

ПРИРОДНЫЕ РЕСУРСЫ АРКТИКИ И СУБАРКТИКИ

(до 2018 г. «Наука и образование»)

Научный журнал

2024, Том 29, № 2

Основан в 1996 г.
Выходит 4 раза в год

Учредители

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

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

Главный редактор

Л.Н. Владимиров

Член-корреспондент РАН

Заместители главного редактора:

В. Ю. Фридовский, член-корр. РАН

Н.С. Данилова, д-р биол. наук

Ответственный секретарь

З.А. Корнилова

Адрес редакции:

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

<https://resar.elpub.ru>

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

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

© Академия наук РС(Я), 2024
© ФИЦ «Якутский научный центр», 2024
© Северо-Восточный федеральный университет
им. М.К. Аммосова, 2024
© Министерство образования и науки РС(Я), 2024

ISSN 2618-9712 (print)

ISSN 2686-9683 (online)

ARCTIC AND SUBARCTIC NATURAL RESOURCES

(until 2018 “Nauka i Obrazovanie”)

Scientific journal

2024, Vol. 29, No. 2

Founded in 1996
4 issues per year

Founders

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

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

Editor-in-Chief

L.N. Vladimirov

Corresponding Member, RAS

Deputy Editors-in-Chief:

V.Yu. Fridovsky

Corresponding Member, RAS

N.S. Danilova

Dr. Sci. (Biol.)

Executive Editor

Z.A. Kornilova

Editorial Office Address:

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

<https://resar.elpub.ru>

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

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

© Academy of Sciences of RS (Ya), 2024
© Federal Research Centre “The Yakut
Scientific Centre of SB RAS”, 2024
© M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, 2024
© Ministry of Education and Science of RS (Ya), 2024

Редакционный совет:

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

Редакционная коллегия:Науки о Земле

Горячев Н.А., акад. РАН, СВКНИИ ДВО РАН, Магадан, Россия
Григорьев М.Н., д.г.н., ИМЗ СО РАН, Якутск, Россия
Железняк М.Н., чл.-корр. РАН, ИМЗ СО РАН, Якутск, Россия
Колодезников И.И., д.г.-м.н., проф., АН РС(Я), Якутск, Россия
Кутыгин Р.В., к.г.-м.н., ИГАБМ СО РАН, Якутск, Россия
Матвеев А.И., д.т.н., ИГДС СО РАН, Якутск, Россия
Похиленко Н.П., акад. РАН, ИГМ СО РАН, Новосибирск, Россия
Романовский В.Е., д-р, проф., Геофиз. ин-т Ун-та шт. Аляска, Фэрбанкс, США
Толстов А.В., д.г.-м.н., ИГАБМ СО РАН, Якутск, Россия
Фридовский В.Ю., чл.-корр. РАН, ИГАБМ СО РАН, Якутск, Россия
Шепелев В.В., д.г.-м.н., проф., ИМЗ СО РАН, Якутск, Россия
Хуббертен Х.-В., д-р, проф., Потсдамский ф-л Ин-та полярных и морских исслед. им. А. Вегенера, Потсдам, Германия
Яковлев В.Л., чл.-корр. РАН, ИГД УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Биологические науки

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

Материаловедение и химические технологии

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

Editorial Council:

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

Editorial Board: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. Kutygin, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Diamond and Precious Metal Geology Inst. SB RAS, Yakutsk, Russia
A.I. Matveev, Dr. Sci. (Eng.), Chersky Inst. of Mining of the North SB RAS, Yakutsk, Russia
N.P. Pokhilenko, Academician, RAS, V.S. Sobolev Inst. of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia
V.E. Romanovsky, Dr., Prof., Geophysical Inst., Univ. of Alaska, Fairbanks, USA
A.V. Tolstov, Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Diamond and Precious Metal Geology Inst. SB RAS, Yakutsk, Russia
V.Yu. Fridovsky, Corresponding Member, RAS, Prof., Diamond and Precious Metal Geology Inst. SB RAS, Yakutsk, Russia
V.V. Shepelev, Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Prof., Melnikov Permafrost Inst. SB RAS, Yakutsk, Russia
H.-V. Hubberten, Dr., Prof., Alfred Wegener Inst. for Polar and Marine Research, Potsdam Research Unit, Potsdam, Germany
V.L. Yakovlev, Corresponding Member, RAS, Inst. of Mining UB RAS, Yekaterinburg, Russia

Biological Sciences

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

Materials Science and Chemical Technologies

B.D. Annin, Academician, RAS, Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk, Russia
Dae-Yong Jeong, Dr., Inha University, Incheon, Republic of Korea
M.L. Kachanov, Dr., Prof., Tufts University, Medford, USA
V.V. Lepov, Dr. Sci. (Eng.), Larionov Inst. of Physical and Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk, Russia
A.A. Okhlopko, Dr. Sci. (Eng.), Prof., M.K. Ammosov NEFU, Yakutsk, Russia
M.H. Salakhov, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Prof., Kazan Federal Univ. Kazan, Russia

СОДЕРЖАНИЕ

Науки о Земле

Геология и полезные ископаемые

<i>Лоскутов Е.Е., Фридовский В.Ю., Тарасов Я.А.</i> Золотое оруденение в диафоритах Верхне-Тимптонского рудного района Алдано-Станового щита.....	181
<i>Сивцев А.И., Тимофеев Н.Г., Мещеряков В.А.</i> Перспективные нефтегазовые объекты на северо-востоке Предпатомского прогиба	193
<i>Копылова А.Г., Гоголева С.С.</i> Петролого-геохимические особенности среднепалеозойских базитов Муно-Тюнгского междуречья.....	204
<i>Макаров А.А., Козьмин Б.М.</i> Пространственно-статистический анализ распределения сейсмической энергии Олекмо-Становой сеймотектонической зоны (Южная Якутия)	216

Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

<i>Новоприезжая В.А., Федоров А.Н.</i> Реконструкция палеотемператур грунтов ледового комплекса Центральной Якутии в голоцене	224
<i>Сурков В.В., Завадский А.С., Тузова Е.А.</i> Техногенная трансформация поймы р. Лена в районе г. Якутск и оценка нарушенности ее ландшафтов	235

Биологические науки

Экология

<i>Саввинов Г.Н., Макаров В.С.</i> Применение методов дистанционного зондирования для оценки экологической ситуации в бассейне верхнего течения реки Лена	248
<i>Андреева М.В., Павлов И.С., Владимиров Л.Н., Протопопов А.В., Мачахтыров Г.Н., Мачахтырова В.А.</i> Палеопаразитологические исследования шерстистого мамонта (<i>Mammutus primigenus</i> (Blumenbach, 1799))	259
<i>Шадрина Е.Г.</i> Пути проникновения и перспективы инвазии азиатского барсука <i>Meles leucurus</i> Hodgson 1847 (Carnivora, Mustelidae) на территорию Якутии.....	268
<i>Филиппова Г.В., Данилова Н.С., Андросова Д. Н., Прокопьев И.А., Воронов И.В.</i> Адаптивные изменения жирнокислотного состава <i>Oxytropis scheludjakovae</i> и <i>Oxytropis strobilacea</i> при температурных условиях вегетационного сезона в Центральной Якутии	277
<i>Таскина К.Б., Казнина Н.М.</i> Оценка устойчивости дикорастущих злаков северо-западного сектора Российской Арктики к хлоридному засолению	287

Биологические ресурсы

<i>Кайзер А.А., Лайшев К.А., Южаков А.А.</i> Биохимический состав ягод и плодов на территории Юго-Западного Таймыра	295
<i>Исаев А.П., Габышева Л.П., Ефимова А.П.</i> Состав, структура и динамика тополевых лесов национального парка «Ленские Столбы»	303

Материаловедение и химические технологии

<i>Лепов В.В., Дьячковский И.И.</i> Моделирование разрушения композиционного материала на основе ледовой матрицы	313
--	-----

Конференции

Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: состояние, перспективы, новые решения	326
---	-----

CONTENTS

Earth sciences

Geology and mineral resources

<i>Loskutov E.E., Fridovsky V.Y., Tarasov Y.A.</i> Gold mineralization in the diaphthorites of the Verhne-Timptonskiy ore district (Aldan-Stanovoy shield).....	181
<i>Sivtsev A.I., Timofeev N.G., Meshcheryakov V.A.</i> Oil-and-gas potential of the northeast Predpatom trough.....	193
<i>Kopylova A.G., Gogoleva S.S.</i> Petrological and geochemical features of Middle Paleozoic basites in the Muna-Tyung interfluvial region	204
<i>Makarov A.A., Kozmin B.M.</i> Spatial and statistical analysis of seismic energy distribution in the Olekmo-Stanovoy seismotectonic zone (South Yakutia).....	216

Engineering geology, permafrost and soil science

<i>Novopriyehzhaya V.A., Fedorov A.N.</i> Reconstruction of the paleotemperature of the Central Yakutia Ice Complex during the Holocene period	224
<i>Surkov V.V., Zavadsky A.S., Tuzova E.A.</i> Technogenic transformation of the Lena River floodplain near Yakutsk and assessment of landscape disturbance.....	235

Biological sciences

Ecology

<i>Savvinov G.N., Makarov V.S.</i> Application of remote sensing methods to assess the environmental situation in the upper Lena River basin	248
<i>Andreeva M.V., Pavlov I.S., Vladimirov L.N., Protopopov A.V., Machakhtyrov G.N., Machakhtyrova V.A.</i> Paleoparasitological studies of the woolly mammoth (<i>Mammutus primigenus</i> (Blumenbach, 1799)).....	259
<i>Shadrina E.G.</i> The ways of penetration and prospects of invasion of the Asian badger <i>Meles leucurus</i> Hodgson 1847 (Carnivora, Mustelidae) into the territory of Yakutia.....	268
<i>Filippova G.V., Danilova N.S., Androsova D.N., Prokopiev I.A., Voronov I.V.</i> Adaptive changes in the fatty acid composition of <i>Oxytropis scheludjakovae</i> and <i>Oxytropis strobilacea</i> under temperature fluctuations during the growth season in Central Yakutia.....	277
<i>Taskina K.B., Kaznina N.M.</i> Assessment of the resistance of wild grasses in the northwestern region of the Russian Arctic to chloride salinization	287

Biological resources

<i>Kaiser A.A., Laishev K.A., Yuzhakov A.A.</i> The biochemical composition of wild berries and fruits growing in the Southwestern Taimyr	295
<i>Isaev A.P., Gabysheva L.P., Efimova A.P.</i> Composition, structure and dynamics of poplar forests in the Lena Pillars National Park	303

Materials science and chemical technologies

<i>Lepov V.V., Dyachkovsky I.I.</i> Modeling of ice-matrix composite fracture	313
---	-----

Conferences

Geology and mineral resources of Northeast Russia: current status, prospects, new solutions.....	326
--	-----

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Геология и полезные ископаемые

УДК 553.411.071

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-181-192>

Оригинальная статья

Золотое оруденение в диафторитах Верхне-Тимптонского рудного района Алдано-Станового щита

Е. Е. Лоскутов[✉], В. Ю. Фридовский, Я. А. Тарасов

*Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН,
г. Якутск, Российская Федерация
[✉]loskutov@diamond.ysn.ru*

Аннотация

В Верхне-Тимптонском золоторудном районе, расположенном в зоне сочленения Станового и Алданского блоков Алдано-Станового щита, известны крупные россыпные месторождения золота рек Гонам, Тимптон, Иенгра, разработка некоторых началась еще в конце XIX в. Несмотря на проведенные во второй половине XX столетия поисковые работы были обнаружены только небольшие золоторудные проявления с неясными генетической и пространственной связями с зеленокаменными породами и разновозрастными магматическими образованиями. Обобщение имеющихся и новых данных о геологии и металлогении Верхне-Тимптонского золоторудного района позволило установить, что проявления золота в диафторитах Холодниканского пояса имеют характерные черты орогенного типа месторождений золота с вкрапленной пиритовой и прожилковой с сульфидами Fe, Pb, Zn, Cu и сульфосолями минерализацией. Околорудные изменения представлены окварцеванием, серицитизацией, карбонатизацией и березитизацией, характерными для мезотермальных флюидных систем. Выявлены общие черты геологического строения и металлогении Верхне-Тимптонского золоторудного района и провинции Цзяодун Северо-Китайского кратона. Показано, что золоторудная минерализация Верхне-Тимптонского золоторудного района, так же как и провинции Цзяодун, пространственно связана с шовными зонами. В Верхне-Тимптонском золоторудном районе Амгинская зона тектонического меланжа в палеопротерозое была одной из структур, где проходила кратонизация блоков земной коры, а позже зоной проницаемости и концентрации разновозрастных тектонотермальных и металлогенических событий. Полученные результаты важны для правильной оценки металлогенического потенциала Верхне-Тимптонского района и Алдано-Станового щита в целом. Они позволяют повысить эффективность методики поисковых работ и локализовать объекты исследования.

Ключевые слова: золото, диафториты, Верхне-Тимптонский рудный район, Холодниканский зеленокаменный пояс, Алдано-Становой щит

Финансирование. Исследование выполнено за счет средств государственного задания ИГАБМ СО РАН (№ FUGG-2024-0006).

Для цитирования: Лоскутов Е.Е., Фридовский В.Ю., Тарасов Я.А. Золотое оруденение в диафторитах 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>

Gold mineralization in the diaphthorites of the Verkhne-Timptonskiy ore district (Aldan-Stanovoy shield)

Evgeniy E. Loskutov✉, Valery Y. Fridovsky, Yaroslav A. Tarasov

*Diamond and Precious Metal Geology Institute,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation*
✉ loskutov@diamond.ysn.ru

Abstract

In the Verkhne-Timptonskiy gold ore district, located where the Stanovoy and Aldan blocks intersect (Aldan-Stanovoy shield), substantial placer gold deposits have been found in the Gonam, Timpton, and Iengra rivers. The exploration of certain deposits in this area began at the end of the 19th century. Despite exploration efforts conducted in the second half of the 20th century, only minor gold ore findings were made, with uncertain links to greenstones and igneous formations from various periods. After conducting a thorough analysis of both existing and new data on the geology and metallogeny of the Verkhne-Timptonskiy gold ore district, we have concluded that gold occurrences in diaphthorites of the Kholodnikan belt display characteristic features of orogenic-type gold deposits. These features include disseminated pyrite and veinlet mineralization containing iron (Fe), lead (Pb), zinc (Zn), copper (Cu) sulfides, and sulfosalts. The near-ore alterations are represented by silicification, sericitization, carbonatization, and beresitization, characteristic of mesothermal fluid systems. Moreover, we identified common features of the geological structure and metallogeny of the Verkhne-Timptonskiy gold ore district and the Jiaodong province of the North China Craton. Thus, gold mineralization in the Verkhne-Timptonskiy gold ore district and the Jiaodong province is spatially associated with suture zones. In the Verkhne-Timptonskiy gold ore district, the Amga zone of tectonic melange in the Paleoproterozoic era was one of the regions where cratonization of blocks of the Earth's crust occurred. Later, it became a zone of permeability and concentration of tectonothermal and metallogenic events of various ages. The results obtained will help assess the metallogenic potential of the Verkhne-Timptonskiy district and the Aldan-Stanovoy shield as a whole. They make it possible to increase the efficiency of search operations and focus on localizing research objects.

Keywords: gold, diaphthorites, Verkhne-Timptonskiy ore district, Aldan-Stanovoy shield, Kholodnikan greenstone belt
Funding. This study was conducted within the framework of the state assignment for the DPMGI SB RAS (No. FUGG-2024-0006).

For citation: Loskutov E.E., Fridovsky V.Y., Tarasov Y.A. Gold mineralization in the diaphthorites of the Verkhne-Timptonskiy 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>

Введение

В пределах Алдано-Станового щита (АСЩ) известны крупные месторождения золота, урана, редких и редкоземельных элементов, платиноидов и других металлов. Основным добываемым видом минерального сырья здесь является золото. Геология и металлогения месторождений золота АСЩ освещена в работах [1–4 и др.]. Наиболее изучен Центрально-Алданский рудный район с известными уникальными месторождениями Эльконского, Лебединского и Кура-нахского рудных узлов. Другие перспективные районы, в том числе Верхне-Тимптонский, изучены хуже.

Верхне-Тимптонский золоторудный район (ВТЗР) расположен в зоне сочленения Станового и Алданского блоков АСЩ, различающихся геологическим строением и металлогенией. В ВТЗР

известны крупные россыпные месторождения золота рек Гонам, Тимптон, Иенгра и ручьев Скобельцинский, Колбочи, Утанах, Березовый, Юрский и других. На некоторых из них золотодобыча началась в конце XIX в. Между тем сопоставимых по масштабам коренных источников золота до сих пор не установлено, их возможный тип не определен, не ясна связь (генетическая и/или пространственная) с зеленокаменными породами Холодниканского пояса и магматическими образованиями. Крупные месторождения орогенного типа в зеленокаменных поясах известны на всех кристаллических щитах (Канадский, Индийский, Бразильский, Австралийский и др.). Запасы таких месторождений составляют до 1000–1500 т (Ред Лейк, Хемло, Керкленд-Лейк, Поркьюпайн в Северной Америке; Калгурли и Челленджер в Западной Австралии; Колар в Индии; Фа-

зенда Бразильеро и Мору-Велью в Бразилии; Ренко в Африке) [5].

Формирование позднемезозойских месторождений золота АСЦ в ранних работах связывалось с процессами в тылу юрско-раннемеловой активной окраины Сибирского кратона [6]. В последние годы обосновывается ассоциация рудномагматических систем АСЦ с субдукцией Палеотихоокеанской плиты в позднем мезозое на восточной окраине Азии [7]. Эти взгляды развиваются на примере орогенных золоторудных месторождений северо-восточной окраины Северо-Китайского кратона (например, провинция Цзяодун), сходной по геологическому строению с АСЦ [2, 8–11].

Проведенные авторами исследования позволили на основе обобщения и новых данных по металлогении золота ВТЗР выполнить сопоставление с хорошо изученными золоторудными месторождениями провинции Цзяодун Северо-Китайского кратона. Полученные результаты важны для правильной оценки металлогенического потенциала Верхне-Тимптонского района и Алдано-Станового щита. Они позволяют повысить эффективность поисковых работ и локализовать объекты исследования.

Сведения о геологическом строении района

ВТЗР приурочен к южной части Амгинской зоны тектонического меланжа, отделяющей Нимырский блок (АНМ) Центрально-Алданского супертеррейна от Западно-Алданского (WA) и Тындинского (TN) составных террейнов [6] (рис. 1, а). В ВТЗР Амгинская зона сложена гнейсами, кристаллическими сланцами, амфиболитами и кварцитами архейского и протерозойского возраста [12]. Эти комплексы в верховьях рек Тимптон и Гонам и в среднем течении р. Иенгра перекрыты юрскими и меловыми песчаниками, алевролитами и конгломератами.

Магматизм ВТЗР представлен докембрийскими ультраметаморфическими и мезозойскими интрузивными породами. В докембрийской толще широко проявлены поля мигматитов и обособленные массивы архейских(?) гранитов и плагиогранитов, древнестановых протерозойских гранитов. Возраст гранитов неричинского комплекса в ранних работах определялся как докембрийский [13], датирование U-Pb методом по циркону показало время их кристаллизации около 170 млн лет [12]. Метаморфические породы фундамента претерпели неоднократный прогрессив-

ный и регрессивный метаморфизм гранулитовой, амфиболитовой, эпидот-амфиболитовой и зеленосланцевой фаций.

В мезозойский этап тектономагматической активизации докембрийские комплексы были интродуцированы гранит-гранодиоритами. С ними пространственно и генетически связаны кварцальбит-микроклиновые метасоматиты, пропилиты и березиты.

Вулканогенно-осадочные образования мезозоя Тимптонского и Токариканского грабенов в основании сложены триасовыми вулканитами, выше по разрезу – ранне- и среднеюрскими терригенными отложениями. Они с угловым несогласием перекрываются раннемеловыми отложениями преимущественно песчано-конгломератового состава.

Широко проявлены различные по составу диафториты Холодниканского зеленокаменного пояса – амфиболиты и эпидот-сланцевые кристаллосланцы. В ранних исследованиях возраст диафторитов принимался как докембрийский [16]. Позднее было показано, что эти породы могут быть связаны с процессами палеозойской или мезозойской тектономагматической активизаций [13].

Характеристика и золотоносность проявлений Верхне-Тимптонского рудного района

Минерализация ВТЗР сосредоточена в Холодникан-Иенгрском и Скабельцинском рудных полях (рис. 1, б) [1]. Холодникан-Иенгрское рудное (рис. 2) поле расположено к северо-западу от Неричинского массива и включает рудопроявления Северикан, Маристое, Надежда, Холодниканское, Геохимическое, Шатерка, Речное-1, Речное-2 и Иенгрское. Проявления Северикан, Маристое и Надежда представлены зонами дробления субмеридиональной, северо-восточной и субширотной ориентировки, а вмещающие породы – катаклазированными и окварцованными кристаллическими сланцами, гнейсами и диафторированными амфиболовыми кристаллическими сланцами. Основные рудные минералы пирит, халькопирит, галенит и сфалерит, редко блеклая руда. В рудных телах содержание Au до 91 г/т и Ag до 1384 г/т. Отмечены повышенные содержания Cu, Pb, Zn, As, Bi, Sb, Mo, Cd. Золото мелкое (менее 0,2 мм), пленочное и каплевидное, пробностью от 487 до 926 ‰ [1].

На проявлениях Холодниканское, Геохимическое и Шатерка преобладают секущие жилы кварцкарбонатного состава с сульфидной (пирит, халь-

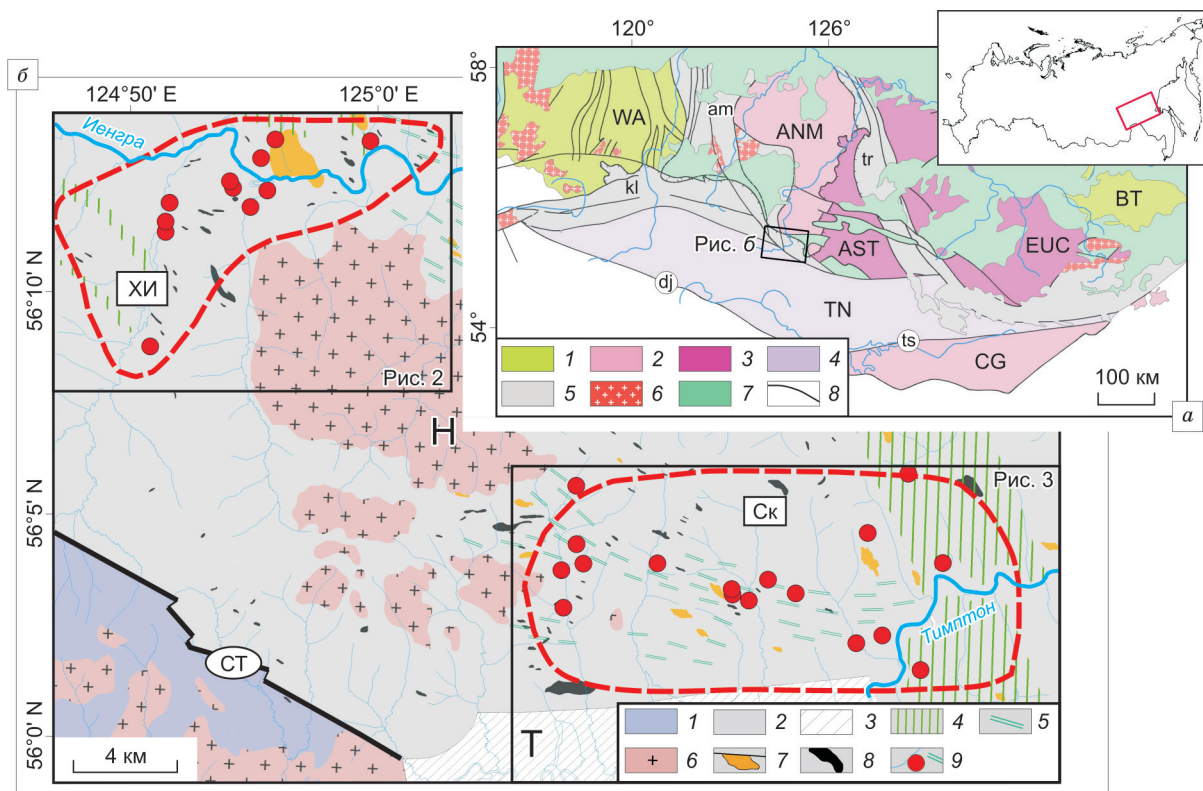


Рис. 1. Тектоническая схема Алдано-Станового щита и положение района работ (по [6] с изменениями) (а) и схема геологического строения центральной части Верхне-Тимптонского золоторудного района (по [14, 15] с изменениями и дополнениями) (б).

а: 1 – гранит-зеленокаменные террейны (WA – Западно-Алданский, BT – Батомгский); 2 – гранулит-ортогнейсовые террейны (ANM – Нимнырский, CG – Чогарский); 3 – гранулит-парагнейсовые террейны (AST – Сутамский, EUC – Учурский); 4 – тоналит-грондъемит-гнейсовый терреин (TN – Тындинский); 5 – зоны тектонического меланжа (am – Амгинская, kl – Каларская, tr – Тыркандинская); 6 – сшивающие раннепротерозойские граниты; 7 – чехол Сибирской платформы; 8 – разломы (dj – Джелтулакский, ts – Таксакандинский).

б: 1 – Становой блок; 2 – Алданский блок; 3 – Тимптонский грабен; 4, 5 – Холодниканский зеленокаменный пояс (4 – диафториты; 5 – диафторированные породы); 6 – граниты, 7 – щелочные массивы; 8 – ультраосновные породы; 9 – рудопроявления золота. Н – Неричинский гранитный массив; Т – Тимптонский грабен; Ст – Становой разлом (южная ветвь); Рудные поля: ХИ – Холодникан-Иенгское; Ск – Скобельцинское

Fig. 1. а – Tectonic scheme of the Aldan-Stanovoy shield and the position of the work area (by [6] with changes); б – Scheme of the geological structure of the central part of the Verkhne-Timptonkiy gold ore district (by [14, 15] with changes and additions).

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

б: 1 – Stanovoy block; 2 – Aldan block; 3 – Timpton graben; 4, 5 – Holodnikan greenstone belt; 4 – diaphthorites; 5 – diafluorinated rocks; 6 – granites; 7 – alkaline massifs; 8 – ultramafic rocks; 9 – ore occurrence of gold. Letter abbreviations: Н – the Nerichin massif of granite; Т – Timpton graben; СТ – Stanovoy fault (south branch); Ore fields: ХИ – Kholodnikan-Iengra; Ск – Skobeltsinsky

копирит, галенит) минерализацией. Вмещающими породами являются интенсивно диафторированные амфибол-плагиоклазовые кристаллические сланцы. При отработке россыпей в районе этих рудопроявлений отмечены крупные самородки золота и серебра, многочисленные находки галенита с примесью Au, Ag, Sb и Bi [1].

Минерализация проявлений Речное-1, Речное-2 и Иенгское образует зоны жильного и прожилкового окварцевания в диафторитах серицит-кварц-альбитового и эпидот-серицит-хлоритового минерального состава. Основной рудный минерал – пирит. Содержание золота в зонах от 2,8 до 3,2 г/т, серебра до 58 г/т [1].

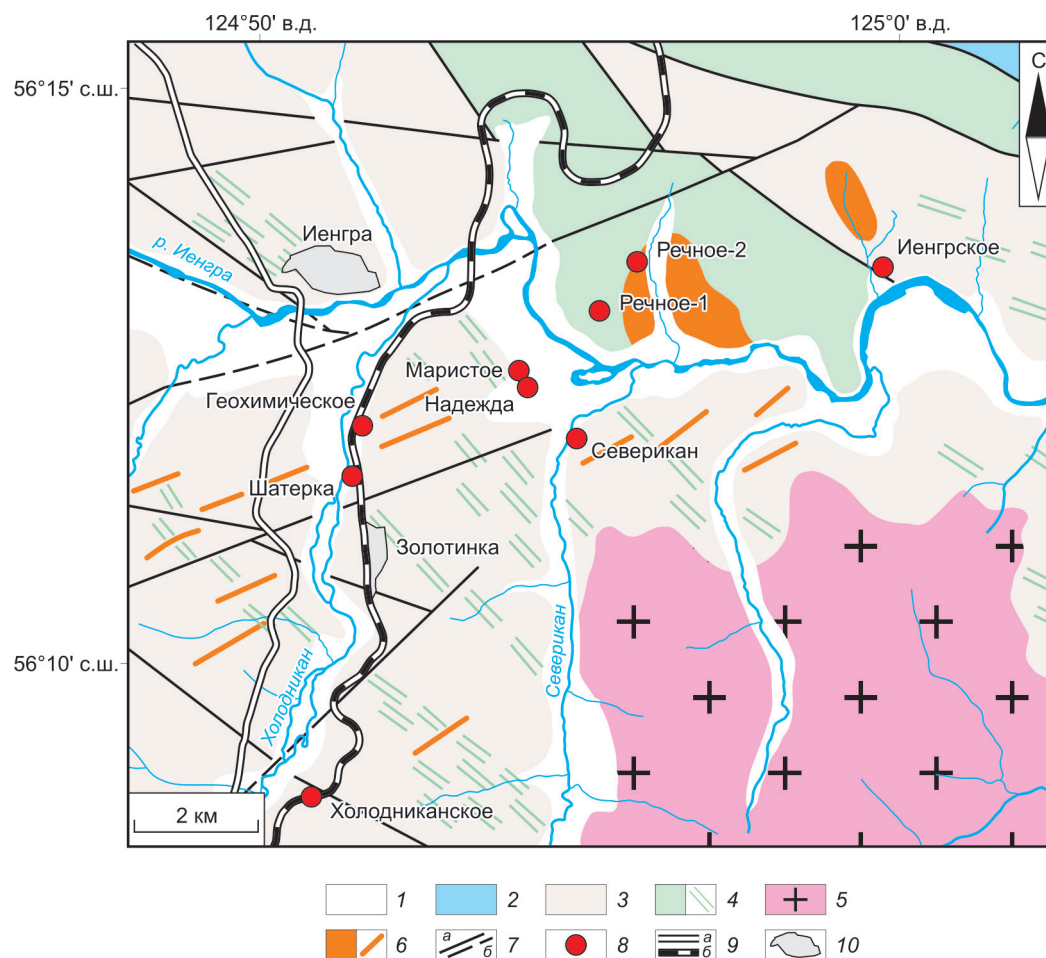


Рис. 2. Схема геологического строения Холодникан-Иенгрского рудного поля (по материалам [14, 15] с изменениями и дополнениями).

1, 2 – отложения: 1 – четвертичные, 2 – юрские терригенные; 3 – породы докембрийского фундамента; 4 – диафториты и диафторированные породы; 5 – граниты Неричинского массива; 6 – мезозойские щелочные массивы и дайки; 7 – разломы достоверные (а) и предполагаемые (б); 8 – рудопроявления золота; 9 – автомобильная (а) и железная дороги (б); 10 – населенные пункты

Fig. 2. Scheme of the geological structure of the Kholodnikan-Iengra ore field (based on materials [14, 15] with changes and additions).

1, 2 – sediments: 1 – Quaternary; 2 – Jurassic terrigenous; 3 – rock of the Precambrian basement; 4 – diaphthorite and diafluorinated rocks; 5 – granite of the Nerichin massif; 6 – Mesozoic alkaline massifs and dikes; 7 – faults reliable (a) and supposed (b); 8 – ore occurrence of gold; 9 – highway (a) and railway (b); 10 – locality

Скобельцинское рудное поле расположено к юго-востоку от Неричинского массива. Здесь известны рудопроявления Сульфидное, Гнейсовое, Пиритовое, Утанахское и др. (рис. 3).

Золотое оруденение проявления Сульфидное локализовано в зоне рассланцевания и катаклаза с кварцевыми жилами протяженностью до 100 м, мощностью до 0,7–0,8 м, с гнездами и вкрапленностью пирита, халькопирита, борнита, ковеллина, малахита размером до 0,5–0,8 см. Содержание золота до 10 г/т. Вмещающие породы – серицит-хлоритовые сланцы. Основным рудным

минералом жил является пирит. Он образует в жильной массе прожилково-зернистые агрегаты мощностью до 5–10 см. В таких участках его содержание может достигать 20–40 %. Обильная вкрапленность пирита наблюдается на контакте с вмещающими породами.

Рудное тело проявления Гнейсовое падает на ЮЗ под углом 60–75°. По морфологии это субсогласная жила альбит-карбонат-кварцевого, альбит-кварцевого, кварцевого состава мощностью до 2–3 м, которая сопровождается серией зон карбонат-кварцевого прожилкования мощностью до

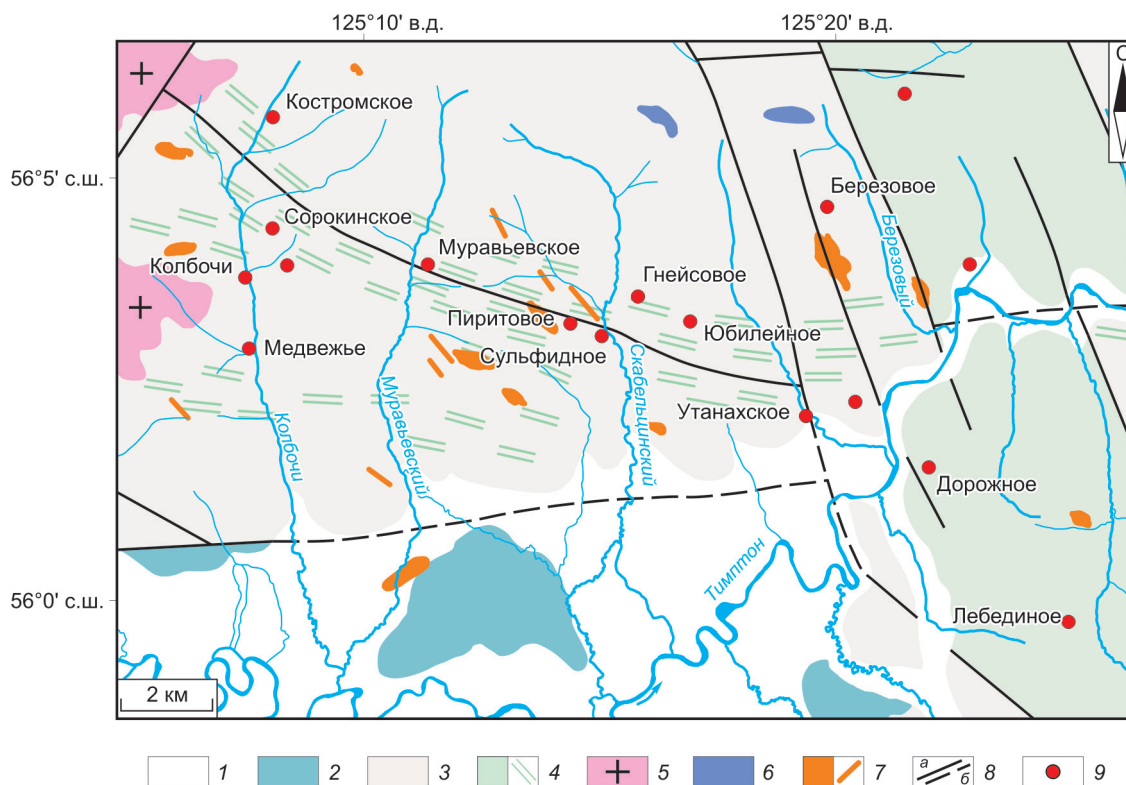


Рис. 3. Схема геологического строения Скабельцинского рудного поля (по материалам [14, 15] с изменениями и дополнениями)

1, 2 – отложения (1 – четвертичные, 2 – юрские терригенные); 3 – породы докембрийского фундамента; 4 – диафториты и диафторитованные породы; 5 – граниты Неричинского массива; 6 – ультраосновные и основные докембрийские интрузии; 7 – мезозойские щелочные массивы и дайки; 8 – разломы достоверные (а) и предполагаемые (б); 9 – рудопоявления золота

Fig. 3. Scheme of the geological structure of the Scabeltinsky ore field (based on materials [14, 15] with changes and additions). 1, 2 – sediments: 1 – Quaternary; 2 – Jurassic terrigenous; 3 – rock of the Precambrian basement; 4 – diaphthorite and diafluorinated rocks; 5 – granite of the Nerichin massif; 6 – Precambrian ultramafic and mafic rocks; 7 – Mesozoic alkaline massifs and dikes; 8 – faults reliable (a) and supposed (b); 9 – ore occurrence of gold.

первых десятков метров и вкрапленностью пирита, реже халькопирита и галенита. Содержание сульфидов не превышает 1–3 %. Вмещающие породы серицит-хлоритовые, плагиоклаз-хлоритовые сланцы, интенсивно хлоритизированные, окварцованные и карбонатизированные габбро-амфиболиты и диафторитованные биотитовые, биотит-амфиболовые гнейсы с рассеянной вкрапленностью пирита.

Рудопоявление Пиритовое приурочено к мощной (>200 м) зоне карбонат-хлорит-серицит-кварц-альбитовых метасоматитов протяженностью ~2200 м в крыле складки с падением пород на юг и юго-запад под углами от 35 до 60° (в среднем 50°). Вмещающие породы хлорит-серицитовые кристаллические сланцы (рис. 4). В метасоматитах минерализация локализована в линзах и жилах кварца мощностью до 0,5–5,0 м с карбонатом, серицитом и сульфидами (1–5 %),

главным образом пиритом, реже халькопиритом, молибденитом, галенитом. В метасоматитах и сульфидно-кварцевых жилах содержание золота от 0,1 до 14 г/т. Золото мелкое (<0,2 мм), пробы 727–989 ‰ [1]. В кварце с вкрапленностью пирита атомно-абсорбционным методом определено содержание золота 1,78 г/т.

Сходная с проявлением Пиритовое минерализация наблюдается в среднем и верхнем течении руч. Скабельцинский. Здесь среди хлорит-серицитовых сланцев развиты согласные и продольно секущие кварцевые жилы с пиритом и галенитом мощностью до 25 см, зоны кварцевого прожилкования мощностью около 2 м (см. рис. 4). Содержание Au в штучных пробах из кварцевых жил до 0,36 г/т. В верховьях руч. Скабельцинский среди кварцит-серицитовых сланцев, диафторитованных амфибол-плагиоклазовых и амфибол-двупироксеновых гнейсов на-



Рис. 4. Минерализация рудопоявления Пиритовое (а, б) и среднего течения руч. Скабельцинский (в, з): а – обломки кварц-полевошпатовой жилы; б – хлорит-серицитовые сланцы; в – амфибол-двупироксеновые кристаллосланцы с вкрапленностью пирита (Py); з – кварцевая жила с вкрапленностью пирита (Py)

Fig. 4. Mineralization of the Piritovoe occurrence (а, б) and middle flow of the Scabeltsinsky creek (в, з): а – fragments of quartz-feldspar veins; б – chlorite-sericite crystalline schists; в – amphibole-two-pyroxene crystalline schists with inclusions of pyrite (Py); з – quartz vein with disseminations of pyrite (Py)

блюдается кварцевая жила мощностью около 70–80 см, по зальбандам которой развиваются гнезда и вкрапленность пирита (см. рис. 4, з). Содержание золота в кварцевой жиле по данным атомно-абсорбционного анализа составляет 0,14 г/т.

Рудопоявление Утанахское расположено в низовьях руч. Утанах. Рудные тела – серии кварц-карбонатных жил с вкраплениями и гнездами пирита и халькопирита. Вмещающие породы – эпидот-слюдистые и хлоритовые кристаллические сланцы флюидально-линзовидного строения (рис. 5).

Сопоставление проявлений

Верхне-Тимптонского рудного района и месторождений золота провинции Цзяодун

Месторождения золота провинции Цзяодун расположены на северо-восточной окраине Северо-Китайского кратона среди архейских зеленокаменных поясов. Это одна из крупнейших золотоносных провинций мира, где разведано более 5000 т золота [8]. Провинция отличается

высокой концентрацией крупных месторождений, благодаря этому здесь находится 36,7 % ресурсов золота Китая [17]. Формирование золотого оруденения происходило около 120 млн лет назад, на 2 млрд лет позже, чем региональный метаморфизм, синхронно позднемезозойской декратонизации и магматической активности [18]. Месторождения контролируются линейными региональными второстепенными разломами, связанными с литосферно-коровой шовной зоной Тан-Лу. Месторождения сформировались в транс-прессивном и транстенсивном тектоническом режиме в период субдукции Палеотихоокеанской плиты в условиях хрупкой деформации [18]. Вмещающими оруденение породами обычно являются позднеюрские–раннемеловые известково-щелочные граниты, реже докембрийские гнейсы. Основные рудные минералы – пирит, халькопирит, галенит и сфалерит, самородное золото, электрум, кюстелит, петцит и калаверит. Золото встречается также в небольших количествах в виде твердого раствора (Au^+) и/или наночастиц (Au^0) в пирите [8, 19]. В околорудных

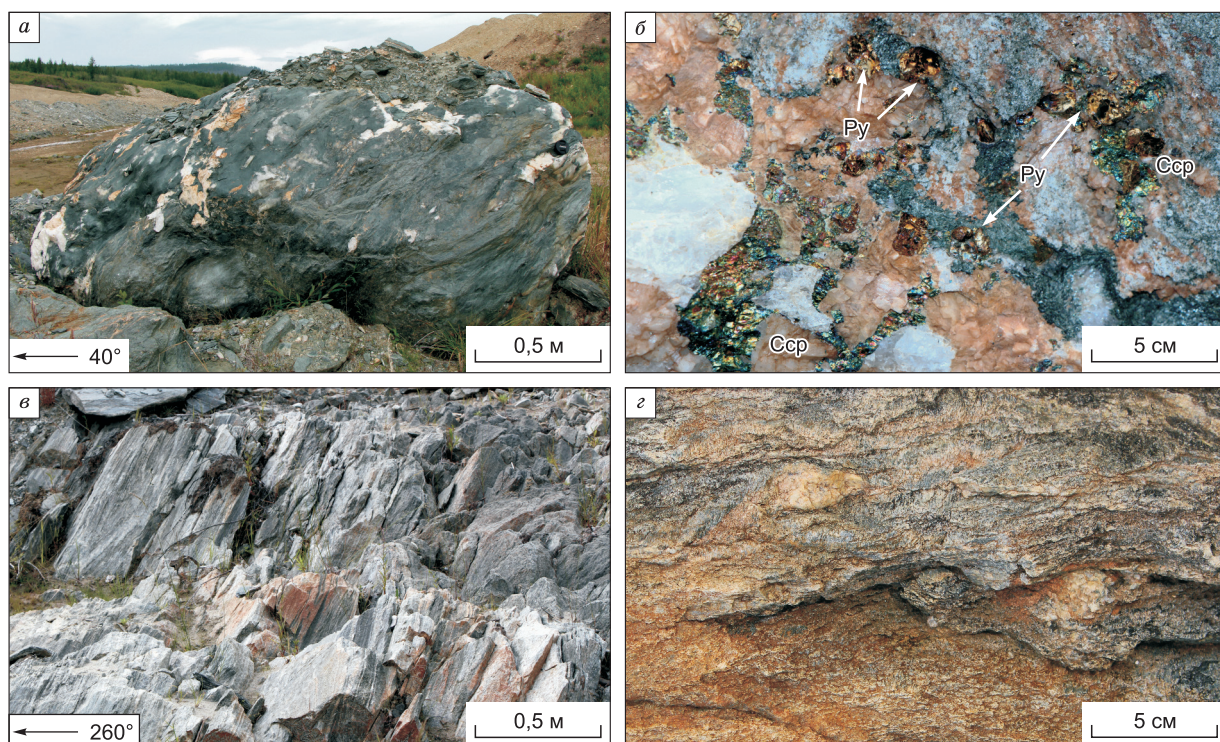


Рис. 5. Минерализация рудопроявления Утанахское. *а* – валуны хлоритовых сланцев с кварц-карбонатными жилами; *б* – вкрапления и гнезда пирита (Py) и халькопирита (Ccp) в кварц-карбонатной жиле; *в* – хлорит-кварцевые кристаллические сланцы; *г* – флюидалльно-линзовидные текстуры кристаллических сланцев

Fig. 5. Mineralization of the Utanahskoe occurrence. *a* – boulder of chlorite crystalline schists with quartz-carbonate veins; *б* – disseminations and nest of pyrite (Py) and chalcopyrite (Ccp) in the quartz-carbonate vein; *в* – chlorite-quartz crystalline schists; *г* – fluid-lenticular textures of crystalline schists

измененных породах обычны калиевый полевой шпат, хлорит, серицит, кварц, а также карбонат [20, 21]. Характеристики золоторудных месторождений провинции Дзяодун типичны для орогенных месторождений золота [22]. Предполагается, что источником флюидов были субдукцированная Палеотихоокеанская плита и перекрывающие ее обогащенные пиритом осадки и/или метасоматизированная мантийная литосфера [8, 22]. Допускается незначительный вклад коровых компонентов из докембрийских пород фундамента.

