.В., Сипкина Е.И. Полимерные композиции и их свойства. *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2022;12(2):192–207. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-2-192-207>
- Lebedeva O.B., Sipkina E.I. Polymer composites and their properties. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2022;12(2):192–207. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-2-192-207>
3. Tang S., Li Z., Sun W., et al. Natural rubber/styrene–butadiene rubber blend composites potentially applied in damping bearings. *Polymers (Basel)*. 2024;16(13):1945. <https://doi.org/10.3390/polym16131945>
4. Ismail A., Zubaydi A., Piscesa B., et al. A novel fiber-glass-reinforced polyurethane elastomer as the core sandwich material of the ship–plate system. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*. 2023;32(1):20220288. <https://doi.org/10.1515/jmbm-2022-0288>
5. Anidha S., Mozhuguan Sekar S., Natarajan E., et al. Preliminary Investigations and Support for the Mechanical and Dynamic Characteristics of a Natural Rubber Reinforcement in E-Glass/ CNT/Epoxy Composite. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*. 2024;8:140. <https://doi.org/10.3390/jcs8040140>
6. Кычкин А.К., Кычкин А.А., Стручков Н.Ф. Исследование сохранения физико-механических свойств стеклоуглепластиков 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>
- 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/10.31242/2618-9712-2025-30-1-148-161>
7. Кычкин А.К., Гаврильева А.А., Васильева Е.Д. и др. Исследование стекло- и базальтотекстолитов по кинетике сорбции и десорбции влаги после экспонирования в условиях холодного климата. *Вестник машиностроения*. 2024;103(4):336–342. <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2024-103-4-336-342>
- Kychkin A.K., Gavrilieva A.A., Vasileva E.D., et al. Research of fiberglass and basalt textile laminates on the kinetics of sorption and desorption of moisture after exposure to cold climate conditions. *Vestnik mashinostroeniya*. 2024;103(4):336–342. (In Russ.) <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2024-103-4-336-342>
8. Морозов С.В. Влияние физической модификации эпоксидного связующего на физико-механические свойства стеклопластика. *Ползуновский вестник*. 2021;(4):157–162. <https://doi.org/10.25712/ASTU.20728921.2021.03.024>
- Morozov S.V. Effect of physical modification of epoxy binder on the physical and mechanical properties of fiberglass. *Polzunovskiy Vestnik*. 2021;(4):157–162. (In Russ.) <https://doi.org/10.25712/ASTU.20728921.2021.03.024>
9. Кузько А.В., Кузько А.Е., Кузьменко А.П. и др. Состав и физико-механические свойства термореактивных стеклопластиков. *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2022;12(3):105–117. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2022-12-3-105-117>
- Kuzko A.V., Kuzko A.E., Kuzmenko A.P., et al. Composition and physico-mechanical properties of thermosetting fiberglass. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Technika i tehnologii. Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2022;12(3):105–117. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2022-12-3-105-117>
10. Селезнев В.А., Какуша В.А., Горбунов И.А. и др. Физико-механические характеристики стеклокомпозитной арматуры. *Вестник Поволжского государственного технического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии*. 2022;21(1):15–26. <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2022.1.15>
- Seleznev V.A., Kakusha V.A., Gorbunov I.A., et al. Mechanical properties of fiber-glass composite reinforced polymer bars. *Vestnik of Volga State University of Technology: Series "Materials. Constructions. Technologies"*. (In Russ.) 2022;21(1):15–26. <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2022.1.15>
11. Dalinkevich A.A., Gumargalieva K.Z., Marakhovskii S.S., et al. Temperature–humidity corrosion behavior of basalt epoxy plastics. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2015;51:1176–1184. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S2070205115070060>
12. Yang S., Cheng Y., Xiao X., et al. Development and application of carbon fiber in batteries. *Chemical Engineering Journal*. 2020;384:123294. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123294>
13. Сидорина А.И. Модификация поверхности углеродных армирующих наполнителей для полимерных композиционных материалов электрохимической обработкой (обзор). *Труды ВИАМ*. 2022;110(4):61–74. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2022-0-4-61-74>
- Sidorina A.I. Modification of the surface of carbon reinforcing fillers for polymer composite materials by electrochemical treatment (review). *Trudi VIAM*. 2022;110(4):61–74. (In Russ.) <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2022-0-4-61-74>
14. Чайкун А.М., Сергеев А.В., Правада Е.С. Эластомерно-тканевые материалы для изделий специальной техники (обзор). *Труды ВИАМ*. 2023;124(6):25–37. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2023-0-6-25-37>
- Chaikun A.M., Sereev A.V., Pravada E.S. Elastomeric-fabric materials for products of special equipment (review). *Trudi VIAM*. 2023;124(6):25–37. (In Russ.) <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2023-0-6-25-37>
15. Морозов С.В., Ананьин С.В. Влияние модификации поверхности углеродных волокон на физико-механические характеристики углепластиков. *Ползуновский вестник*. 2022;(1):134–138. <https://doi.org/10.25712/ASTU.20728921.2022.01.018>
- Morozov S.V. The effect of modification of the carbon fiber surface on the physical and mechanical characteristics of carbon fiber plastics. *Polzunovskiy Vestnik*. 2022;(1):134–138. (In Russ.) <https://doi.org/10.25712/ASTU.20728921.2022.01.018>
16. Zhang B., Jia L., Tian M., et al. Surface and interface modification of aramid fiber and its reinforcement for polymer composites: A review. *European Polymer Journal*. 2021;147:110352. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2021.110352>
17. Марков А.Е., Копырин М.М., Дьяконов А.А. и др. Поверхностная обработка армирующих наполнителей смесью фенолметана и полибутадиена для повышения адгезии с эластомером. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*.