В таблице приведены главные характеристики золотого оруденения провинции Цзяодун и ВТЗР. Несмотря на то что данных по рудообразующим системам проявлений ВТЗР немного и они нуждаются в дополнительном изучении, выявляется много общих черт в геологическом строении и металлогенической эволюции регионов.

Оба золоторудных района пространственно связаны с литосферно-коровыми шовными зонами. Для провинции Цзяодун это шовная зона

Тан-Лу, для ВТЗР – Амгинская. Вмещающими породами обоих районов являются докембрийские кристаллические комплексы, метаморфизованные в эпидот-амфиболитовой и гранулитовой фациях. Как правило, месторождения провинции Цзяодун и ВТЗР имеют схожие минеральные ассоциации. Основными минералами в рудах сравниваемых объектов являются пирит, халькопирит, галенит, сфалерит, блеклые руды, самородное золото, кварц, полевой шпат, карбонат. Во вмещающих породах проявлены окварцевание, серицитизация, карбонатизация и березитизация. Возраст месторождений провинции Цзяодун около 120 ± 10 млн лет. Он близок, с учетом погрешности анализов, изотопному возрасту некоторых золоторудных месторождений в докембрийских комплексах Алдано-Станового щита [23, 25].

Приведенные характеристики месторождений провинции Цзяодун и их сопоставление с изученными золоторудными месторождениями ВТЗР позволяют отнести последние к орогенному типу.

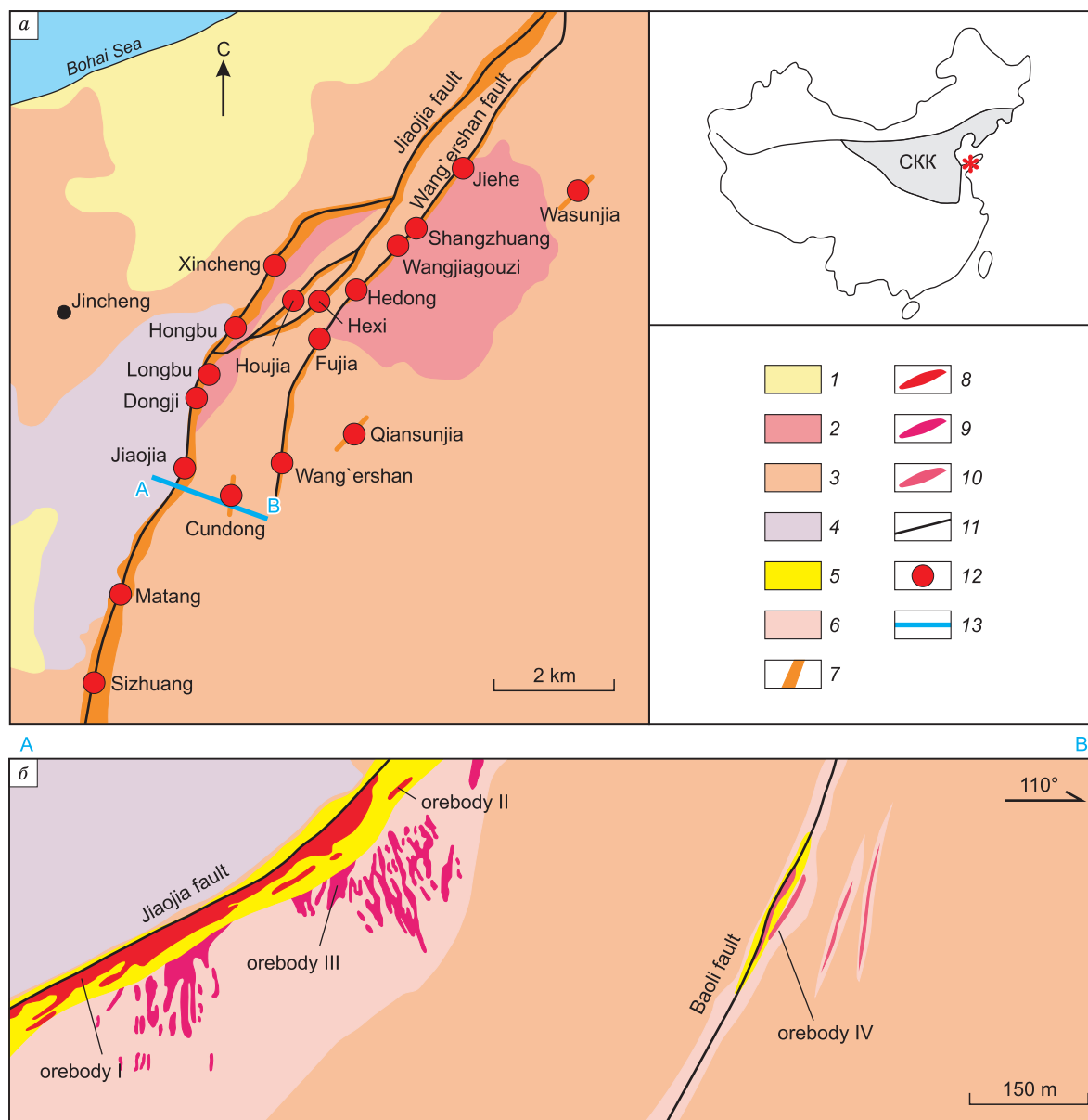


Рис. 6. Геологическая карта (а) и разрез (б) золоторудного месторождения Цзяоцзяо провинции Цзяодун [19].

1 – четвертичные отложения; 2 – раннемеловые граниты Гуоджиалин; 3 – позднеюрские граниты Линглон; 4 – архейские амфиболиты; 5 – пирит-серицит-кварцевые метасоматиты; 6 – полевошпат-хлорит-серицит-кварцевые метасоматиты; 7 – зоны метасоматоза; 8 – вкрапленная и штокверковая минерализация; 9 – минерализация в пирит-мусковит-кварцевых жилах; 10 – золотосодержащие кварц-сульфидные жилы; 11 – основные разломы; 12 – месторождения; 13 – линия разреза

Fig. 6. Geological map (a) and cross section (b) of the Jiaojiao gold deposit in the Jiaodong province [19].

1 – Quaternary sediments; 2 – Lower Cretaceous Guojialing granites; 3 – Upper Jurassic Linglong granites; 4 – Archean amphibolites; 5 – Pyrite-sericite-quartz alteration zone; 6 – K-feldspar-chlorite-sericite-quartz alteration zone; 7 – Alteration zone; 8 – Disseminated and stockwork-style mineralization; 9 – Thin pyrite-muscovite-quartz vein-style mineralization; 10 – Auriferous quartz-sulfide vein-style mineralization; 11 – Major faults; 12 – Gold deposits; 13 – Cross section

Закключение

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Золоторудная минерализация ВТЗР, так же как и провинции Цзяодун, пространственно свя-

зана с шовными зонами. В ВТЗР такой региональной тектонической структурой является Амгинская зона тектонического меланжа. В палеопротерозое она была одной из структур, где проходила кратонизация блоков земной коры, а

Характеристика золоторудных месторождений провинции Цзяодун Северо-Китайского кратона и рудопроявлений Верхне-Тимптонского района Алдано-Станового щита орогенного типа

Typical features of gold orogenic deposits in the Jiaodong province of the North China Craton and gold occurrences in the Verkhne-Timptonskiy district of the Aldan-Stanovoy shield

Провинция / Рудный район	Цзяодун	Верхне-Тимптонский
Тектонические структуры	Второстепенные разломы литосферно-коровой шовной зоны Тан-Лу	Литосферно-коровая Амгинская зона тектонического меланжа
Вмещающие породы	Позднеархейский тоналит-трондьемит-гранодиоритовый комплекс (2,6–2,9 млрд лет). Гранитные батолиты мезозойского возраста (160–110 млн лет)	Архейские и протерозойские гнейсы, кристаллические сланцы, амфиболиты и кварциты
Региональный метаморфизм	Амфиболитовая и гранулитовая фация	Эпидот-амфиболитовая фация
Метасоматические процессы	Окварцевание, серицитизация, пиритизация, калишпатизация	Окварцевание, серицитизация, березитизация, карбонатизация
Рудные тела	Золотокварцевые жилы, штокверки, прожилково-вкрапленная сульфидная минерализация	Кварцевые жилы, штокверки, прожилково-вкрапленная сульфидная минерализация
Рудные минералы	Главные – пирит, второстепенные – халькопирит, галенит, сфалерит, самородное золото, электрум, кюстелит, петцит и калаверит.	Главные – пирит, второстепенные – халькопирит, галенит, сфалерит, блеклые руды, самородное золото
Возраст	120 ± 10 млн лет	Ранний мел (?)
Тип месторождения	Орогенный	Орогенный (?)
Рудные флюиды	Низкая соленость 0–11 мас. % NaCl $H_2O-CO_2-NaCl \pm CH_4$	Нет данных
T, P	170–335 °C 0,7–2,5 кбар	Нет данных
h, O, C изотопы	$\delta^{18}O_{H_2O}$ 7,0 – 10,9 ‰, δD -81 – -64 ‰	Нет данных
Изотоп серы	$\delta^{34}S$ 5,8 – 7,0 ‰	Нет данных
Источники	[9–11]	[1], эта статья

позже зоной проницаемости и концентрации разновозрастных тектонотермальных и металлогенических событий.

2. Положение рудопроявлений ВТЗР определяется линейными зонами диафторитов Холодниканского зеленокаменного пояса и, локально, позднеюрско-раннемеловыми дайками и малыми интрузиями щелочного (субщелочного) состава.

3. Жильные минеральные ассоциации (пирит, халькопирит, галенит, сфалерит, блеклые руды, самородное золото, кварц, полевой шпат, карбонат) и околорудные изменения (окварцевание, серицитизация, карбонатизация и березитизация) характерны для мезотермальных флюидных систем.

4. Проявления золота в диафторитах Холодниканского пояса имеют характерные черты орогенного типа месторождений золота. Зоны диафторитов кроме жильно-прожилкового оруденения несут рассеянную вкрапленную минерализацию пирита с повышенными содержаниями золота.

рализацию пирита с повышенными содержаниями золота.

Список литературы / References

1. Ветлужских В.Г. Золотоносность Северо-Становой металлогенической зоны (Южная Якутия, Амурская область). *Отечественная геология*. 2007;(1):59–71.
Vetluzhskikh V.G. Gold content of the North Stanovoy metallogenetic zone (South Yakutia, Amur region). *Otechestvennaya geology*. 2007;(1):59–71. (In Russ.)
2. Казанский В.И., Яновский В.М. Сопоставление мезозойских золоторудных районов Сино-Корейского и Алдано-Станового щитов. *Геология рудных месторождений*. 2006;48(1):51–70.
Kazansky V.I., Yanovsky V.M. Comparison of Mesozoic gold district of the Sino-Korean and Aldan-Stanovoi shields. *Geology of ore deposits*. 2006;48(1):51–70.
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 cluster of the Aldanian Metal-

- logenic Province. *Regional Geology and Metallogeny*. 2017;(71):93–111. (In Russ.)
4. 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., Amuzinskii V.A., et al. Gold metallogeny in the Aldan Province. *Russian Geology and Geophysics*. 2007;48(12):1257–1275.
5. Сафонов Ю.Г., Попов В.В., Волков А.В. и др. Актуальные проблемы металлогении золота. *Геология и геофизика*. 2007;48(12):1257–1275.
- Safonov Yu.G., Popov V.V., Volkov A.V., et al. Topical problems of gold metallogeny. *Russian Geology and Geophysics*. 2007;48(12):1257–1275. (In Russ.)
6. Парфенов Л.М., Кузьмин М.И. *Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия)*. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика»; 2001. 571 с.
- Parfenov L.M., Kuzmin M.I. *Tectonics, geodynamics and metallogeny of the territory of the Republic Sakha (Yakutiya)*. Moscow: MAIK “Nauka/Interperiodika”; 2001. P. 571 (In Russ.)
7. Khomich V.G., Boriskina N.G., Santosh M. Geodynamics of late Mesozoic PGE, Au, and U mineralization in the Aldan shield, North Asian Craton. *Ore Geology Reviews*. 2015;68:30–42.
8. Deng J., Wang Q.F., Santosh M., et al. Remobilization of metasomatized mantle lithosphere: a new model for the Jiaodong gold province, eastern China. *Mineralium Deposita*. 2020;55(2):257–274. <https://doi.org/10.1007/s00126-019-00925-0>.
9. Fun H.R., Hu F.F., Yang J.H., Zhai M.G. Fluid evolution and large-scale gold metallogeny during Mesozoic tectonic transition in the Jiaodong Peninsula, eastern China. *Geological Society. London. Special Publications*. 2007;280:303–316. <https://doi.org/10.1144/SP280.16>.
10. Qiu K.F., Goldfarb R.J., Deng J., et al. Gold deposits of the Jiaodong Peninsula, Eastern China. *Society of Economic Geologists*. 2020;23:753–773. <https://doi.org/10.5382/SP.23.35>.
11. Wen B.J., Fan H.R., Santosh M., et al. Genesis of two different types of gold mineralization in the Linglong gold field, China: Constrains from geology, fluid inclusions and stable isotope. *Ore Geology Reviews*. 2015;65:643–658. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.03.018>.
12. Радъков А.В. *Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Алдано-Забайкальская. Лист О-51 – Алдан. Объяснительная записка*. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ; 2015. 365 с.
- Rad'kov A.V. *State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1 000 000 (third generation). Aldano-Zabaikalskaya series. Sheet O-51 – Aldan. Explanatory letter*. SPb.: VSEGEI Cartographic Factory; 2015. 365 p.
13. Котов А.Б., Ларин А.М., Смелов А.П. и др. Возрастные границы проявления зеленосланцевого диафтореза в зоне Станового структурного шва. *Доклады РАН*. 2015;463(6):687–691. <https://doi.org/10.7868/S0869565215240184>.
- Kotov A.B., Larin A.M., Smelov A.P., et al. Age boundaries for the manifestation of greenschist diaphthoresis in the Stanovoi structural suture zone. *Doklady Earth Sciences*. 2015;463(6):687–691. (In Russ.)
14. Кац А.Г. *Объяснительная записка к геологической карте СССР масштаба 1 : 200 000. Алданская серия, лист О-51-XXXVI*. М: ЦСП ХП ВГФ; 1965. 115 с.
- Katz A.G. *Explanatory note to the geological map of the USSR, scale 1: 200,000. Aldan series, sheet O-51-XXXVI*. M: TsSP KhP VGF; 1965. 115 p. (In Russ.)
15. Кац А.Г. *Объяснительная записка к геологической карте СССР масштаба 1 : 200 000. Алданская серия, лист О-51-XXXV*. М: ЦСП ХП ВГФ; 1976. 120 с.
- Katz A.G. *Explanatory note to the geological map of the USSR, scale 1: 200,000. Aldan series, sheet O-51-XXXV*. M: TsSP KhP VGF; 1976. 120 p. (In Russ.)
16. Кориковский С.П. *Метаморфизм, гранитизация и постмагматические процессы в докембрии Удоканостановой зоны*. М.: Наука; 1967. 300 с.
- Korikovskiy S.P. *Metamorphism, granitization and postmagmatic processes in the Precambrian Udokan-Stanovoy zone*. Moscow: Nauka; 1967. 300 p. (In Russ.)
17. *China Mineral Resources 2019*. Ministry of Natural Resources, PRC. Beijing: Geological Publishing House; 2019. P. 68.
18. Deng J., Yang L.Q., Li R.H., et al. Regional structural control on the distribution of world-class gold deposits: an overview from the giant Jiaodong Gold Province, China. *Geological Journal*. 2019;54:378–391. <https://doi.org/10.1002/gj.3186>.
19. Yang L.Q., Deng J., Wang Z.L., et al. Relationships between gold and pyrite at the Xincheng gold deposit, Jiaodong Peninsula, China: implications for gold source and deposition in a brittle epizonal environment. *Economic Geology*. 2016;111:105–126. <https://doi.org/10.2113/econgeo.111.1.105>.
20. Deng J., Wang C.M., Bagas L., et al. Cretaceous–Cenozoic tectonic history of the Jiaojia Fault and gold mineralization in the Jiaodong Peninsula, China: constraints from zircon U–Pb, illite K–Ar, and apatite fission track thermochronometry. *Mineralium Deposita*. 2015;50:987–1006. <https://doi.org/10.1007/s00126-015-0584-1>.
21. Li L., Santosh M., Li S.R. The ‘Jiaodong type’ gold deposits: haracteristics, origin and prospecting. *Ore Geology Reviews*. 2015;65:589–611. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.06.021>.
22. Goldfarb R.J., Santosh M. The dilemma of the Jiaodong gold deposits: are they unique? *Geoscience Frontiers*. 2014;5:139–153. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2013.11.001>.
23. Степанов В.А. *Бамское золоторудное месторождение (геология, минералогия, геохимия)*. Владивосток: Дальнаука; 1998. 209 с.
- Stepanov V.A. *Bam gold deposit (geology, mineralogy, geochemistry)*. Vladivostok: Dalnauka; 1998. 209 p. (In Russ.)

24. Степанов В.А. Этапы формирования и генезис золоторудных месторождений Приамурья. Доклады РАН. 2005;403(1):83–87.

Stepanov V.A. Stages of formation and genesis of gold deposits in the Amur region. Doklady Earth Sciences. 2005;403(1):83–87. (In Russ.)

25. Кардашевская В.Н. Золотое оруденение Алгоминского рудного узла Южно-Алданской металло-

генической зоны: минералогия и условия образования руд. Дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Якутск. 2022. 132 с.

Kardashevskaya V.N. Gold mineralization of the Algominsky ore cluster of the South Aldan metallogenic zone: mineralogy and conditions of ore formation. Diss. ... Cand. Sci. Yakutsk. 2022. 132 p. (In Russ.)

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, <https://orcid.org/0000-0002-4994-2141>, Scopus Author ID: 6505824025, SPIN: 3383-0398, e-mail: fridovsky@diamond.ysn.ru

ТАРАСОВ Ярослав Алексеевич, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0009-0002-1524-2013>, ResearcherID: RID70503, Scopus Author ID: 57220984194, SPIN: 7004-9761, e-mail: t.yaroslav_96@mail.ru

Вклад авторов

Лоскутов Е.Е. – проведение исследования, создание черновика рукописи

Фридовский В.Ю. – разработка концепции, проведение исследования, создание черновика рукописи, редактирование рукописи

Тарасов Я.А. – визуализация

Конфликт интересов

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

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 AuthorID: 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.), <https://orcid.org/0000-0002-4994-2141>, Scopus Author ID: 6505824025, SPIN: 3383-0398, e-mail: fridovsky@diamond.ysn.ru

TARASOV, Yaroslav Alekseevich, Junior Researcher, <https://orcid.org/0009-0002-1524-2013>, ResearcherID: RID70503, Scopus Author ID: 57220984194, SPIN: 7004-9761, e-mail: t.yaroslav_96@mail.ru

Authors' contribution

Loskutov E.E. – investigation, original draft

Fridovsky V.Y. – conceptualization, investigation, original draft, review & editing

Tarasov Y.A. – visualization

Conflict of interest

One of the authors, Fridovsky V.Yu., Corresponding member of RAS, Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Professor, Director 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 17.01.2024

Поступила после рецензирования / Revised 20.02.2024

Принята к публикации / Accepted 12.03.2024

Перспективные нефтегазовые объекты на северо-востоке Предпатомского прогиба

А. И. Сивцев^{✉,1,2}, Н. Г. Тимофеев², В. А. Мещеряков³

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

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

³АО «Сахатранснефтегаз», г. Якутск, Российская Федерация

✉maraday@yandex.ru

Аннотация

В статье рассматриваются геологическое строение и перспективы нефтегазоносности северо-восточной части Предпатомского прогиба. Анализ основан на результатах глубокого бурения и данных прямых геохимических исследований, проведенных в последние годы. Показаны особенности соотношения структурных планов верхней и нижней частей геологического разреза, обусловленные надвиговыми деформациями. Сделано предположение, что глубоким бурением в районе Улугурской структуры не достигнуты целевые продуктивные горизонты в автохтонной части разреза. Здесь, после уточняющего объема сейсморазведочных работ, предлагается заложить поисковую скважину большей глубины. В качестве другого приоритетного объекта на нефть и газ обозначена потенциальная зона выклинивания терригенных отложений венда на юго-западном склоне Сунтарского поднятия. Сделан прогноз распространения литологических ловушек, сложенных хорошо отсортированными гранулярными коллекторами венда на северных частях Эргеджейского и Улугурского лицензионных участков. В аллохтонной части разреза обозначены перспективы нефтегазоносности карбонатных отложений венда и нижнего кембрия в коллекторах, образованных за счет вторичных процессов. Сделано предположение, что надвиговые деформации могли обусловить циркуляцию агрессивных растворов с формированием вторичных трещинно-кавернозных коллекторов с последующей миграцией и накоплением в них скоплений углеводородов. Также отмечены высокие перспективы газоносности верхней части разреза, где были установлены залежи газа на вновь открытых месторождениях. Приведены результаты прямого геохимического опробования Улугурского и Эргеджейского лицензионных участков, позволяющие предварительно локализовать перспективные зоны и участки изученной территории. При этом узкие вытянутые геохимические аномалии связываются с перспективами аллохтонной части разреза, а изометричные аномалии – с автохтонной частью. Отмечена необходимость консолидации всей имеющейся геолого-геофизической информации по Предпатомскому прогибу в рамках тематических исследований.

Ключевые слова: Предпатомский прогиб, венд, кембрий, надвиги, аллохтон, автохтон, перспективы нефтегазоносности, геохимия

Финансирование. Статья подготовлена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), проект «Государственное регулирование недропользования и охраны окружающей среды во Франции и в Арктической зоне Российской Федерации: сравнительное исследование, методология и практика» (№ 21-510-22001).

Для цитирования: Сивцев А.И., Тимофеев Н.Г., Мещеряков В.А. Перспективные нефтегазовые объекты на северо-востоке Предпатомского прогиба. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(2):193–203. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-193-203>

Original article

Oil-and-gas potential of the northeast Predpatom trough

Alexey I. Sivtsev^{✉,1,2}, Nikolay G. Timofeev², Vitaly A. Meshcheryakov³

¹Taas-Yuryakh Neftegazodobycha, Yakutsk, Russian Federation

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

³Sakhatransneftegaz, Yakutsk, Russian Federation

✉maraday@yandex.ru

Abstract

This article discusses the geological structure and prospects of the oil and gas potential in the northeastern part of the Predpatom trough. The materials of the study included geological findings from deep drilling and data from direct

geochemical studies conducted in recent years. It describes the specific features of the structural plans of the upper versus the lower part of the geological cross-section. It is assumed that deep drilling in the area of the Ulugur structure has not reached the target productive horizons in the autochthonous part of the section. After acquiring more recent seismic data, there is a proposal to drill a deeper exploratory well in the area. As another priority target for oil and gas exploration, a potential zone of Vendian clastic deposits wedging on the southwestern slope of the Suntar uplift has been identified. A forecast has been made for the distribution of lithological traps stacked with well-sorted granular Vendian reservoirs in the northern parts of the Ergedzheysky and Ulugursky license areas. In the allochthonous part of the section, the potential for oil and gas content in carbonate deposits from the Vendian and Lower Cambrian periods is highlighted in reservoirs formed by secondary processes. It is assumed that thrust deformations could lead to the circulation of aggressive solutions, resulting in the formation of secondary fractured cavernous reservoirs. Subsequently, hydrocarbon accumulations may migrate and accumulate within these reservoirs. Good gas prospects were also noted in the upper part of the section, where gas deposits were confirmed in newly discovered fields. The results of direct geochemical testing of the Ulugur and Ergedzheysky license areas are presented, enabling the preliminary delineation of promising zones and areas in the studied territory. At the same time, narrow elongated geochemical anomalies are associated with the prospects of the allochthonous part of the section, while isometric anomalies are linked to the autochthonous part of the section. The need to consolidate all available geological and geophysical information on the Pre-Atomic deflection within the framework of case studies is noted.

Keywords: Predpatom basin, Vendian, Cambrian, thrusts, allochthon, autochthon, oil and gas prospects, geochemistry

Funding. This study was conducted with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (RFBR), project “State regulation of subsoil use and environmental protection in France and in the Arctic zone of the Russian Federation: a comparative study, methodology and practice” (No. 21-510-22001).

For citation: Sivtsev A.I., Timofeev N.G., Meshcheryakov V.A. Oil-and-gas potential of the northeast Predpatom trough. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(2):193–203. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-193-203>

Введение

В настоящее время в Предпатомском прогибе на территории РС(Я) открыты Бетинчинское нефтяное, Бысахтахское, Кэдэргинское, им. И.Н. Кульбертинова, им. И.М. Меньшикова, Отраднинское газоконденсатные и Хотого-Мурбайское газовое месторождения. Большинство месторождений открыто в последнее время в связи с активизацией геологоразведочных работ в регионе. Большой интерес недропользователей к данной территории обусловлен, прежде всего, близостью к магистральным трубопроводам Восточная Сибирь–Тихий океан и «Сила Сибири», а также относительно высоким потенциалом суммарных ресурсов углеводородов [1].

В пределах рассматриваемой территории АО «Сахатранснефтегаз» в лице дочерних компаний ООО «Улугурнефтегаз» и ООО «ГДК Ленскгаз» принадлежат два лицензионных участка – Улугурский и Эргеджейский. В 2018–2022 гг. на этих участках проведены прямые геохимические исследования вдоль проектируемых сейсмических профилей для предварительного выделения нефтегазоперспективных объектов. Работы выполнялись АО «ВНИГРИ» с использованием стандартных методов сбора и компьютерной обработки геолого-геофизической и геохимической информации.

Целью данной работы является рассмотрение с общегеологических позиций перспектив нефтегазоносности северо-восточной части Предпатомского прогиба и сопоставление их с данными прямых геохимических опробований.

Особенности геологического строения

В составе Предпатомского прогиба выделяют Нюйско-Джербинскую и Березовскую впадины, которые разделены Уринским антиклинорием.

Нюйско-Джербинская впадина отделяет Непско-Ботуобинскую антеклизу от складчатых сооружений Патомского нагорья, вытянута в северо-восточном направлении на 300 км при средней ширине около 120 км и имеет площадь более 40 тыс. км² [2].

Березовская впадина отделяет Алданскую антеклизу от структур Байкало-Патомского складчатого пояса и является незамкнутой структурой, раскрывающейся в сторону Кемпендяйской впадины. Впадина вытянута в субмеридиональном направлении на 350 км при средней ширине около 100 км; ее площадь превышает 36 тыс. км² [2].

Надо заметить, что на существующих тектонических картах условная граница между Нюйско-Джербинской и Березовской впадинами практически проходит по границе между Улугурским и Эргеджейским лицензионными участками (рис. 1).

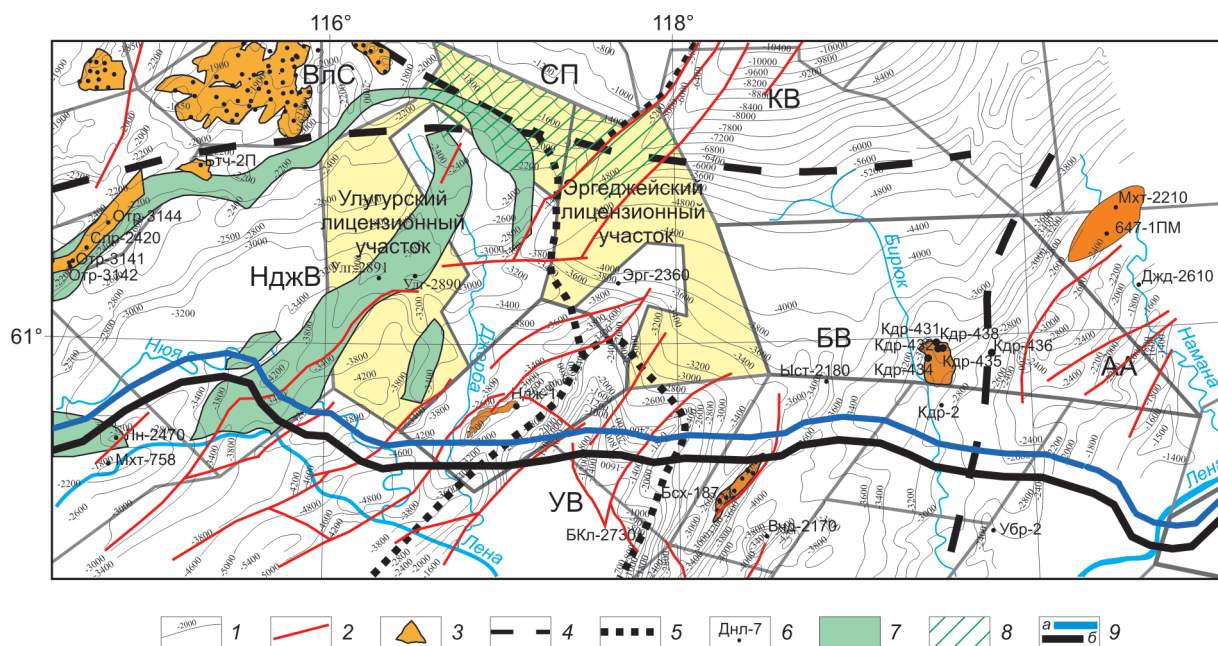


Рис. 1. Структурная схема по отражающему горизонту КВ северо-восточной части Предпатомского прогиба и расположение Улугурского и Эргеджейского лицензионных участков.

1 – изогипсы отражающего горизонта КВ (кровля терригенного венда), 2 – разрывные нарушения, 3 – месторождения углеводородов, 4 – границы надпорядковых тектонических элементов, 5 – границы структур 1-го порядка, 6 – скважины и их номера, 7 – зоны развития надвиговых складок, представляющие основной нефтегазопромысловый интерес в подсолевой карбонатной толще (аллохтон), 8 – зоны выклинивания перспективных отложений на юго-западе Сунтарского поднятия, 9 – газопровод «Сила Сибири» (а) и нефтепровод ВС-ТО (б). Желтым цветом показаны площади лицензионных участков. ВЛС – Вилучанская седловина, ВС – Вилуйская синеклиза, АА – Алданская антеклиз, НДЖВ – Нюйско-Джербинская впадина, УВ – Уринский выступ, БВ – Березовская впадина, СП – Сунтарское поднятие, КВ – Кемпендйская впадина

Fig. 1. Structural diagram of the KV reflecting horizon in the northeastern part of the Predpatomsky trough and location of the Ulugursky and Ergedzheysky license areas.

Symbols: 1 – isohypses of the reflecting horizon of the KV (roof of the terrigenous vendian), 2 – discontinuous faults, 3 – hydrocarbon deposits, 4 – boundaries of superorder tectonic elements, 5 – boundaries of structures of the 1st order, 6 – wells and their numbers, 7 – zones of development of thrust folds representing the main oil and gas exploration interest in subsalt carbonate column (allochthon), 8 – zones of wedging of promising deposits in the south-west of the Suntar uplift, 9 – the Power of Siberia gas pipeline (a) and the VS-TO oil pipeline (b). The yellow color shows the area of the licensed areas.

Designations: ВЛС – Vilyuchanskaya saddle, ВС – Vilyuyskaya syncline, АА – Aldan anteclise, НДЖВ – Nyuisko-Djerbinsky depression, УВ – Urinsky ledge, БВ – Berezovskaya depression, СП – Suntar uplift, КВ – Kemptendyai depression

Осадочный чехол в пределах изучаемой территории имеет толщину 2000–7000 м и представлен пятью структурно-литологическими комплексами: рифейским – 2000–3000 м, бетинчино-сералахским (терригенный вендский) – 300–900, бюкско-билирским (карбонатный венд-нижнекембрийский) – 650–1000, юрегинско-метежерским (нижне-среднекембрийский карбонатно-галогенный) – 1000–1500 и верхоленско-нерюктейским (среднекембрийско-среднепалеозойский карбонатный) – 1500–1800 м.

Главной отличительной чертой Предпатомского прогиба является широкое развитие надвиговых деформаций, разделяющих разрез на автохтонную и аллохтонную части. Надвиговые

деформации достоверно установлены в пределах Нюйско-Джербинской впадины [3, 4]. К формационным особенностям Предпатомского прогиба относится появление в бюкской свите венда солей (торсальская пачка), а также то, что на внешнем борту терригенные отложения венда залегают на кристаллическом фундаменте Сибирской платформы, а во внутренней части подстилаются породами рифея.

Раздел между аллохтоном и автохтоном проходит по базальному срыву (детachment), ступенчато переходящему на все более высокие горизонты от внутренних частей Байкало-Патомского пояса к его фронту [5]. В Предпатомском прогибе detachment трассируется по соленосным

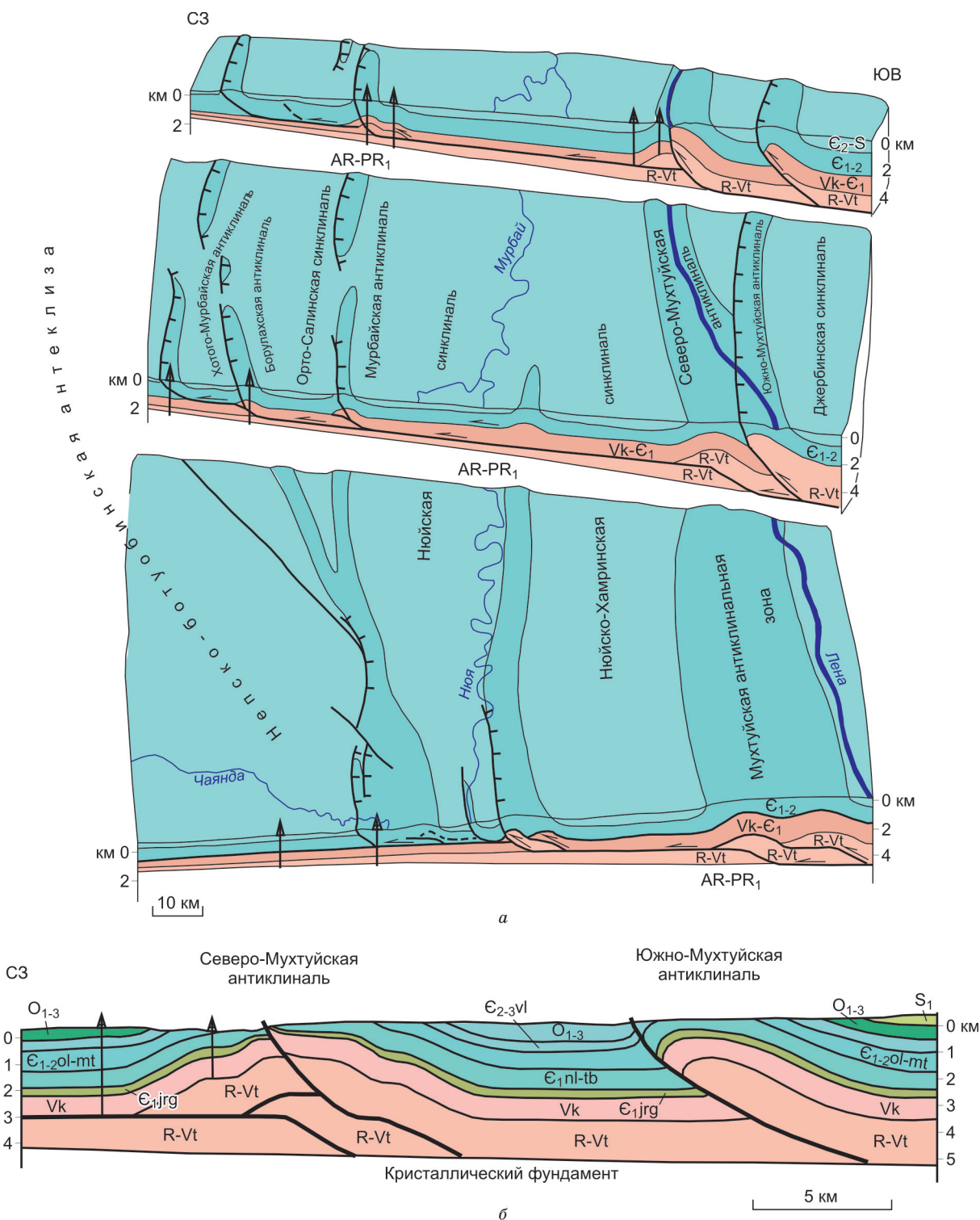


Рис. 2. Блок-диаграмма Нюйско-Джербинской впадины (а) и геологический разрез через Мухтуйскую антиклинальную зону (б) [3].

R-Vt – рифей-венд-терригенный, Vk – венд-карбонатный, E_{1jrg} – юрегинская свита (нижний кембрий), E_{1nl-tb} – нелбинско-толбачанский карбонатный (нижний кембрий), $E_{1-2}ol-mt$ – олекминско-метегерский галогенно-карбонатный (нижний-средний кембрий), $E_{2-3}vl$ – верхоленская карбонатная серия свит (средний-верхний кембрий), O – карбонатный ордовик, S – карбонатный силур

Fig. 2. *a)* Block diagram of the Nyu-Djerbin depression, *b)* geological section through the Mukhtuy anticline zone [3]. Symbols: R-Vt – Riphean-wend-terrigenous, Vk – wend-carbonate, C_{1jrg} – Yureginsky formation (Lower Cambrian), C_{1nl-tb} – Nelbinsk-Tolbachan carbonate (Lower Cambrian), $C_{1-2ol-mt}$ – Olekminsko-Metegersky halogen-carbonate (lower-Middle Cambrian), C_{2-3vl} – Verkholsenskaya carbonate series of formations (Middle-Upper Cambrian), O – carbonate Ordovician, S – carbonate Silurian

отложениям торсальской пачки венда. По мере ее выклинивания детачмент переходит на соленосные отложения нижнего кембрия [5].

В Нюйско-Джербинской впадине автохтонный и аллохтонный структурные комплексы характеризуются резко выраженным несовпадением структурных планов, обусловленным нарушением структуры аллохтона контрастными складчато-надвиговыми деформациями.

Аллохтон характеризуется развитием линейных складчато-надвиговых деформаций преимущественно северо-восточного простирания, разделенных синклиналями с ненарушенной внутренней структурой (рис. 2). Количество и ширина деформированных участков увеличиваются от платформы в сторону Байкало-Патомского складчатого пояса [1]. Отмечается упрощение структурных форм вниз по разрезу автохтона, тогда как породы аллохтона могли быть неоднократно деформированы в процессе продвижения надвиговых пластин.

Надвиговые деформации предполагаются и в Березовской впадине. В 80-х годах XX века был пробурен ряд параметрических и поисковых глубоких скважин на выявленных положительных структурах в южной части впадины [6]. К сожалению, проведенные работы не увенчались открытием новых скоплений углеводородов, были зафиксированы только незначительные прямые признаки нефтегазоносности и выделены отдельные хорошо проницаемые пласты. Впоследствии, после проведения детальных сейсморазведочных работ предполагаемые на уровне проектных венд-нижнекембрийских продуктивных горизонтов положительные структуры не были обнаружены. Было сделано предположение, что несовпадение структурных планов обусловлено надвиговыми деформациями [6].

Таким образом, для обеих впадин основной проблемой картирования перспективных структур является несовпадение структурных планов нижней и верхней частей разреза. Выделенные в пределах Предпатомского прогиба структуры имеют преимущественно узкие линейно-вытянутые формы, совпадающие по простиранию с генеральным простиранием впадин.

Перспективы нефтегазоносности

Традиционно основные перспективы нефтегазоносности прогиба связываются с не затронутыми надвиговыми деформациями отложениями автохтона. Строение автохтона в Нюйско-Джербинской впадине по отражающему горизонту КВ (кровля терригенного венда) характеризуется достаточно спокойным моноклинальным погружением пород в юго-юго-восточном направлении с градиентом наклона 15–20 м/км, и лишь на крайнем северо-востоке наклон пород постепенно сменяется на юго-западный. Структурный план по КВ осложнен редкими локальными поднятиями, структурными носами и заливами [5].

В автохтоне перспективы нефтегазоносности связываются с терригенно-карбонатными отложениями венда. Так, притоки нефти (4,65 м³/сут) получены из харыстанского продуктивного горизонта венда на Бетинчинском нефтяном месторождении. На Хотого-Мурбайском газовом месторождении промышленные притоки (до 143,2 тыс.м³/сут) получены из терригенного бутубинского продуктивного горизонта венда. На крупном по запасам газа и нефти Верхневилучанском нефтегазоконденсатном месторождении продуктивные горизонты также приурочены к терригенному вендскому (вилучанский и харыстанский продуктивные горизонты) [7] и карбонатному венд-нижнекембрийскому (юряхский продуктивный горизонт) комплексам [8].

В пределах изученной территории высокие перспективы связываются с бысахтахским продуктивным горизонтом венда. Промышленные притоки газа из этого горизонта получены на Бысахтахском и им. И.Н. Кульбертинова газоконденсатных месторождениях. Дебит газа составлял от 18,1 до 984,8 тыс. м³/сут на Бысахтахском месторождении и 79,3 тыс. м³/сут в скважине 1-П месторождения им. И.Н. Кульбертинова. Хотя пористость пород бысахтахского горизонта на месторождениях невысокая (5–7 %), хорошая проницаемость обеспечивается за счет интенсивной трещиноватости высококремнистых пород [9].

Достаточно крупная по запасам залежь Отраднинского газоконденсатного месторождения приурочена к телгеспитской карбонатной толще



Рис. 3. Розоватые крупнозернистые песчаники курсовской свиты венда. Скважина Шеинская 472, интервал 3750–3760

Fig. 3. Pinkish coarse-grained sandstones of the Kursovskaya Venda formation. Sheinskaya well 472, interval 3750–3760

венда. Здесь дебиты из телгеспитского горизонта после соляно-кислотной обработки призабойной зоны достигали 1070 тыс. м³/сут (скв. 314-2). Залежи газа в телгеспитском горизонте в изученном регионе установлены также на вновь открытых месторождениях им. И.М. Меньшикова [10] и им. И.Н. Кульбертинова (по данным ООО «Таас-Юрях Нефтегазодобыча»).

Наибольший интерес представляют северо-восточная часть Улугурского лицензионного участка и прилегающая северная часть Эргеджейского лицензионного участка. Москвитин И.Е. [11] на основании изучения материалов глубокого бурения на Верхневиллючанской, Виллойско-Джербинской, Буягинской и Шеинской площадях установил на склонах Сунтарского поднятия последовательное увеличение мощности терригенной части вендского разреза, сложенного в основном песчаниками. Здесь прогнозируются литологические ловушки, сложенные хорошо отсортированными гранулярными коллекторами венда (рис. 3).

В аллохтонной части разреза также определенный интерес представляют зоны развития надвигов. В этих зонах могут быть обнаружены структуры различного строения и разной степени деформированности (см. рис. 1). Здесь ожидается развитие трещиновато-кавернозных карбонатных коллекторов в успунской и кудулахской свитах венда, а также в телгеспитском (венд), юряхском (венд–кембрий) и осинском (кембрий) горизонтах. По имеющимся представлениям, в рассматриваемом регионе формирование значительных по размерам залежей углеводородов в карбонатных породах верхнего докембрия и кембрия возможно только в случае следующей последовательности

процессов: формирование зоны разлома с оперяющими трещинами → циркуляция по ним агрессивных растворов с формированием вторичных трещинно-кавернозных коллекторов → вертикальная миграция и накопление УВ в образованном вторичном коллекторе [12].

Наличие достаточно мощного рифейского осадочного чехла во внутренней части Предпатомского прогиба и крупный предвендский размыв верхов рифея [13] обуславливают преимущественно газовое насыщение разреза. Предполагается, что образованные до предвендского разрыва залежи жидких углеводородов были разрушены, а последующее накопление палеозойских отложений обусловило генерацию преимущественно газовых углеводородов.

Для локализации наиболее перспективных зон рассматриваемых участков были проведены прямые геохимические исследования вдоль проектируемых сейсмических профилей.

Основные результаты проведенных литогазо-геохимических опробований Улугурского и Эргеджейского лицензионных участков сводятся к следующему:

- установлены контрастные аномалии по сорбированным газам и битумам приповерхностных отложений (рис. 4, выделены красным);
- определены высокие содержания коэффициента эпигенетичности (отношение сумма предельных углеводородов/сумма нефтяных углеводородов – до 10 условных единиц), что свидетельствует о преимущественно «миграционном» составе углеводородных газов.

На рис. 4 представлена результирующая схема перспектив углеводородного насыщения изучаемого района по данным геохимических исследований.

По всей видимости, согласно простирающие отдельных выделенных узких вытянутых геохимических аномалий с генеральным простирающим Ньюско-Джербинской и Березовской впадин [6] может свидетельствовать о приуроченности их к аллохтонным структурам. Более крупные и изометричные аномалии, по всей вероятности, скорее обязаны своим происхождением структурам в автохтонной части разреза.

В плане нефтегазоносности весьма перспективной является Улугурская структура (см. рис. 1 и 4). С учетом фактических забоев в 2800 и 3106 м пробуренные в ее пределах скважины, по-видимому, не достигли автохтонных отложений.

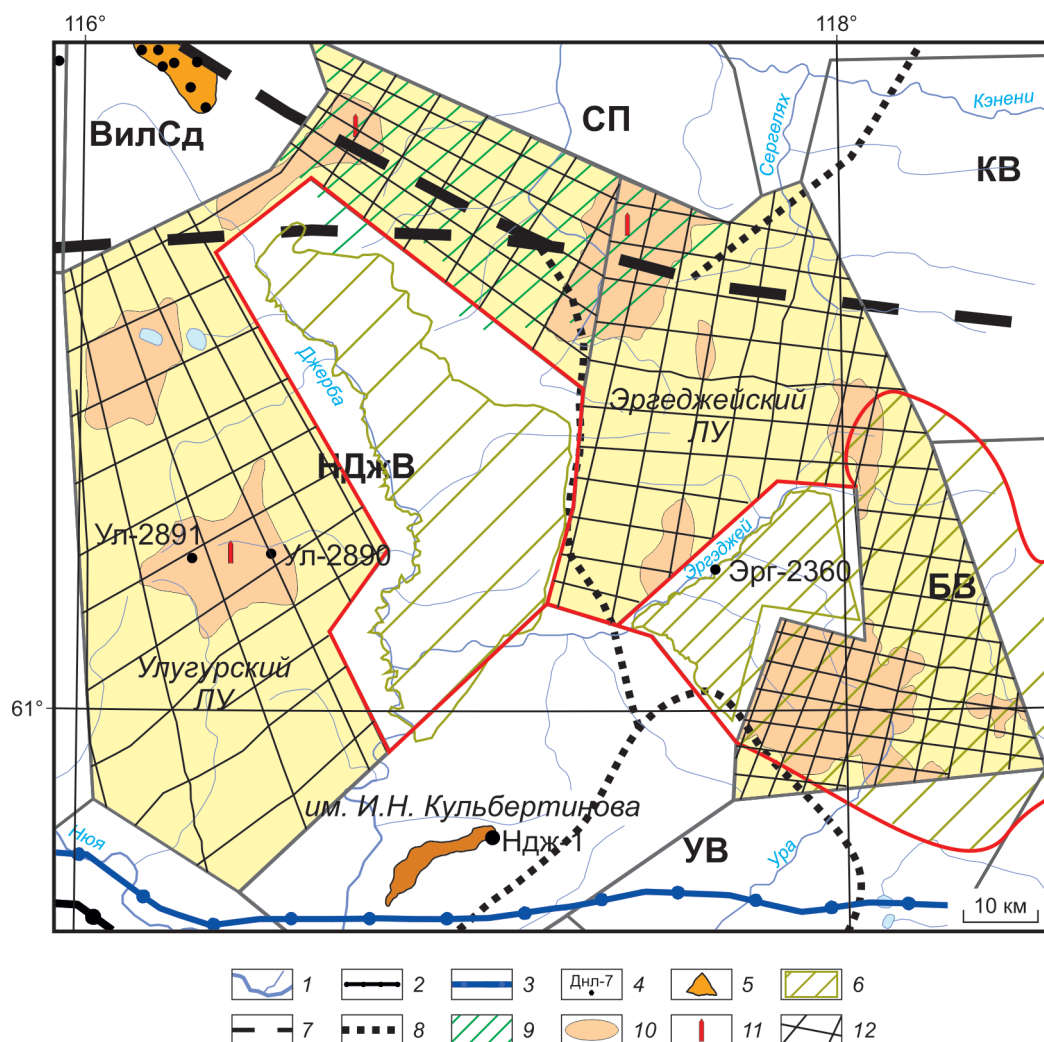


Рис. 4. Перспективные на обнаружение углеводородов зоны, установленные по результатам прямых геохимических опробований.

1 – гидросеть, 2 – нефтепровод ВС–ТО, 3 – газопровод «Сила Сибири», 4 – скважины и их номера, 5 – месторождения углеводородов, 6 – особо охраняемые природные территории, 7 – границы надпорядковых тектонических элементов, 8 – границы структур 1-го порядка, 9 – зоны выклинивания перспективных отложений на юго-западе Сунтарского поднятия, 10 – локализация аномалий по сорбированным газам и битумам приповерхностных отложений, 11 – рекомендуемые площади для подготовки и постановки глубокого бурения, 12 – линии геохимических опробований.

ВлСд – Вилочанская седловина, НДжВ – Ньюско-Джербинская впадина, СП – Сунтарское поднятие, КВ – Кемпендайская впадина, УВ – Уринский выступ, БВ – Березовская впадина

Fig. 4. Zones with high potential for finding hydrocarbons, identified through direct geochemical testing results.

Symbols: 1 – hydro grid, 2 – VS-TO oil pipeline, 3 – the Power of Siberia gas pipeline, 4 – wells and their numbers, 5 – hydrocarbon deposits, 6 – specially protected natural territories, 7 – boundaries of superorder tectonic elements, 8 – boundaries of structures of the 1st order, 9 – zones wedging of promising deposits in the south-west of the Suntar uplift, 10 – localization of anomalies in sorbed gases and bitumen of near-surface deposits, 11 – recommended areas for the preparation and staging of deep drilling, 12 – lines of geochemical testing.

Designations: ВлСд – Vilyuchan saddle, НДжВ – Nyuisko-Djerbin depression, СП – Suntar uplift, КВ – Kempendyai depression, УВ – Urinsky ledge, БВ – Berezovskaya depression

В пределах Улугурской площади забой скважины 289-0 находится в кудулахской свите, а скважины 289-1 – в верхнебюкской подсвите венда. В скважине 289-1 отмечается сдвоение разреза венд-кембрийских отложений (от верхов куду-

лахской свиты до верхнебилирской свиты включительно) [14], что может быть связано с надвиговыми деформациями.

Восточнее рассматриваемой площади пробурена Эргоджейская скважина 236-0. В ней раз-

**Продуктивные горизонты
открытых в 2021–2022 гг. месторождений Предпатомского прогиба**

Productive horizons of the deposits of the Predatomsky trough discovered in 2021–2022

Скважина	Свита	Интервал испытания, м	Дебит, тыс. м ³ /сут.
Среднебирукская 1-П	Юряхская	2662–2697	115,8
	Олекминская	1450–1466	218,3
	Ичерская		78,83.
Кэдэргинская 431	Ичерская	Аварийный	>2000
Кэдэргинская 432	Ичерская	757–807	37,75
Кэдэргинская 435	Ичерская	840–852	5,27
		862–865	
Кэдэргинская 438	Ичерская	892–908	203,17
Мухтинская 647-1ПМ	Толбачанская	1193,06–1206,56	16,52
	Чарская	883,0–887,0	43,64
		915,2–920,5	
		933,0–937,6	
Мухтинская 2210	Чарская	940,0–944,6	
		1092–1122	4,47
		1088–1107	28,63
		968–1022	3,07

рез верхнебюкской свиты представлен (сверху вниз): аянской ангидритовой (47 м), торсальской соляной (286 м) и телгеспитской доломитовой (130 м) пачками отложений общей мощностью 463 м.

В Улугурской скважине 289-1 разрез верхнебюкской свиты вскрыт на глубину 187 м. Если допустить, что разрез верхнебюкской свиты на Улугурской площади будет аналогичным разрезу, вскрытому на Эргеджейской площади, то до перспективного телгеспитского горизонта оставалось пробурить всего 146 м. С учетом незначительного варьирования толщин верхнебюкской свиты в регионе – максимум 300 м.

На Улугурской площади рекомендуется после проведения небольшого объема уточняющей сейсморазведки модификации МОГТ-3D заложить поисковую скважину с проектной глубиной 3600 м. При благоприятном расположении скважины 289-1 в уточненной структуре необходимо рассмотреть возможности ее углубления.

На выделяемой зоне выклинивания перспективных отложений на юго-западе Сунтарского поднятия попадают две геохимические аномалии (см. рис. 4). Здесь рекомендуется проведение сейсморазведочных работ модификации МОГТ-2D с целью оконтуривания потенциальных структур выклинивания литологических ловушек с элементами тектонического экранирования в терригенных отложениях венда для дальнейшей постанов-

ки глубокого бурения. Таким образом, проведение геолого-геофизических разведочных работ на юго-западном склоне Сунтарского поднятия имеет приоритетное значение для обоих лицензионных участков.

По остальным территориям Улугурского и Эргеджейского лицензионных участков определенные перспективы нефтегазоносности могут быть связаны с верхней частью разреза. На вновь открытых газоконденсатных месторождениях (Кэдэргинское, Мухтинское), расположенных восточнее рассматриваемой территории, промышленные залежи установлены в толбачанской, олекминской, чарской и ичерской свитах нижнего кембрия (см. таблицу).

По всей видимости, данные залежи образовались при переформировании крупных залежей из нижних этажей в верхние в ходе новейших тектонических процессов, происходивших в палеогеновое, неогеновое и неоплейстоценовое время [16]. Особенности нефтегазоносности верхней части разреза требуют дополнительных тематических исследований для более точного прогнозирования.

Заключение

В последние годы в пределах Предпатомского прогиба разворачиваются масштабные геологоразведочные работы по поиску и разведке месторождений нефти и газа. Возможности откры-

тия новых залежей, в том числе нефтяных, на новых стратиграфических уровнях расширяют круг поисковых задач и увеличивают перспективы нефтегазоносности региона.

Имеющаяся геолого-геофизическая и геохимическая информация позволяет говорить о наличии перспектив нефтегазоносности северо-восточной части Улугурского лицензионного участка и прилегающей северной части Эргеджейского лицензионного участка, в том числе в Улугурской структуре, расположенной в центральной части одноименного лицензионного участка.

Для успешного решения задач по прогнозированию зон нефтегазового насыщения недр необходима консолидация всей имеющейся обновленной геолого-геофизической информации в рамках тематических исследований.

Список литературы / References

1. Шемин Г.Г., Станевич А.М., Смирнов М.Ю. и др. *Перспективы нефтегазоносности региональных резервуаров Предпатомского регионального прогиба (Сибирская платформа)*. Новосибирск: Издательство СО РАН; 2018. 315 с. <https://doi.org/10.15372/PROSPECTS2018SGG>

Shemin G.G., Stanevich A.M., Smirnov M.Yu., et al. *Oil-and-gas prospects of regional reservoirs in Pre-Patom regional trough (Siberian Platform)*. Novosibirsk: SB RAS Publishing House; 2018. 315 p. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/PROSPECTS2018SGG>

2. Анциферов А.С., Бакин В.Е., Варламов И.П. *Геология нефти и газа Сибирской платформы*. М.: Недра; 1981. 552 с.

Anciferov A.S., Bakin V.E., Varlamov I.P. *Geology of oil and gas of the Siberian platform*. Moscow: Nedra; 1981. 552 p. (In Russ.)

3. Гайдук В.В. *Реконструкция структуры надвиговых поясов и локальная оценка их нефтегазоносности на примере Индигиро-Зырянского, Предверхоянского прогибов и Нюйско-Джербинской впадины*: Дис. ... докт. геол.-мин. наук. Новосибирск; 1995. 37 с.

Gaiduk V.V. *Reconstruction of thrust zones and local estimation of their petroleum potential on the example of Indigir-Zyryansky, PredVerkhoyansky flexures and Nyuisko-Jerbinsky valley*: Diss. ... Doct. Sci., Novosibirsk; 1995. 37 p. (In Russ.)

4. Сереженков В.Г., Ситников В.С., Аржаков Н.А. и др. *Надвиговая тектоника и нефтегазоносность Предпатомского прогиба. Геология нефти и газа*. 1996; (9):4–10.

Serezenkov V.G., Sitnikov V.S., Arzhakov N.A., et al. *Thrust tectonics and oil and gas potential of the Prepatom downwarp. Geologiya nefiti i gaza = geology of oil and gas*. 1996;(9):4–10. (In Russ.)

5. Шемин Г.Г., Мигурский А.В., Смирнов М.Ю. и др. *Комплексная характеристика и количественная*

оценка перспектив нефтегазоносности региональных резервуаров нефти и газа верхневендско-нижнекембрийского аллохтонного карбонатного макрокомплекса Предпатомского регионального прогиба (Сибирская платформа). *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*. 2018;33(1):32–55. <https://doi.org/10.20403/2078-0575-2018-1-32-55>

Shemin G.G., Migurskij A.V., Smirnov M.Yu., et al. *Comprehensive characteristics and quantitative assessment of prospects of petroleum content in the regional oil and gas reservoirs of the upper vendian – lower cambrian allochthonous carbon-bearing macrocomplex at the Predpatom regional trough (Siberian platform). Geology and mineral resources of Siberia*. 2018;33(1):32–55. (In Russ.). <https://doi.org/10.20403/2078-0575-2018-1-32-55>

6. Сивцев А.И., Ситников В.С. *О проявлениях горизонтальных тектонических движений в низах осадочного чехла Березовской впадины в связи с нефтегазоносностью. Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*. 2014;(3):24–31.

Sivtsev A.I., Sitnikov V.S. *Some aspects of manifestations of horizontal tectonic movements in the bottoms of the sedimentary cover of Berezovsky depression due to oil and gas occurrence. Geology, geophysics and development of oil and gas fields*. 2014;(3):24–31. (In Russ.)

7. Рыжов А.Е., Склярлова З.П., Крикунов А.И. и др. *Уточнение внутреннего строения терригенного комплекса нижнего венда Верхневилучанского нефтегазоконденсатного месторождения. Научно-технический сборник Вести газовой науки*. 2021;46(1):87–105.

Ryzhov A.Ye., Sklyarova Z.P., Krikunov A.I., et al. *Clarification of inner structure for Lower-Vendian terrigenous complex of Verkhnevilyuchanskoye oil-gas-condensate field. Vesti Gazovoy Nauki: collected scientific technical papers*. 2021;46(1):87–105. (In Russ.)

8. Бурова И.А. *Карбонатные коллекторы вендско-нижнекембрийского нефтегазоносного комплекса Восточной Сибири. Нефтегазовая геология. Теория и практика*. 2010;5(2):4.

Burova I.A. *Carbonate reservoirs of the Vendian-Lower Cambrian petroleum complex, Eastern Siberia. Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika = Petroleum Geology – Theoretical and Applied Studies*. 2010;5(2):4. (In Russ.)

9. Сафронов А.Ф., Бубнов А.В., Москвитин И.Е. *Нетрадиционный коллектор Быхтахского газоконденсатного месторождения. В кн.: Соколов Б.А. (ред.). Нефтегазоносные бассейны как саморазвивающиеся нелинейные системы: Труды третьей Международной конференции Новые идеи в геологии и геохимии нефти, г. Москва, 28–30 мая 1999 г. М.: МГУ; 1999. С. 225–226.*

Safronov A.F., Bubnov A.V., Moskvitin I.E. *Unconventional collector of the Bysakhtakh gas condensate field. In: Sokolov B.A. (ed.). Oil and gas basins as self-developing nonlinear systems: Proceedings of the 3rd International Conference New Ideas in Petroleum Geo-*

logy and Geochemistry, Moscow, May 28–30, 1999. Moscow: MSU; 1999, pp. 225–226. (In Russ.)

10. Карточка изученности месторождения им. И.М. Меньшикова. URL: <https://www.geol.irk.ru/izn/uk/AG-P50-53> (дата обращения: 22.08.2023)

Menshikov Field Study Card. URL: <https://www.geol.irk.ru/izn/uk/AG-P50-53> (accessed: 22.08.2023)

11. Москвитин И.Е., Ситников В.С., Михайлов В.А. и др. Строение, развитие и нефтегазоносность Сунтарского поднятия. В кн.: Микуленко К.И. (ред.). *Тектоника и нефтегазоносность Якутии: Сборник научных трудов*. Якутск: ЯНЦ СО АН СССР; 1989. С. 59–67.

Moskvitin I.E., Sitnikov V.S., Mikhailov V.A., et al. Structure, development and oil and gas potential of the Suntar uplift. In: Mikulenko K.I. (ed.). *Tectonics and oil and gas potential of Yakutia: Collection of scientific papers*. Yakutsk: YaSC SB of the USSR Academy of Sciences; 1989, pp. 59–67. (In Russ.)

12. Ivanova Z.E., Sivtsev A.I. Peculiarities in the distribution of hydrocarbons in carbonate sediments of Vendian and Cambrian. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 988 032042. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/988/3/032042>

13. 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.

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. *Neftega-*

zovaya Geologiya. Teoriya i Praktika = Petroleum Geology – Theoretical and Applied Studies. 2011;6(2):2. (In Russ.)

14. Ларионова Т.И. Палинспатические реконструкции складчато-надвиговых дислокаций Нюйско-Джербинской впадины – перспективных объектов нефтегазописковых работ (Сибирская платформа). *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*. 2011;(12):32–37.

Larionova T.I. Palispatic reconstructions of fold thrust dislocations in Nyuye-Dzherba depression – promising targets for petroleum exploration (Siberian platform). *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*. 2011;(12):32–37. (In Russ.)

15. Мельников П.Н., Погодаев А.В., Матвеев А.И. и др. Открытие нового нефтегазоносного района на северо-западном склоне Алданской антеклизы Сибирской платформы. *Геология нефти и газа*. 2023;(2):5–16. <https://doi.org/10.31087/0016-7894-2023-2-5-16>

Mel'nikov P.N., Pogodaev A.V., Matveev A.I., et al. Discovery of new Petroleum District on north-western slope of Aldansky Syncline (Siberian Platform). *Geologiya nefii i gaza = geology of oil and gas*. 2023;(2):5–16. (In Russ). <https://doi.org/10.31087/0016-7894-2023-2-5-16>.

16. Ситников В.С., Спектор В.Б. Новейшая тектоника нефтегазоносных территорий на юго-западе Якутии. *Тихоокеанская геология*. 2004;23(6):45–54.

Sitnikov V.S., Spektor V.B. Neotectonics of oil and gas territories in South-Western Yakutia. *Tikhookeanskaya geologiya = Russian Journal of Pacific Geology*. 2004;23(6):45–54 (In Russ.)

Об авторах

СИВЦЕВ Алексей Иванович, кандидат геолого-минералогических наук, главный специалист сектора ресурсной базы, аудита запасов; доцент кафедры «Недропользование» Геологоразведочного факультета, <https://orcid.org/0000-0001-8386-2383>, ResearcherID: F-1077-2014, Scopus Author ID: 56287496100, SPIN: 8676-4888, e-mail: maraday@yandex.ru

ТИМОФЕЕВ Николай Гаврильевич, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Недропользование» Геологоразведочного факультета, <https://orcid.org/0000-0002-1422-2304>, ResearcherID: E-1025-2017, Scopus Author ID: 56670953800, SPIN: 7505-7570, e-mail: yakutsk_09@mail.ru

МЕЩЕРЯКОВ Виталий Алексеевич, начальник Управления геологии и недропользования, <https://orcid.org/0009-0001-1180-8924>, e-mail: ugn07@mail.ru

Вклад авторов

Сивцев А.И. – разработка концепции, проведение исследования, создание и редактирование рукописи, получение финансирования

Тимофеев Н. Г. – визуализация, администрирование проекта

Мещеряков В.А. – ресурсное обеспечение исследования

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

SIVTSEV, Alexey Ivanovich, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Chief Specialist, Resources Sector and Reserves Audit; Associate Professor, Subsoil Use Department, Faculty of Geology and Survey, [202](https://orcid.org/0000-</p></div><div data-bbox=)

0001-8386-2383, ResearcherID: F-1077-2014, Scopus Author ID: 56287496100, SPIN: 8676-4888, e-mail: maraday@yandex.ru

TIMOFEEV, Nikolay Gavrilovich, Cand. Sci. (Eng.), Head, Subsoil Use Department, Faculty of Geology and Survey, <https://orcid.org/0000-0002-1422-2304>, ResearcherID: E-1025-2017, Scopus Author ID: 56670953800, SPIN: 7505-7570, e-mail: yakutsk_09@mail.ru

MESHCHERYAKOV, Vitaly Alekseevich, Head, Geology and Subsoil Use Department, <https://orcid.org/0009-0001-1180-8924>, e-mail: ugn07@mail.ru

Authors' contribution

Sivtsev A.I. – conceptualisation, investigation, original draft, review & editing, funding acquisition

Timofeev N.G. – visualization, project administration

Meshcheryakov V.A. – resources

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 29.08.2023

Поступила после рецензирования / Revised 12.03.2024

Принята к публикации / Accepted 22.04.2024

Петролого-геохимические особенности среднепалеозойских базитов Муно-Тюнгского междуречья

А. Г. Копылова, С. С. Гоголева✉

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

Аннотация

В связи с открытием в пределах Вилюйско-Мархинского дайкового пояса (ВМДП) алмазоносных кимберлитовых трубок резко увеличился интерес к исследованию сопряженных с ними в пространстве и времени продуктов среднепалеозойского базитового магматизма. В результате установлено, что долериты даек, располагающиеся вблизи кимберлитовых трубок, отличаются от основной массы базитов дайкового пояса высоким содержанием титана, и данный признак предложен в качестве критерия поисков кимберлитовых трубок. Это явилось основанием для постановки работ по изучению базитов на северо-восточном окончании ВМДП в районе Муно-Тюнгского междуречья, где отмечены поля россыпных алмазов, характерных для кимберлитовых тел с продуктивной алмазоносностью. При исследовании интрузивов среднепалеозойских базитов Муно-Тюнгского междуречья дайкового пояса были установлены тела высокотитанистых базитов, по своим петрохимическим характеристикам близкие базитам, ассоциирующим с кимберлитами в алмазоносных районах. Они локализируются на флангах дайкового пояса, где действует режим компенсационного сжатия. Это дает основание использовать их в качестве одного из поисковых признаков на кимберлиты и обоснованно считать зоны преимущественного сжатия наиболее перспективными участками для выявления локализации коренных месторождений алмазов.

Ключевые слова: дайковый пояс, высокотитанистые базиты, кимберлиты, россыпные алмазы

Финансирование. Работа выполнена в рамках плана НИР ИГАБМ СО РАН «Мантийный магматизм, эволюция литосферы и рудоносность восточной части Сибирской платформы, геоэкология недропользования (№ FUGG-2024-0007)».

Для цитирования: Копылова А.Г., Гоголева С.С. Петролого-геохимические особенности среднепалеозойских базитов Муно-Тюнгского междуречья. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(2):204–215. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-204-215>

Original article

Petrological and geochemical features of Middle Paleozoic basites in the Muna-Tyung interfluvial region

Albina G. Kopylova, Sargylana S. Gogoleva✉

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

Abstract

The discovery of kimberlite pipes containing diamonds in the Viluy-Markha dyke belt led to a surge in interest in studying the products of Middle Paleozoic basic magmatism associated with these pipes in terms of their spatial and temporal characteristics. A distinct group of high-titanium rocks linked to diamond-bearing kimberlites was identified among the basic intrusions, serving as a key indicator for locating kimberlite pipes. This discovery prompted further research on basites and potential areas, such as the northeastern region of the dyke belt within the Muna-Tunga interfluvial region, where alluvial diamonds have been found but their original sources remain unidentified. The presence of

diamond varieties typical of kimberlites with high diamond concentrations in the placer diamonds of this area suggests the possibility of a new kimberlite field. The study of Middle Paleozoic basites in the Muna-Tunga interfluvial region revealed high-titanium basites with similar petrochemical characteristics to those associated with diamond-bearing kimberlites. These basites are situated on the flanks of the dyke belt marked by compensating compression, making them a promising indicator for kimberlite prospecting. This study has demonstrated that areas with preferential compression are highly prospective for identifying primary diamond deposits.

Keywords: dike swarm, high-Ti basites, kimberlites, alluvial diamonds

Funding. This study was conducted as part of the research plan for the DPMGI SB RAS “Mantle magmatism, lithosphere evolution and ore content of the eastern part of the Siberian platform, geocology of subsurface use” (No. FUG-2024-0007).

For citation: Kopylova A.G., Gogoleva S.S. Petrological and geochemical features of Middle Paleozoic basites in the Muna-Tyung interfluvial region. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(2):204–215. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-204-215>

Введение

Вилуйско-Мархинский дайковый пояс (ВМДП) расположен на северо-западном борту Вилуйского палеорифта [1–3]. В его пределах расположены поля кимберлитовых алмазоносных трубок и многочисленные тела среднепалеозойских базитов [4–6]. При исследовании пород, непосредственно ассоциирующих с кимберлитами, выделена отдельная группа щелочных высокотитанистых базитов [7–9]. Она была предложена в качестве поискового критерия кимберлитовых трубок [9, 10]. Это явилось основанием для постановки работ по изучению базитов в районе Муно-Тюнгского междуречья [11]. На данной территории находится Верхне-Мунское кимберлитовое поле, выделены поля россыпных алмазов и встречается широкий спектр базитов среднепалеозойского возраста [12–14]. Среди россыпных алмазов отмечено повышенное содержание разновидностей, характерных для кимберлитовых тел с продуктивной алмазоносностью, что может свидетельствовать о присутствии в данном регионе нового кимберлитового поля [13, 14]. Вселяет надежду открытие Сюльдюкарского кимберлитового поля на западной периферии ВМДП, которое показало, что перспективными на локализацию продуктивных кимберлитов могут быть территории на его флангах [15].

Петрогеохимические характеристики базитов

Территория Муно-Тюнгского междуречья приурочена к северо-восточному окончанию Вилуйско-Мархинского дайкового пояса (рис. 1). В районе, включающем бассейны рек Тюнг, Муна, Линда и их притоков, ширина дайкового пояса достигает 150 км. На этом фланге пояс базитов, постепенно закругляясь, меняет свое доминирующее направление. В условиях «подвора-

чивающего клина» северного фланга дайкового пояса меняется динамика развития рифтовой структуры, в его периферийных и центральных частях существует разная динамическая обстановка. В разных частях района были проведены замеры трещиноватости пород, которые показали, что режим растяжения в осевых частях рифтовой долины меняется на режим сжатия на фронтальных участках [16]. По структурным особенностям, химическому и геохимическому составу можно выделить центральную и периферийные зоны дайкового пояса. В центральных частях наиболее распространены призматически-офитовые и гломеропорфировые габбро-долериты, выполняющие в основном разломы северо-восточного направления. В зоне максимального растяжения и утонения литосферы располагаются наиболее мощные (до 100 м) тела базитов протяженностью десятки километров, сложенные офитовыми и призматически-офитовыми долеритами. Минеральный состав представлен лабрадором An_{63-57} , умеренно железистым авгитом Fs_{15-18} , оливином, по составу отвечающим гортонолиту Ga_{50-62} , часто замещенному идингсит-боулинговитом или тальк-магнетитовым агрегатом (рис. 2, а, б). Дополняют минеральный состав рудные минералы (до 6 %) – ильменит, титаномагнетит. Химический и микроэлементный составы пород даек призматически-офитовых габбро-долеритов на исследуемой территории соответствуют среднему составу доминирующей группы пород ВМДП (см. таблицу). Распределение редких элементов, нормированных к составу примитивной мантии [17], пологое, а отсутствие минимума Ta-Nb исключает влияние контаминации материала коры на состав исходных расплавов (рис. 3).

Дайки гломеропорфировых габбро-долеритов располагаются в зоне относительного сжатия в краевых частях рифтовой долины. Мощность даек

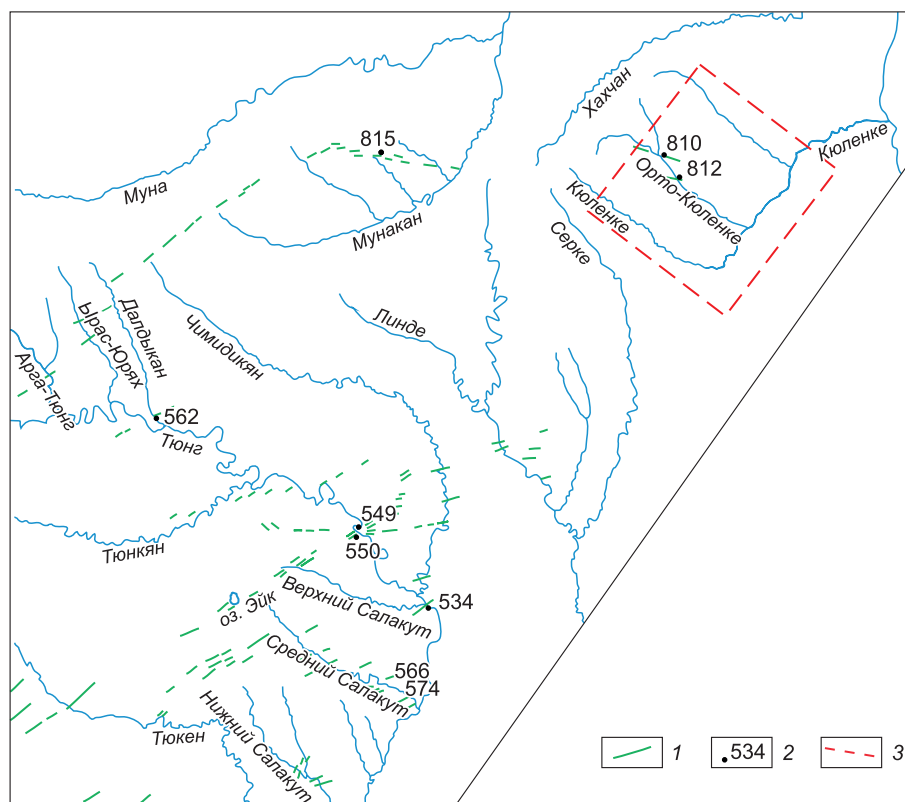


Рис. 1. Схема расположения даек базитов в пределах Муно-Тюнгского междуречья.

1 – дайки среднепалеозойских базитов, 2 – выходы даек долеритов, составы которых приведены в таблице, 3 – контур перспективного участка на открытие кимберлитов

Fig. 1. Scheme of location of basites dikes in the Muno-Tung interfluvial region.

1 – dikes of Middle Paleozoic basites, 2 – outcrops of dolerite dikes, the compositions of which are given in Table, 3 – outline of a promising area for the discovery of kimberlites

уменьшается до 17–20 м, протяженность до первых километров. Прямым петрологическим свидетельством начала кристаллизации магмы в магмовыводящих каналах служит увеличение протофаз (до 10 %) оливина и плагиоклаза (рис. 2, в–е). Наиболее ранние из них представлены битовнитом An_{83-72} , гиалосидеритом Fa_{34} и иногда магнезиальным авгитом $En_{49}Wo_{34}Fs_{17}$. Плагиоклаз ранней генерации обрастает плагиоклазом внутрикамерного этапа кристаллизации. Зональность подобных таблиц охватывает значительный интервал An_{83-60} . Характерной особенностью гломеропорфировых габбро-долеритов является существенная доля (до 6 %) оливина в сложении пород. В основной массе он представлен гортонолитом Fa_{52-59} . Следующая особенность данных пород наличие двух пироксенов – авгита и пижонита. Специфика химического состава гломеропорфировых габбро-долеритов ($Mg\# = 36$) также указывает на то, что их расплав подвергался интенсивной

протокристаллизации до прихода его в гипабиссальную камеру. Следует отметить повышенное содержание Al_2O_3 , обусловленное достаточно высоким значением анортитового компонента в плагиоклазе. По содержанию титана и остальных породообразующих элементов гломеропорфировые габбро-долериты близки призматическо-офитовым долеритам района и вообще рядовым значениям для доминирующих групп среднепалеозойских базитов ВМДП [18]. На классификационной диаграмме $SiO_2-(Na_2O+K_2O)$ (по [19]) составы пород центральных частей Муно-Тюнгского междуречья располагаются в основном в полях нормативно-кварцсодержащих толеитов и только частично в полях субщелочного состава (рис. 4). Наличие этапа докамерной кристаллизации расплава отразилось на закономерном уменьшении содержаний сидерофильных элементов – Ni и Cr, часть которых была удалена из расплава при потере оливина и магнезиального

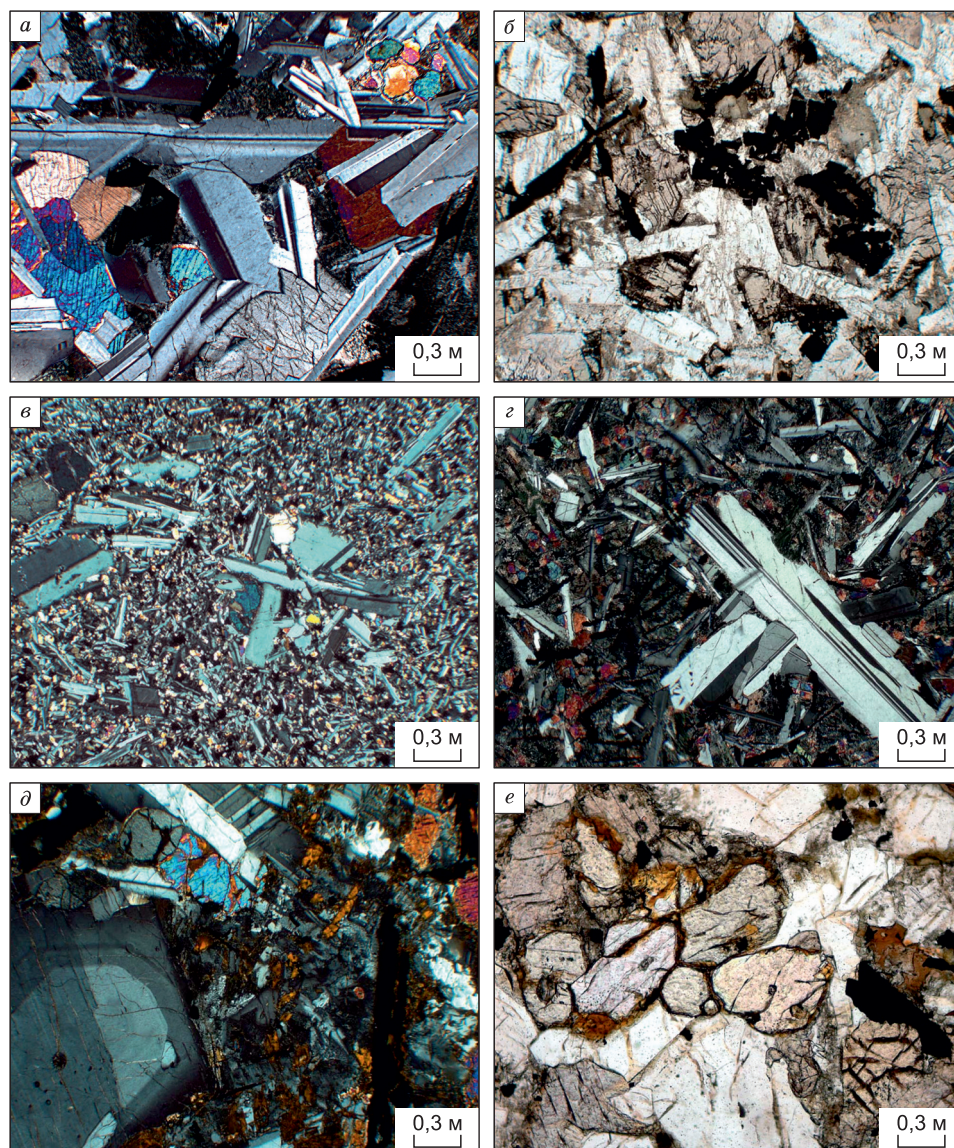


Рис. 2. Габбро-долериты центральных частей Муно-Тюнгского междуречья: *a* – плагиоклаз, клинопироксен, титаномагнетит в призматическо-офитовом габбро-долерите даек (550-8); *б* – кристаллы ильменита в мелкозернистом офитовом долерите, оливин замещен тальк-магнетитовым агрегатом (566-1); *в* – «звездчатое» скопление лейст битовнита в гломеропорфировом габбро-долерите, основная масса – лабрадор, авгит, оливин, ильменит (571-1); *г* – порфировый кристалл плагиоклаза An_{79} и игольчатые выделения ильменита (534-4б); *д* – зональная порфировая таблица плагиоклаза: в центре An_{80-78} , в краевых частях An_{51-48} (534-4л); *е* – агрегат оливина (Fa_{50}), частично замещенного по периферии идингситом (534-4л)

Fig. 2. Gabbro-dolerites of the central parts in the Muno-Tung interfluvial region: *a* – plagioclase, clinopyroxene, titanomagnetite in prismatic-ophite gabbro-dolerite dyke (550-8), *б* – ilmenite crystals (Ilm) in fine-grained ophite dolerite, olivine is replaced by talc-magnetite aggregate (566-1), *в* – “stellate” accumulation of leucite bitovnite in glomeroporphyritic gabbro-dolerite, the bulk is labrador, augite, olivine, ilmenite (571-1), *г* – porphyry crystal of plagioclase An_{79} and needle-like ilmenite secretions (534-4л), *д* – zonal porphyry table of plagioclase: in the center An_{80-78} , in the marginal parts An_{51-48} (534-4л), *е* – is an aggregate of olivine grains (Fa_{50}) partially replaced at the periphery by iddingsite (534-4л)

пироксена. На спайдер-диаграммах концентраций несовместимых элементов отражена положительная аномалия Sr – признак интрузивов, сформированных расплавом, с фракционирова-

нием раннемагматического высококальциевого плагиоклаза [20].

На северном фланге Муно-Тюнгского междуречья дайковый пояс в виде полукруга меняет

Состав базитов Муно-Тюнгского междуречья, мас.%, г/т

Basite content found in the Muna-Tyug interfluve, wt, %, ppm

Компонент	Базиты центральной части дайкового пояса				Базиты периферийных частей дайкового пояса				Среднее	
	549-5	550-5	27/34	534/46	562-4	815-1	812-2	574-1		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	48,40	48,06	48,37	48,84	48,64	49,20	48,37	46,63	48,32	46,47
TiO ₂	2,56	2,75	3,14	3,11	4,5	4,36	5,02	3,89	2,27	4,88
Al ₂ O ₃	13,96	13,84	14,25	15,05	13,32	14,18	15,01	13,73	14,76	14,25
Fe ₂ O ₃	2,86	3,12	6,72	3,38	5,41	4,76	3,52	6,71	3,33	4,84
FeO	11,84	11,83	9,03	12,44	7,49	8,4	9,40	8,46	9,89	8,02
MnO	0,23	0,21	0,24	0,25	0,10	0,15	0,15	0,18	0,17	0,12
MgO	6,48	5,75	4,59	4,97	4,88	5,05	5,16	5,09	5,42	6,31
CaO	9,81	10,8	9,34	9,05	7,41	6,94	6,67	7,4	9,49	7,59
Na ₂ O	2,08	2,11	2,23	2,13	2,85	2,21	2,49	2,49	2,51	2,68
K ₂ O	0,67	0,56	0,82	1,15	2,39	1,91	1,56	2,01	1,40	1,94
P ₂ O ₅	0,29	0,26	0,33	0,32	0,59	0,56	0,55	0,42	0,27	0,53
H ₂ O+	1,31	1,31	1,96	1,66	1,37	1,4	1,66	1,78	1,36	1,83
Сумма	100,4	100,6	100,5	100,3	98,95	99,59	99,6	98,79	99,32	100,41
Mg#	44	41	35	36	41	42	45	38	43	48
Ni	103	88	57	69	38	37	42	51	93	88
Co	57	53	51	48	47	49	44	53	45	46
Cr	149	130	55	54	36	53	71	54	112	152
V	286	352	370	346	326	310	305	442	322	367
Rb	13,4	12,6	20,9	28,8	45,4	46,3	39,1	34,4	21	37
Ba	173,	171	232	304	460	471	445	254	235	359
Th	2,03	2,02	3,21	3,13	5,95	6,10	6,01	3,94	2,02	4,46
U	0,54	0,51	0,80	0,75	1,20	1,25	1,27	0,91	0,60	1,18
Nb	18,2	17,5	28,7	19,6	50,0	34,91	35,0	40,2	22,0	43,5
Ta	1,04	1,09	2,36	1,65	3,92	2,91	3,06	3,14	1,47	2,99
Sr	275	308	360	394	561	497	574	510	562	696
Zr	183	159	264	542	395	380	360	310	185	322
Hf	4,24	3,65	6,31	5,44	7,73	8,65	8,74	7,14	4,52	7,75
Y	32,0	33,3	41,6	40,7	39,4	38,7	34,51	43,2	29,0	27,7
Pb	2,01	1,81	3,21	3,00	6,43	5,73	4,83	2,41	2,33	4,43
La	18,5	18,7	25,5	25,4	46,5	44,6	38,5	34,9	19,69	37,09
Ce	43,3	43,8	57,5	56,4	103	107	95	76,3	45,35	86,48
Pr	5,44	5,43	7,27	7,09	12,86	12,87	12,23	9,56	6,05	11,54
Nd	26,3	26,1	34,8	34,5	60,5	58,8	56,5	44,1	26,21	49,77
Sm	6,21	6,37	8,49	8,11	12,69	13,0	11,8	10,2	6,12	10,54
Eu	2,06	2,20	2,44	2,63	4,02	3,93	3,69	3,02	1,87	3,06
Gd	6,24	6,56	7,91	7,51	10,29	10,07	9,71	8,88	6,12	8,77
Tb	0,88	0,98	1,22	1,12	1,35	1,38	1,31	1,34	0,96	1,21
Dy	5,70	5,49	6,55	6,50	6,86	6,84	6,52	7,61	5,68	6,28
Ho	1,10	1,10	1,39	1,34	1,35	1,31	1,22	1,50	1,17	1,16
Er	2,95	3,05	3,71	3,72	3,41	3,42	3,16	4,09	3,05	2,78
Tm	0,48	0,46	0,62	0,57	0,50	0,52	0,47	0,65	0,45	0,37
Yb	2,77	2,99	3,34	3,59	2,86	2,75	2,58	3,44	2,79	2,20
Lu	0,39	0,43	0,47	0,49	0,36	0,41	0,30	0,49	0,41	0,30

Компонент	Базиты центральной части дайкового пояса				Базиты периферийных частей дайкового пояса				Среднее	
	549-5	550-5	27/34	534/46	562-4	815-1	812-2	574-1		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ΣREE	122	124	161	161	240	267	243	206	125,9	221,56
$(\text{La}/\text{Yb})_n$	4,79	4,5	5,15	5,08	13,6	10,7	10,1	6,86	5,07	12,12
Eu/Eu^*	1,01	1,04	0,90	1,03	0,92	1,05	1,02	0,95	0,92	0,95
Nb/Nb^*	1,4	0,76	1,15	0,8	1,1	0,77	0,83	1,24	1,29	1,22
$(\text{Tb}/\text{Yb})_n$	1,44	1,49	1,66	1,42	2,41	2,31	2,15	1,77	1,56	2,42

Примечание. Редкие элементы анализировались методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на приборе Elan 6100 DRC в стандартном режиме (ICP-MS) (ИМГРЭ РАН, Д.З. Журавлев). Анализы: 1, 2 – призматически-офитовые долериты, 3, 4 – гломеропорфировые габбро-долериты, 5–7 – плагиодолериты, 8 – долериты низовьев р. Ср. Салакут, средние данные: 9 – типичные базиты ВМДП (из 8 анализов), 10 – высокотитанистые базиты, ассоциирующие с кимберлитовыми трубками (из 6 анализов). $\text{Eu}/\text{Eu}^* = \text{Eu}_n/(\text{Sm}_n \times \text{Gd}_n)^{1/2}$, $\text{Nb}/\text{Nb}^* = 0,3618 \times \text{Nb}/\sqrt{(\text{La} \cdot \text{Th})}$, n – нормализовано по хондриту [17].