2022;27(3):439–449. <https://doi.org/0.31242/2618-9712-2022-27-3-439-449>

Markov A.E., Kopyrin M.M., Dyakonov A.A., et al. Surface treatment of reinforcing fillers with a mixture of phenylmethane and polybutadiene to increase adhesion with elastomer. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(3):439–449. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-439-449>

18. Копырин М.М., Марков А.Е., Дьяконов А.А. и др. Сравнение способов повышения адгезии между бутадиеновым эластомером и базальтовой тканью. *Ползуновский вестник*. 2022;2(4):109–117. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.014>

Kopyrin M.M., Markov A.E., Dyakonov A.A., et al. Comparison of methods for improving adhesion between butadiene elastomer and basalt fabric. *Polzunovskiy Vestnik*. 2022;2(4):109–117. (In Russ.) <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.014>

19. Manzhosova E.N., Lukina N.F., Isaev A.Y. Adhesives for gluing rubbers to metals during the vulcanization process: A review. *Polymer Science, Series D*. 2024;17:322–328. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S1995421224700539>

20. Третьякова Н.А., Пучков А.Ф., Ильичева Т.М. Химическая модификация резин промоторами адгезии, полученными в расплавах ε-капролактама. В кн.: *Резиновая промышленность. Сырье. Материалы. Технологии: Доклады XXVI научно-практической конференции, г. Москва, 24–28 мая 2021 г. М.: ООО «Научно-исследовательский центр “Научно-исследовательский институт шинной промышленности”»; 2021. С. 117–120.*

Tretiakova N.A., Puchkov A.F., Ilyicheva T.M. Chemical modification of rubbers with adhesion promoters synthesized in ε-caprolactam melts. In: *Rubber Industry. Raw Materials. Materials. Technologies: Proceedings of the 26th Scientific and Practical Conference, Moscow, May 24–28, 2021*. Moscow: Scientific Research Center “Research Institute of the Tire Industry”; 2021, pp. 117–120. (In Russ.)

21. Мухин В.В., Петрова Н.Н., Капитонов Е.А. и др. Разработка стойких к авиационным синтетическим маслам резин на основе смесей нитрильных и диеновых каучуков. *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова*. 2016;56(6):41–50.

Muhin V.V., Petrova N.N., Kapitonova E.A., et al. Development of aircraft synthetic oil resistant rubbers based on mixture of nitrile and diene rubbers. *Vestnik of North-Eastern Federal University*. 2016;56(6):41–50. (In Russ.)

22. Ушмарин Н.Ф., Егоров Е.Н., Кольцов Н.И. Влияние микросфер на свойства агрессивностойких резин. *Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология*. 2021;64(2):49–55. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20216402.6165>

Ushmarin N.F., Egorov E.N., Kol'tsov N.I. Influence of microspheres on properties of aggressiveresistant rubbers. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. [ChemChemTech]*. 2021;64(2):49–55. (In Russ.) <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20216402.6165>

23. Усс Е.П., Шашок Ж.С., Касперович А.В., Кротова О.А. Влияние природы полимера на свойства эластомерных композиций, модифицированных в олигомерных средах. *Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология*. 2018;205(1):53–60.

Uss E.P., Shashok J.S., Kasperovich A.V., Krotova O.A. The influence of polymer nature on properties of elastomer compositions modified by oligomeric environments. *Proceedings of BSTU: Series 2. Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*. 2018;205(1):53–60. (In Russ.)

24. Илларионова М.С., Ушмарин Н.Ф., Капитонова М.С., Кольцов Н.И. Влияние антиоксидантов на свойства резины на основе бутадиен-нитрильных каучуков. *Бутлеровские сообщения*. 2017;51(7):126–131.

Illarionova M.S., Ushmarin N.F., Kapitonova M.S., Kol'tsov N.I. The influence of antioxidants on the properties of rubber based butadiene-nitrile caoutchouc. *Butlerov Communications*. 2017;51(7):126–131. (In Russ.)

25. Бабиевская И.З., Дробот Н.Ф., Фомичев С.В., Кренев В.А. Расчет минерального состава базальтовых пород. *Неорганические материалы*. 2009;45(8):987–989.