Note. Trace elements were analyzed by (ICP-MS) with an Elan 6100 DRC (Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystal Chemistry of Rare Element, D.Z. Zhuravlev), analyses: 1, 2 – prismatic-ophitic dolerites, 3, 4 – glomeroporphyritic gabbro-dolerites, 5–7 – plagiodolerites, 8 – dolerites of the lower reaches of the Wed Salakut River, 9 – typical basites of the VMDS (from 8 analyses), 10 – high-titanium basites associated with kimberlite pipes (from 6 analyses). $\text{Eu}/\text{Eu}^* = \text{Eu}_n/(\text{Sm}_n \times \text{Gd}_n)^{1/2}$, $\text{Nb}/\text{Nb}^* = 0.3618 \times \text{Nb}/\sqrt{(\text{La} \cdot \text{Th})}$, n – normalized by chondrite [17].

свое преобладающее северо-восточное направление на субширотное восточное и, далее, на юго-восточное. Здесь происходит смена условий доминирующего растяжения на режим устойчивого компенсационного сжатия [21]. Следствием этого процесса является задержка расплава и начало кристаллизации его в магмопроводнике. Пе-

трологическим доказательством служит образование специфического роя маломощных даек щелочных плагиодолеритов. Мощность даек изменяется от 1–2 до 25–30 м, протяженность тел первые километры. Эта цепь тел, протянувшаяся на 230 км от р. Арга-Тюнг по водоразделу р. Чимидикян с р. Муна до р. Кюленке, получила на-

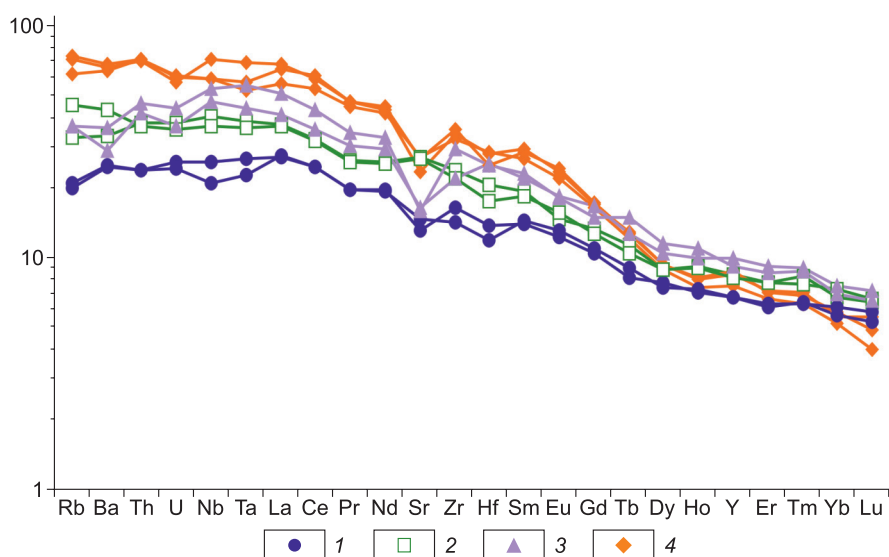


Рис. 3. Распределение редких элементов в базитах Муно-Тюнгского междуречья. Нормировано по примитивной мантии [17].

1 – призматически-офитовые габбро-долериты, 2 – гломеропорфировые габбро-долериты, 3 – долериты даек низовьев р. Ср. Салакут, 4 – плагиодолериты северной части Муно-Тюнгского междуречья

Fig. 3. Distribution of rare elements in the basites in the Muno-Tung interfluvium. Normalized by primitive mantle [17].

1 – prismatic-ophite gabbro-dolerites, 2 – glomeroporphyritic gabbro-dolerites, 3 – dolerites of dikes of the lower reaches of the Salakut River, 4 – plagiodolerites of the northern part of the Muno-Tung interfluvium

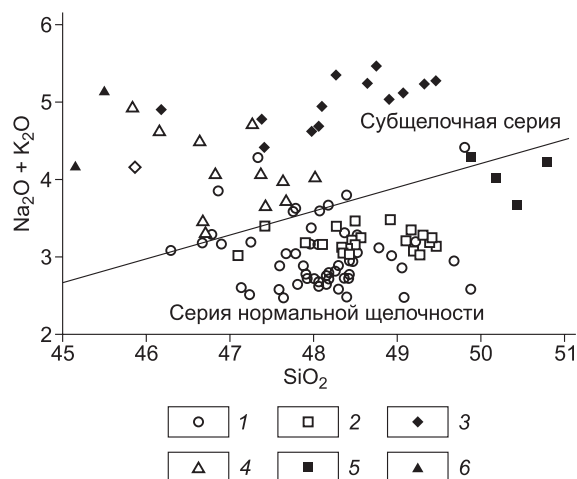


Рис. 4. Диаграмма SiO_2 –($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) для базитов Муно-Тюнгского междуречья (по [19]).

1 – призматически-офитовые габбро-долериты; 2 – гломеропорфировые габбро-долериты; 3 – плагиодолериты северной части Муно-Тюнгского междуречья; 4 – долериты даек низовьев р. Ср. Салакут; 5 – лейкократовые долериты; 6 – щелочные долериты береговых обнажений юго-восточной части Муно-Тюнгского междуречья

Fig. 4. SiO_2 – ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) diagram for the basites in the Muno-Tung interfluvial region [by 19].

1 – prismatic-ophite gabbro-dolerites, 2 – glomeroporphyric gabbro-dolerite, 3 – plagiodolerites of the northern part of the Muno-Tung interfluvial, 4 – dolerites of dikes of the lower reaches of the Salakut River, 5 – leucocratic dolerites and 6 – alkaline dolerites of coastal outcrops of the southeastern part of the Muno-Tung interfluvial

звание Чимидикянского роя даек. Признаки интенсивного фракционирования расплава в докамерной близповерхностной обстановке проявились появлением в долеритах значительных количеств (до 30 %) протофаз плагиоклаза, а привнос калия в эволюционирующую систему является причиной активной его калишпатизации (рис. 5, а–г). Плагиоклаз представлен лабрадором (An_{62-51}), состав клинопироксена отвечает авгиту ($\text{Wo}_{42-37}\text{En}_{42-40}\text{Fs}_{22-17}$) и практически нет оливина. Химический состав пород Чимидикянского роя характеризует высокое содержание щелочей ($\geq 4\%$). На диаграмме кремнезем–сумма щелочей все точки составов плагиодолеритов полностью располагаются в поле субщелочных базитов (см. рис. 4). Гравитационное осаждение ранних темноцветных минералов обусловило пониженное содержание в плагиодолеритах Mg, Fe, Ni, Co, Cr (см. таблицу). В то же время они обогащены титаном, фосфором, а также Zr, Hf, Ta, Nb, Th, U, охотно входящими в состав ильме-

нита, сфена и апатита (см. таблицу). Сумма REE возрастает (до 267) в основном за счет легких редкоземельных элементов, накапливающихся в объеме плагиоклаза, необычно большом для базитов. Об активном влиянии флюидной фазы свидетельствует повышенное содержание легкоподвижных крупноионных литофилов – K, Rb, Ba, Pb. В качестве индикатора глубины плавления используется отношение $(\text{Tb}/\text{Yb})_n$, которое превышает значение 1,8 в магмах, формирующихся в глубинных условиях в присутствии граната. Более низкие значения этой величины характерны для расплавов, равновесных со шпинелью [22]. Величина отношения $(\text{Tb}/\text{Yb})_n = 2,15\text{--}2,41$ для плагиодолеритов существенно выше, чем для других пород района, что свидетельствует о формировании расплава плагиодолеритов в наиболее глубинных условиях.

Юго-восточная периферийная часть дайкового пояса, примыкающая к рифтовой долине, включает территорию низовьев рек Верхний, Средний и Нижний Салакуты – правых притоков р. Тюнг. Среди расположенных здесь даек также встречаются интрузивы с повышенным содержанием титана. В приустьевой части р. Средний Салакут отмечены дайки призматически-офитовых долеритов с содержанием в среднем около 4 % TiO_2 . Основная часть даек сложена лабрадором, титансодержащим авгитом и оливином, часто замещенным тальк-магнетитовым агрегатом. Рудные минералы (~6 %) представлены титаномagnetитом и ильменитом. Химический состав отличается низкой кремнекислотностью, магнизиальностью, пониженной кальциевостью, при довольно высоком содержании TiO_2 , $\text{FeO}_{\text{общ}}$, повышенном K_2O и P_2O_5 . Для долеритов даек характерно низкое содержание сидерофильных элементов и относительно повышенные доли крупноионных литофильных элементов – Ba, Sr, Zr, Nb.

Дайки лейкократовых щелочных долеритов с содержанием титана $> 4\%$ установлены в береговых обнажениях правых притоков р. Тюнг – рек Нижний Салакут и Тас-Юрх [23, 24]. В этом же районе при бурении вскрыта дайка лейкократовых долеритов, на 65 % сложенная преимущественно андезиновым (An_{54-37}) плагиоклазом. Клинопироксен полностью замещен хлоритом и роговой обманкой, оливин отсутствует. Значительная часть объема породы выполнена кварцем, калиевым полевым шпатом и микропегматоидным агрегатом (см. рис. 3, д, е). В межзерновом

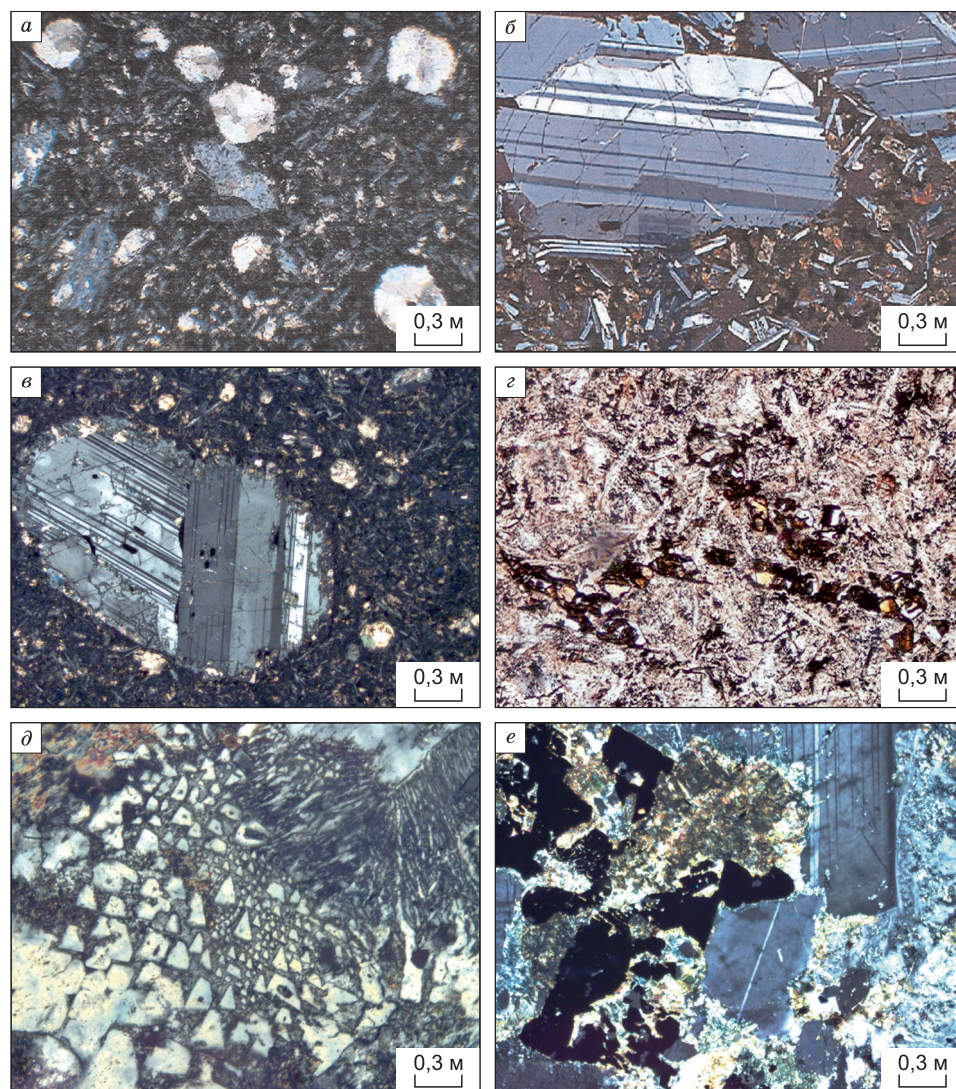


Рис. 5. Плагидолериты (а-г) и щелочные долериты (д, е) краевых частей Муно-Тюнгского междуречья: а – краевой миндалекаменный плагидолерит, миндалины выполнены карбонатом (561-6); б – скопление оплавленных порфировых таблиц плагиоклаза (An_{60-51}) (561-5); в – таблица плагиоклаза, замещенная по периферии калишпатом (561-2); г – кристаллы сфена различной морфологии в плагидолерите (561-2); д – микрографическое срастание кварца с полевым шпатом, псевдоморфозы хлорита и роговой обманки по пироксену в лейкократовом долерите (187/88); е – призмы плагиоклаза (An_{54-37}), кристаллы титаномagnetита в кварц-полевошпатовом и хлорит-амфиболовом метастазисе (187/88)

Fig. 5. Plagioclase dolerites (a–g) and alkaline dolerites (d, e) of the marginal parts in the Muno-Tung interfluvial region: a – marginal amygdala–stone plagioclase dolerite, tonsils are made of carbonate (561-6), b – accumulation of fused porphyry plagioclase tables (An_{60-51}) (561-5), v – plagioclase table replaced on the periphery by kalishpate (561-2), g – sphenes crystals of various morphologies in plagioclase dolerite (561-2), d – micrographic coalescence of quartz with feldspar, pseudomorphoses of chlorite and hornblende by pyroxene in leucocratic dolerite (187/88), e – prisms plagioclase (An_{54-37}), titanomagnetite crystals in quartz-feldspar and chlorite-amphibole metastasis (187/88)

пространстве располагаются крупные кристаллы апатита (до 1,2 %) и титаномagnetит. В отличие от щелочных долеритов береговых обнажений, долериты скважины относятся к насыщенным кремнекислотой породам с повышенным содержанием железа, калия, фосфора и низкой магнетизмностью.

Результаты и обсуждение

При исследовании базитов ВМДП в районе Муно-Тюнгского междуречья были установлены группы тел, объединенные одинаковыми геодинамическими условиями формирования и вещественными характеристиками. Они наглядно иллюстрируют наличие латеральной зонально-

сти, проявленной вкрест простирания дайковых поясов. На периферийных участках дайкового пояса в зонах преобладающего режима сжатия локализованы дайки высокотитанистых базитов. По своим петрохимическим характеристикам они близки базитам, ассоциирующим с кимберлитами в алмазоносных районах, что дает основание использовать их в качестве одного из поисковых признаков на кимберлиты и обоснованно считать зоны преимущественного сжатия наиболее перспективными участками для выявления локализации коренных месторождений алмазов. Геохимические характеристики пород указывают на то, что они являются производными глубинного гранатосодержащего мантийного источника.

Исследуемые базиты располагаются в пределах Верхне-Тюнгского россыпного поля алмазов [14]. Наиболее значительные россыпи алмазов в Муно-Тюнгском районе установлены в пределах распространения Чимидикянского роя даек плагиодолеритов, охватывая район от р. Арга-Тюнг, захватывая верховья рек Чимидикян и Мунакан и протягиваясь до р. Орто-Кюленке. При этом в россыпном поле отмечено повышенное содержание разновидностей алмазов, обычно характерных для алмазоносных трубок [15]. На основании изучения структурных дефектов алмазов предполагается, что россыпи района сформированы за счет локальных коренных источников кимберлитового типа, но при этом они отличаются от алмазов кимберлитовых тел Верхнемунского поля [25, 26].

Такие данные могут свидетельствовать о перспективах района локализации плагиодолеритов северной части Муна-Тюнгского района на открытие нового продуктивного кимберлитового поля. К этому стоит добавить то обстоятельство, что и в алмазоносном Среднемархинском, и в исследуемом Муно-Тюнгском районе большинство тел базитов формировалось в пределах 368–376 млн лет до внедрения кимберлитов. Посткимберлитовое время характеризуется образованием на алмазоносной территории тел высокотитанистых околокимберлитовых долеритов более молодого возраста (341–352 млн лет) [3]. И для плагиодолеритов северной части района установлены близкие к ним возрасты (329, 339 млн лет). Кроме того, в центральных частях района встречены двухфазные дайки. По одному из таких двухфазных тел выполнено изотопное датирование. Возраст первой фазы – 367, второй – 346 млн лет. Это слу-

жит основанием считать, что активизация базитовой магматической деятельности на Муно-Тюнгской площади также происходила дважды. Сохраняет перспективы открытия кимберлитовых тел и территория юго-восточного фланга, особенно низовья рек Средний и Нижний Салакуты, где также установлены дайки высокотитанистых долеритов.

Заключение

В результате исследования установлена латеральная зональность вещественного состава базитов, обусловленная сменой режима растяжения в центральных районах на преобладающий режим сжатия на участках периферии. Определен перспективный район на поиски продуктивных кимберлитовых тел, выделенный по наличию даек высокотитанистых базитов, приуроченный к зоне преимущественного сжатия и совпадающий с аллювиальной россыпью алмазов.

Список литературы / References

1. Гайдук В.В. *Вилуйская среднепалеозойская рифтовая система*. Якутск: ЯФ СО АН СССР; 1988. 128 с.
Gayduk V.V. *Vilyui Middle Paleozoic rift system*. Yakutsk: YaSC SB USSR; 1988. 128 p. (In Russ.)
2. Polyansky O.P., Prokopiev A.V., Koroleva O.V., et al. Temporal correlation between the formation of dyke swarms and crustal extension in the middle Palaeozoic Vilyui rift basin, Siberian platform. *Lithos*. 2017;282-283:45–64. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.02.020>
3. Томшин М.Д., Копылова А.Г., Константинов К.М., Гоголева С.С. Базиты Вилуйского палеорифта. Геохимия и последовательность становления. *Геология и геофизика*. 2018;59(10):1503–1518. <https://doi.org/10.15372/GiG20181002>
4. Tomshin M.D., Kopylova A.G., Konstantinov K.M., Gogoleva S.S. Basites of the Vilyui paleorift: Geochemistry and sequence of intrusive events. *Russian Geology and Geophysics*. 2018;59(10):1204–1216. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2018.09.002>
5. Томшин М.Д., Фомин А.С., Корнилова В.П. и др. Особенности магматических образований Накынского кимберлитового поля Якутской провинции. *Геология и геофизика*. 1998;39(2):1693–1703.
6. Tomshin M.D., Fomin A.S., Kornilova V.P., et al. Features of magmatic formations of the Nakyn kimberlite field of the Yakut province. *Russian Geology and Geophysics*. 1998;39(2):1693–1703. (In Russ.)
7. Машак М.С., Наумов М.В., Леухин В.И. и др. Среднепалеозойский базитовый магматизм Марха-Тюнгского междуречья (Накынский кимберлитовый поле). *Региональная геология и металлогения*. 2004; (20):122–138.

Mashchak M.S., Naumov M.V., Leukhin V.I., et al. Middle Paleozoic basic magmatism in the Nakyn Kimberlite Area (the Markha-Tjung interfluvium). *Regional Geology and Metallogeny*. 2004;(20):122–138. (In Russ.)

6. Киселев А.И., Ярмолюк В.В., Иванов А.В., Егоров К.Н. Пространственно-временные отношения среднепалеозойских базитов и алмазоносных кимберлитов на северо-западном плече Вилуйского рифта (Сибирский кратон). *Геология и геофизика*. 2014; 55(2):185–196.

Kiselev A.I., Ivanov A.V., Egorov K.N., Yarmolyuk V.V. Middle paleozoic basaltic and kimberlitic magmatism in the northwestern shoulder of the Vilyui rift, Siberia: Relations in space and time. *Russian Geology and Geophysics*. 2014;55(2):144–152.

7. Томшин М.Д., Зайцев А.И., Земнухов А.Л., Копылова А.Г. Характер становления базитов в Накынском кимберлитовом поле (Якутия). *Отечественная геология*. 2004;(5):39–43.

Tomshin M.D., Zaitsev A.I., Zemnukhov A.L., Kopylova A.G. Character of basite formation in Nakyn kimberlite field, Yakutia. *Otechestvennaya geologiya*. 2004;(5): 39–43. (In Russ.)

8. Копылова А.Г., Земнухов А.Л., Томшин М.Д. Петрохимические особенности щелочных базитов Накынского кимберлитового поля. *Отечественная геология*. 2005;(5):65–73.

Kopylova A.G., Zemnukhov A.L., Tomshin M.D. Petrochemical features of alkaline mafic rocks of the Nakyn kimberlite field. *Otechestvennaya geologiya*. 2005;(5): 65–73. (In Russ.)

9. Земнухов А.Л., Зайцев А.И., Копылова А.Г. и др. Базитовый магматизм Ханья-Накынского междуречья. В кн.: Зинчук Н.Н. (ред.). *Геология алмазов – настоящее и будущее*. Воронеж: ВГУ; 2005. С. 482–494.

Zemnukhov A.L., Zaitsev A.I., Kopylova A.G., et al. Basic magmatism of Khanna-Nakyn interfluvium. In: Zinchuk N.N. (ed.). *Geology of diamond – the present and the future*. Voronezh: VGU; 2005, pp. 482–494. (In Russ.)

10. Томшин М.Д., Гоголева С.С. Высокотитанистые долериты как новый критерий поисков кимберлитов. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;27(4):499–513. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-1-15>

Tomshin M. D., Gogoleva S. S. High-titanium dolerites as a new criterion for kimberlite prospecting. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(4):499–513. (In Russ.). <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-499-513>

11. Копылова А.Г., Томшин М.Д. Базитовый магматизм Среднесалакутского района. *Наука и образование*. 2008;52(4):27–33.

Kopylova A.G., Tomshin M.D. Maphic magmatism in the Middle Salakut Region. *Nauka i obrazovaniye*. 2008;52(4):27–33. (In Russ.)

12. Граханов С.А., Шаталов В.И., Штыров В.А. и др. *Россыпи алмазов России*. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео»; 2007. 454 с.

Grakhanov S.A., Shatalov V.I., Shtyrov V.A., et al. *Diamond placers of Russia*. Novosibirsk: Geo; 2007. 454 p. (In Russ.)

13. Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. *Типоморфизм алмазов Сибирской платформы*. Москва: Недра; 2003. 603 с.

Zinchuk N.N., Koptil' V.I. *Typomorphism of the Siberian platform diamonds*. Moscow: Nedra; 2003. 603 p. (In Russ.)

14. Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. Особенности алмазов из россыпей Сибирской платформы в связи с проблемой прогнозирования их коренных источников. В кн.: *Геология алмазов – настоящее и будущее*. Воронеж: ВГУ; 2005. С. 1020–1050.

Zintchouk N.N., Koptil' V.I. Specific features of diamonds from the Siberian platform's placers (in connection with forecasting problem of their primary sources). In: *Geology of diamond – the present and the future*. Voronezh: VGU; 2005, pp.1020–1050. (In Russ.)

15. Проценко Е.В., Горев Н.И. К вопросу о перспективах коренной алмазоносности северо-восточного фланга Вилуйско-Мархинской минерагенической зоны В кн.: *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции: в 2-х томах, г. Якутск, 10–12 апреля 2019 года. Том 1*. Якутск: Издательский дом СВФУ; 2019. С. 160–165.

Protsenko E.V. Gorev N.I. Prospects for the primary diamond content of the northeastern flank of the Vilyuisk-Markhinskaya mineragenic zone. In: *Geology and mineral resources of the North-East of Russia: Proceedings of the 9th All-Russian scientific and practical conference: in 2 volumes, Yakutsk, 10–April 12, 2019. Volume 1*. Yakutsk: NEFU Publishing House; 2019, pp. 160–165. (In Russ.)

16. Калинин А.И., Земнухов А.Л. Тектоническое подтверждение латеральной зональности северо-восточной части Вилуйско-Мархинского дайкового пояса. В кн.: *Проблемы геологии и освоения недр: труды XXIV Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвященного 75-летию Победы в Великой Отечественной войне, г. Томск, 06–10 апреля 2020 года*. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет; 2002. С. 121–122.

Kalinin A.I., Zemnukhov A.L. Tectonic confirmation of the lateral zoning of the northeastern part of the Vilyui-Markhinsky dike belt. In: *Problems of geology and subsoil development: proceedings of the 24th International Symposium named after Academician M.A. Usov students and young scientists, dedicated to the 75th anniversary of Victory in the Great Patriotic War, Tomsk, April 06–10, 2020*. Tomsk: National Research Tomsk Polytechnic University. 2002, pp. 121–122. (In Russ.)

17. Sun S.-S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders A.D., Norry M.J. (eds.). *Magmatism in ocean basins. Geological Society. Special Publications*. 1989;(42), pp. 313–345.
18. Гоголева С.С., Копылова А.Г. Петролого-геохимическая характеристика базитов Тенкеляхской площади. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2019;24(1):33–43. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-1-33-42>
- Gogoleva S.S., Kopylova A.G. Petrological and geochemical characteristics of the basites of the Tenkelyakh area. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2019;24(1): 33–43. (In Russ.). <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-1-33-42>
19. Богатиков О.А., Гоньшакова В.И., Ефремова С.В. и др. *Классификация и номенклатура магматических горных пород*. М.: Недра; 1981. 160 с.
- Bogatikov O.A., Gonshakova V.I., Efremova S.V., et al. *Classification and nomenclature of igneous rocks*. Moscow: Nedra; 1981. 160 p. (In Russ.)
20. Drake M.J., Weill D.F. Partition of Sr, Ba, Ca, Y, Eu⁺², Eu⁺³, and other REE between plagioclase feldspar and magmatic liquid: an experimental study. *Geochimica et Cosmochimica. Acta*. 1975;39(5):689–712. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(75\)90011-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(75)90011-3)
21. Олейников Б.В., Томшин М.Д., Копылова А.Г., Рихванов Л.П. Петролого-геохимические черты латеральной зональности базитов среднепалеозойских палеорифтов Сибирской платформы. *Отечественная геология*. 1997;(9):3–7.
- Oleynikov B.V., Tomshin M.D., Kopylova A.G., Rikhvanov L.P. Petrologo-geokhimicheskiye cherty lateral'noy zonal'nosti bazitov srednepaleozoyskikh paleoriftoy Sibirskoy platformy. *Otechestvennaya geologiya*. 1997;(9):3–7. (In Russ.)
22. Wang K., Plank T., Walker J.D., Smith E.L. A mantle melting profile across the Basin and Range, SW USA. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2002; 107(B1). <https://doi.org/10.1029/2001JB000209>.
23. Олейников Б.В., Саввинов В.Т. Пространственно-временная эволюция траппового магматизма в пределах Вилуйско-Мархинской и Жиганской магмоподводящих зон. В кн.: Ковальский В.В., Олейников Б.В. (ред.). *Магматические образования северо-востока Сибирской платформы: (геология, петрография, минералогия и геохимия)*. Якутск; 1975. С. 73–98.
- Oleynikov B.V., Savvinov V.T. Spatiotemporal evolution of trap magmatism within the Vilyui-Markha and Zhigansk magma supply zones. In: Kovalsky V.V., Oleynikov B.V. (eds.). *Igneous formations of the northeast of the Siberian platform: (geology, petrography, mineralogy and geochemistry)*. Yakutsk; 1975, pp. 73–98. (In Russ.)
24. Копылова А.Г., Гоголева С.С. Базиты Тюнго-Мунского междуречья. В кн.: *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России. Матер. XII ВНИК*. Якутск: Издательский дом СВФУ; 2022. С. 72–76.
- Kopylova A.G., Gogoleva S.S. Basites of Tyungo-Muna interfluece. In: *Geology and mineral resources of the North-East of Russia: Proceedings of the 12th VNPk*. Yakutsk: NEFU Publishing House; 2022, pp. 72–76. (In Russ.)
25. Хачатрян Г.К., Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. Структурные дефекты в алмазах северо-востока Сибирской платформы и их типоморфное значение. В кн.: *Геология алмазов – настоящее и будущее*. Воронеж: ВГУ; 2005. С. 1607–1615.
- Khachatryan G.K., Zinchuk N.N., Koptil' V.I. Structural defects in diamonds of the northeast of the Siberian platform and their typomorphic significance. In: *Geology of diamond – the present and the future*. Voronezh: VGU; 2005, pp.1607–1615. (In Russ.)
26. Уханов А.В., Никольская Н.Е., Галимов Э.М. и др. Изотопный состав углерода алмазов коренных и россыпных месторождений Якутской алмазоносной провинции. В кн.: *Геология алмазов – настоящее и будущее*. Воронеж: ВГУ; 2005. С. 1095–1111.
- Ukhanov A.V., Nikol'skaya N.Ye., Galimov E.M., et al. Carbon isotope composition of diamonds from primary and alluvial deposits of the Yakut diamond-bearing province. In: *Geology of diamond – the present and the future*. Voronezh: VGU; 2005, pp. 1095–1111. (In Russ.)

Об авторах

КОПЫЛОВА Альбина Георгиевна, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-6577-9615>, SPIN: 4639-4246, e-mail: Kopylova@diamond.ysn.ru

ГОГОЛЕВА Саргылана Семеновна, ведущий инженер, <https://orcid.org/0000-0002-1043-3710>, SPIN: 1231-9190, e-mail: gogoleva_ss@mail.ru

Вклад авторов

Копылова А.Г. – разработка концепции, методология, проведение исследования, проведение статистического анализа, руководство исследованием, администрирование проекта, редактирование рукописи, получение финансирования

Гоголева С.С. – программное обеспечение, верификация данных, проведение исследования, визуализация, создание черновика рукописи, получение финансирования

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

KOPYLOVA, Albina Georgievna, Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-6577-9615>, SPIN: 4639-4246, e-mail: Kopylova@diamond.ysn.ru

GOGOLEVA, Sargylana Semenovna, Leading Engineer, <https://orcid.org/0000-0002-1043-3710>, SPIN: 1231-9190, e-mail: gogoleva_ss@mail.ru

Authors' contribution

Kopylova A.G. – conceptualization, methodology, investigation, formal analysis, supervision, project administration, review & editing, funding acquisition

Gogoleva S.S. – software, validation, investigation, visualization, original draft, funding acquisition

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 01.08.2023

Поступила после рецензирования / Revised 20.02.2024

Принята к публикации / Accepted 15.03.2024

Пространственно-статистический анализ распределения сейсмической энергии Олекмо-Становой сеймотектонической зоны (Южная Якутия)

А. А. Макаров✉, Б. М. Козьмин

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

✉Makarov.2A@yandex.ru

Аннотация

Сейсмичность Республики (Саха) Якутия фиксируется на обширной территории 1,5 млн км² и проявлена в двух крупных сейсмических таксонах различного ранга: в Олекмо-Становой сеймотектонической зоне на юге и Арктико-Азиатском сейсмическом поясе – на севере. В данной статье рассматривается территория Олекмо-Становой сеймотектонической зоны, которая является восточным флангом Байкало-Станового сейсмического пояса. Для статистического анализа использована геолого-геофизическая модель территории Южной Якутии, согласно которой Олекмо-Становая сеймотектоническая зона подразделяется на пять структурно-тектонических блоков. Для территории исследования нами был создан региональный каталог землетрясений, дополненный данными Международного сейсмологического бюллетеня (ISC). На его базе и с учетом сеймотектонических особенностей и геодинамической позиции региона был проведен пространственно-статистический анализ сейсмической энергии, выделившейся при землетрясениях за 58-летний инструментальный период региональных сейсмологических наблюдений. Основным параметром для расчетов выбран наиболее часто используемый при общей количественной оценке уровня сейсмичности территории параметр ΣE (суммарная выделившаяся сейсмическая энергия). Анализ сейсмостатистических данных, полученных в пределах пяти структурно-тектонических блоков, выявил следующую корреляционную зависимость: в Олекмо-Становой сеймотектонической зоне в направлении с запада на восток при удалении от Байкальской рифтовой зоны сейсмическая активность снижается в 10^4 раз. Этот факт позволяет предполагать также замедление в этом же направлении интенсивности сеймотектонических и геодинамических процессов. Полученные результаты могут быть актуальны при проведении мелкомасштабных исследовательских работ по оценке потенциальной сейсмической активности малоизученных территорий и при среднесрочном прогнозе землетрясений как отдельный признак предстоящих сейсмических событий.

Ключевые слова: сейсмичность, структурно-тектонические блоки, активные разломы, Олекмо-Становая сеймотектоническая зона, Байкало-Становой сейсмический пояс, Алданский щит, сейсмическая энергия

Финансирование. Работа выполнена в рамках Государственного задания НИР ИГАБМ СО РАН (№ FUEM-2019-0001/FUFG-2024-0005).

Благодарности. Авторы благодарны рецензенту за сделанные конструктивные замечания.

Для цитирования: Макаров А.А., Козьмин Б.М. Пространственно-статистический анализ распределения сейсмической энергии Олекмо-Становой сеймотектонической зоны (Южная Якутия). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(2):216–223. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-216-223>

Original article

Spatial and statistical analysis of seismic energy distribution in the Olekmo-Stanovoy seismotectonic zone (South Yakutia)

Alexander A. Makarov✉, Boris M. Kozmin

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

✉Makarov.2A@yandex.ru

Abstract

The seismic activity in the Republic of Sakha (Yakutia) is monitored across a vast territory of 1.5 million km² and is characterized by two major seismic zones of varying rank: the Olekmo-Stanovoy seismotectonic zone in the south and

the Arctic-Asian seismic belt in the north. This article explores the Olekmo-Stanovoy seismotectonic zone, which forms the eastern flank of the Baikal-Stanovoy seismic belt. For statistical analysis, we used a geological and geophysical model of the Southern Yakutia territory. According to this model, the Olekmo-Stanovoy seismotectonic zone is segmented into five structural-tectonic blocks. For the study area, we compiled a regional catalog of earthquakes, supplemented by data from the International Seismological Bulletin (ISC). Based on the seismotectonic features and geodynamic position of the region, a spatial-statistical analysis of seismic energy released during earthquakes over a 58-year instrumental period of regional seismological observations was conducted. The main parameter for calculations was the parameter ΣE (total released seismic energy), which is most often used in the comprehensive quantitative assessment of seismic activity in a region. This study examines the major earthquakes that made the largest contribution to the calculations of the total energy released in each of the five blocks. Analysis of seismic-statistical data collected in the aisles of large structural-tectonic blocks of the first rank revealed the following correlation: in the Olekmo-Stanovoy seismotectonic zone in the direction from west to east, with distance from the Baikal rift zone, seismic activity decreases by 10^4 times. This thesis also suggests a slowdown in the intensity of seismotectonic and geodynamic processes in the same direction. The results of spatial-statistical analysis of the distribution of seismic energy in large regional blocks of the Olekmo-Stanovoy seismotectonic zone can be relevant for conducting small-scale research to assess the potential seismic activity of poorly studied areas and for medium-term earthquake forecasting as an independent indicator of impending seismic events.

Keywords: seismicity, tectonic blocks, active faults, Olekmo-Stanovaya Seismic Zone, Baikal-Stanovoy seismic belt, Aldan shield, seismic energy

Funding. This study was conducted within the framework of the state assignment for the DPMGI SB RAS (No. FUEM-2019-0001/ FUG-2024-0001).

Acknowledgements. The authors are grateful to the reviewer for the valuable feedback provided.

For citation: Makarov A.A., Kozmin B.M. Spatial and statistical analysis of seismic energy distribution in the Olekmo-Stanovoy seismotectonic zone (South Yakutia). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(2):216–223. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-216-223>

Введение

Цель проведенных исследований заключалась в статистическом анализе выделившейся при землетрясениях сейсмической энергии и выявлении взаимосвязей сейсмичности с зонами активных разломов, разграничивающих территорию Южной Якутии на ряд структурно-тектонических блоков, взаимодействующих между собой в условиях регионального сжатия под влиянием перемещения Евразийской и Амурской литосферных плит. Выбор параметра суммарной выделившейся энергии ΣE обосновывается тем, что он ведет себя гораздо более устойчиво относительно числа N , активности (A_{10} в частности) и наклона графика повторяемости, так как практически вся выделившаяся энергия определяется наиболее сильными землетрясениями [1]. Это дает преимущество при анализе данных за продолжительный интервал времени, несмотря на то что количество сейсмостанций не было постоянным.

Вдоль юго-восточной окраины Сибирской платформы от оз. Байкал к Охотскому морю протягивается крупный Байкало-Становой сейсмический пояс (БСП), отделяющий Евразийскую литосферную плиту (ЕА) на севере от Амурской (АМ) на юго-востоке (рис. 1). Пояс включает Байкальскую рифтовую зону (БРЗ) на западе и Олекмо-Становую сейсмотектоническую зону (ОСЗ) на

востоке [2]. На юге Якутии землетрясения ОСЗ прослеживаются в субширотном направлении широкой (до 200 км) полосой на протяжении до 1 тыс. км от среднего течения р. Олекма до Удской губы Охотского моря.

Эти зоны различаются по своему сейсмическому режиму. Так, в БРЗ ежегодно регистрируется более 2 тыс. подземных толчков с энергетическим классом $M > 2,2$ ($K > 8$), в то время как в ОСЗ в среднем таких случаев не более 500 [4]. Максимальная магнитуда M_s землетрясений в Байкальском рифте может составлять 7,5–7,8 (Цаганское землетрясение 1862 г., $M_s \approx 7,5$; Муйское событие 1957 г., $M_s = 7,6$; Могойтское землетрясение 1967 г., $M_s = 7,8$). В Олекмо-Становой зоне наибольшая магнитуда не превышает 6,5–7,0 (Тас-Юряхское землетрясение 1967 г., $M_s = 7,0$; Южно-Якутское 1989 г., $M_s = 6,6$).

Материалы исследования

Исследования проявлений южно-якутских землетрясений, их воздействий и сейсмической опасности более 60 лет проводит Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН и Якутский филиал Федерального исследовательского центра Единой геофизической службы РАН (ФИЦ ЕГС РАН). В составе последнего в настоящее время действует сеть из семи цифро-

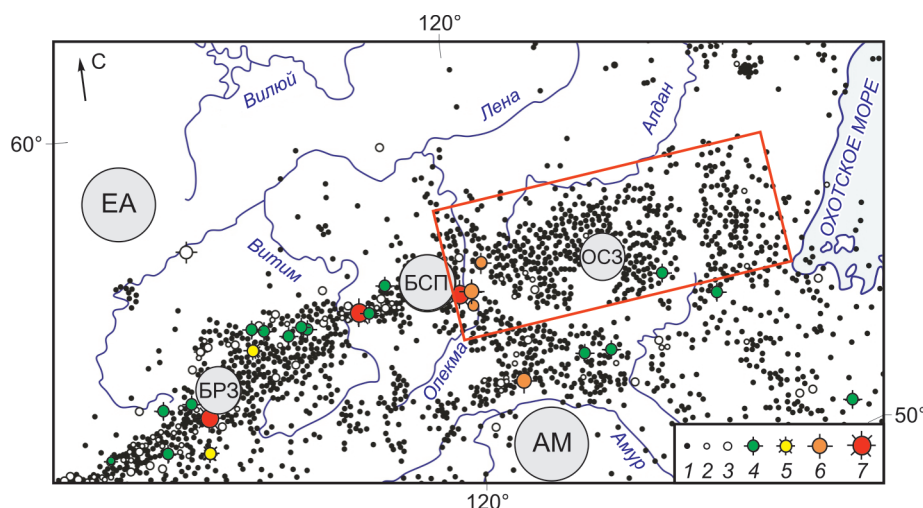


Рис. 1. Локация эпицентров землетрясений Байкало-Станового сейсмического пояса в Южной Якутии за XX–начало XXI вв. [4, с изменениями].

Магнитуда землетрясений M_s : 1 – 3–4, 2 – 5, 3 – 6, 4 – 7, 5 – 8, 6 – 9, 7 – 10. Плиты, пояса и зоны см. в тексте [2, 3]. Красным прямоугольником показана исследованная территория.

Fig. 1. Location of earthquake epicenters in the Baikal-Stanovoy seismic belt in the South Yakutia during the 20th and early 21st centuries [4 modified].

Magnitude of earthquakes: 1 – $M_s = 3-4$; 2 – $M_s = 5$; 3 – $M_s = 6$; 4 – $M_s = 7$; 5 – $M_s = 8$; 6 – $M_s = 9$; 7 – $M_s = 10$. Plates: EA – Eurasian, AM – Amurian. Belts and zones: БСП – Baikal-Stanovoy belt; БРЗ – the Baikal rift zone; ОСЗ – the Olekma-Stanovoy seismotectonic zone [2, 3]. The study area is shown as a red rectangle.

вых стационарных региональных сейсмостанций Южной Якутии, а при привлечении сведений с цифровых станций соседних Байкальского и Сахалинского филиалов ФИЦ ЕГС РАН общее число пунктов наблюдений, используемых для определения параметров эпицентров, достигает 20 [5]. Это позволяет без пропусков фиксировать местные землетрясения, начиная с $M_s \geq 3-4$. В целом, общее число подземных толчков в Южной Якутии за 60 лет инструментальных наблюдений составляет более 40 тыс. Помимо этого, созданный нами каталог землетрясений Южной Якутии был дополнен данными международного сейсмологического центра (International Seismological Centre) [6]. Эти материалы легли в основу проведенного исследования.

Сеймотектонические особенности

Южная Якутия – наиболее сейсмоактивная часть территории Якутии. В структурно-тектоническом плане здесь выделяются Алданский щит Сибирской платформы и граничащая с ним с юга Становая складчатая область. Эти структуры контактируют между собой по субширотной зоне Станового разлома, в пределах которой фиксируются как сильные и катастрофические землетрясения, так и многочисленные подземные толчки

меньшей интенсивности. На протяжении всей геологической истории здесь проявлялись тектонические движения, вызывающие активизацию ранее существовавших тектонических нарушений и возникновение новых разломов, подвижки по которым способствовали образованию современного рельефа, появлению многочисленных блоков земной коры различного ранга и др. [4, 7].

На Алданском щите наряду с реактивацией древних деструктивных зон архейского и протерозойского возраста сформировались более молодые структуры, связанные с мезозойской активизацией, заложением и развитием БРЗ и современными геодинамическими процессами на окраине и в пределах Евразийской литосферной плиты.