Babievskaya I.Z., Drobot N.F., Fomichev S.V., Krenov V.A. Calculation of the mineral composition of basaltic rocks. *Inorganic Materials*. 2009;45(8):916–918. (In Russ.)

26. Абрамов О.Н., Сидоров Д.В., Апухтина Т.Л. и др. Получение пекового углеродного волокна на основе нефтяного сырья. *Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология*. 2015;58(5):86–89.

Abramov O.N., Sidorov D.V., Apuhtina T.L., et al. Production of pitch carbon fiber based on petroleum raw materials. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. [ChemChemTech]*. 2015;58(5):86–89. (In Russ.)

27. Kapitonov E.A., Petrova N.N., Mukhin V.V., et al. Enhanced physical and mechanical properties of nitrile-butadiene rubber composites with n-cetylpyridinium bromide-carbon black. *Molecules*. 2021;26(4):805. <https://doi.org/10.3390/molecules26040805>

28. Иванова С.Ф., Петрова Н.Н. Перспективы модификации бутадиен-нитрильных каучуков гидролизатом коллагена из северных видов рыб. *Каучук и резина*. 2019;78(5):302–307.

Ivanova S.F., Petrova N.N. Prospects for modifications of butadiene acrylonitrile rubbers with collagen hydrolysate from northern fish species. *Kauchuk i Rezina*. 2019;78(5):302–307. (In Russ.)

Об авторах

МАРКОВ Айтал Еремеевич, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-6853-6758>, ResearcherID: ACF-8819-2022, e-mail: aital.markov@gmail.com

ДЬЯКОНОВ Афанасий Алексеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-6959-368X>, ResearcherID: E-5710-2014, e-mail: afonya71185@mail.ru

ТУИСОВ Алексей Геннадьевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-6819-1937>, ResearcherID: ABA-4930-2020, e-mail: tuisovag@gmail.com

ОХЛОПКОВА Айтилина Алексеевна, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-0691-7066>, ResearcherID: A-6594-2014, SPIN: 5495-1617, e-mail: okhlopkovala@yandex.ru

Вклад авторов

Марков А.Е. – методология, верификация данных, проведение исследования, создание черновика рукописи; **Дьяконов А.А.** – руководство исследованием, редактирование рукописи, методология, верификация данных, проведение исследования, ресурсное обеспечение исследования; **Туйсов А.Г.** – разработка концепции, редактирование рукописи, проведение статистического анализа; **Охлопкова А.А.** – администрирование проекта, ресурсное обеспечение исследования, получение финансирования

Конфликт интересов

Один из авторов – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Охлопкова А.А. является членом Редакционной коллегии журнала «Природные ресурсы Арктики и Субарктики». Авторам неизвестно о каком-либо другом потенциальном конфликте интересов, связанном с этой рукописью.

About the authors

MARKOV, Aital Ereemeevich, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-6853-6758>, ResearcherID: ACF-8819-2022, e-mail: aital.markov@gmail.com

DYAKONOV, Afanasy Alekseevich, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-6959-368X>, ResearcherID: E-5710-2014, e-mail: afonya71185@mail.ru

TUIISOV, Aleksei Gennadevich, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-6819-1937>, ResearcherID: ABA-4930-2020, e-mail: tuisovag@gmail.com

OKHLOPKOVA, Aitalina Alekseevna, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-0691-7066>, ResearcherID: A-6594-2014, SPIN: 5495-1617, e-mail: okhlopkova@yandex.ru

Authors' contribution

Markov A.E. – methodology, validation, investigation, writing – original draft; **Dyakonov A.A.** – writing – review & editing, supervision, methodology, validation, investigation, resources; **Tuisov A.G.** – conceptualization, writing – review & editing, formal analysis; **Okhlopkova A.A.** – data curation, resources, funding acquisition

Conflict of interest

One of the authors, Okhlopkova A.A., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher is a member of the Editorial Board for the journal “Arctic and Subarctic Natural Resources”. The authors are not aware of any other potential conflict of interest relating to this article.

Поступила в редакцию / Submitted 30.08.2025

Поступила после рецензирования / Revised 28.10.2025

Принята к публикации / Accepted 20.11.2025

Редактор *Н.А. Лившиц*
Корректурa *З.А. Корнилова*
Компьютерная верстка *И.В. Мелехов*
Обложка *Б.В. Яковлев*

Дата выхода в свет 30.12.2025. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая
Усл. п.л. 18,6. Тираж 100 экз. Заказ № 4536. Цена свободная.

Адрес редакции:

677007, г. Якутск, пр. Ленина, 33, тел.: +7(4112) 33-57-11, e-mail: nras2018@mail.ru

Адрес издателя:

677007, г. Якутск, пр. Ленина, 33, ГБУ «Академия наук Республики Саха (Якутия)»,
тел.: + 7(4112) 33-57-11, e-mail: anrsya@mail.ru

Адрес типографии:

ООО «Компания «Дани-Алмас»
677008, г. Якутск, ул. Билибина, д. 10А
тел.: +7(4112) 36-93-38, e-mail: ardah@inbox