Установлено, что большинство разломов мезозойского времени заложения являются «живыми» и в кайнозой [2, 4]. Как видно на рис. 2, эпицентры сильных землетрясений тяготеют к зонам влияния крупных разломов и к вулканическим полям кайнозойского возраста. При этом на левобережье р. Олекма под влиянием Байкальского рифта наблюдается тектонический режим растяжения земной коры, проявленный преимущественно сбросовыми механизмами очагов местных сейсмических толчков, который на пра-

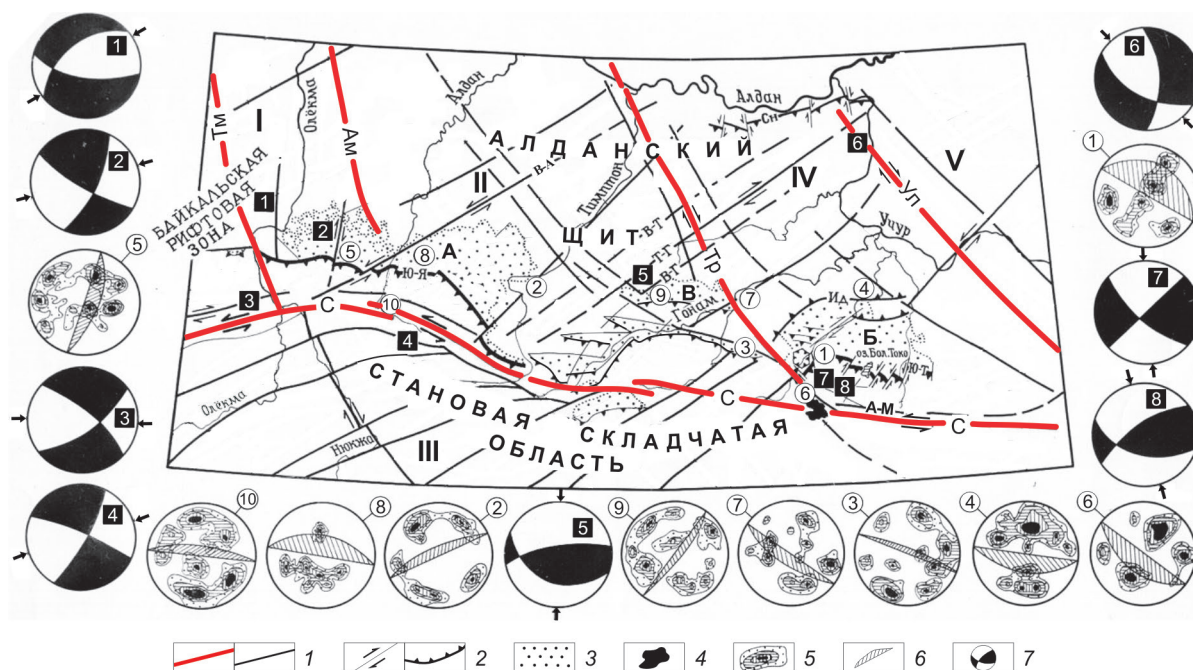


Рис. 2. Схема активных разломов [4, 7] и тектонических блоков [8].

1 – межблоковые зоны разломов 1-го порядка: Темулякитская (Тм), Амгинская (Ам), Тыркандинская (Тр), Улканская (Ул), Становая (С); 2 – разломы 2-го и меньших порядков (сдвиги, надвиги и неизвестной кинематики): В-А – Верхнеалданский, 3-А – Западно-Алданский, В-Т – Верхнетимптонский, Т-Г – Тимптомо-Гонамский, В-Г – Верхнегонамский, А-М – Августуро-Майский сдвиги; Ю-Я – Южно-Якутский, Ю-Т – Южно-Токинский, Сн – Суннагинский, Ид – Идюмский надвиги; 3 – мезозойско-кайнозойские впадины: А – Чульманская, Б – Токинская, В – Ытымджинская; 4 – поле кайнозойских базальтов; 5 – изолинии плотности трещиноватости в зонах разрывов, 6 – простирание главной плоскости сместителя (цифры рядом с диаграммами трещиноватости в кружках соответствуют их расположению на схеме); 7 – фокальные механизмы землетрясений (стрелками показано положение векторов сжатия в их очаге, цифры в квадрате – расположение очагов землетрясений на схеме).

Структурно-тектонические блоки: I – Чаро-Олекминский, II – Центрально-Алданский, III – Становой, IV – Тимптоно-Учурский, V – Батомгский

Fig. 2. Scheme of active faults [4,7] and tectonic blocks [8] in the South Yakutia.

1 – interblock fault systems of the 1st order: Temulyakitskaya (ТМ), Amginskaya (Ам), Tyrkandinskaya (Тр), Ulkansкая (Ул), Stanovaya (С); 2 – faults of the II-nd and smaller orders (strike-slip, thrusts and faults of unknown kinematics): В-А – Verkhnealdansky, 3-А – Zapadno-Aldansky, В-Т – Verkhnetimptonsky, Т-Г – Timptomo-Gonamsky, В-Г – Verkhnegonamsky, А-М – Augenkuro-Maysky strike-slip faults; Ю-Я – Yuzhno-Yakutsky, Ю-Т – Yuzhno-Tokinsky, Сн – Sunnaginsky, Ид – Idyumsky thrusts; 3 – Mesozoic-Cenozoic depressions: А – Chulmanskaya, Б – Tokinskaya, В – Itymdzhinskaya; 4 – field of Cenozoic basalts; 5 – isolines of fracture density in fracture zones; 6 – trend of main fault surface (numbers of fracture diagrams in circles correspond to their location on the scheme); 7 – focal mechanisms of earthquakes (arrows show position of compression vectors in their origin, numbers in square – location of earthquake epicenters on the scheme).

Structural-tectonic blocks: I – Chara-Olekminsk, II – Central Aldan, III – Stanovoy, IV – Timpton-Uchur, V – Batomga

вобережье р. Олекма сменяется на поле тектонических напряжений сжатие с реконструкцией подвижек в очагах землетрясений типа взброса, надвига и сдвига [4].

По современным тектоническим представлениям Алданский щит состоит из разноранговых террейнов, соединившихся в результате аккреции и коллизии отдельных структурных блоков [2]. Для статистического анализа нами была использована геолого-геофизическая блоковая модель [8], которая не противоречит известным тектоническим схемам исследуемой территории. Границами

блоков служат зоны сближенных тектонических нарушений, представленных раздробленными породами, диафоритами, катаклазитами, милонитами (зоны тектонического меланжа) [2]. Темулякитская, Тыркандинская, Верхнеамгинская и Улканская разломные зоны северо-западного простирания причленяются с севера к Становой складчатой области и оконтуривают на территории Алданского щита пять крупных блоков первого порядка – Чаро-Олекминский, Центрально-Алданский, Тимптоно-Учурский, Батомгский и Становой [8]. В составе каждого из этих блоков выде-

ляются структуры второго, третьего и меньших порядков, но в плане проявления сейсмичности основная роль принадлежит блокам первого и второго порядков и разделяющих их дизъюнктивам. Зоны крупных межблоковых разломов наиболее потенциально опасны в плане возникновения катастроф природного и техногенного характера [2, 8]. При этом эпицентры землетрясений регистрируются как в пределах Становой области, так и в примыкающих к ней блоках Алданского щита.

Самым активным на юге Якутии является Чаро-Олекминский блок (I), локализованный на западном фланге ОСЗ в среднем течении р. Олекма, где в XX столетии произошли три крупные сейсмические катастрофы с интенсивностью в эпицентре (шкала MSK-64) до 9 баллов: Нюкжинское (1958 г.), Олекминское (1958 г.) и Тас-Юряхское (1967 г.) землетрясения с магнитудой $M_s = 6,5-7,0$. Позднее, в начале XXI в., здесь же были зафиксированы три 7–8-балльных Чароудинских землетрясения (два в 2005 г. и одно в 2009 г.) с $M_s = 5,4-5,8$ [2, 10].

В расположенном восточнее Центрально-Алданском блоке (II) в междуречье Олекмы и Тимптона (среднее течение р. Тунгурча) отмечено сильное Южно-Якутское землетрясение с $M_s = 6,6$ (см. рис. 2). Оно произошло 20 апреля 1989 г. и является одним из сильнейших сейсмических событий, зафиксированных на территории Южной Якутии за последние 50 лет. Интенсивность землетрясения в его эпицентральной зоне была близка к 8 баллам. Глубина очага составила 27 км, что существенно больше среднего значения глубины очагов (10–15 км) для землетрясений Южной Якутии в целом. Эпицентр землетрясения расположен в южной окраине мезозойской Чульманской впадины. В его эпицентральной области обнаружены многочисленные сейсмообвалы и осыпи, выколы каменных монолитов и камнепады. На р. Тунгурча произошли ранние местные ледоходы. Землетрясение вследствие значительной глубины очага ощущалось на территории более 1,5 млн км² в Якутии, Бурятии, Иркутской, Читинской и Амурской областях, а также в Китайской Народной Республике [11].

Самым интенсивным событием в Становом блоке (III) являлось 7–8-балльное Ларбинское землетрясение 1971 г. с $M_s = 5,9$ с его афтершоками, произошедшими в бассейне р. Ларба, правом притоке р. Олекма [4].

В Тимптоно-Учурском блоке (IV) наиболее известными были 6-балльное Усмуное землетрясение 1972 г. с $M_s = 4,9$ и 7-балльное Гонамское сотрясение 2004 г. с $M_s = 5,4$. Самый восточный Батомгский блок (V) малоактивен, но и здесь имело место 6-балльное Суннагинское землетрясение 1976 г. с $M_s = 4,7$ [4].

Геодинамика

Рассматриваемая зона деформаций земной коры между оз. Байкал и Охотским морем вызвана смещением Амурской плиты относительно Евразийской в восток-юго-восточном направлении. Причиной такого движения может являться столкновение Индийского субконтинента с окраинными структурами Евразии, в результате чего произошло образование отдельных микроплит и блоков разной конфигурации на территории Китая и Монголии, а также в пределах Забайкалья и Приамурья [12–14].

Становой блок, зажаты между структурами БРЗ, Евразийской и Амурской плитами, испытывает давление в связи с раскрытием впадин Байкальского рифта на юго-восток со скоростью 0,5–0,7 мм/год [15] и сопутствующего движения Амурской плиты на восток со скоростью 1–1,3 см/год [16]. В результате этого Становой блок также смещается в восточном направлении. При этом скорость современных горизонтальных движений вдоль северной границы блока (зона Станового шва), по данным триангуляционных замеров на полигонах Южной Якутии, составляет ~ 0,3 см/год [17], а на его южной границе в Тукурингра-Джагдинской разломной зоне, по расчетам величин смещений гидросети, ~ 0,5–0,6 см/год [18, 19].

Сейсмическая энергия

Для анализа распределения сейсмической энергии (Е), выделяющейся при землетрясениях, был обработан массив инструментальных данных за последние 58 лет (1958–2016 гг.) в каждом из перечисленных блоков 1-го порядка. Предварительно рассчитывалось количество произошедших землетрясений разных магнитуд (M_s), затем их суммарная энергия (ΣE) в джоулях. Эти сведения обрабатывались с помощью экспоненциального цифрового формата. Далее определялась общая сумма (ΣE) для отдельных участков и районов, входящих в рассматриваемый блок. В итоге была оценена вся суммарная сейсмическая энер-

гия, высвободившаяся при землетрясениях, произошедших в данном блоке.

Расчеты показали, что наибольшая величина ΣE установлена в Чаро-Олекминском блоке ($5 \cdot 10^{16}$ Дж, 59 % общей ΣE); значительно меньшая – в Становом блоке ($2 \cdot 10^{16}$ Дж, 23 %) и Центрально-Алданском блоке ($1,5 \cdot 10^{16}$ Дж, 18 %). В Тимптоно-Учурском и Батомгском блоках сейсмическая энергия едва достигала величины в $1,2 \cdot 10^{14}$ Дж (0,001 %) и $2,4 \cdot 10^{12}$ Дж (0,0003 %) соответственно. Общая величина высвободившейся в Южной Якутии сейсмической энергии составила $\Sigma E = 8,5 \cdot 10^{16}$ Дж.

Выводы

Расчет сейсмической энергии, выделившейся при южно-якутских землетрясениях, показал, что в зависимости от их пространственной локализации в блоках ОСЗ прослеживается тенденция к понижению ее суммарных величин с запада на восток. К самым активным относятся западные структурно-тектонические блоки: Чаро-Олекминский (59 % от всей ΣE), Центрально-Алданский (23 %) и Становой (18 %). Наиболее инертным является Батомгский блок (0,0003 %). Таким образом, в направлении с запада на восток уровень ΣE снижается в 10^4 раз. Эти результаты косвенно свидетельствуют, что в восточном направлении при удалении от БРЗ сейсмостектонические процессы в ОСЗ существенно замедляются и, по-видимому, также снижаются скорости современных тектонических движений. Более точная корреляционная связь между сейсмической энергией и рядом значимых сейсмостектонических показателей территории Южной Якутии может быть получена при проведении аналогичных работ в структурно-тектонических блоках второго и более рангов, а также в зонах динамического влияния региональных активных разломов.

Список литературы / References

1. Салтыков В.А., Кравченко Н.М., Пойгина С.Г., Воропаев П.В. Оценка уровня сейсмической активности регионов России. В кн.: Маловичко А.А. (ред.). *Землетрясения России в 2012 году*. Обнинск: Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук»; 2014. С. 63–69.
2. Saltykov V.A., Kravchenko N.M., Poigina S.G., Voropaev P.V. Assessment of the level of seismic activity in Russian regions. In: Malovichko (ed.). *The earthquakes of Russia in 2012*. Obninsk: Geophysical Survey of RAS; 2014, pp. 63–69. (In Russ.)
3. Парфенов Л.М., Кузьмин М.И. (ред.). *Тектоника, геодинамика и металлогения территории Респуб-*

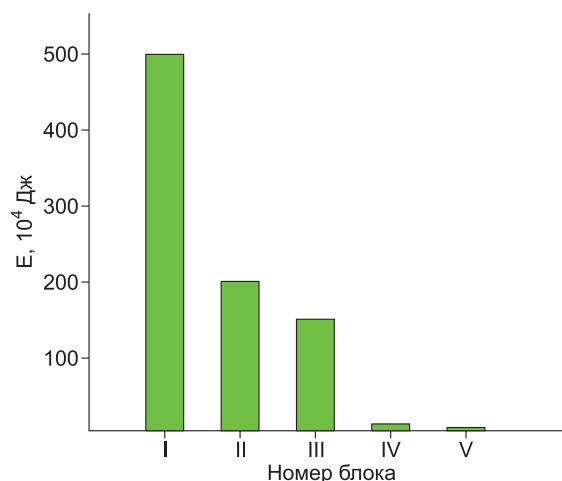


Рис. 3. Распределение выделившейся при южно-якутских землетрясениях сейсмической энергии ΣE .

Структурно-тектонические блоки: I – Чаро-Олекминский, II – Становой, III – Центрально-Алданский, IV – Тимптоно-Учурский, V – Батомгский

Fig. 3. Distribution of seismic energy ΣE released during the South Yakutia earthquakes (in J)

Blocks: I – Chara-Olekminsk, II – Central Aldan, III – Stanovoy, IV – Timpton-Uchur, V – Batomga

лики Саха (Якутия). М.: МАИК «Наука/Интерпериодика»; 2001. 571 с.

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

3. Козьмин Б.М. *Сейсмические пояса Якутии и механизмы очагов их землетрясений*. М.: Наука; 1984. 125 с.

Koz'min B.M. *Seismic belts of Yakutia and focal mechanisms of their earthquakes*. Moscow: Nauka; 1984. 125 p. (In Russ.)

4. Имаева Л.П. *Сейсмостектоническая активизация новейших структур восточного сектора Сибирского кратона*. Пенза: Научно-издательский центр «Социосфера»; 2022. 371 с.

Imaeva L.P. *Seismotectonic Activity of Recent Structures in the Eastern Sector of the Siberian Craton: monograph*. Penza: Science Publishing Center Sociosphere; 2022. 371 p.

5. Шибаетов С.В., Козьмин Б.М., Куляндина А.С. и др. Якутия. Результаты сейсмического мониторинга различных регионов России. В кн.: Маловичко А.А. (ред.). *Землетрясения России в 2020 году*. Обнинск: Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук»; 2022. С. 62–67.

Shibaev S.V., Kozmin B.M., Kulyandina A.S., et al. Yakutia. Results of seismic monitoring of various regions of Russia In: Malovichko A.A. (ed.). *The earthquakes of Russia in 2020*. Obninsk: Geophysical Survey of RAS; 2022, pp. 62–67. (In Russ.)

6. ISC Bulletin. [http://www.isc.ac.uk]. International Seismological Centre [обновлено 27 июля 2023; процитировано 27 июля 2023] Доступно: <https://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/>
7. Парфенов Л.М., Козьмин Б.М., Гриненко О.В. и др. *Геодинамика Олекмо-Становой сейсмической зоны*. Якутск: ЯФ СО АН СССР; 1985. 134 с.
- Parfenov L.M., Kozmin B.M., Grinenko O.V., et al. *Geodynamics of the Oliokma-Stanovoi seismic zone*. Yakutsk: Yakutian Branch of the Siberian Section of the USSR Academy of Sciences Publication; 1985. 134 p. (In Russ.)
8. Стогний Г.А., Стогний В.В. *Геофизические поля восточной части Северо-Азиатского кратона*. Якутск: Сахаполиграфиздат; 2005. 173 с.
- Stognii G.A., Stognii V.V. *Geophysical fields of the Eastern North Asian craton*. Yakutsk: Sakhapoligraphizdat; 2005. 173 p. (In Russ.)
9. Петров А. Ф., Боровиков А. М. Изучение очагов сильных землетрясений и сейсмоопасных зон по космическим снимкам в Байкало-Алданском регионе. *Исследование Земли из космоса*. 1978;(6):34–41.
- Petrov A.F., Borovikov A.M. Study of sources of strong earthquakes and seismic zones based on satellite images in the Baikal-Aldan region. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 1978;(6):34–41. (In Russ.)
10. Медведев С.В. Международная шкала сейсмической интенсивности. В кн.: Медведев С.В. (ред.). *Сейсмическое районирование СССР*. М.: Наука. 1968. С. 151–162.
- Medvedev S.V. International Seismic Intensity Scale. In: Medvedev S.V. (ed.). *Seismic zoning of the USSR*. Moscow: Nauka; 1968, pp. 151–162. (In Russ.)
11. Козьмин Б.М., Голенецкий С.И., Николаев В.В. и др. Южно-Якутское землетрясение 20(21).04.1989 г. и его афтершоки. В кн.: Кондорская Н.В. (ред.). *Землетрясения в СССР в 1989 г.* М.: Наука; 1993. С. 172–193.
- Kozmin B.M., Golenetsky S.I., Nikolaev V.V., et al. South Yakut earthquake of 04/20/21/1989 and its after-shocks. In: Kondorskaya N.V. (ed.). *Zemletryaseniya v SSSR v 1989 godu (Earthquakes in the USSR in 1989)*. Moscow: Nauka; 1993, pp. 172–193. (In Russ.)
12. Зоненшайн Л.П., Савостин Л.А. *Введение в геодинамику*. М.: Недра; 1979. 311 с.
- Zonenshain L.P., Savostin L.A. *Introduction to geodynamics*. Moscow: Nedra; 1979. 311 p. (In Russ.)
13. Tapponier P., Molnar P. Active faulting and Cenozoic tectonics of the Tien-Shan, Mongolia and Baikal Regions. *Journal of Geophysical Research*. 1979;84(B7):3425–3459. <https://doi.org/10.1029/JB084iB07p03425>
14. Гусев Г.С., Хаин В.Е. О взаимоотношениях Байкало-Витимского, Алдано-Станового и Монголо-Охотского террейнов (юг Средней России). *Геотектоника*. 1995;(5):68–82.
- Gusev G.S., Khain V.E. About the relationships between the Baikal-Vitim, Aldan-Stanovoy and Mongol-Okhotsk terranes (southern Central Russia). *Geotectonics*. 1995;(5):68–82. (In Russ.)
15. Calais E., Lesne O., Deverchere J., et al. Crustal deformation in the Baikal Rift from GPS measurements. *Geophysical Research Letters*. 1998;25(21):4003–4006. <https://doi.org/10.1029/1998GL900067>
16. Apel E.V., Burgmann R., Steblov G., et al. Independent active microplate tectonics of northeast Asia from GPS velocities and block modeling. *Geophysical Research Letters*. 2006;33(11):1–5. <https://doi.org/10.1029/2006GL026077>
17. Бочаров Г.В., Замараев Н.Н. Геодезические измерения на геодезических полигонах Южной Якутии. *Геодезия и картография*. 1991;(3):30–34.
- Bocharov G.V., Zamaraev N.N. Geodetic measurements at geodetic sites in Southern Yakutia. *Geodezia i Kartografiya*. 1991;(3):30–34. (In Russ.)
18. Николаев В.В., Семенов Р.М., Солоненко В.П. *Сейсмогеология Монголо-Охотского линеймента (Восточный фланг)*. Новосибирск: Наука; 1979. 113 с.
- Nikolaev V.V., Semenov R.M., Solonenko V.P. *Seismogeology of the Mongol-Okhotsk lineament (Eastern flank)*. Novosibirsk: Nauka; 1979. 113 p. (In Russ.)
19. Жижерин В.С., Серов М.А. Современная тектоника области сочленения Евразийской и Амурской плит. В кн.: Складарев Е.В. (ред.). *Строение литосферы и геодинамика: Материалы XXVIII Всероссийской молодежной конференции, г. Иркутск, 8–14 апреля 2019 г.* Иркутск: Институт земной коры СО РАН; 2019. С. 68–69.
- Zhizherin V.S., Serov M.A. Modern tectonics of the junction of the Eurasian and Amur plates. In: Sklyarov E.V. (ed.). *Structure of the lithosphere and geodynamics: Proceedings of the 28th All-Russian Youth Conference, Irkutsk, April 8–14, 2019*. Irkutsk: Institute of the Earth's crust SB RAS; 2019, pp. 68–69. (In Russ.)

Об авторах

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

КОЗЬМИН Борис Михайлович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-4270-1318>, ResearcherID: HKD-9774-2023, Scopus Author ID: 6506595969, SPIN: 9218-1530, e-mail: kozmin@diamond.ysn.ru

Вклад авторов

Макаров А.А. – проведение исследования

Козьмин Б.М. – руководство исследованием

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

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

KOZMIN, Boris Mikhailovich, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-4270-1318>, ResearcherID: HKD-9774-2023, Scopus Author ID: 6506595969, SPIN: 9218-1530, e-mail: kozmin@diamond.ysn.ru

Authors' contribution

Makarov A.A. – investigation

Kozmin B.M. – supervision

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 21.11.2023

Поступила после рецензирования / Revised 18.02.2024

Принята к публикации / Accepted 14.03.2024

Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

УДК 551.345.2

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-224-234>

Оригинальная статья

Реконструкция палеотемператур грунтов ледового комплекса Центральной Якутии в голоцене

В. А. Новоприезжая✉, А. Н. Федоров

*Институт мерзлотоведения им П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация
✉schwarz999@mail.ru*

Аннотация

Современное потепление климата вызывает изменения мерзлотных ландшафтов на нарушенных участках вследствие активизации криогенных процессов, что отрицательно влияет на несущую способность грунтов, устойчивость зданий и линейных сооружений. Реконструкция объектов является нагрузкой на экономику республики и влияет на качество жизни населения. В Центральной Якутии эти процессы обширно распространены, ввиду высокой плотности населения и воздействия человека на мерзлоту. Изучение эволюции криолитозоны при изменении климата в прошлые эпохи необходимо для отождествления будущих преобразований мерзлотных ландшафтов, динамики температурного режима грунтов при современном потеплении климата и оценки устойчивости верхней части криолитозоны. На основе хронологии эволюции климата Центральной Якутии в голоцене проведена реконструкция температурного режима грунтов ледового комплекса посредством математического моделирования. Математическое моделирование температурного режима грунтов ледового комплекса произведено на основе климатических и теплофизических характеристик грунтов, которые подобраны по литологическим разрезам Центральной Якутии. Произведены анализ и выборка климатических характеристик, таких как средняя годовая и месячная температуры воздуха, мощность снежного покрова по архивным данным метеостанций. В периоды потеплений расчетные температуры грунтов на глубине нулевых теплооборотов составляли $-2,1 \dots -2,7$ °C с разницей от современных в $0,4-1$ °C, а в периоды похолоданий $-5,2 \dots -12,3$ °C с разницей от современных $2,1-9,2$ °C. Анализ расчетных моделей показывает зависимость динамики теплового состояния грунтов ледового комплекса от мощности снежного покрова и устойчивость ледового комплекса Центральной Якутии в самые теплые периоды голоцена.

Ключевые слова: криолитозона, Центральная Якутия, голоцен, потепление климата, моделирование

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

Для цитирования: Новоприезжая В.А., Федоров А.Н. Реконструкция палеотемператур грунтов ледового комплекса Центральной Якутии в голоцене. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(2):224–234. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-224-234>

Original article

Reconstruction of the paleotemperature of the Central Yakutia Ice Complex during the Holocene period

Varvara A. Novopriezzhasya✉, Alexander N. Fedorov

*Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation
✉schwarz999@mail.ru*

Abstract

The increase in worldwide temperatures is leading to changes in permafrost landscapes in disturbed areas, which are causing the onset of cryogenic processes. Central Yakutia has a high population density and human impact on the permafrost, which contribute to the widespread occurrence of these processes. Studying the changes in permafrost

over past periods is crucial for predicting future landscape changes, monitoring soil temperature changes in current warming conditions, and evaluating the stability of the upper permafrost layer. We reconstructed the temperature regime of the soils in the Ice Complex using mathematical modeling based on the chronology of climate evolution in Central Yakutia during the Holocene. Mathematical modeling of the temperature regime of the ice complex's soils is based on climatic and thermophysical characteristics of the soils selected from the lithological sections of Central Yakutia. Archive data from weather stations was used for the analysis and sampling of climatic characteristics such as average annual and monthly air temperatures and snow cover thickness. During periods of warming, the calculated ground temperatures at the depth of zero heat turnover were between -2.1 and -2.7 °C, showing a difference of 0.4 – 1 °C from the current temperatures. Conversely, during cooling periods, the temperatures ranged from -5.2 to -12.3 °C, with a variance of 2.1 – 9.2 °C from the current soil temperatures. Thus, the examination of computational models indicates that the thermal conditions of the soils within the Ice Complex in Central Yakutia during the most significant periods of the Holocene are impacted by the thickness of the snow cover and the integrity of the Ice Complex.

Keywords: permafrost zone, Central Yakutia, Holocene, climate warming, modeling

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

For citation: Novopriezzhasya V.A., Fedorov A.N. Reconstruction of the paleotemperature of the Central Yakutia Ice Complex during the Holocene period. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(2):224–234. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-224-234>

Введение

В настоящее время в Центральной Якутии повышение температур воздуха в дополнение к антропогенным воздействиям приводит к активизации и интенсификации криогенных процессов. Это вызывает интерес к прогнозу геоэкологических условий, основой которого является история эволюции криолитозоны. Криолитозона – продукт взаимосвязи климата и природной среды, соответственно, динамика многолетней мерзлоты прямо зависит от изменений климата.

Рассматриваемая часть Центральной Якутии входит в зону средней тайги с преобладанием межаласного и аласного типов местности. Межаласье представляет собой природно-территориальный комплекс, развитый на высоких террасах крупных рек и озерно-аллювиальных равнинах, характеризуется наличием мощных повторно-жильных льдов [1]. Аласный тип местности представляет собой наиболее характерные ландшафты в Центральной Якутии, в которых ледовый комплекс был деградирован в периоды потеплений в позднем плейстоцене и голоцене (рис. 1). По Н.П. Босикову [2], под аласами понимаются замкнутые или полузамкнутые термокарстовые котловины, развитые на плакорных пространствах криолитозоны. Он также поясняет, что развитие аласов определяется вытаиванием подземных льдов и образованием термокарстового озера. После усыхания озера на днище котловины образуется комплекс лугов с засоленными почвами. Коренной тип леса межаласья представлен лиственничными лесами. Формирование ледового комплекса в Центральной Якутии происходило в экс-

тремально холодных климатических условиях позднего плейстоцена около 50–11 тыс. лет назад, а среднегодовая температура мерзлых пород не превышала -10 °C [3]. По В.В. Колпакову [4], в среднем течении Лены развиты лессовидные породы.

По С.М. Фотиеву [6], в голоцене на территории Сибири по развитию криогенного метаморфизма выделяются две эпохи: деградационная от 11 тыс. лет назад до конца эпохи климатического максимума (термохрон) и далее агтрадационная до настоящего времени (криохрон). М. Ульрих и др. [7] с учетом палеоэкологических реконструкций Сибири указывают на интенсивную термокарстовую активность в голоценовый оптимум примерно 7–5 тыс. лет назад, с сильными колебаниями уровня вод и дальнейшим боковым расширением бассейна между 3,5 и 1,5 тыс. лет назад. После ледниковое потепление достигло своего максимума между 6–4,5 тыс. лет назад. С.П. Качурин [8] предположил, что термокарстовые процессы в Сибири были более слабыми в период позднего голоцена. Переход позднего плейстоцена в голоцен характеризуется резким увеличением пыльцы деревьев и снижением степной растительности [9–11].

На основе палинологических данных А.А. Андреевым и др. [12] составлена палеоклиматическая реконструкция Центральной Якутии (табл. 1). Аллеред и поздний дриас (до 10,3–10,5 тыс. лет назад) характеризовались суровым климатом и малым количеством осадков, развитием тундростепей и ерников. В аллереде июльская температура воздуха была ниже современной темпера-

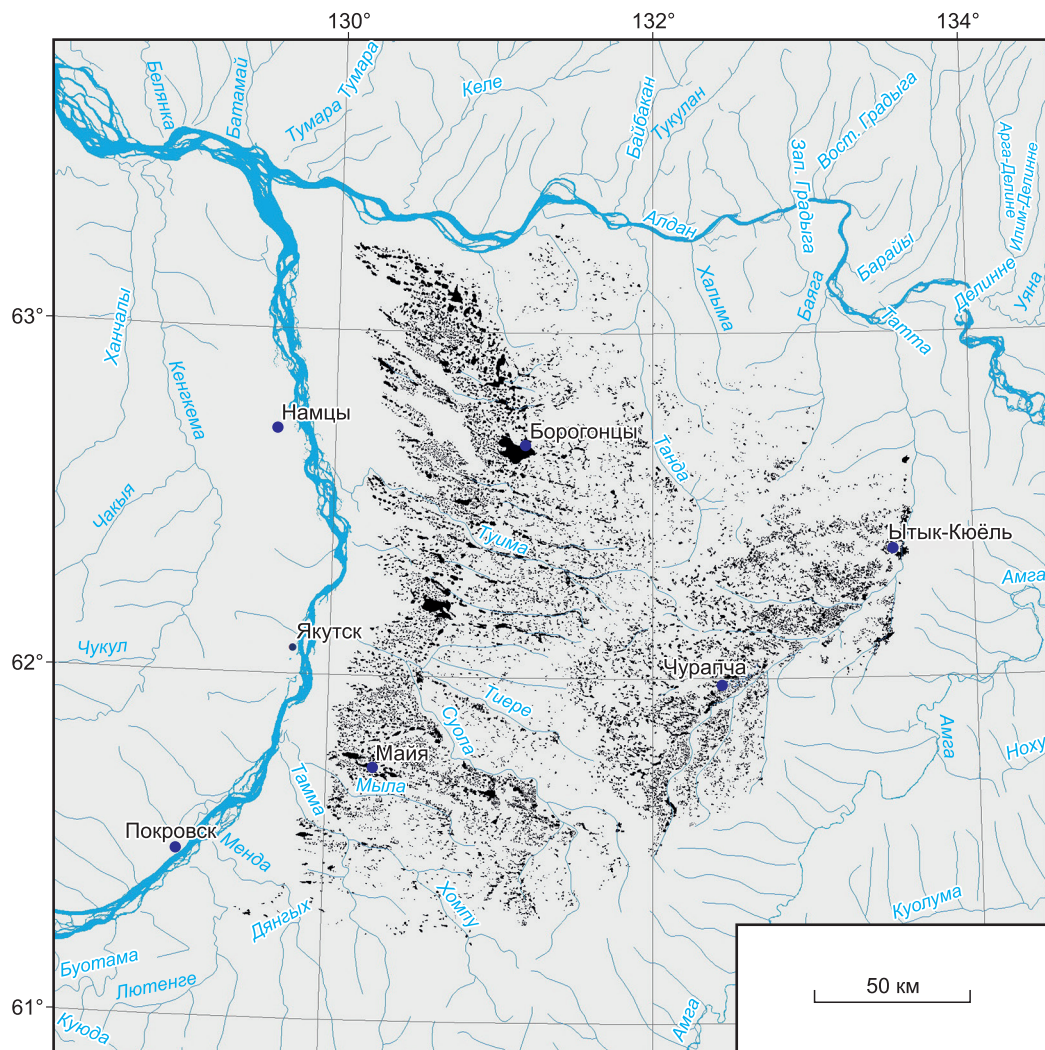


Рис. 1. Карта аласности Лено-Амгинского междуречья [5]

Fig. 1. Map of the alasnesh of the Lena-Amga interfluvium [5]

туры воздуха на 1,5–2,5 °С, января – на 2–5 °С, в позднем дриасе июльская – на 3 °С, январская – на 6 °С. С предбореального периода около 9,8 тыс. лет назад выражена тенденция к росту температур, тундростепи сменились на лиственничные и березовые редколесья с ерниками. Температура воздуха в июле в предбореальный период была ниже современной на 2 °С, январская – на 4 °С. Бореальный период (8,5 тыс. лет назад) был более теплым, чем предбореальный, отклонение среднегодовой температуры воздуха от нынешней составляло –0,5...–1 °С, произошло обширное распространение лиственничных и березовых лесов с елью и сосной. В атлантический период (7,9 тыс. лет назад) на севере Евразии выделяется географическая зональность и

секторность, чередуются периоды потепления и похолодания. Среднегодовая температура воздуха повысилась до превышения современной среднегодовой на 0,5 °С, а через 900 лет понизилась на 1,5 °С с уменьшением количества осадков, далее среднегодовая температура воздуха повышается на 0,5–1 °С от современных, и в это потепление характерной растительностью являются лиственничные леса с сосной и березой. В суббореальный (4,4–3,5 тыс. лет назад) и субатлантический (2,2–1 тыс. лет назад) периоды происходят чередования похолоданий и потеплений через 900–1200 лет. В суббореальный период похолодания (4,4 тыс. лет назад) температура воздуха июля была ниже современной на 1,5 °С, а январская – на 2–3 °С. В периоды по-

**Хронология периодов голоцена
и их климатические характеристики в Центральной Якутии [12]**

Table 1

Chronology of the Holocene periods and their climatic characteristics in Central Yakutia

Период	Время	Отклонения от среднегодовой температуры воздуха, °С	Отклонения годовой суммы осадков, мм	Характерная растительность
Аллеред	10500	–3...–4,5	–50...–100	Тундростепи и ерники
Поздний дриас	10300	–5	–150	Тундростепи и ерники
Предбореальный	9800	–2,5	–50	Редколесья лиственничные и березовые с ерниками
Бореальный	8500	–0,5...–1	–25	Леса лиственничные и березовые с елью и сосной
Атлантический	7900	+0,5	+25	Леса лиственничные с березой
	7000	–1,5	–50	Леса лиственничные
	5500	+0,5...+1	+25	Леса лиственничные с сосной и березой
Суббореальный	4400	–2	–50	Леса лиственничные с сосной, березой и ерниками
	3500	+0,5...+1	+50...+75	Леса лиственничные с сосной и березой
Субатлантический	2200	–1,5	–50	Леса лиственничные с сосной, березой и ерниками
	1000	+0,5...+1	+25	Леса лиственничные с сосной и березой

теплений суббореального и субатлантического периодов характерная растительность представлена лиственничными лесами с сосной и березой, а в периоды похолоданий к ним добавляются ерники [13].

Целью настоящей работы является реконструкция температурного режима грунтов ледового комплекса Центральной Якутии в голоцене для геокриологического прогноза при будущих изменениях климата и оценки устойчивости криогенных ландшафтов, т. е. верхней части криолитозоны, которая наиболее важна для строительства и эксплуатации инженерных сооружений и деятельности человека.

Материалы и методы исследования

Мониторинговые полигоны Умайбыт (близ г. Покровск) и Юкэчи (близ с. Майя), где были проведены детальные геокриологические исследования Институтом мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, были выбраны как опорные участки. На этих мониторинговых полигонах сотрудниками института проводились регулярные ежегодные замеры температур грунтов и слоя сезонного оттаивания. Для моделирования использовались дан-

ные метеостанций Бердигестях, Покровск, Амга, Чурапча, Охотский Перевоз, Крест-Хальджай и Ытык-Кюель (табл. 2). Основой для моделирования стали современные значения среднемесячных температур и воздуха, мощности и плотности снежного покрова по метеостанциям (рис. 2 и 3) [14–17].

В целях реконструкции теплового состояния пород промоделированы климатические характеристики голоцена по участкам согласно табл. 1. Произведена выборка массива архивных данных средних годовых температур воздуха по отклонению от современной средней годовой температуры воздуха. В ходе решения задачи теплотехнического расчета по максимальным периодам похолодания в аллереде и позднем дриасе, в силу отсутствия натурных данных с настолько низкими температурами воздуха, для расчетов выборка произведена по метеостанциям северной тайги и тундры, которые могли быть аналогами центральной якутских метеостанций в эти эпохи. Отклонения суммы осадков в виде высоты снежного покрова высчитывались в процентном соотношении, в холодные периоды упор делался на первые месяцы снегопада, так как в сильные морозы количество осадков уменьшалось. Если

Таблица 2

Среднемесячные температуры и среднегодовые температуры воздуха, °С

Table 2

Monthly temperatures and mean annual air temperatures, °C

Участок	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Ср.год
Амга	–42,9	–38,0	–24,0	–7,5	6,1	14,5	17,7	14,1	5,3	–8,9	–29,6	–40,6	–11,2
Чурапча	–44,0	–38,4	–24,0	–7,8	5,8	14,7	18,1	14,3	5,2	–9,4	–30,8	–41,8	–11,5
Ытык-Кюель	–44,9	–39,5	–25	–8,2	5,6	14,4	17,4	13,8	4,5	–10,3	–32,4	–42,7	–12,2
Покровск	–40,9	–35,5	–22,5	–7	5,8	14,5	18	14,4	5,6	–7,8	–28,1	–38,7	–10,2
Крест-Хальджай	–44,3	–38,2	–23,0	–6,5	6,4	15,4	18,4	14,4	5,6	–9,5	–31,8	–42,4	–11,3
Охотский Перевоз	–44,2	–39,4	–24,7	–7,8	5,7	14,2	17,4	14,0	5,5	–8,7	–30,3	–41,1	–11,6
Бердигестях	–40,5	–35,7	–22,9	–8,3	4,7	13,5	16,5	12,6	3,9	–8,7	–28,2	–38,9	–11,0

отклонение от современной годовой суммы осадков превышало 25 %, то плотность снежного покрова принималась в большую или меньшую сторону по схожей метеостанции. В экстремально холодные периоды голоцена, где господствовали тундростепи и ерники, дополнительно вводились коэффициенты теплообмена с учетом скорости ветра.

Литологический разрез на мониторинговых полигонах Умайбыт и Юкэчи однотипный, характерный для Абалахской равнины Центральной Якутии, сложен покровными суглинками и супесями до глубины 2,2–2,4 м, ниже вскрываются повторно-жильные льды мощностью от 10 до 13,8 м, подстилаемые песками [18–20]. На его основе и свойств грунтов по физическим свойствам подобраны теплофизические параметры для каждого слоя [21, 22]. Теплопроводность талых супесей около 1,16–1,26 Вт/(м · °С), мерзлых 1,28–1,89, талых суглинков 1,16–1,33, мерзлых 1,51–2,15, талых песков 2,5, мерзлых

2,73 Вт/(м · °С). Теплоемкость талых супесей составляет 642–686 Вт/м³, мерзлых 523–529, талых суглинков 686–896, талых песков 872, мерзлых супесей 523–529, мерзлых суглинков 523–605, мерзлых песков 651 Вт/м³. Температура замерзания грунтов следующая, °С: супесей –0,15, суглинков –0,20, песков –0,10; теплота фазовых переходов для супесей 14–23 тыс. Вт/(ч · м³), суглинков 23–48 тыс., песков 36 тыс. Вт/(ч · м³) [23]. Грунты межлассий Центральной Якутии являются незасоленными, и, следовательно, в расчетах температура замерзания принята по незасоленным разновидностям дисперсных грунтов.

Реконструкция температур грунтов была выполнена с помощью математического метода решения одномерной задачи Стефана, с использованием программы Qfrost, разработанной кафедрой геокриологии геологического факультета МГУ. Расчет производился по периодам голоцена на весь промежуток времени периода по-

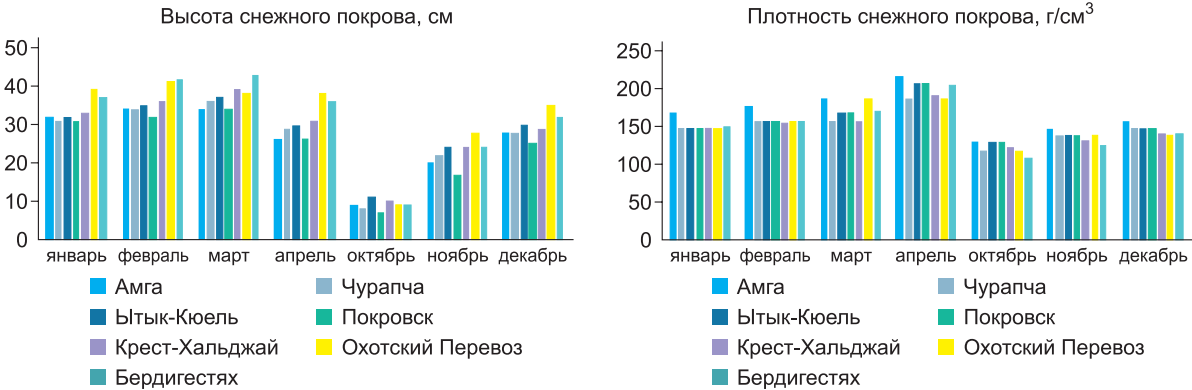


Рис. 2. Динамика характеристик снежного покрова по метеостанциям
Fig. 2. Dynamics of snow cover characteristics observed by meteorological stations

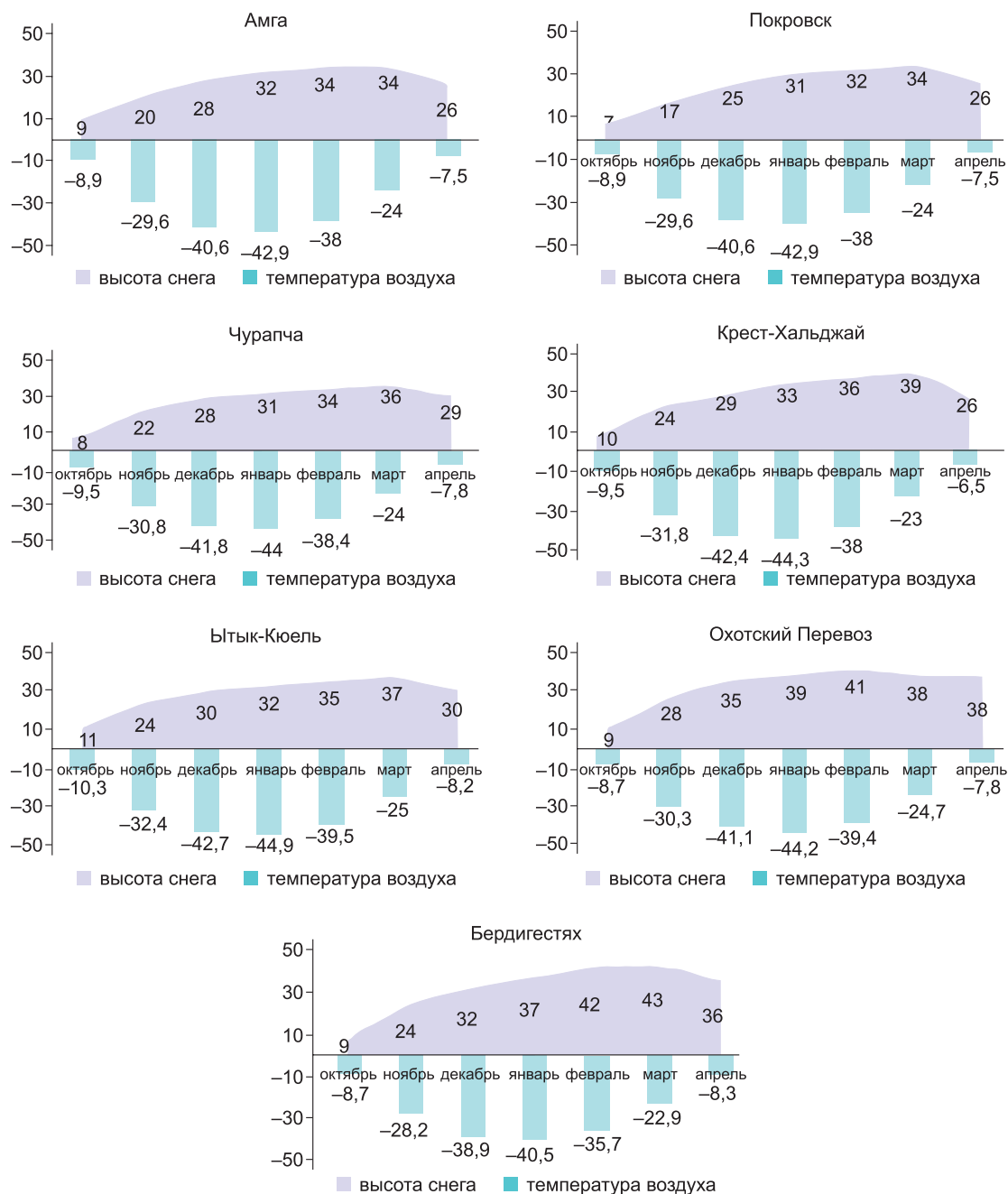


Рис. 3. Распределение снежного покрова и температур воздуха в период отрицательных температур по метеостанциям

Fig. 3. Distribution of snow cover and air temperatures during the period of sub-zero temperatures recorded by meteorological stations

сле выборки и подбора среднемесячных температур воздуха и высоты снежного покрова по метеостанциям.

Верификация моделей полигонов Умайбыт и Юкэчи производилась посредством ретроспективного моделирования на период 1980–2018 гг. и демонстрирует хорошую сходимость расчетных температур грунтов с фактическими замерами температур и согласованность с ходом раз-

вития динамики температурного поля многолетнемерзлой толщи (рис. 4).

Результаты и обсуждение

По результатам реконструкции температуры грунтов Центральной Якутии в аллереде составили, °C: –8,4...–9,2, в позднем дриасе –11,4...–13,2, в предбореальный период –7,1...–8,0, в бо-реальный –4,9...–5,5, в атлантические теплые

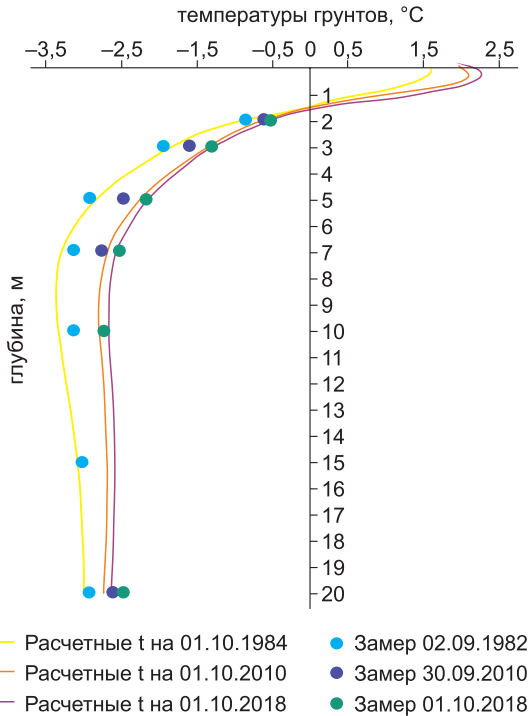


Рис. 4. Сопоставления расчетных температур грунтов с замерами. Полигон Умайбыт

Fig. 4. Comparison of calculated ground temperatures with actual measurements at the Umaybyt site

периоды $-2,4 \dots -3,0$, в атлантический холодный период $-5,6 \dots -6,8$, в суббореальный холодный период $-6,1 \dots -7,3$, в суббореальный термохрон $-1,9 \dots -2,3$, в субатлантический холодный период $-5,6 \dots -6,8$, в субатлантический теплый период $-2,0 \dots -2,9$ (табл. 3). Температуры грунтов приведены на глубине нулевых годовых теплооборотов, которая составляет для Центральной Якутии в настоящее время 15 м.

В ходе ретроспективного анализа прослеживаются следующие особенности:

Температурный режим грунтов Покровска аналогичен режимам Бердигестяха и Охотского перевоза. Как правило, температуры ниже многоснежного бердигестяхского на $0,1 \dots 0,5$ °C в многоснежный, равны в бореальный (8,5 тыс. лет назад), атлантический (5,5 тыс. лет назад) и суббореальный (3,5 тыс. лет назад) периоды. Покровск по сравнению с Охотским перевозом теплее, но малоснежен, разница в температурах грунтов составляет $0,1 \dots 0,3$ °C.

Бердигестях отмечен как участок с самой высокой температурой грунтов, вследствие высокой среднегодовой температуры и большей высоты снежного покрова.

Температуры грунтов Чурапчи схожи с температурами Амги, Крест-Хальджай (особенно в

Реконструкция температур грунтов Центральной Якутии в голоцене, °C

Таблица 3

Soil temperature reconstruction in Central Yakutia During the Holocene, °C

Table 3

Период	Время	Отклонения от ср. год. темп. воздуха, °C	Отклонения год. суммы осадков, мм	Покровск	Чурапча	Амга	Крест-Хальджай	Охотский Перевоз	Бердигестях	Ытык-Кюель	Среднее	Стандартное отклонение
Аллеред	10500	$-3 \dots -4,5$	$-50 \dots -100$	-8,8	-9,1	-9,2	-8,9	-8,7	-8,4	-9,2	-8,9	0,29
Поздний дриас	10300	-5	-150	-11,9	-12,7	-12,7	-12,4	-12,0	-11,4	-13,2	-12,3	0,60
Предбореальный	9800	-2,5	-50	-7,2	-7,8	-7,9	-7,6	-7,4	-7,1	-8	-7,6	0,35
Бореальный	8500	$-0,5 \dots -1$	-25	-4,9	-5,2	-5,5	-5,3	-4,9	-4,9	-5,5	-5,2	0,28
Атлантический	7900	+0,5	+25	-2,5	-2,8	-2,9	-2,6	-2,5	-2,4	-3	-2,7	0,23
	7000	-1,5	-50	-5,8	-6,6	-6,6	-6,3	-6	-5,6	-6,8	-6,2	0,45
	5500	$+0,5 \dots +1$	+25	-2	-2,4	-2,8	-2,4	-2,3	-2	-2,9	-2,4	0,35
Суббореальный	4400	-2	-50	-6,2	-6,9	-7	-6,9	-6,5	-6,1	-7,3	-6,7	0,44
	3500	$+0,5 \dots +1$	$+50 \dots +75$	-1,9	-2,1	-2,1	-2,1	-2,1	-1,9	-2,3	-2,1	0,14
Субатлантический	2200	-1,5	-50	-5,8	-6,6	-6,6	-6,3	-6	-5,6	-6,8	-6,2	0,45
	1000	$+0,5 \dots +1$	+25	-2	-2,4	-2,8	-2,6	-2,3	-2	-2,9	-2,5	0,36
Современный	0			-2,7	-3	-3,2	-3,4	-3	-2,5	-3,6	-3,1	0,38

атлантический, суббореальный, субатлантические теплые периоды) и Ытык-Кюеля. В позднем дриасе, в атлантическом холодном, суббореальном теплом периодах чурапчинские и амгинские температуры грунтов совпадают, а в остальные периоды чурапчинские выше на 0,1–0,4 °С, что, вероятно, связано с меньшими плотностями снежного покрова в начале зимы.

Участок Охотский перевоз по температурному режиму схож с Крест-Хальджем, но имеет большую высоту снега (но меньшую плотность) к началу морозного периода. Температуры воздуха незначительно ниже температур участка Крест-Хальджай, потому в периоды похолоданий с меньшим количеством снега, такие как поздний дриас, бореальный, атлантический (7,0 тыс. лет назад) и субатлантический (2,2 тыс. лет назад), температуры грунтов становятся ниже крестхальджайских на 0,2–0,4 °С.

Ытык-Кюель выделяется среди прочих участков наиболее низкими температурами грунтов, но в отдельные холодные периоды (аллеред и бореальный) температуры грунтов равны амгинским.

По результатам моделирования, наиболее теплые температурные режимы в Центральной Якутии имеют участки Покровск и Бердигестях, а наиболее холодные – Амга и Ытык-Кюель, что объясняется различием в среднегодовых температурах воздуха и мощностях снежного покрова, также по географическому расположению самые «теплые» участки находятся на юго-западной стороне.

В.В. Самсоновой [24] была смоделирована мерзлотно-климатическая динамика криогенных систем Центральной Якутии в голоцене через задание трендов температур воздуха от +0,0015 до –0,05 °С в год на определенные периоды. По данным Самсоновой В.В., температуры грунтов на глубине годовых нулевых теплооборотов составили, °С: в аллереде –10,6, в позднем дриасе –10,9...–11,8, в предбореальный период –9,0, в бореальный –4,4, в атлантический (7900 л.н.) –1,2, в атлантический (7000 л.н.) –5,1...–5,3, в атлантический (5500 л.н.) –0,5...–2,7, в суббореальный (4400 л.н.) –3,5...–5,5, в суббореальный (3500 л.н.) –0,6...–1,9, в субатлантический (2200 л.н.) –5,3, в субатлантический период (1000 л.н.) –0,4. При сопоставлении результатов моделирования разница составляет 0,2–2,0 °С. При сопоставлении с данной реконструкцией палеотемператур наибольшие различия температуры грунтов в аллереде – 1,7 °С, в предбореаль-

ный – 1,4, в атлантический период (7900 л.н.) – 1,5, в суббореальный (4400 л.н.) – 1,2, а в субатлантический период (1000 л.н.) в 2,0 °С. Предположительно, эти различия обусловлены разницей подходов, в одном случае использовались тренды температур воздуха и опорные метеостанции для характеристик снежного покрова в соответствующий период, в другом – отклонения среднегодовых и среднемесячных температур воздуха от современных в сочетании с разницей по высоте снежного покрова в процентном соотношении через подборку архивных данных.

Самые теплые периоды голоцена [25, 26] могут быть использованы как опорные для прогноза изменений температурного режима и для оценки устойчивости верхних горизонтов криолитозоны и криогенных ландшафтов при будущем потеплении климата. Модели мерзлотных ландшафтов показывают достаточную устойчивость криолитозоны в самые теплые периоды голоцена: атлантический (5500 л.н.), суббореальный (3500 л.н.), субатлантический (1000 л.н.), когда повышение температур грунтов составило от +0,4 до +1 °С при повышении температуры воздуха на +0,5...+1 °С, но около 80 % территории ледового комплекса сохранили устойчивость, согласно Карте аласности Центральной Якутии [27], так как аласы формировались при развитии термокарста в периоды потеплений позднего плейстоцена и голоцена.

По Т.П. Каплиной [28], причиной возникновения аласного рельефа на территории Северной Якутии является увеличение осадков примерно 13–12 тыс. лет назад, отмечается, что процесс был весьма стремительным, к рубежу 10–8,5 тыс. лет назад аласный рельеф был сформирован. М. Ульрих и др. [7], основываясь на анализе седиментологических и биогеохимических характеристик термокарстовых процессов, подчеркивают, что эволюция аласов и термокарстовых озер Центральной Якутии не была непрерывным процессом и возникла из-за кратковременных фаз ускорения динамики климатических условий. Таяние вечной мерзлоты и экстенсивное развитие термокарстовых бассейнов ускоряются при увеличении количества осадков и возможны даже в кратковременные теплые периоды.

А.Ф. Фрадкина с соавторами [10] также считает, что термокарстовые озера начали формироваться к концу позднего оледенения в аллереде около 13 тыс. лет назад.

Согласно работам Ф. Катамуры и др. [29, 30], в Центральной Якутии формирование аласов про-

изошло около 11–9 тыс. лет назад и термокарст интенсивно развивался 7–8,5 тыс. лет назад, в так называемый голоценовый оптимум. Основной причиной развития термокарста в Центральной Якутии на основе изучения остатков древесного угля они считают лесные пожары.

Заключение

1. Динамика состояния криолитозоны находится в тесной зависимости от местных климатических особенностей. Наиболее теплые температурные режимы грунтов имеют участки Покровск и Бердигестях, а наиболее холодный – участок Ытык-Кюель, что объясняется различием в среднегодовых температурах воздуха и мощностях снежного покрова.

2. Наибольшие стандартные отклонения температуры грунтов отмечены в холодные периоды из-за уменьшения мощности снежного покрова и далее большего влияния экстремально низких зимних температур.

3. Расчетные модели температуры грунтов показывают относительную устойчивость верхней части криолитозоны и криогенных ландшафтов в самые теплые периоды голоцена – атлантический (5500 л.н.), суббореальный (3500 л.н.), субатлантический (1000 л.н.), когда повышение температур грунтов составило от +0,6 до +1 °С при повышении температуры воздуха на +0,5...+1 °С и увеличении осадков на 10–30 %.

Список литературы / References

1. Федоров А.Н., Ботулу Т.А., Варламов С.П. Мерзлотные ландшафты Якутии (Пояснительная записка к Мерзлотно-ландшафтной карте Якутской АССР масштаба 1: 2 500 000). Новосибирск: ГУГК; 1989. 170 с.
Fedorov A.N., Botulu T.A., Varlamov S.P. *Permafrost landscapes of Yakutia (Explanatory note to the Permafrost-landscape map of the Yakut Autonomous Soviet Socialist Republic, scale 1: 2,500,000)*. Novosibirsk: GUGK; 1989. 170 p. (In Russ.)
2. Босиков Н.П. Эволюция аласов Центральной Якутии. Якутск: ИМЗ СО РАН; 1991. 127 с.
Bosikov N.P. *Evolution of the Alases in Central Yakutia*. Yakutsk: IMZ SB RAS; 1991. 127 p. (In Russ.)
3. Конищев В.Н. Реакция вечной мерзлоты на потепление климата. *Криосфера Земли*. 2011;15(4):15–18.
Konishchev V.N. Permafrost response to climate warming. *Kriosfera Zemli*. 2011;15(4):15–18. (In Russ.)
4. Колпаков В.В. Эоловые четвертичные отложения приленской Якутии. *Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода*. 1983;52:123–131.
Kolpakov V.V. Eolian Quaternary deposits of the Lena Yakutia. *Bulletin of the Commission for the Study of the Quaternary Period*. 1983;52:123–131. (In Russ.)

5. Торговкин Я.И., Шестакова А.А. Пространственный анализ криогенных форм рельефа северной части Лено-Амгинского междуречья (на примере аласов Усть-Алданского улуса). *Вестник СВФУ. Серия «Науки о Земле»*. 2019;4(16):102–112. <https://doi.org/10.25587/SVFU.2020.16.49746>

Torgovkin Y.I., Shestakova A.A. Spatial analysis of cryogenic forms of the relief in the northern part of the Leno-Amga interfluvium: the case of alases in the Ust-Aldansky District. *Vestnik of North-Eastern Federal University Series "Earth Sciences"*. 2019;4(16):102–112. (In Russ.). <https://doi.org/10.25587/SVFU.2020.16.49746>

6. Фотиев С.М. Геокриологические летописи Сибири. *Криосфера Земли*. 2009;13(3):3–16.

Fotiyev S.M. Geocryological chronicles of Siberia. *Kriosfera Zemli*. 2009;13(3):3–16. (In Russ.)

7. Ulrich M., Matthes H., Schmidt J., et al. Holocene thermokarst dynamics in Central Yakutia – A multi-core and robust grain-size endmember modeling. *Quaternary Science Reviews*. 2019;218:10–33. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.06.010>

8. Качурин С.П. *Термокарст на территории СССР*. М.: Изд-во АН СССР; 1961. 291 с.

Kachurin S.P. *Thermokarst on the territory of the USSR*. Moscow: USSR Academy of Sciences Publishing House; 1961. 291 p. (In Russ.)

9. Andreev A.A., Klimanov V.A., Sulerzhitsky L.D. Younger Dryas pollen records from central and southern Yakutia. *Quaternary international*. 1997;41(42):111–117.

10. Andreev A.A., Tarasov P.E. Northern Asia. In: Elias S.A. (ed.). *The Encyclopedia of Quaternary Science*, 4. Elsevier, Amsterdam. 2013, pp. 164–172. <https://doi.org/10.13140/2.1.3263.3929>

11. Fradkina A.F., Alekseev M.N., Andreev A.A., Klimanov V.A. East Siberia. In: Velichko A.A., Nechaev V.P. (eds.). *Cenozoic Climatic and Environmental Changes in Russia. The Geological Society of America*. London; 2005, pp. 105–120.

12. Андреев А.А. История растительности и климата Центральной Якутии в голоцене и позднеледниково. В кн.: *Материалы международной конференции «Озера холодных регионов»*. Часть 4: Вопросы палеоклиматологии, палеолимнологии и палеоэкологии. Якутск; Изд-во Якутского университета; 2000. С. 15–19.

Andreev A.A. History of vegetation and climate of Central Yakutia in the Holocene and Late Glacial. In: *Proceedings of the Lakes of Cold Regions International Conference. Part 4: Paleoclimatology, paleolimnology and paleoecology issues*. Yakutsk: Yakutsk State University Publishing House; 2000, pp. 15–19. (In Russ.)

13. Ершов Э.Д., Гарагуля Л.С., Гордеева Г.И. и др. *Основы геокриологии*. Ч. 6. Геокриологический прогноз и экологические проблемы в криолитозоне. М.: Изд-во МГУ; 2008. 768 с.

Ershov E.D., Garagulya L.S., Gordeeva G.I., et al. *Fundamentals of geocryology. Part 6. Geocryological fore-*

cast and environmental problems in the permafrost zone. Moscow: MSU Publishing House; 2008. 768 p. (In Russ.)

14. *Научно-прикладной справочник по климату СССР, выпуск 24, часть II, IV*. Л.: Гидрометеониздат; 1989.

Scientific and applied reference book on the climate in the USSR. Issue 24, Part II, IV. Leningrad: Hydrometeorological Publishing House; 1989. (In Russ.)

15. *Справочник по климату СССР, выпуск 24, часть II, IV*. Л.: Гидрометеониздат; 1968.

Handbook on the climate of the USSR. Issue 24, Part II, IV. Leningrad: Hydrometeorological Publishing House; 1968. (In Russ.)

16. *Справочно-информационный портал «Погода и климат»*. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru>

Reference and information portal "Weather and Climate". URL: <http://www.pogodaiklimat.ru>

17. *Специализированные массивы для климатических исследований*. URL: <http://aisori-m.meteo.ru>

Specialized arrays for climate research. URL: <http://aisori-m.meteo.ru>

18. Турбина М.И. Оценка геокриологических условий долины средней Амги в связи с сельскохозяйственным освоением территории (на примере района с. Бетюнь). В кн.: Павлов А.В. (ред.). *Термика почв и горных пород в холодных регионах: Сборник научных трудов*. Якутск: ИМ СО АН СССР; 1982. С. 135–141.

Turbina M.I. Assessment of the geocryological conditions of the Middle Amga valley in connection with the agricultural development of the territory (on the example of the area of the village of Betyun). In: Pavlov A.V. (ed.). *Thermals of soils and rocks in cold regions: Collection of research papers*. Yakutsk: Permafrost Institute SB AS USSR; 1982, pp. 135–141. (In Russ.)

19. Турбина М.И. Сельскохозяйственное освоение ландшафтов с подземными льдами в Центральной Якутии. В кн.: Возин В.Ф. (ред.). *Охрана природы Центральной Якутии: Сборник научных трудов*. Якутск: ЯФ СО АН СССР; 1985. С. 31–42.

Turbina M.I. Agricultural development of landscapes with underground ice in Central Yakutia. In: Vozin V.F. (ed.). *Nature Protection of Central Yakutia: Collection of research papers*. Yakutsk: YaF SB AS USSR; 1985, pp. 31–42. (In Russ.)

20. Босиков Н.П. Изменение климата и эволюция термокарстовых образований. В кн.: Балобаев В.Т. (ред.). *Влияние климата на мерзлотные ландшафты Центральной Якутии*. Якутск: ИМЗ СО РАН; 1996. С. 106–122.

Bosikov N.P. Climate change and evolution of thermokarst formations. In: Balobaev V.T. (ed.). *Influence of climate on the permafrost landscapes of Central Yakutia*. Yakutsk: Permafrost Institute SB RAS; 1996, pp. 106–122. (In Russ.)

21. Гаврильев Р.В. *Теплофизические свойства горных пород и напочвенных покровов криолитозоны*. Новосибирск: Изд-во СО РАН; 1998. 280 с.

Gavriliev R.V. *Thermophysical properties of rocks and ground covers in the permafrost zone*. Novosibirsk: Publishing House SB RAS; 1998. 280 p. (In Russ.)

22. Фельдман Г.М., Тетельбаум А.С., Шендер Н.И. и др. *Пособие по прогнозу температурного режима грунтов Якутии*. Якутск: Изд-во ИМЗ СО АН СССР; 1988. 240 с.

Feldman G.M., Tetelbaum A.S., Shender N.I., et al. *Handbook on the forecast of the temperature regime of the soils of Yakutia*. Yakutsk: Permafrost Institute SB AS USSR; 1988. 240 p. (In Russ.)

23. Новоприезжая В.А., Федоров А.Н. Модельная реконструкция грунтов Центральной Якутии в голоцене. В кн.: Мотенко Р.Г. (ред.). *Сборник докладов Шестой конференции геокриологов России «Мониторинг в криолитозоне» с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов, г. Москва, 14–17 июня 2022 г. М.: «КДУ», «Добросвет», 2022. С. 9020906.*

Novopriyehzhaya V.A., Fedorov A.N. Model reconstruction of soils of Central Yakutia in the Holocene. In: Motenko R.G. (ed.) *Collection of reports of the Sixth Conference of geocryologists of Russia with participation of Russian and foreign scientists, engineers and specialists, June 14–17, 2022*. Moscow: University Book House, Dobrosvet; 2022, pp. 902–906.

24. Самсонова В.В., Федоров А.Н. Анализ мерзлотно-климатической динамики криогенных геосистем Центральной Якутии в голоцене средствами численного геокриологического прогноза. В кн.: *Климат и мерзлотные экосистемы: Труды Девятого международного симпозиума «Баланс углерода, воды и энергии и климат бореальных и арктических регионов с особым акцентом на Восточную Евразию», посвященного 25-летию начала совместных Российско-Японских исследований по изучению изменения климата в криолитозоне, г. Якутск, 1–4 ноября 2016*. Якутск; 2016. С. 232–235.

Samsonova V.V., Fedorov A.N. Analysis of permafrost-climatic dynamics of cryogenic geosystems in Central Yakutia in the Holocene by means of numerical geocryological forecasting. In: *Climate and permafrost ecosystems: Proceedings of IXth International Symposium "C/H₂O/energy balance and climate over the boreal and Arctic regions with special emphasis on Eastern Eurasia" dedicated to the 25th anniversary of the joint Russian-Japanese research on climate change in the cryolithozone, Yakutsk, 1–4 November 2016*. Yakutsk; 2016, pp. 232–235. (In Russ.)

25. Величко А.А. *Климаты и ландшафты Северной Азии в условиях глобального потепления. Ретроспективный анализ и сценарии. Вып. III*. М.: ГЕОС; 2010. 220 с.

Velichko A.A. *Climates and landscapes of Northern Eurasia under conditions of global warming. Retrospective analysis and scenarios. Issue III*. Moscow: GEOS; 2010. 220 p. (In Russ.)

26. Климанов В.А. Палеоклимат Северной Евразии при повышении среднеглобальной температуры

на 0,6–0,8 °С. В кн.: *Климаты и ландшафты Северной Евразии в условиях глобального климата. Ретроспективный анализ и сценарии. Вып. III*. М.: ГЕОС; 2010. С. 70–86.

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

27. Босиков Н.П. Аласность Центральной Якутии. В кн.: Некрасов И.А., Климовский И.В. (ред.). *Геокриологические условия в горах и на равнинах Азии*. Якутск: Ин-т мерзлотоведения; 1978. С. 113–118.

Bosikov N.P. Alasnost of Central Yakutia. In: Nekrasov I.A., Klimovskii I.V. (eds.) *Geocryological condi-*

tions in the mountains and plains of Asia. Yakutsk: Permafrost Institute, 1978, pp. 113–118. (In Russ.)

28. Каплина Т.Н. Аласные комплексы Северной Якутии. *Криосфера Земли*; 2009;13(4):3–17.

Kaplina T.N. Alas complexes of North Yakutia. *Kriosfera Zemli*. 2009;13(4):3–17. (In Russ.)

29. Katamura F., Fukuda M., Bosikov N.P., et al. Thermokarst formation and vegetation dynamics inferred from a palynological study in central Yakutia, Eastern Siberia, Russia. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 2006; 38(4):561–570.

30. Katamura F., Fukuda M., Bosikov N.P., Desyatkin R.V. Charcoal records from thermokarst deposits in central Yakutia, eastern Siberia: Implications for forest fire history and thermokarst development. *Quaternary Research*. 2009;71:36–40.

Об авторах

НОВОПРИЕЗЖАЯ Варвара Андреевна, младший научный сотрудник, аспирант, <https://orcid.org/0000-0003-4632-9840>, SPIN: 4245-5312, e-mail: schwarz999@mail.ru

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

Вклад авторов

Новоприезжая В.А. – разработка концепции, методология, верификация данных, проведение исследования, администрирование данных, создание черновика рукописи, редактирование рукописи, визуализация

Федоров А.Н. – разработка концепции, редактирование рукописи, руководство исследованием, администрирование проекта, получение финансирования

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

NOVOPRIEZZHAYA, Varvara Andreevna, Junior Researcher, Post-Graduate Student, <https://orcid.org/0000-0003-4632-9840>, SPIN: 4245-5312, e-mail: schwarz999@mail.ru

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

Authors' contribution

Novopriezzaya V.A. – conceptualization, methodology, validation, investigation, data curation, writing original draft, editing, visualization

Fedorov A.N. – conceptualization, editing, supervision, project administration, funding acquisition

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 03.11.2023

Поступила после рецензирования / Revised 20.02.2024

Принята к публикации / Accepted 23.04.2024

УДК 911.2

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-235-247>

Оригинальная статья

Техногенная трансформация поймы р. Лена в районе г. Якутск и оценка нарушенности ее ландшафтов

В. В. Сурков[✉], А. С. Завадский, Е. А. Тузова

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация

[✉]vita.surkov@yandex.ru

Аннотация

Долина Туймаада в районе г. Якутск – наиболее освоенная часть поймы р. Лена. Ландшафтные исследования, проведенные здесь в 2016–2022 гг., показали значительную степень ее техногенной трансформации: сильную и среднюю степень нарушенности имеет 30,4 % урочищ. Основным вектором развития ее ландшафтов была смена лесных урочищ луговыми в результате многовекового пастбищного использования поймы. Современная тенденция эволюции – смена сельскохозяйственных урочищ селитебными, что усиливает механические нарушения ландшафтной структуры. Водозащитные дамбы вывели значительные площади левобережной поймы из зоны затопления; в результате часть ее урочищ заболачивается или подтапливается, часть превращается в сухие пустыри с малоценными остепненными лугами. В настоящее время на стадии обоснования инвестиций прорабатывается вопрос комплексной защиты всей левобережной части долины Туймаада от негативного воздействия половодий и паводков. В условиях дальнейшего ее освоения следует предусматривать не только защитные, но и природоохранные мероприятия, и меры по благоустройству существующих и новых городских, дачно-коттеджных и хозяйственно-технических зон на формирующейся техногенной террасе.

Ключевые слова: поймы рек, ландшафты, техногенная трансформация ландшафта, экология поймы, река Лена, долина Туймаада

Финансирование. Анализ и обобщение данных выполнены по государственному заданию (№ 121051100166-4) Научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева МГУ им. М.В. Ломоносова.

Благодарности. Авторы выражают признательность Академии наук Республики Саха (Якутия) за научно-информационное и техническое содействие при проведении экспедиционных исследований.

Для цитирования: Сурков В.В., Завадский А.С., Тузова Е.А. Техногенная трансформация поймы р. Лена в районе г. Якутск и оценка нарушенности ее ландшафтов. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(2):235–247. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-235-247>

Original article

Technogenic transformation of the Lena River floodplain near Yakutsk and assessment of landscape disturbance

Vitaly V. Surkov[✉], Alexandr S. Zavadsky, Elizaveta A. Tuzova

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

[✉]vita.surkov@yandex.ru

Abstract

The Tuymaada Valley located in the Yakutsk region represents the most developed region within the Lena River floodplain. Landscape studies conducted here between 2016 and 2022 revealed a significant level of technogenic transformation: 30.4 % of its sites showed a high and moderate degree of disturbance. The primary driver of landscape development was the transformation of forested areas into meadows due to centuries of grazing in the floodplain. The current trend in evolution involves replacing agricultural stows with residential ones, leading to an increase in mechanical disturbances to the landscape structure. Water protection dams have removed significant areas of the left-

bank floodplain from the flood zone. Consequently, some of its stows become swamped, while others transform into dry wastelands with low-value steppe meadows. Currently, at the investment justification stage, the issue of providing comprehensive protection for the entire left bank of the Tuymaada valley from the adverse effects of floods and inundations is under consideration. For its continued growth, it is essential to implement not just protective measures but also environmental and improvement measures for both existing and new urban, rural, and economic-technical zones on the developing technogenic terrace.

Keywords: river floodplains, landscapes, technogenic transformation of the landscape, floodplain ecology, Lena River, Tuymaada Valley

Funding. Analysis and synthesis of data were conducted within the state assignment (No. 121051100166-4) for the Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Channel Processes at Lomonosov Moscow State University.

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia) for their support in scientific, informational, and technical aspects during the expeditionary research.

For citation: Surkov V.V., Zavadsky A.S., Tuzova E.A. Technogenic transformation of the Lena River floodplain near Yakutsk and assessment of landscape disturbance. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(2):235–247. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-235-247>

Введение

Техногенные террасы создаются на месте пойм, затопление которых, даже нерегулярное, исключено [1, 2]. Они образуются при регулировании стока реки гидроузлами, изъятии его части на орошение и водопотребление, обваловании поймы, сооружении насыпных площадок и антропогенно обусловленном врезании русла. Техногенные террасы характерны для селитебных и сельскохозяйственных территорий с противопаводковой защитой (Хуанхэ, Кубань, Темза), они широко распространены в нижних бьефах ГЭС (Обь, Иртыш), встречаются на отрезках русел с карьерами (Ока, Томь), на реках с управляемым водным режимом (Москва, нижний Неман). Они активно эксплуатируются, их природно-техногенные урочища принципиально отличны от природных комплексов пойм. Техногенные террасы хорошо изучены, в том числе в ландшафтном отношении [3–6]. Выход бывшей поймы из зоны затопления сопровождается ее обсыханием, в некоторых случаях, при ее обваловании, – заболачиванием. Оба процесса неблагоприятны и требуют корректировки водного режима поймы, в том числе инженерными средствами – строительством каналов, дренажных и оросительных сетей, водорегуляторов, шлюзов, дамб, отводов.

Освоение пойм создает новые техногенные террасы, в том числе на широких поймах больших рек. С 60-х гг. XX в. такая терраса, огражденная от русла реки водозащитными дамбами, формируется на левобережье Лены в г. Якутск; причина обвалования поймы – бурный рост города и его населения. Разрабатывается проект полного перекрытия левобережной поймы в долине Туймаада: противопаводковая дамба длиной 64 км

протянется от Табагинского до Кангаласского мыса, перекрывая левобережные рукава реки. Предлагаемая статья обобщает многолетние исследования ландшафтов поймы р. Лена, в том числе в г. Якутск, и характеризует экологическое состояние поймы на современном этапе – при наличии частичного водозащитного периметра.

Материалы и методы

Ландшафтные исследования. Основной методикой работ стали натурные ландшафтные исследования поймы р. Лена, проводившиеся в 2016–2022 гг. по классической методике [7, 8]. Она предполагает крупномасштабное (1:10000–1:25000) ландшафтное профилирование долины, картирование ключевых участков и трансектов, анализ полученных карт и профилей, позволяющий провести комплексное изучение природных ландшафтов, оценить степень их антропогенного преобразования, экологическое состояние территории, выявлять техногенные объекты и результаты их воздействия на ландшафты поймы. Натурные изыскания дополнялись дешифрированием аэро- и космических снимков, картографического материала, в том числе исторического, анализом имеющихся научных, литературных и фондовых материалов.

Большое внимание уделялось динамике природных комплексов, степени их изменения, связанной с сельскохозяйственной деятельностью и строительством городских кварталов и дачных поселков; изучалось влияние на природные комплексы существующих техногенных объектов. Исследовалось затопление поймы, состояние водных объектов; картировалась пойменная растительность как наиболее подвижный компонент природного комплекса.



Рис. 1. Схема техногенной нарушенности пойменных урочищ (фрагмент): 1 – условно-коренные урочища, 2 – слабая степень нарушения, 3 – средняя степень нарушения, 4 – сильная степень нарушения, 5 – техногенные урочища

Fig. 1. Scheme of technogenic disturbance of floodplain stows (fragment): 1 – conditionally primary stows, 2 – weak degree of disturbance, 3 – medium degree of disturbance, 4 – strong degree of disturbance, 5 – technogenic stows

В общей сложности было исследовано 3,1 тыс. км² пойменных территорий между г. Покровск и устьем р. Алдан, в наибольшей степени – долина Туймаада между Табагинским и Кангаласским мысами. Была проведена нивелировка и ландшафтное описание 18 морфостворов (трансект) длиной 2–20 км через пойму Лены, дополнительно вне трансектов выполнено 1548 точек описания природных и природно-техногенных комплексов и 3000 фотопикетов, составлены ландшафтные карты и карты нарушенности урочищ (рис. 1). Точки описания охватывают практически все природные и природно-техногенные комплексы ранга урочищ на исследуемой территории. Были описаны большинство техногенных объектов: защитные сооружения в г. Якутск, насыпи проходящих по пойме автодорог, массово строящиеся дачные поселки, промышленные и гражданские объекты в пригородах Якутска, городские кварталы Якутска, Жатая и Пригородного. Установлена сложная ландшафтная структура поймы – между п. Бестях и устьем р. Алдан она включает три сопряженных ландшафта, которые отличаются друг от друга по ширине поймы, ее высоте и морфологии, почвенно-растительному покрову, освоенности, техногенной

нарушенности и набору подчиненных урочищ; последних насчитывается более 8,5 тысяч 30 видов.

Урочища стали основными объектами картирования и изучения; это природные территориальные комплексы, состоящие из генетически связанных *фаций* (элементарных комплексов с однородной структурой) и занимающие целиком мезоформу рельефа (пойменную гриву, межгривное понижение, элементарный остров, озерную котловину, выровненный пойменный массив, ограниченный ложбинами и т. д.). Вследствие этого они легко распознаются на местности и читаются на аэро- и космоснимках [7]. Сложнее выделять природно-техногенные урочища на селитебных территориях со спланированным рельефом. На первый план здесь выходят неоднородность застройки и ее функциональное назначение (жилая, промышленная, многоэтажная, усадебная). Кварталы зданий, шоссе, палисадники, скверы, парки – в этом случае являются фациями в составе урочищ.

Экспресс-оценка техногенной нарушенности ландшафтов была разработана авторами для исследования воздействия линейных коммуникаций (дорог, трубопроводов) на ландшафтную структуру [9, 10]; но впоследствии неоднократно

но применялась как показатель экологического состояния особо охраняемых территорий [11] и пойменных ландшафтов [1]. Вначале по визуальным признакам оценивается нарушенность простых или элементарных морфологических частей ландшафта – фаций или урочищ – по пяти градациям (условно-коренные, слабо-, средне-, сильнонарушенные и техногенные ПТК), затем в рамках ландшафта или исследуемой территории показатели каждой градации суммируются, по количеству или площади, вычисляются их процентное соотношение и общий показатель нарушенности в целом. Эта экспресс-оценка во многом субъективна, но дает вполне удовлетворительные результаты. Признаки каждой градации раскрываются в следующем разделе.

Результаты исследований

Результатами проведенных исследований стали: конкретизация условий развития ландшафтных структур дна долины р. Лена в районе г. Якутск, определение общего вектора развития ландшафтов и установление их нарушенности по разработанной ранее авторами методике.

На исследованной территории дна долины р. Лена выделено три ландшафта, которые отличаются друг от друга по ширине и конфигурации поймы, ее высоте и морфологии, почвенно-растительному покрову, освоенности и нарушенности. Основным критерием их обособления являются параметры дна долины – его ширина и конфигурация, которые определяют высоту половодья, особенности затопления поймы и накопления осадков на ее поверхности, русловые процессы и, в конечном итоге, рельеф, ярусность почвенно-растительного покрова поймы и внутриландшафтную структуру урочищ.

Верхний по течению ландшафт (Мохсогдохско-Синский) расположен в пределах Лено-Алданского (Приленского) плато и протягивается от г. Покровск далеко вверх по течению, до п. Исит выше Ленских столбов, где аккумулятивные острова практически исчезают из врезанного в коренные породы русла реки. В исследованную территорию входит лишь его северо-восточная часть. Пересекая Приленское плато с широким распространением кембрийских карбонатных пород, Лена развивает, за счет их выщелачивания, глубинную эрозию и формирует выше г. Покровск узкую (от 4 до 12 км) долину, с ограниченной крутыми и обрывистыми уступами коренных берегов и высоких цокольных

надпойменных террас, преимущественно правобережной поймой шириной 0,5–2,8 км. Крупные островные массивы также тяготеют к правому берегу. На левобережье вдоль уступов коренных берегов протягиваются лишь зарастающие песчано-щебнистые бечевники и незначительные по площади ленточные низкие (3–5 м над меженным уровнем) цокольные молодые поймы.

Средний по течению пойменный ландшафт (Якутский) расположен на границе Центрально-Якутской низменности и Лено-Алданского плато. Смена геоморфологических и геологических структур сопровождается резким расширением долины. Дно долины здесь четковидное, включающее два расширения – верхнее Октемцовское (долина Эркээни) и нижнее Якутское (долина Туймаада), разделенные правобережными мысами у с. Табаги и п. Кангалассы. Здесь преобладают условия свободных русловых деформаций; резкое расширение долины при большом стоке наносов способствует снижению транспортирующей способности потока; это, в свою очередь – формированию сложноразветвленного русла и образованию широкой, 10–14 км (учитывая ширину самого русла) поймы. *Нижний ландшафт, Кангаласско-Алданский*, протягивающийся от Кангаласского мыса до устья р. Алдан, расположен полностью в пределах Центрально-Якутской низменности. Пойма здесь двусторонняя, шириной 9–15 км; ниже п. Маймага она раструбообразно расширяется к устью Алдана до 20 км и более.

Условия формирования ландшафтной структуры в районе г. Якутск. Долина Туймаада – расширение дна долины р. Лена между Табагинским (верхним по течению) и Кангаласским (нижним) мысами размером 70×15–20 км – наиболее хозяйственно освоенный долинный комплекс на территории Якутии. Здесь проживает 40 % населения республики – 380 из 975 тыс. чел., находятся ее столица Якутск (324 тыс. жит.), крупные города и поселки. Сосредоточение техногенной инфраструктуры в небольшом по площади очаге предполагает значительную трансформацию ее природных комплексов.

По основным морфологическим признакам русло Лены врезается [12], формируя ступенчатую пойму; ступени образуют разновозрастные генерации, различающиеся по рельефу и почвенно-растительному покрову. Первая ступень – прирусловая островная пойма, покрытая ивняками, березняками и кустарниками. Ее высота 5–7 м над меженным уровнем; некоторые острова до-

стигают отметок 8–8,4 м. Вторую ступень (центральную луговую пойму) образуют консолидированные островные массивы, в том числе присоединенные к берегу, высотой 7–9 м. Третья ступень, высокая притеррасная пойма, занимает тыловые части береговых массивов. Ее поверхность гривистая, с отметками 8–11 м над меженным уровнем, редко затапливаемая. Ступень застроена, за пределами селитебных территорий используется как пастбище, и естественных урочищ на ней почти не сохранилось. С третьей ступенью поймы генетически связана (их рельеф одинаков) I надпойменная терраса, образующая четвертый уровень высотой 11–17 м. В Якутске и его дачных пригородах рельеф террасы выровнен при застройке – здесь остались лишь контуры сегментов и межсегментные понижения со старичными озерами. Вне городской территории на террасе господствуют остепненные дигрессионные луга, в тыловых депрессиях – озера, осоковые и хвощовые болота, заболоченные ивово-березовые мелколесья. Остепненные луга привлекают обилием цветков прострела *Pulsatilla orientalisibirica*, появляющихся с таянием снега; для населения они имеют почти сакральное значение.

Сергеляхская (вторая надпойменная) терраса распространена по левобережью р. Лена неширокими (1–4 км) фрагментами вдоль уступа коренного берега. Гривы и гряды террасы возвышаются над меженным урезом Лены на 14–20 м; понижения также лежат выше максимально возможных уровней затопления, даже заторного происхождения. Бровка выражена уступом высотой 3–5 м, кое-где в городских кварталах сnivelированным, над поверхностью первой террасы. Вдоль уступа просматривается извилистое понижение шириной 200–500 м, занятое системой озер (Сайсары, Белое, Сергелях, Янит, Соленое) с глубинами до 6 м. Аллювий террасы представлен базальным галечником и песками, крупность которых уменьшается вверх по разрезу. Пески перекрыты маломощной (1–1,5 м) толщей суглинков и супесей, иногда с прослоями торфа. Мощность аллювия составляет 18–33 м, его подошва лежит ниже современного меженного уреза Лены [13, 14].

Формально терраса не относится к днищу долины, но включена в черту города (на ней расположены мкр. Сергелях, ГИМЕИН, Поселок Геологов, Строительный и Сайсарский округа, часть мкр. Мархи), и ее природно-техногенные комплексы также стали объектом исследования. В прош-

лом террасу покрывали сосновые леса, сейчас большая ее часть уже застроена. Парковые сосняки, чередующиеся с дачными участками, сохранились в западной части Якутска в микрорайонах Борисовка, Сергелях и др., останком прежних лесов является парк культуры и отдыха им. Гагарина у стадиона «Туймаада».

Современный вектор эволюции ландшафтной структуры в долине Туймаада – смена сельскохозяйственных и остатков лесных, луговых и болотных урочищ селитебными. До 50-х гг. XX в. Якутск был небольшим городом с населением менее 60 тыс. чел. С 1950 по 2020 г. его территория возросла десятикратно при росте населения в 5,6 раза (рис. 2). Левобережье застраивается многоэтажными и усадебными кварталами, быстро расширяется дачная периферия, возводятся фермы, теплицы, многоцелевые базы отдыха, сельскохозяйственно-торговые предприятия, промышленные кластеры. При освоении возникает много «ландшафтных сорняков» – замусоренных и заболоченных пустырей с канавами, отвалами грунтов, помойками и ветхими лачугами. Благоустройство городской территории еще оставляет желать лучшего и требует внимания.

Пойма р. Лена в Якутском расширении затапливается регулярно, но на короткое время. При ледовых заторах вода поднимается на 11–13 м, под воду уходит не только пойма, но и пониженные участки первой надпойменной террасы. Сейчас разливы на левобережной пойме ограничивают почти 75 км дамб, дорожных насыпей, набережных, перекрывающих доступ воды на третью ступень поймы. Защитный периметр уменьшил ширину разлива в районе Якутска на 1,3–1,8 км (на 15 %), выше и ниже города – на 3–5 км (20–30 %).

Тенденции развития Якутского ландшафта. Строительство защитного периметра неоднозначно сказалось на природно-техногенных системах поймы. Две низкие ступени поймы по-прежнему регулярно затапливаются и промываются, условия развития природных комплексов здесь не изменились. Часть массивов третьей ступени поймы сохранила гидравлическую связь с руслом реки, вода заходит на них через устья ложбин. Транзитный поток здесь не возникает, но воды половодья свободно стекают в реку, вследствие чего эти массивы имеют хороший дренаж и слабую заболоченность.

В центральной и северной частях Якутска возникли изолированные бассейны, огражден-

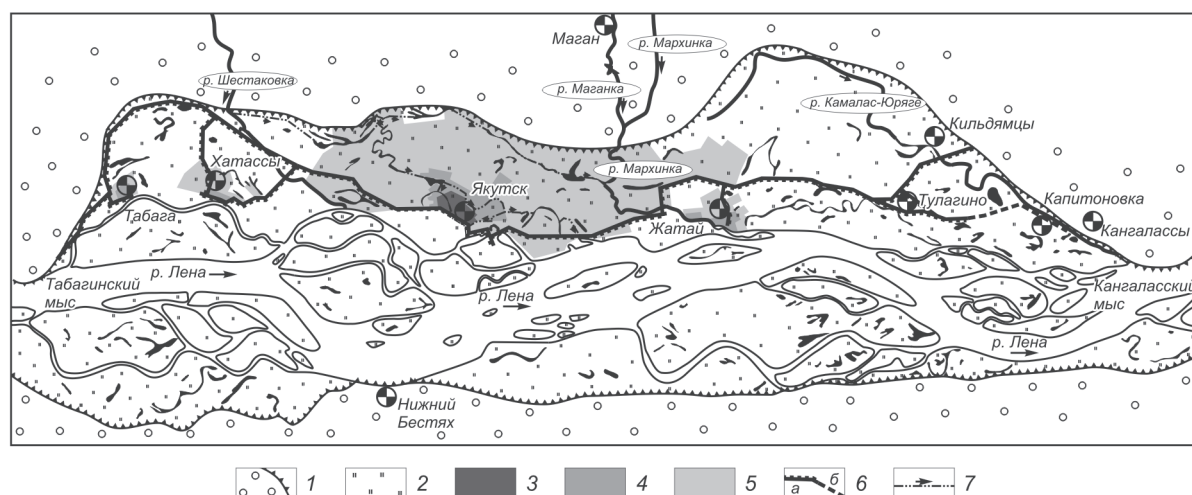


Рис. 2. Рост г. Якутск (застроенные территории) и защитный периметр: 1 – коренной берег, 2 – дно долины (пойма и низкие террасы: Якутская (I) и Сергеляхская (II)), 3 – застроенная территория в 1890 г., 4 – площадь застройки в 1955 г., 5 – селитебная территория в 2020 г., 6 – внешние защитные дамбы и поднятые насыпи автодорог (а – не переливаемые в половодье, б – переливаемые), 7 – городской канал, направление течения

Fig. 2. Growth of Yakutsk (built-up areas) and protective perimeter: 1 – valley side, 2 – valley bottom (floodplain and low terraces: Yakutskaya (I), and Sergelyakhskaya (II)), 3 – built-up area in 1890, 4 – building area in 1955, 5 – residential area in 2020, 6 – external protective dams and raised road embankments: а – not overflowing during floods, б – overflowing, 7 – city canal, direction currents

ные дамбами. Их затопление речными водами исключено, но и сток в реку выпадающих осадков почти невозможен. При близком залегании мерзлых грунтов здесь развивается заболачивание, а уровни воды в пойменных озерах на 2–5 м выше меженного уровня воды в реке. Непроточность, кроме ухудшения экологического состояния озера и ложбин, способствует подтоплению городской территории, при ливнях превращает улицы и дворы в мутные потоки и озера. Излишнее увлажнение поймы увеличивает глубину сезонного оттаивания мерзлоты, снижает устойчивость грунтов к техногенным нагрузкам. Некоторые изолированные бассейны, затопление которых прекратилось (у поселков Табага и Жатай), трансформируются в сухие пустыри: оставшиеся озера высыхают, растительность выбивается пастбищной дигрессией. Обсыхает Табагинское болото, разбитое грейдерами на изолированные массивы.

С 90-х гг. XX в. властями и организациями Якутска проводятся работы по устранению негативных процессов на городской территории: выполнена инвентаризация городских озера, реконструирован водосброс из оз. Сайсары в Городскую протоку, очищены днища и берега озера от ила и мусора, в новых кварталах прокладываются

дренажные каналы, восстанавливается городской канал, предназначенный для регулирования уровней озера. Но этого недостаточно, дренажная система нуждается в реконструкции и улучшении, а экологическое состояние многих озера остается неудовлетворительным.

Рост селитебной территории создает механические нарушения ландшафтной структуры; создаются природно-техногенные территориальные комплексы. *Урочища с кварталами многоэтажной городской застройки с асфальтированными улицами, жилыми и общественными зданиями, торговыми комплексами, промышленными предприятиями сосредоточены на старой территории Якутска. Поверхность здесь выровнена, много отсыпок и искусственных площадок; пойменные ложбины засыпаны, разделены на изолированные отрезки с озерами и тростниковыми болотами. Застройка чередуется со скверами с березой, ивой, акацией, шиповником, реже – с елью и лиственницей, в дворовых и парковых посадках – с тополем душистым, свидиной, смородиной, иногда – боярышником, венгерской сиренью и яблоней *Malus baccata*.*

Ошибки в эксплуатации зданий сопровождаются разрушением мерзлоты, снижением устойчивости грунтов, нередко авариями. Этому спо-

собствует плохой дренаж низменных и плоских урочищ, ослабленный разрушением естественной сети пойменных ложбин.

Урочища с малоэтажной застройкой усадебного типа преобладают на окраинах Якутска (районы Марха, Сергелях, Строительный, Сайсарский округа, район ГРЭС) и в крупных поселках. Застройка ведется по гривам; межгривные ложбины сохраняются, но перекрываются насыпями автодорог. В результате наблюдаются заболачивание ложбин и подтопление берегов, часто занятых свалками и хибарами, заболачивание дворов из-за постоянно высокого уровня воды в старичных озерах. Обращают на себя внимание запредельно большая плотность деревянной застройки (при колоссальном резерве свободных площадей) и общая неблагоустроенность территории – давно не отремонтированные улицы и проезды, проблемы с водой, недостаточно развитая инфраструктура, ветхость жилья.

Урочища с сельской малоэтажной застройкой находятся в лучшем состоянии: плотность застройки здесь меньше, палисадники с елями, березами и кустарниками скрывают ветхие дома. В последние годы в поселках появилось немало благоустроенных коттеджей и общественных зданий. Ложбины с озерами здесь не перегораживаются, чем сохраняется хороший дренаж поймы. Села имеют разбросанную планировку: гривы с улицами разделяются низинами-пустырями, которые велик соблазн использовать как помойки, свалки крупного мусора, строительных отходов, ржавого железа, навоза с ферм. Замусоренные, утопающие в грязи ложбины есть почти в каждом поселке. Проблема сельских урочищ – застройка периферийных низких грив, часто затопляемых, и руины давно не используемых ферм, складов, лесопилок, технических строений, создающие очаги экологического неблагополучия.

Урочища с коттеджно-дачной застройкой образуют северную и южную периферию Якутска. Сейчас их площадь стремительно растет. Коттеджные поселки не являются очагами экологической напряженности, – они новые, с относительно хорошими дорогами, газификацией; здесь нет руин и замусоренных ложбин; по периферии – не выбитые пастбища, а эстетически красивые лесные и луговые комплексы. Урочища городских технических территорий в большинстве случаев являются «ландшафтными сорняками» – злаково-сухотравными (в ложбинах и депрессиях – заболоченными тростниковыми)

замусоренными пустырями вокруг технических объектов, ферм, предприятий.

Вне селитебной зоны произошла смена лесного эволюционного ряда природных комплексов лугово-кустарниковым. В долине Туймаада в результате многовекового пастбищного использования лесные урочища, сменяющие друг друга в зависимости от высоты над меженным уровнем (ивняки – ивово-ольховые леса – ольшаники – березняки – сосняки на песках или лиственнично-еловые леса на суглинках), замещены подвижным рядом лугово-кустарниковых сообществ. В 50–80-е годы XX в. здесь даже проводились мероприятия по улучшению сенокосов и пастбищ, включавшие, в том числе, вырубку, раскорчевку кустарников и их уничтожение гербицидами.

На второй ступени поймы низкие уровни (3–5 м над меженным урезом) в днищах старичных понижений занимают хвощовые и тростниковые болота. На склонах ложбин и в депрессиях с отметками 5,0–6,5 м их сменяют осоковники. В их травостое присутствует более 40 видов, но основной фон дают осоки – двурядная и острая. Луговые комплексы включают три градации – сырые (располагаются на отметках 6,5–8 м) лисохвостные, полевицевые и ячменниковые луга, разнотравно-бобово-злаковые луга среднего увлажнения (от 7,5 до 8,5 м), сухие и остепненные (более 8,5 м) луга, эдификаторы которых – лилия желтая, астры, полевица Триниуса, келерия степная, полыни, подмаренники, гвоздики, люцерна, вострец пушистостоловый, осока твердоватая, мышиный горошек.

Луговые комплексы третьей ступени и надпойменной террасы уже можно считать условно-коренными, так как в условиях пастбищного сельского хозяйства они существуют многие десятилетия. Гривы низких сегментов (9–10 м), сложенные суглинками, занимают пастбищно-сенокосные луга среднего увлажнения (мятликовые, пырейные, ячменные) с горошками, чиной и богатым разнотравьем: лилией желтой, колокольчиками, геранями, астрами, подмаренниками и др., местами с осоковыми лугами в небольших ложбинах. Песчаные высокие (более 10 м) гривы покрыты сухими остепненными лугами (келериевыми, вострецовыми) с подавляющим превосходством степных видов.

Усиливается пастбищная дигрессия. Урочища с дигрессионными лугами распространены повсеместно, особенно – на третьей ступени поймы. Злаковые, полынные, обедненные луга со

значительным участием сорных и непоедаемых видов, проективным покрытием 40–50 % и высотой травостоя не более 5 см – основной фон не только высоких грив древней поймы, но они встречаются и в приустьевье, даже на относительно низких (6–6,5 м над урезом) отметках. На пастбищах травостой выбивается и поедается до корней, разрушаются дернина и верхние горизонты почв, что иногда приводит к развеванию песков. Вблизи населенных пунктов и у заброшенных ферм создаются луговые пустыри с руинами и остатками загонов. Пастбищная дигрессия разрушает старичные и межгрядные ложбины: скот перемешивает грунт, превращая днище ложбины в глинистый такыр.

Техногенная нарушенность урочищ. К естественным (условно-коренным) фациям и урочищам относятся природные комплексы, не используемые в хозяйстве, почти полностью сохранившие зональный (в поймах – ярусный) почвенно-растительный покров, соответствующий

условиям затопления, увлажнения, литологическому составу поверхностных отложений. Нарушения структуры – единичные тропы, грунтовые дороги, вырубki, канавы, стоянки, легкие строения занимают не более 5 % территории урочища, не влияют на режим увлажнения и не ухудшают санитарное состояние природного комплекса. К ним относятся лесные урочища островов приустьевой поймы. Условно-коренными являются природные комплексы ложбин с хвощовыми и осоковыми болотами, озерами и ленточными ивняками. Условно-коренными можно считать урочища второй и третьей ступеней поймы с закустаренными лугами: сырыми и заболоченными осоковыми, среднего увлажнения с богатым цветущим разнотравьем (рис. 3, а), сухими остепненными. Они существуют в ландшафтной структуре пойм десятки лет без видимых изменений, хотя, безусловно, являются вторичными структурами, появившимися на месте лесов в результате многовекового пастбищного ис-

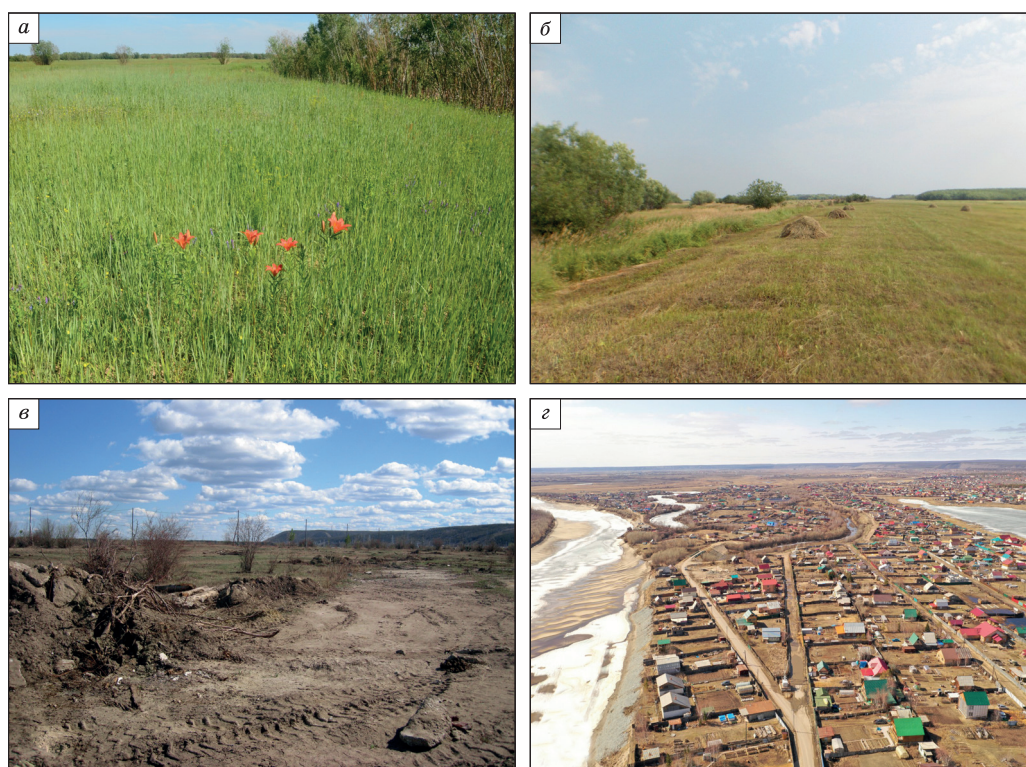


Рис. 3. Степень техногенной трансформации урочищ: а – условно-коренной (природный) комплекс (луговая гряда на о. Кюэх-Ары); б – слабая степень трансформации (гряда с сенокосными лугами, Мохсоголлохско-Синский ландшафт); в – средняя степень (пустырь у п. Табага); з – сильная степень (гряда с коттеджно-дачной застройкой, п. Пригородный)

Fig. 3. Extent of anthropogenic transformation of stow areas: а – conditionally primary (natural) complex (meadow ridge on Kueh-Ary Island); б – weak degree of transformation (ridge with hay meadows, Mokhsogollokh-Sinsky landscape); в – average degree (wasteland near the Tabaga village); з – strong degree (ridge with cottage buildings, Prigorodny village)

пользования поймы. Основной критерий здесь – они не эксплуатируются постоянно, как пастбища и сенокосы.

Слабонарушенные урочища имеют измененный видовой состав растительности (например, березняки и кустарники вместо ельников и лиственничников, дигрессионные пастбищные луга на месте лугов с богатым разнотравьем, пастбищные леса с редуцированными кустарниковым и травяным ярусом) и нарушенными свойствами почв (структуру, характер оглеения) без изменения их морфологического типа. Вырубки, пустоши, легкие постройки, дороги, канавы, карьерные выемки, свалки мусора, кострища могут занимать до 20 % площади. Сюда входят фации с парковыми лесами в Якутске, старичные понижения с луговой растительностью на месте ивняков, урочища с молодыми вторичными лесными насаждениями из сосны и березы.

К слабо нарушенным урочищам относится большинство урочищ поймы с сенокосными лугами (рис. 3, б). Тотальный сенокос почти не влияет на видовой состав лугов, который воспроизводится на следующий год в зависимости от режима затопления поймы. Некоторое снижение сельскохозяйственной нагрузки на пойму с 90-х годов XX в., прекращение работ по улучшению сельскохозяйственных угодий сопровождались распространением по пойме ивняков, кустарников и березовых мелколесий. Но эта тенденция обратима и не свидетельствует о возможном восстановлении прежней лесной растительности.

Средняя степень нарушения включает вырубку леса с изменением почвенного покрова, распашку под огороды, интенсивный выпас, с образованием низкотравных сухих лугов, с разрушением верхних горизонтов почв, оголением поверхности, частичное изменение рельефа, условий поверхностного и подземного стока (сооружение карьеров, дамб, прокладка коммуникаций с насыпями и выемками, многочисленных троп и дорог, перекрытие проток, мелиоративные работы). Пустоши (рис. 3, в), застроенные участки, карьеры, изрытые и спланированные участки занимают от 20 до 50 % площади природного комплекса. Сюда же относятся «ландшафтные сорняки» – техногенные пустыри с замусоренными залежами и мелколесьями, карьерами, руинами, разрушенными строениями, сточными канавами на месте ручьев и рек.

Сильную степень нарушения определяют уничтожение естественного почвенно-растительного

покрова, формирование техногенных и искусственных почв на насыпных грунтах, создание искусственных фитоценозов (разбивка парков, питомников и скверов), изменение рельефа или застройка более 50 % площади урочища, регулирование стока и режима увлажнения плотинами и водохранилищами, мелиоративными системами, прокладкой коллекторов. От природного комплекса остается практически один геологический фундамент. Это урочища с многоэтажной городской, дачной и усадебной сельской застройкой (рис. 3, г), урочища со стройплощадками, дорожными насыпями, инженерными сооружениями, коммуникациями, причалами, водозаборами, карьерами. Селитебные ПТК не являются полностью техногенными; геологические и гидрогеологические свойства фундамента бывших природных урочищ (в частности, мерзлота) оказывают существенное воздействие на эксплуатацию зданий и объектов.

К категории сильно нарушенных урочищ относятся перекрытые дамбами и насыпями старичные понижения. Это могут быть и комплексы парково-рекреационного типа с набережными, дорожками, фонтанами, цветниками и скамейками на тротуарах и замусоренные лоханки со свалками и затопленными сараями на бортах. К сожалению, застройка пойм и террас в Якутске сопровождается необратимой деградацией разветвленной сети ложбин и старичных понижений.

Техногенные урочища. В техногенном комплексе все компоненты, включая литогенный фундамент, должны быть созданы искусственно; это могут быть хозяйственные и селитебные объекты на насыпных грунтах, с круговоротом вещества и энергии, который обеспечивается инженерными коммуникациями. Они характерны для промышленных и городских агломераций. Многоэтажная застройка редко сохраняет изначальный рельеф: сглаживаются даже крупные его элементы – уступы террас, овраги, холмы. При прокладке коммуникаций и заложении фундаментов грунт перекапывается на большую глубину. Пойма превращается в террасу с насыпными грунтами, создается система поверхностного стока вдоль улиц, прокладывается дренаж, водопровод и канализация; малые притоки и ручьи забираются в трубы.

Техногенных урочищ на пойме Лены немного, даже в черте Якутска, они встречаются единицами среди сильно нарушенных урочищ. Это всевозможные дамбы, дорожные насыпи, карье-



Рис. 4. Техногенное урочище – отсыпка 202 и 203 кварталов Якутска

Fig. 4. Technogenic stow – backfilling of blocks 202 and 203 in Yakutsk

ры, пруды, хозяйственные объекты на искусственных грунтах. Техногенным урочищем, например, является старичное понижение Теплового озера в Якутске, расширенное и вычищенное, с набережными, лавочками, декоративным освещением, мостиками и фонтанами. Техногенными урочищами служат песчаные отсыпки микрорайонов 202 и 203 (рис. 4), защищенные дамбами, с искусственной системой дренажа и стока, заасфальтированной поверхностью и многоэтажной застройкой.

Нарушенность пойменных ступеней. Первая ступень поймы масштабно не освоена, здесь абсолютно преобладают условно-коренные ПТК с лесной растительностью. Молодые острова малодоступны, они посещаются рыбаками, охотниками, летом – отдыхающими, устраивающими стоянки, временные балки и биваки, иногда – палаточные лагеря. Стихийная рекреация и рыбалка не наносят ущерба островным урочищам: отходы вывозятся, случайные тропинки быстро зарастают, а остающийся мусор, шалаши и хижинки – сносятся первым же паводком. Урочища с сильной степенью нарушения – береговые полосы, приспособленные под пляжи и технические площадки (например, для причалов паромов, погрузочно-разгрузочные комплексы), занимает лишь 3 % площади ступени. Существенно больше (10 % площади) на молодой пойме слабо нарушенных урочищ, где ивняки и березняки замещены лугово-кустарниковыми и луговыми сообществами. Распространение лугов на молодых поймах – антропогенный процесс. В прошлом эти урочища использовались как пастбища; сейчас – как места отдыха и подходы к руслу Лены.

Вторая ступень поймы характеризуется слабой степенью нарушенности. Сенокос не затрагивает почвы и почти не изменяет видовой состав лугов. Высотные границы луговых ярусов сдвигаются на 1,5–2,5 м по высоте в зависимости от высоты половодья и продолжительности затопления. В многоводные годы сырые луга – осоковые и злаково-разнотравно-осоковые, – могут занимать склоны грив и даже вершины низких грив до высоты 6,5–7 м над меженным уровнем. В годы с низкими половодьями луга среднего увлажнения спускаются в днища понижений до отметки 5,5 м, при условии, что в них нет мерзлоты. Но это естественный процесс.

Строительство на второй ступени почти не ведется, оно невозможно без водозащитных сооружений и отсыпок. Отсыпки 202–203 кварталов, район Даркылах в Якутске, дачные поселки Север и Речник в Жатае – исключения, ведущие «борьбу за существование» с переменным успехом. Здесь нет ферм – только временные полевые станы с легкими постройками. Соответственно, на зрелой ложбинно-островной пойме почти нет урочищ с сильной степенью нарушения и очень мало (не более 10 % территории) – со средней.

Препятствием освоения второй ступени служит не только регулярное затопление, но и относительная недоступность и раздробленность угодий: островные массивы разделены густой сетью протоков, пересыхающих только в августе–сентябре. Сельскохозяйственная техника заводится, в основном, в конце зимы по льду; реже – на паромках. Сообщение между гривами ограничено: переездов через ложбины с озерами и болотами мало, и действуют они, в основном, с конца июля. Это затрудняет снабжение сельхозбригад расходными материалами, ГСМ, продуктами. Трудности освоения второй ступени, в конечном итоге, снижают степень ее антропогенной нарушенности до слабой.

Третья и четвертая ступени имеют среднюю и сильную степень нарушенности. Левобережная пойма от п. Пригородный до п. Жатай застроена почти сплошь. Исключения – относительно небольшие по площади урочища с сосновыми лесами в Строительном округе Якутска, включая Парк культуры и отдыха им. Гагарина. Линейка сильно нарушенных селитебных урочищ дополняется пастбищными комплексами. Они широко развиты у сел Табага и Хатассы, на правобережье у сел Хаптагай, Павловск, Нижний Бестях. С превращением Намского тракта в

непереливаемую дамбу остепненные луга распространяются на пойме севернее Якутска по гривам с отметками 6–7 м над меженным уровнем, что на 2 м ниже их обычного положения. Урочищ с сильной степенью нарушения на высокой пойме около 40 %, условно-коренных – не более 5 %.

Обсуждение результатов

Нарушенность Якутского ландшафта в целом. Ландшафт долины Туймаада (условно названный Якутским) имеет среднюю степень нарушения с тенденцией к росту из-за возрастания техногенной нагрузки и связанных с этим экологических осложнений. Условно-коренных урочищ здесь меньше, чем слабо нарушенных, – 30,2 против 39,4 % (хотя занимаемая ими площадь пока еще больше – 30,5 % из 1,6 тыс. км² против 23 %). Здесь много урочищ со средней (17,6 %, по площади 23 %) и с сильной степенью нарушения (10,2 %, по площади 21 %). Доля техногенных урочищ 2,6 % (около 2,5 % по площади). Таким образом, сильную и среднюю степень нарушения сейчас имеет треть урочищ ландшафта – 30,4 %. По сравнению с соседними ландшафтами поймы р. Лена, это много. Кангаласско-Алданский ландшафт, включающий пойму реки между Кангаласским мысом и р. Алдан, – малоосвоенный. Доля условно-коренных урочищ здесь 55 %, слабо нарушенных – 30 %, за счет используемых как сенокосы и пастбища урочищ высокой поймы в его южной части. Среднюю степень нарушения имеет 12 % урочищ, сильную – 3 % (это селитебные урочища). Техногенных урочищ, здесь, по сути, нет. Мохсоголлохско-Синский ландшафт, расположенный к югу от г. Покровска, – слабонарушенный. Подсчет урочищ в его исследованной части дает долю условно-коренных комплексов 48,5 % (приустьевая и центральная пойма первой и второй ступеней), слабо нарушенных – 28 % (урочища высокой поймы с сенокосными лугами). Доля урочищ со средней степенью нарушения 15 %, с сильной – 7 %; это застроенные гривы и перекрытые насыпями старичные ложбины на селитебных территориях. 1,5 % урочищ из 1800 можно отнести к техногенным (пруды и дамбы на р. Кирим у с. Качикатцы, береговые карьеры в Мохсоголлохе, насыпи грейдеров и ряд других урочищ малой площади).

Сопоставление с близкими по строению ландшафтами и территориями. Интересно сравнить нарушение ландшафтов днища долины

р. Лена с нарушением ландшафтов других техногенных террас. Пойма р. Москва в нижнем течении (ниже г. Москва) является типичной техногенной террасой, не затопляемой почти 90 лет, которая интенсивно используется в сельском хозяйстве и постепенно застраивается промышленными и гражданскими объектами. Ее природные комплексы имеют среднюю и сильную степень нарушения; в Москворецко-Битцевском ландшафте, ближайшем к Москве, 53–57 % сильно нарушенных и техногенных урочищ, занимающих 31 % территории. Нерский ландшафт имеет наибольшую долю техногенных урочищ (40 %): здесь, в расширениях поймы, проводились большие мелиоративные работы и создана наиболее разветвленная сеть каналов; но их площадь (7,3 %) невелика. Условно-коренных урочищ здесь всего 5–7 %, слабо нарушенных – от 7 до 13 % [3]. Следовательно, нарушение городских и пригородных ландшафтов днища долины Лены еще не предельная; она даже ниже показателей нарушения урочищ поймы р. Москва в особо охраняемых резерватах, исключенных из непосредственного хозяйственного использования. В частности, на Строгинской пойме, входящей в природный Москворецкий парк, лишь 11 % пойменных урочищ сохранили близкий к естественным облик. 24 % урочищ здесь имеют среднюю, 26 % – сильную степень нарушения, и 7 % являются техногенными [11]. Тем актуальней в долине Туймаада становится разработка природоохранных мероприятий, призванных сберечь еще оставшиеся природные урочища.

Следует отметить, что нарушение исследованных ландшафтов имеет ту же тенденцию снижения показателей по мере удаления от центров освоения, как, например, в Европейской России. Нарушенность якутского ландшафта близка к среднеосвоенным ландшафтам центральных районов Тверской области: доля урочищ, близких к естественным, составляет 11 – 15 %, слабонарушенных – 29 %; сильную степень нарушения имеет 31 % природных комплексов. Для Ярославской области эти показатели составляют, соответственно 18, 42 и 23 %, для менее освоенной северной Вологодской – 40, 35 и 6 % [9, 10], что близко к параметрам нарушения Кангаласско-Алданского ландшафта.

Заключение

Нарушенность покровско-якутского ландшафта отражает результат значительного вовлечения пойменных территорий в хозяйственный оборот;

и при дальнейшем освоении поймы Лены, темпы которого в ближайшее время вряд ли снизятся, следует предусматривать уже не только защитные, но и природоохранные мероприятия и меры по благоустройству осваиваемых территорий, выходящих из зоны регулярного затопления. В частности, необходимо восстановить (хотя бы частично) сеть пойменных проток, улучшив дренаж поймы: заменить глухие дамбы водопропусками; расчистить русла; укрепить и облагородить берега, убрав сараи, заборы, свалки и мусор; предусмотреть обводнение пастбищ и сенокосов на удаленных от реки массивах, используя те же пойменные протоки. Пойменные протоки и ложбины служат естественной дренажно-канализационной сетью, создать которую на селитебных территориях в условиях сплошного развития мерзлоты затруднительно.

Список литературы / References

1. Беркович К.М., Чалов Р.С., Чернов А.В. *Экологическое русловедение*. М.: ГЕОС; 2000. 332 с.
Berkovich K.M., Chalov R.S., Chernov A.V. *Ecological channel science*. Moscow: GEOS; 2000. 332 p. (In Russ.)
2. Сурков В.В. Техногенные террасы, их формирование, развитие и ландшафтная структура. В кн.: *Изучение и сохранение естественных ландшафтов: сборник статей Международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию юбилею Волгоградского государственного социально-педагогического университета и естественно-географического факультета ВГСПУ, г. Волгоград, 12–15 сентября 2011 г.* М.: Планета; 2011. С. 332–336.
Surkov V.V. Technogenic terraces, their formation, development and landscape structure. In: *Study and preservation of natural landscapes: a collection of articles of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 80th anniversary of the Volgograd State Social Pedagogical University and the Faculty of Natural Geography of VGSPU, Volgograd, September 12–15, 2011*. Moscow: Planeta; 2011. pp. 332–336. (In Russ.)
3. Завадский А.С., Сурков В.В., Чернов А.В. Пойма р. Москвы в нижнем течении, ее экологическое состояние, развитие в условиях интенсивного техногенного использования и оценка техногенной нарушенности ее природных территориальных комплексов. *Эрозия почв и русловые процессы*. 2019;(21):113–149.
Zavadsky A.S., Surkov V.V., Chernov A.V. Floodplain of the river Moscow in the lower reaches, its ecological state, development under conditions of intensive technogenic use and assessment of technogenic disturbance of its natural territorial complexes. *Soil erosion and channel processes*. 2019;(21):113–149. (In Russ.)
4. Царегородцева А.Г. *Пойменные ландшафты Павлодарского Прииртышья*. Павлодар: Павлодарский гос. ун-т им. С. Торайгырова; 2003. 77 с.

Tsaregorodtseva A.G. *Floodplain landscapes of the Pavlodar Irtysh region*. Pavlodar: Pavlodar State University named after S. Toraigyrov; 2003. 77 p. (In Russ.)

5. Шестобитова Л.В. Классификация пойменных ландшафтов с позиции измененности их человеком. *Вопросы географии Сибири*. 2003;(25):236–241.

Shestobitova L.V. Classification of floodplain landscapes from the perspective of their alteration by humans. *Voprosy geografii Sibiri*. 2003;(25):236–241. (In Russ.)

6. Буркин В.П. *Ландшафтная среда пойменных территорий как основа пространственной структуры городов*: Дисс...канд. геогр. наук. М.; 2000. 149 с.

Burkin V.P. *Landscape environment of floodplain territories as the basis of the spatial structure of cities*: Diss ... Cand. Sci. Moscow; 2000. 149 p. (In Russ.)

7. Жучкова В.К. *Организация и методы комплексных физико-географических исследований*. М.: МГУ; 1977. 186 с.

Zhuchkova V.K. *Organization and methods of complex physical-geographical research*. Moscow: Moscow State University; 1977. 186 p. (In Russ.)

8. Жучкова В.К., Раковская Э.М. *Методика комплексных физико-географических исследований*. М.: Центр «Академия»; 2004. 354 с.

Zhuchkova V.K., Rakovskaya E.M. *Methods of complex physical-geographical research*. Moscow: Academy; 2004. 354 p. (In Russ.)

9. Сурков В.В. Оценка антропогенной нагрузки ландшафтов по трассе Северо-Европейского газопровода в пределах Вологодской области. В кн.: Дьяконов К.Н. (ред.). *Ландшафтоведение: теория, методы, региональные исследования, практика: материалы XI Международной ландшафтной конференции, г. Москва, 22–25 авг. 2006 г.* М.: МГУ; 2006. С. 590–593.

Surkov V.V. Assessment of the anthropogenic load of landscapes along the route of the North European Gas Pipeline within the Vologda Region. In: D'yakonov K.N. (ed.). *Landscape science: theory, methods, regional studies, practice: Proceedings of the 11th International landscape conference, Moscow, August 22–25, 2006*. Moscow: Moscow State University; 2006. pp. 590–593. (In Russ.)

10. Иванов А.Н., Самойлова Г.С., Сурков В.В. Ландшафтно-экологические исследования при проектировании газопроводов в лесной зоне. *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2008;(1):58–65.

Ivanov A.N., Samoilova G.S., Surkov V.V. Landscape and environmental studies when designing gas pipelines in a forest area. *Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography*. 2008;(1):58–65. (In Russ.)

11. Завадский А.С., Зайцев А.С., Мосалов А.А. и др. Опыт комплексной природной инвентаризации особо охраняемой природной территории (на примере Строгинской поймы в г. Москве). *Бюллетень Главного ботанического сада РАН*. 2008;194:110–140.

Zavadsky A.S., Zaitsev A.S., Mosalov A.A., et al. An experience of complex inventory inspection of a specially protected natural area (a case of the Moscow River food-lands in the region of Strogino, Moscow). *Bulletin*

of the Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences. 2008;194:110–140. (In Russ.)

12. Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т.1: Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. М.: Изд-во ЛКИ; 2008. 608 с.

Chalov R.S. Channel studies: theory, geography, practice. T.1: Channel processes: factors, mechanisms, forms of manifestation and conditions for the formation of river channels. Moscow: LKI Publishing House; 2008. 608 p. (In Russ.)

13. Соловьев П.А. Криолитозона северной части Лено-Амгинского междуречья. М.: Изд-во АН СССР; 1959. 143 с.

Soloviev P.A. Permafrost zone of the northern part of the Lena-Amga interfluv. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1959. 143 p. (In Russ.)

14. Гриненко В.С., Камалетдинов В.А., Сластенов Ю.Л., Щербаков О.И. Геологическое строение Большого Якутска. В кн.: Региональная геология Якутии: Сборник научных статей. Якутск: Изд-во ЯГУ; 1995. С. 3–19.

Grinenko V.S., Kamaletdinov V.A., Slastenov Yu.L., Shcherbakov O.I. Geological structure of Greater Yakutsk. In: Regional geology of Yakutia: Collection of scientific papers. Yakutsk: Yakut State University, 1995, pp. 3–19. (In Russ.)

Об авторах

СУРКОВ Виталий Владимирович, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0009-0006-1458-0554>, ResearcherID: M-3081-2015, Scopus Author ID: 36860323700, SPIN: 8733-8900, e-mail: vita.surkov@yandex.ru

ЗАВАДСКИЙ Александр Сергеевич, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, ResearcherID: M-3089-2015, Scopus Author ID: 6602245310, SPIN: 3043-9153, e-mail: az200611@rambler.ru

ТУЗОВА Елизавета Андреевна, инженер, ResearcherID: P-2652-2015, e-mail: ea.morozovaa@yandex.ru

Вклад авторов

Сурков В.В. – разработка концепции, методология, проведение исследования, ресурсное обеспечение, создание черновика рукописи

Завадский А.С. – проведение исследования, ресурсное обеспечение, администрирование данных, редактирование рукописи, руководство исследованием, администрирование проекта

Тузова Е.А. – программное обеспечение, верификация данных, проведение статистического анализа, проведение исследования, визуализация

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

SURKOV, Vitaly Vladimirovich, Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0009-0006-1458-0554>, ResearcherID: M-3081-2015, Scopus Author ID: 36860323700, SPIN: 8733-8900, e-mail: vita.surkov@yandex.ru

ZAVADSKY, Alexandr Sergeevich, Cand. Sci. (Geogr.), Leading Researcher, ResearcherID: M-3089-2015, Scopus Author ID: 6602245310, SPIN: 3043-9153, e-mail: az200611@rambler.ru

TUZOVA, Elizaveta Andreevna, Engineer, ResearcherID: P-2652-2015, e-mail: ea.morozovaa@yandex.ru

Authors' contribution

Surkov V.V. – conceptualization, methodology, investigation, resources, original draft

Zavadzky A.S. – investigation, resources, data curation, review & editing, supervision, project administration

Tuzova E.A. – software, validation, formal analysis, investigation, visualization

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 10.04.2024

Поступила после рецензирования / Revised 23.04.2024

Принята к публикации / Accepted 15.05.2024

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Экология

УДК 504.054, 528.88

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-248-258>

Оригинальная статья

Применение методов дистанционного зондирования для оценки экологической ситуации в бассейне верхнего течения реки Лена

Г. Н. Саввинов^{✉1}, В. С. Макаров^{1,2}

¹Северо-Восточный федеральный университет, г. Якутск, Российская Федерация

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

[✉]savvinov_gn@mail.ru

Аннотация

В статье затронута проблема загрязнения р. Лена золотодобывающими предприятиями, функционирующими в ее верхнем течении. Промышленная разработка рудных и россыпных месторождений золота активно ведется на территориях пяти регионов Сибирского и Дальневосточного федеральных округов, наиболее масштабное освоение осуществляется в Иркутской области, Бурятии и Якутии. Дальнейшая интенсификация деятельности объектов золотодобывающей промышленности приведет к значительным негативным воздействиям на экосистемы бассейна верхнего течения р. Лена. В связи с этим рассмотрены возможности применения спутниковых данных Sentinel-2 для оценки экологической ситуации в речных системах Якутии. В работе использованы наиболее распространенные водные индексы NDTI, AMWI и Narma. Объектом применения данных индексов был выбран район устья р. Витим, в бассейне которого сосредоточено наибольшее количество действующих лицензионных участков по золотодобыче. Выделены тестовые участки на реках Витим и Лена, а также на оз. Охнинское в качестве контроля. Водные индексы проанализированы в программном пакете ArcGIS, статистическая обработка данных проведена в программе MS Excel. Выявлено, что для оценки мутности поверхностных вод в районе устья р. Витим наилучшие результаты дает использование индекса AMWI. Показаны пространственные закономерности и проанализирована сезонная динамика мутности изучаемых водных объектов. Предложенная методика с использованием индекса AMWI может применяться для оперативной оценки состояния водных объектов Якутии в условиях их активного техногенного загрязнения, с целью своевременного принятия превентивных природоохранных мероприятий.

Ключевые слова: река Лена, экосистемы, золотодобывающая промышленность, техногенное воздействие, загрязнение природных вод, метод дистанционного зондирования

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ «Биота и абиотические компоненты экосистем Северо-Востока России и рациональное освоение природных ресурсов криолитозоны в условиях изменения климата и техногенного воздействия» (№ FSRG-2013-0011).

Для цитирования: Саввинов Г.Н., Макаров В.С. Применение методов дистанционного зондирования для оценки экологической ситуации в бассейне верхнего течения реки Лена. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(2):248–258. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-248-258>

Application of remote sensing methods to assess the environmental situation in the upper Lena River basin

Grigory N. Savvinov^{✉,1}, Victor S. Makarov^{1,2}

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

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

✉savvinov_gn@mail.ru

Abstract

This article addresses the problem of pollution in the Lena River caused by gold mining enterprises operating in its upper regions. It highlights the ongoing industrial exploitation of ore and placer gold deposits in five regions within the Siberian and Far Eastern federal districts. The most large-scale development is carried out in the Irkutsk region, Buryatia, and Yakutia. Further intensification of gold mining activities will result in significant negative impacts on the ecosystems of the upper reaches of the Lena River basin. In this context, the potential applications of Sentinel-2 satellite data for assessing the ecological conditions of river systems in Yakutia are being explored. The most common water indices, NDTI, AMWI, and Harma, were used in this study. The indices were applied to analyze the area of the Vitim River mouth, which contains the highest concentration of active gold mining license areas in the basin. Test sites were allocated on the Vitim and Lena rivers, as well as on Lake Okhninskoye for control purposes. Water indices were analyzed using the ArcGIS software package, and statistical data processing was conducted in the MS Excel program. It is revealed that the best results for estimating surface water turbidity in the area of the Vitim River mouth are obtained using the AMWI index. Spatial regularities are demonstrated, and the seasonal dynamics of turbidity in the studied water bodies are analyzed. The proposed methodology using the AMWI index can be applied for operational assessment of the state of water bodies in Yakutia under conditions of active anthropogenic pollution. This can facilitate timely implementation of preventive environmental protection measures.

Keywords: Lena River, ecosystems, gold mining industry, technogenic impact, natural water pollution, remote sensing method

Funding. This study was conducted within the framework of the state assignment of the Ministry of Higher Education and Science of the Russian Federation “Biota and abiotic components of ecosystems in the North-East of Russia and the rational development of natural resources of the permafrost zone under conditions of climate change and technogenic impact” (No. FSRG-2013-0011).

For citation: Savvinov G.N., Makarov V.S. Application of remote sensing methods to assess the environmental situation in the upper Lena River basin. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(2):248–258. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-248-258>

Введение

Одним из наиболее значимых техногенных факторов воздействия на экосистемы р. Лена является масштабная разработка месторождений золота в бассейне ее верхнего течения, которая сопровождается рассеиванием больших масс загрязняющих веществ, поступающих в окружающую среду.

Промышленное освоение бассейна верхней Лены (реки Бодайбо, Витим, Малый Патом, Хомолхо и др.) началось с открытия приисков иркутских купцов Трапезникова, Катывшевцева, Базилевского, Баснина и др., где с середины XIX в. стали разрабатывать богатейшие россыпные месторождения золота [1].

В настоящее время бассейн р. Лена охватывает территории, относящиеся к семи субъектам Си-

бирского (Красноярский край, Иркутская область) и Дальневосточного (Забайкальский край, Республика Бурятия, Республика Саха (Якутия), Амурская область и Хабаровский край) федеральных округов (рис. 1). Из них в бассейне верхнего течения р. Лена золотобыча рудных и россыпных месторождений активно ведется в пяти регионах, наиболее масштабное освоение осуществляется в Иркутской области, Бурятии и Якутии (табл. 1). Среди указанных субъектов Иркутская область относится к числу ведущих золотодобывающих регионов Российской Федерации.

В Иркутской области из всего количества разведанного золота на долю рудного приходится примерно 85 %, россыпного — 15 %. Его балансовые запасы сосредоточены почти на 300 месторождениях, а прогнозные ресурсы оценены

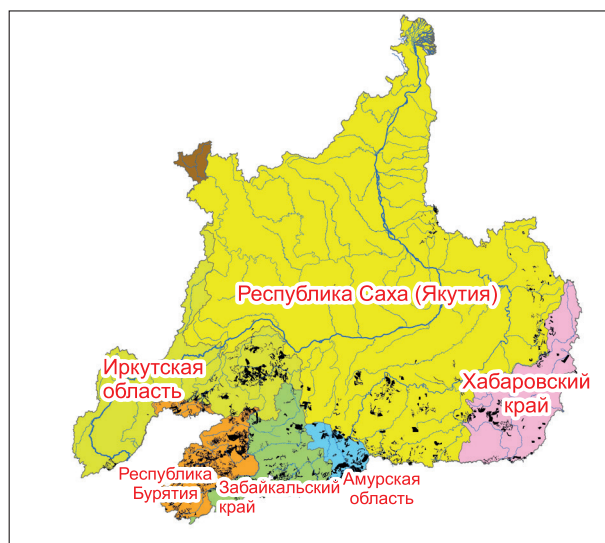


Рис. 1. Распределение лицензионных участков золотодобывающих предприятий в субъектах РФ, расположенных в бассейне верхнего течения р. Лена

Fig.1. Distribution of license areas for gold mining companies in the regions of the Russian Federation, located in the upper reaches of the Lena River basin

более чем для 100 объектов в Бодайбинском, Мамско-Чуйском, Нижнеудинском, Ольхонском и Иркутском административных районах.

Золотодобывающая промышленность в регионе представлена такими предприятиями, как

Таблица 1

Количество и общая площадь лицензионных участков золотодобывающих предприятий по регионам СФО и ДВФО, расположенных в бассейне верхнего течения р. Лена

Table 1

Number and total area of licensed gold mining enterprises in the regions of SFD and FEFD, located in the upper reaches of the Lena River basin

Регион	Количество объектов с лицензией недропользователя	Общая площадь лицензионных участков в регионе, км ²
Хабаровский край	120	7696,422
Амурская область	105	10208,3
Забайкальский край	156	11417,9
Иркутская область	489	13933,98
Республика Саха (Якутия)	612	15504,07
Республика Бурятия	461	25027,19

АО «ЗДК «Лензолото» и АО «Полюс Вернинское» (входят в группу ПАО «Полюс»), ПАО «Высочайший», АО «Артель старателей «Витим», ООО «Друза». По итогам 2023 г. добыча золота в Иркутской области составила 22 364,5 кг драгметалла, из которых 14 429 кг рудного и 7 935,5 кг россыпного золота.

На территории области выделяют три отдельных золотоносных района: Лено-Витимский, Восточно-Саянский и Предбайкальский. Из них Лено-Витимский золотоносный район по своей площади и запасам занимает первое место. Здесь сосредоточено 95 % россыпного и примерно столько же рудного золота Иркутской области. Расположен он в центральной части Патомского нагорья, в бассейнах Витима, Чары и Олекмы — притоков Лены. Охватывает территорию площадью около 50 тыс. км².

Материалы и методы

Одним из приоритетных направлений современных природоохранных мероприятий является совершенствование действующих и развитие новых принципов и методов экологического мониторинга за состоянием водных объектов при различных видах антропогенного воздействия. Важный шаг на пути к эффективному решению этой задачи — использование методов дистанционного зондирования. Оценка мутности воды дистанционными методами основано на использовании способности взвешенных веществ усиливать рассеивание света в воде. Водоёмы, содержащие большое количество взвешенных частиц, сильнее отражают световую волну во всем видимом диапазоне, чем чистая вода. В данной работе были использованы наиболее распространенные водные индексы [2–4]:

1. Индекс NDTI= (Red – Green) / (Red+ Green).
2. Индекс AMWI= (Red – Blue) / (Red+ Blue).
3. Индекс Hama= Blue / (Red+ Green+ Blue),

где Red, Green и Blue – коэффициенты спектральной яркости в красном, зеленом и синем каналах соответственно.

Материалами для исследования послужили спутниковые снимки Sentinel-2 – семейство спутников дистанционного зондирования Земли Европейского космического агентства, созданное в рамках проекта глобального мониторинга окружающей среды и безопасности «Коперник». Всего для анализа было выбрано четыре снимка с минимальной (нулевой) облачностью.

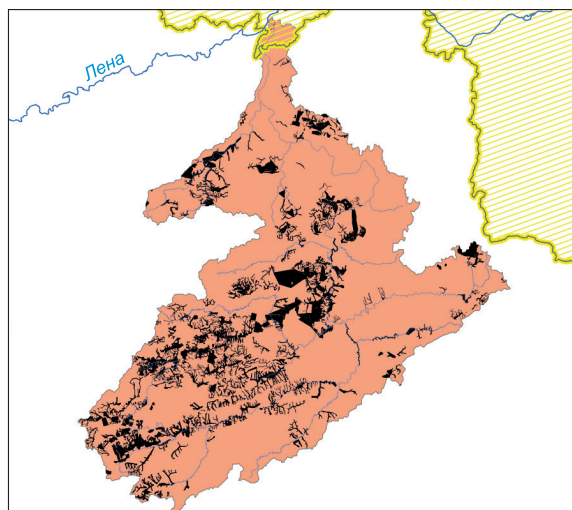


Рис. 2. Расположение лицензионных участков золото-добывающих предприятий в бассейне р. Витим

Fig. 2. Location of gold mining license areas in the Vitim River basin

Объектом применения данных индексов был выбран район устья р. Витим. Выбор района обусловлен тем, что в бассейне реки расположены одни из богатейших месторождений золота, занимающие первое место в России не только по запасам, но и по своей площади. Как было выше отмечено, золотодобыча в бассейне Витима имеет долгую историю, начиная с XIX в., когда первые золотоискатели начали осваивать эти богатые драгоценным металлом земли. ГИС-анализ показал, что сегодня в бассейне Витима сосредоточено наибольшее количество действующих лицензионных участков по сравнению с другими притоками р. Лена (рис. 2).

Устьевая часть р. Витим представляет с собой замыкающий створ водотока, по которому можно получить интегральное представление о миграции и аккумуляции потоков веществ в пределах всего бассейна.

Чтобы узнать, в каком качественном состоянии воды рек Витим и Лена достигли своих устьев, мы выделили отдельные тестовые участки на этих реках (2 и 3), отстоящие примерно в 3 км выше от устьевых частей (рис. 3). Еще один тестовый участок (1) находился на оз. Охнинское, которое расположено в 20 км от устья Витима. В районе озера отсутствует воздействие промышленных и селитебных объектов, поэтому оно было выбрано в качестве контроля. В программном пакете ArcGIS растры водных индек-

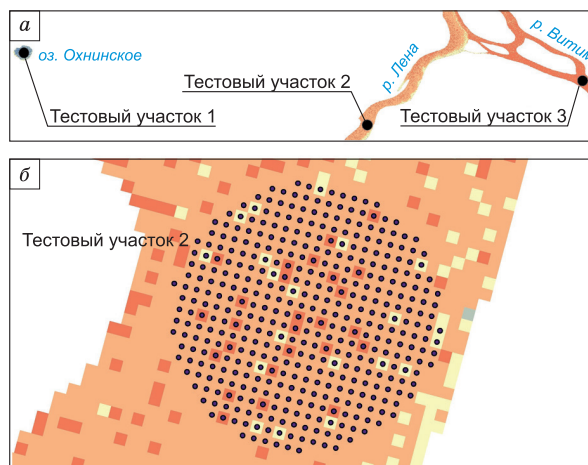


Рис. 3. Тестовые участки в районе устья р. Витим (а) и крупным планом тестовый участок 2 с точечным шейп-файлом (б)

Fig. 3. Test sites in the area of the Vitim River mouth (а) and a close-up of test site 2 with a point shapefile (б)

сов были вырезаны по контуру тестовых участков, в результате были получены новые матрицы растров, состоящие из 420 пикселей.

После конвертации растров в объекты шейп-файла атрибутивные таблицы были экспортированы в текстовый формат и подвергнуты процедуре однофакторного дисперсионного анализа (с уровнем значимости 0,05) в программе MS Excel. Для проведения дисперсионного анализа необходимо сформулировать и проверить нулевую гипотезу, а также рассчитать ее вероятность. В нашем случае рассматриваются две нулевые гипотезы. Первая гипотеза выдвигает предположение, что средние значения пикселей (водных индексов) в трех тестируемых участках поверхностных вод равны между собой. Вторая гипотеза выдвигает предположение, что средние значения пикселей (водных индексов) в одном из поверхностных вод не имеют сезонной динамики.

Результаты и обсуждение

Интенсификация золотодобывающей промышленности в Иркутской области сопровождается масштабным негативным воздействием на экосистемы бассейна верхнего течения р. Лена, расположенные не только в Иркутской области, но и на сопредельной территории Республики Саха (Якутия).

Как известно, весь спектр схем и способов промышленной добычи золота сопровождается

мощным негативным воздействием на окружающую среду: загрязнения не только атмосферы при буровзрывных работах на карьерах, но и водных и наземных экосистем при обогащении золотосодержащих песков и горных пород.

Во-первых, изменения пойм и русел рек, часто случающиеся в ходе промышленных разработок, несут колоссальные разрушительные последствия для аллювиальных ландшафтных комплексов. Добыча россыпного золота сегодня приводит к существенной деградации ландшафтов на достаточно больших площадях и загрязнению рек на многие километры вниз по течению. Хвосты флотации руд вызывают водную и ветровую эрозию, они подвержены пылению. Запыленность воздуха может превышать санитарные нормы на расстоянии 10 км и более от источника пыления, а при оседании пыли на почву и водоемы образуются сверхнормативные концентрации токсичных элементов [1, 5, 6].

Во-вторых, промышленное освоение золотосодержащих месторождений на верхней Лене имеет более чем 150-летнюю историю, в течение которой использовались самые различные способы извлечения золота. Наиболее опасен для окружающей среды использовавшийся в течение длительного времени амальгамный способ извлечения золота с использованием ртути. По некоторым расчетам, долины многих малых рек и их притоков районов длительной золотодобычи к настоящему времени насыщены техногенными отвалами, содержащими те или иные количества ртути, которая выводится на поверхность и вовлекается в экзогенные процессы. В результате загрязнение ртутью встречается в поверхностных и подземных водах, донных отложениях, почвах и растительности [7, 8].

В-третьих, техногенное воздействие предприятий, применяющих технологию кучного выщелачивания, на объекты окружающей среды носит комплексный характер, связанный с загрязнением атмосферного воздуха, поверхностных и подземных вод, отчуждением и разрушением природных биоценозов прилегающих территорий [9]. Основная проблема состоит в использовании при растворении благородных металлов растворителя – цианида, который наряду с высокой избирательностью к золоту и серебру является высокотоксичным ядовитым веществом [10]. Загрязнение атмосферного воздуха летучим цианистым водородом, образующимся в результате разложения цианистых солей, а также прямые

утечки продуктивных цианистых растворов, приводящие к загрязнению почв, подземных и поверхностных вод, также требуют строгого соблюдения техники безопасности и разработки специальных мероприятий защиты окружающей среды [11].

Таким образом, разработка россыпных месторождений золота открытым способом – это самый разрушительный антропогенный фактор для окружающей природной среды.

Отмечено, что разработка россыпных месторождений золота является источником поступления избыточного количества минеральных взвесей в водотоки. Обобщение имеющихся данных показывает, что если в контрольных реках (не затронутых отработкой) общее содержание взвеси 100–200 мг/л (мутность воды), то в реках со средней антропогенной нагрузкой эти показатели увеличиваются соответственно до 250 мг/л, а в интенсивно эксплуатируемых реках иногда превышают 500 мг/л. Большая часть продуктов эрозии антропогенного происхождения, особенно мелкие фракции, уносится потоком во взвешенном состоянии в низовья рек, часть же аккумулируется на дне и в толще грунта в верховьях [7].

Недавние исследования показали, что для оценки мутности воды методами дистанционного зондирования Земли можно использовать характеристики ее отражающей способности даже в пределах одного спектрального канала, однако наилучшие результаты достигаются при использовании водных индексов, рассчитываемых при помощи двух и более спектральных каналов.

Индекс NDTI (нормализованный разностный индекс мутности воды) был разработан в 2006 г. для оценки мутности водоемов в Сенегале [2]. Авторы индекса отмечают специфичность радиометрического отклика чистой воды. В зеленой области спектра чистая вода имеет слабое отражение (менее 10 %), которое становится очень малым в красной и почти нулевым в ближнем инфракрасном диапазоне. Когда водоемы становятся грязными и нагружаются взвешенными отложениями, увеличение мутности и связанная с ней радиометрическая реакция заставляют пруд вести себя как оголенная почва, при этом значения красных радиометрических откликов становятся намного больше, чем зеленых. Поэтому увеличение мутности воды приводит к повышению отражения в красной области и увеличению индекса NDTI. В работах [12–14] показано наличие тесной корреляционной связи между индек-

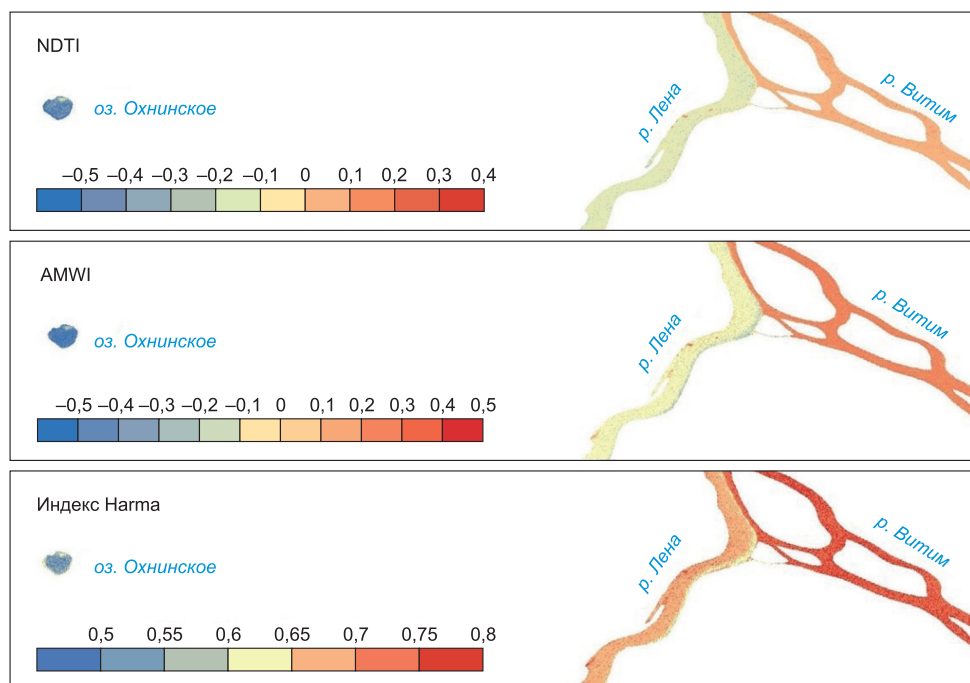


Рис. 4. Распределение NDTI, AMWI и индекса Harma поверхностных вод в районе устья р. Витим по данным спутникового снимка Sentinel-2 за 16 июля 2023 г.

Fig. 4. Distribution of NDTI, AMWI, and Harma index of surface water in the area of Vitim River mouth based on Sentinel-2 satellite image data for July 16, 2023

сом NDTI и фактически измеренными значениями содержания взвешенных веществ в воде, при этом отмечается наличие степенной зависимости между характеристикой мутности и индексом NDTI.

Индекс AMWI (Acid Mine Water Index) впервые был представлен в работе [3] для выявления спектральных особенностей поверхностных водотоков, загрязненных шахтными излиями. Авторами было установлено, что основной особенностью речной воды, загрязненной кислыми шахтными водами, является резкий рост коэффициента спектральной яркости от синего диапазона к красному.

Индекс Harma – это показатель мутности поверхностных вод, который был разработан для исследования озер Финляндии и прибрежных вод Балтийского моря. Он был предложен в работе финских ученых Харма и Вепсалайнен в 2001 г. [4]. Индекс Harma имеет сильную корреляцию с натурными данными мутности воды. В результате сравнительных исследований между индексом Harma и мутностью воды были установлены статистические связи, которые показали, что коэффициент корреляции между ними может достигать 0,95 в отдельные дни [15, 16].

Результат использования вышепредставленных индексов показан на примере слияния двух рек (Лены и Витима) с различной степенью мутности (рис. 4). На всех индексах р. Витим имеет более высокую мутность, что видно по более интенсивному красному цвету. В то же время на р. Лена отмечена низкая степень мутности, что коррелируется с ее более светлой цветовой гаммой. Также на рисунке показано контрольное озеро с наименьшим значением индекса мутности, отличающегося темно-синим цветом. Наименьшая мутность воды в озере может быть обусловлена несколькими факторами, такими как отсутствие крупных источников загрязнения, олиготрофность озера и наличие растительности, которая способствует очистке воды. Поэтому оз. Охнинское, расположенное в 20 км от устья Витим, можно использовать в качестве контроля, где нет воздействия промышленных и селитебных объектов.

Чтобы определить, какой из индексов лучше всего отражает мутность воды, был проведен однофакторный дисперсионный анализ (табл. 2–4). Согласно нулевой гипотезе, статистически значимых различий мутности между тремя поверхностными водами (оз. Охнинское, реки Витим и Лена) не существует. Однако, для всех представ-

Таблица 2

**Однофакторный дисперсионный анализ
индекса NDTI на тестовых участках
района устья р. Витим за 16 июля 2023 г.**

Table 2

**One-factor analysis of variance
for the NDTI index at the test sites
in the Vitim River estuary area on July 16, 2023**

Источник вариации	Между группами	Внутри групп
SS	56,09	3,440
df	2	1257
MS	28,0458	0,0027
F	10247,2186	
P-Значение	0	
F критическое	3,002883179	

Таблица 4

**Однофакторный дисперсионный анализ
индекса Harma на тестовых участках
района устья р. Витим за 16 июля 2023 г.**

Table 4

**One-factor analysis of variance
for the Harma index at test sites
in the Vitim River estuary area on July 16, 2023**

Источник вариации	Между группами	Внутри групп
SS	10,93	0,474
df	2	1257
MS	5,4674	0,0003
F	14469,33	
P-Значение	0	
F критическое	3,002883179	

ленных индексов P-значение оказалось значительно ниже $\alpha = 0,05$, что указывает на наличие значимой разницы между средними значениями индексов исследуемых водных объектов. При этом более высокая величина F-критерия была отмечена при использовании индекса AMWI.

Все три индекса показали статистически значимые колебания мутности в реках Витим и Лена в течение одного летнего сезона. Это визуально хорошо прослеживается и по спутниковым снимкам, особенно сильный контраст индексов наблюдался в р. Лена. Что касается мутности оз. Охнинское, то его цветовой оттенок практически не менялся во времени, поэтому визуально сложно оценить временную динамику его мутности.

Дисперсный анализ показал статистически значимые колебания мутности озера при использо-

Таблица 3

**Однофакторный дисперсионный
анализ индекса AMWI на тестовых участках
района устья р. Витим за 16 июля 2023 г.**

Table 3

**One-factor analysis of variance
for the AMWI index at test sites
in the Vitim River estuary area on July 16, 2023**

Источник вариации	Между группами	Внутри групп
SS	100,6	2,324
df	2	1257
MS	50,3210	0,0018
F	27214,6386	
P-Значение	0	
F критическое	3,002883179	

вании индексов AMWI и NDTI, хотя значения F-критерия были относительно низкими. В отличие от предыдущих индексов, индекс Harma определил оз. Охнинское как водоем без сезонных колебаний мутности (P-значение $>0,05$; F-критерий $<$ критического F-критерия). Вероятно, это связано с тем, что индекс Harma менее чувствителен к небольшим изменениям мутности в чистой воде.

Таким образом для оценки мутности поверхностных вод в районе устья р. Витим наилучшие результаты выявлены при использовании индекса AMWI. Следует отметить, что этот индекс первоначально использовался для оценки степени загрязнения кислыми водами угольных месторождений, однако оказался наиболее информативным и для анализа мутности воды в районе деятельности золотодобывающих предприятий.

Пространственное распределение индекса AMWI в разные даты съемок показано на рис. 5. Для визуализации сезонной динамики были построены диаграммы размаха AMWI в тестовых участках – графики, использующиеся в описательной статистике для сравнения распределений между несколькими группами или наборами данных (рис. 6). На протяжении всего летнего сезона 2023 г. на тестовом участке р. Витим наблюдаются повышенные значения индекса AMWI, которые с большой долей вероятности связаны с деятельностью многочисленных золотодобывающих предприятий, расположенных в бассейне реки. ГИС-анализ выявил, что в бассейне Витима, площадь которого составляет 225 тыс. км², на сегодня действуют 678 лицензионных участков, занимающие 32 тыс. км². Из них на 461 участок

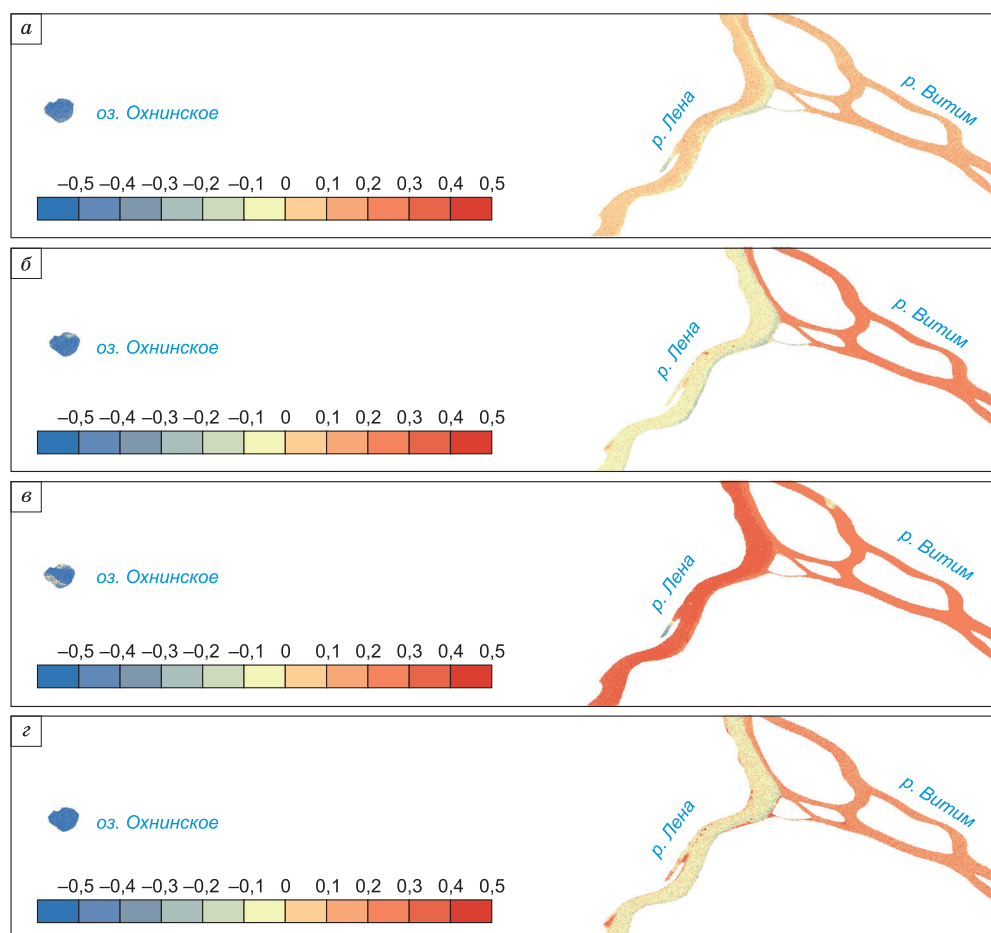


Рис. 5. Распределение индекса AMWI в районе устья р. Витим по данным спутниковых снимков Sentinel-2 2023 г.: а – 13 июня; б – 16 июля; в – 22 августа; г – 4 сентября

Fig. 5. AMWI distribution in the area of the Vitim River mouth according to Sentinel-2 satellite image data: а – June 13, 2023; б – July 16, 2023; в – August 22, 2023; г – September 4, 2023

лицензия была выдана на геологическое изучение (поиск и оценку), на 98 участков – разведку и добычу, и на 119 участков выдана так называемая сквозная лицензия, включающая и геологическое изучение, и разведку и добычу полезных ископаемых. По значениям AMWI можно констатировать, что пик деятельности золотодобычи приходится на июль и август.

Высокие значения AMWI на тестовом участке реки Лена объясняются тем, что в бассейнах рек Большая Чуя и Чая, которые впадают в Лену выше устья Витима, расположены 19 лицензионных участков золотодобычи, часть из которых активно функционируют. Так, 22 августа 2023 г. здесь было зафиксировано значение AMWI, заметно превышающее максимальные индексы реки Лена (см. рис. 5 и 6). Такой же резкий всплеск AMWI наблюдался в августе 2018 г. на р. Вилуй, после аварийного прорыва дамб дражных кот-

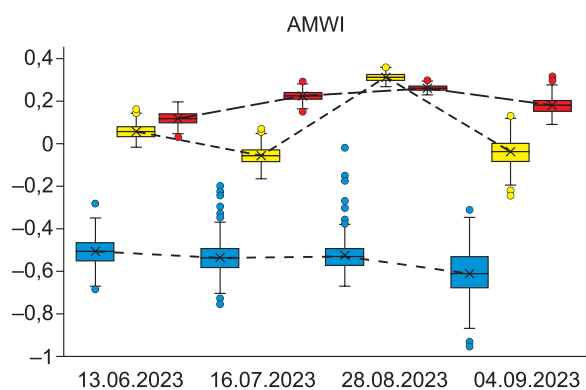


Рис. 6. Динамика индекса AMWI в районе устья р. Витим по данным спутниковых снимков Sentinel-2

Fig. 6. AMWI dynamics in the area of the Vitim River mouth based on Sentinel-2 satellite image data

лованов на месторождении «Иреляхская россыпь», который послужил причиной масштабного загрязнения водных объектов рек Ирелях, Малая Ботубоя и Виллой. Поэтому можно предположить, что кратковременное, но значительное загрязнение р. Лена в августе 2023 г. также могло быть вызвано аварийным или несанкционированным сбросом загрязняющих веществ в реку на одном из золотодобывающих предприятий (см. рис. 5 и 6).

В целом, применение в дальнейшем методов дистанционного зондирования Земли в системе экологического мониторинга в речных системах Якутии имеет большую перспективу. Предложенная нами методика с использованием индекса AMWI является наиболее подходящей для оперативной оценки состояния водных объектов и своевременного принятия превентивных природоохранных мероприятий.

Заключение

Многолетними исследованиями НИИПЭС СВФУ выявлено, что при техногенном воздействии объектов горнодобывающей промышленности трансформация аллювиальных ландшафтных комплексов выражается не только в загрязнении рек химическими элементами-токсикантами и мелкодисперсными взвесями, но и в деградации почвенно-растительного покрова речных пойм, нарушении теплового режима многолетнемерзлых грунтов, образовании новых техногенно-преобразованных ландшафтов, а также в полном уничтожении мест обитания ихтиофауны на участках промышленной отработки, донных биоценозов при отведении русла рек и т. д.

Разработка россыпных месторождений золота является источником поступления избыточного количества минеральных взвесей в водотоки. Большая часть продуктов эрозии антропогенного происхождения, особенно мелкие фракции, уносится потоком во взвешенном состоянии на большие расстояния.

Результаты исследований показали, что использование спектральных характеристик спутниковых снимков позволяет не только выявить наличие взвешенных частиц в воде и степень их загрязнения, но и установить пространственно-временные закономерности распределения мутности водных объектов, оперативно контролировать их экологическое состояние. Для оценки мутности поверхностных вод в районе устья р. Витим наилучшие результаты среди тестируемых водных индексов получены при использовании индекса AMWI.

В связи с этим предложенная нами методика с использованием индекса AMWI может применяться для оперативной оценки состояния водных объектов Якутии в условиях их активного техногенного загрязнения, с целью своевременного принятия превентивных природоохранных мероприятий.

Список литературы / References

1. Саввинов Г.Н. *Эколого-почвенные комплексы Якутии*. М.: Недра; 2007. 312 с.
Savvinov G.N. *Ecological and soil complexes in Yakutia*. Moscow: Nedra; 2007. 312 p. (In Russ.)
2. Lacaux J.P., Tourre Y.M., Vignolles C., et al. Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing: Application to Rift Valley Fever epidemics in Senegal. *Remote Sensing of Environment*. 2006;106(1): 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.07.012>
3. Березина О.А., Шихов А.Н., Абдуллин Р.К. Применение многолетних рядов данных космической съемки для оценки экологической ситуации в угледобывающих районах (на примере ликвидированного Кизеловского угольного бассейна). *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018;(15)2:144–158. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-2-144-158>
4. Berezina O.A., Shikhov A.N., Abdullin R.K. The use of multi-temporal satellite images for environmental assessment in coal mining areas (by example of closed Kizel coal basin). *Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2018;(15)2:144–158. (In Russ.). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-2-144-158>
5. Härmä P., Vepsäläinen J., Hannonen T., et al. Detection of water quality using simulated satellite data and semi-empirical algorithms in Finland. *Science of the Total Environment*. 2001;268(1-3):107–121. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00688-4](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00688-4)
6. Голик В.И., Комащенко В.И., Дребенштедт К. *Охрана окружающей среды*. М.: Высш. школа; 2007. 270 с.
Golik V.I., Komashchenko V.I., Drebenshtedt K. *Environmental protection*. Moscow: Vyssh. shkola Publ.; 2007. 270 p. (In Russ.)
7. Логачев А.В., Голик В.И. Минимизация вредных последствий добычи золота на Дальнем Востоке. *Вестник ДВО РАН*. 2009;146(4):97–102.
Logachev A.V., Golik V.I. Minimization of harmful consequences of extraction of gold in the Far East. *Vestnik of the Far East branch of the Russian Academy of Sciences*. 2009;(4):97–102. (In Russ.)
8. Сотников В.И. Влияние рудных месторождений и их отработки на окружающую среду. *Соросовский образовательный журнал*. 1997;(5):62–65.
Sotnikov V.I. The influence of ore deposits and their processing on environment. *Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal*. 1997;(5):62–65. (In Russ.)
9. Росляков Н.А., Кириллова О.В. Ртутное загрязнение при добыче золота в России. *Химия в интересах устойчивого развития*. 1995;(3):43–56.

Roslyakov N.A., Kirillova O.V. Mercury pollution during gold mining in Russia. *Chemistry for Sustainable Development*. 1995;(3):43–56. (In Russ.)

9. Антонинова Н.Ю. *Экологическая реабилитация установок кучного выщелачивания (на примере Сафьяновского месторождения)*: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пермь; 2007. 137 с.

Antoninova N.Yu. *Environmental remediation of leaching facilities (on the example of Safyanovskoye deposit)*: Abstr. Diss. ... Cand. Sci. Perm. 2007. 137 p. (In Russ.)

10. Шаякубов Т.Ш. *Золоторудное месторождение Мурунтау*. Ташкент: ФАН; 1998. 539 с.

Shayakubov T.Sh. *Muruntau gold deposit*. Tashkent; FAN Publ.; 1998. 539 p. (In Russ.)

11. Толстов Е.А., Прохоренко Г. А., Браунли Дж. Кучное выщелачивание золота из забалансовой руды карьера Мурунтау на совместном предприятии «Зарафшан-Ньюмонт». *Цветные металлы*. 1999;(7):53–56.

Tolstov E.A., Prokhorenko G. A., Braunli D. Heap leaching of gold from off-balance ore of the Muruntau quarry at the Zarafshan-Nyomont joint venture. *Tsvetnye Metally*. 1999;(7):53–56. (In Russ.)

12. Курганович К.А. Использование нормализованного разностного индекса мутности воды NDTI для дистанционного мониторинга содержания взвешенных веществ в водах рек. В кн.: *Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов: Материалы XXII Международной научно-практической конференции. г. Чита, 28 ноября – 02 декабря 2022 г. Часть 2*. Чита: Забайкальский государственный университет; 2022. С. 142–147.

Kurganovich K.A. Use of the normalized difference water turbidity index NDTI for remote monitoring of the content of suspended substances in river waters. In: *Kulagin readings: equipment and technologies of production processes: Materials of the 22nd International Scientific and Practical Conference, Chita, November 28 – December 2, 2022. Part 2*. Chita: Transbaikal State University; 2022, pp. 142–147. (In Russ.)

13. Кочев Д.В., Эмих Н.А., Курганович К.А. Дистанционный мониторинг качества поверхностных вод водных объектов как фактор решения социально-экономических проблем Азиатско-Тихоокеанского региона. В кн.: *Научный вектор в АТР: материалы международной научно-практической конференции молодых ученых, г. Чита, 10–11 ноября 2022 г. Часть 1*. Чита: Забайкальский государственный университет; 2022. С. 35–39.

Kochev D.V., Emikh N.A., Kurganovich K.A. Remote monitoring of the quality of surface waters of water bodies as a factor in solving socio-economic problems of the Asia-Pacific region. In: *Scientific vector in the Asia-Pacific region: materials of the international scientific and practical conference of young scientists, Chita, November 10–11, 2022. Part 1*. Chita: Transbaikal State University; 2022, pp. 35–39. (In Russ.)

14. Шевченко И.А. Определение экологического состояния водоемов Киева по данным дистанционного зондирования Земли. *Мелиорация*. 2017;1(79):76–80.

Shevchenko I.A. Diagnostic of ecological state of water bodies in Kiev via remote sensing. *Land Reclamation*. 2017;(1):76–80. (In Russ.)

15. Тихомиров О.А., Бочаров А.В. Использование данных дистанционного зондирования для оценки показателей мутности воды водных объектов. *Вестник Тверского государственного университета. Серия: География и геоэкология*. 2016;(1):5–11.

Tikhomirov O.A., Bocharov A.V. Use of sensor for evaluation of indicators turbidity content in water reservoir. *Herald of Tver State University. Series: Geography and Geoecology*. 2016;(1):5–11. (In Russ.)

16. Тихомиров О.А., Бочаров А.В., Комиссаров А.Б. и др. Использование данных сенсора Landsat 8 (OLI) для оценки показателей мутности, цветности и содержания хлорофилла в воде Иваньковского водохранилища. *Вестник Тверского государственного университета. Серия: Химия*. 2016;(2):230–244.

Tikhomirov O.A., Bocharov A.V., Komissarov A.B., et al. Use of sensor landsat 8 (OLI) for evaluation of indicators turbidity, color and chlorophyll content in water reservoir Ivankovskoye. *Herald of Tver State University. Series: Chemistry*. 2016;(2):230–244. (In Russ.)

17. Тихонова С.А., Стручкова Г.П., Капитонова Т.А. Оценка антропогенного загрязнения водоемов Якутии по спектральным характеристикам космоснимков. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2021;(12–1):213–222. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_121_0_213

Tikhonova S.A., Struchkova G. P., Kapitonova T.A. Manmade pollution assessment in water bodies in Yakutia using color response curves and satellite images. *Mining informational and analytical bulletin*. 2021;(12–1): 213–222. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_121_0_213

Об авторах

САВВИНОВ Григорий Николаевич, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, директор, <https://orcid.org/0000-0002-5324-5410>, ResearcherID: T-7914-2017, Scopus Author ID: 56028258300, SPIN: 7459-1073, e-mail: savvinov_gn@mail.ru

МАКАРОВ Виктор Семенович, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-4781-9027>, ResearcherID: H-2289-2019, Scopus Author ID: 57387347600, SPIN: 6635-3508, e-mail: mvs379@yandex.ru

Вклад авторов

Саввинов Г.Н. – разработка концепции, методология, администрирование данных, редактирование рукописи

Макаров В.С. – проведение исследования, проведение статистического анализа, создание черновика рукописи

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

SAVVINOV, Grigory Nikolayevich, Dr. Sci. (Biol.), Chief Researcher, Director, <https://orcid.org/0000-0002-5324-5410>, ResearcherID: T-7914-2017, Scopus Author ID: 56028258300, SPIN: 7459-1073, e-mail: savvinov_gn@mail.ru

MAKAROV, Victor Semyonovich, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-4781-9027>, ResearcherID: H-2289-2019, Scopus Author ID: 57387347600, SPIN: 6635-3508, e-mail: mvs379@yandex.ru

Authors' contribution

Savvinov G.N. – conceptualization, methodology, data curation, review & editing

Makarov V.S. – investigation, formal analysis, original draft

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 08.04.2024

Поступила после рецензирования / Revised 17.05.2024

Принята к публикации / Accepted 29.05.2024

Палеопаразитологические исследования шерстистого мамонта (*Mammutus primigenus* (Blumenbach, 1799))

М. В. Андреева✉, И. С. Павлов, Л. Н. Владимиров,
А. В. Протопопов, Г. Н. Мачахтыров, В. А. Мачахтырова

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

✉ amv-65@mail.ru

Аннотация

Объекты мамонтовой фауны, обнаруженные в толще многолетней мерзлоты, отличаются хорошей сохранностью. До 90 % всех уникальных находок как с мягкими тканями, так и ископаемых животных с сохранившимися биологическими жидкостями, обнаружены на территории Якутии. Однако, несмотря на уникальные условия сохранения в толще многолетней мерзлоты, ископаемые останки шерстистого мамонта не использовались в палеопаразитологических исследованиях. В настоящей статье приводятся первые результаты, полученные при палеопаразитологическом изучении замороженно-оттаянных проб, отобранных от шерстистого мамонта. Материалом для настоящих исследований послужило содержимое желудочно-кишечного тракта шерстистого мамонта, найденного в Булунском районе на полуострове Быковский в 2022 г. Останки мамонта были обнаружены в слое многолетней мерзлоты и до момента изъятия проб постоянно хранились в замороженном виде, поэтому отобранный материал был в хорошо сохраненном виде. В связи с этим нами были использованы традиционные гельминтологические методы: нативного мазка и метод Фюллеборна. Впервые в замороженно-оттаянных пробах шерстистого мамонта были обнаружены и описаны яйца и личинки гельминтов из класса Nematoda, в том числе яйца аскарид подотряда Ascaridata, сем. Ascarididae Baird, 1853. Всего было обнаружено 13 яиц. Хорошая сохранность палеоматериала позволила нам визуализировать яйца на разных стадиях развития и измерить размеры и толщину оболочки обнаруженных яиц. Диаметр яиц аскарид шерстистого мамонта (*Mammutus primigenus* (Blumenbach, 1799)) составил $73,25 \pm 1,47$ мкм; толщина оболочки $4,10 \pm 0,20$ мкм. Также нами впервые обнаружены четыре разновидности целых личинок и фрагменты личинок типа Nematelminthes, класса Nematoda. Полученные результаты, несомненно, дополняют знания по паразитам древних ископаемых животных и требуют проведения дополнительных исследований.

Ключевые слова: мамонт, палеопаразитология, яйца, личинки, нематоды, аскарида

Финансирование. Исследование выполнено за счет финансирования Комплексных научных исследований по теме «Фенотипическая и палеогенетическая идентификация таксономического состава позднелайстоценовых изолятов» на 2024 г.

Для цитирования: Андреева М.В., Павлов И.С., Владимиров Л.Н., Протопопов А.В., Мачахтыров Г.Н., Мачахтырова В.А. Палеопаразитологические исследования шерстистого мамонта (*Mammutus primigenus* (Blumenbach, 1799)). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(2):259–267. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-259-267>

Original article

Paleoparasitological studies of the woolly mammoth (*Mammutus primigenus* (Blumenbach, 1799))

Marina V. Andreeva✉, Innokentiy S. Pavlov, Leonid N. Vladimirov, Albert V. Protopopov,
Gregory N. Machakhtyrov, Varvara A. Machakhtyrova

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

✉ amv-65@mail.ru

Abstract

Mammoth fauna found in the permafrost in Yakutia are usually well-preserved, with up to 90% of unique discoveries, including those with soft tissues and fossil animals with intact biological fluids. Despite the exceptional preservation

conditions in the deep permafrost, the remains of woolly mammoth have not been used in paleoparasitological research. This article introduces the initial findings of a paleoparasitological investigation conducted on thawed samples obtained from a woolly mammoth. The research material consisted of the gastrointestinal contents of a woolly mammoth found in the Bulunsky district on the Bykovsky Peninsula in 2022. The mammoth's remains were discovered in permafrost and were consistently frozen until sampling, maintaining their shape well. Traditional helminthological methods, such as native smear and the Fulleborn method, were used. For the first time, eggs and larvae of helminths from the Nematoda class, including the *Ascaris* eggs from the Ascaridata suborder, family Ascarididae Baird, 1853 were identified in frozen-thawed samples of the woolly mammoth. A total of 13 eggs were found, showcasing excellent preservation that allowed for visualization of eggs at various developmental stages and measurement of eggshell size and thickness. The diameter of the *Ascaris* eggs from the woolly mammoth (*Mammutus primigenus* (Blumenbach, 1799)) was 73.25 ± 1.47 microns, with a shell thickness of 4.10 ± 0.20 microns. Additionally, four varieties of whole larvae and larvae fragments of the Nematelminthes type within the Nematoda class were identified for the first time. These discoveries contribute to our knowledge of ancient fossil animals parasites and require further exploration.

Keywords: mammoth, paleoparasitology, eggs, larvae, nematodes, ascaris

Funding. This study was conducted as part of the Comprehensive Scientific Research on the theme of “Phenotypic and paleogenetic identification of the taxonomic composition of Late Pleistocene isolates” for 2024.

For citation: Andreeva M.V., Pavlov I.S., Vladimirov L.N., Protopopov A.V., Machakhtyrov G.N., Machakhtyrova V.A. Paleoparasitological studies of the woolly mammoth (*Mammutus primigenus* (Blumenbach, 1799)). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(2):259–267. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-259-267>

Введение

Мамонтовая фауна плейстоцена является особым фаунистическим сообществом, существовавшим в условиях, которые до настоящего времени остаются во многом не исследованными, и их изучение требует особых методологических подходов [1].

Одним из новых местонахождений, открытых в 2020 г., является участок мыса Муостах, полуострова Быковский со стороны бухты Буор-Хайа и моря Лаптевых. Здесь на пляже у размываемой морем береговой линии с обрывистыми и частично сползающими берегами был собран палеонтологический материал, часть которого была фрагментирована древним человеком [2, 3]. В 2022 г. был обследован эрозийный берег Быковского полуострова, со стороны Нееловского залива в 3 км от Быковского перешейка. Район разведочных работ 2022 г. был определен проведенными в 2021 г. исследованиями на берегу залива Неелова в продолжение общего изучения п-ова Быковский в Булунском районе, начатого в 2020 г. Обнаружение вмерзшего скелета мамонта позволило провести раскопочные работы с учетом оттайки мерзлого грунта. Кости мамонта (*Mammutus primigenus* (Blumenbach, 1799)) были зафиксированы вмерзшими на берегу залива, рельеф которого представлен многочисленными буграми разной высоты от 7 до 12 м от уреза воды и на глубине 24 м от дневной поверхности. Мохово-лишайниковая тундра на этом месте ровная, без аласных низменностей, с мелкими озерцами, многочисленными глубокими оврагами, изрезанными на вечной мерзлоте с разной протяженно-

стью. На северной стороне в 4 км низменность между Корякинским озером и Омудево лагуной, с южной стороны в 3 км – перешеек Колычева. От берега залива Неелова на восток расположено урочище Ого-Алыта и далее, в 4 км, бухта Тикси [1, 4].

В России сведения об обнаружении гельминтов в тканях ископаемых мамонтов появились еще в начале XX столетия [5]. Спустя более чем 100 лет, в 2012 г., при изучении фрагментов мягких тканей молодого самца Сопкаргинского мамонта (мышц, печени, содержимого кишечника), сохранившихся в вечной мерзлоте, обнаружили яйца нематоды и цестоды, дальнейшее определение которых до вида или рода оказалось невозможным в связи с нарушением их морфологии. Тем не менее, авторы заключили, что результаты сравнения современных и древних паразитов, а также их хозяев могут дать новые знания об эволюционном и генетическом аспектах формирования явления паразитизма [6]. В публикации отмечалось, что яйца гельминтов, находясь в условиях вечной мерзлоты в трупах животных, все-таки подвергаются воздействию разницы температур и частично изменяют морфологическую структуру. Однако они подтверждают данные А.В. Хрусталева, А.Б. Савинцева [7], что яйца паразитов могут сохранять свою оболочку и даже частично свою внутреннюю структуру на протяжении десятков тысяч лет. Яйца нематод имеют характерные морфологические структуры, по которым их можно обнаружить, однако, при сравнительной микроскопической оценке яиц гельминтов древних и современных животных

невозможно прийти к однозначному решению в определении их до вида. Исследованиями Гламаздина и др. [6, 8] было обнаружено наличие у мамонта яиц гельминтов, относящихся к типам Plathelminthes и Nematelminthes, к классам Cestoda и Nematoda соответственно.

Обзор находок паразитов у шерстистого мамонта *M. primigenius* (Blumenbach, 1799), чьи остатки (включая мягкие ткани и внутренние органы) достаточно часто встречаются в вечномёрзлых отложениях Северо-Востока Евразии, проведен Н.В. Сердюк и Е.Н. Машенко [9].

Об обнаружении яиц нематод у мамонтов представителей семейства Ascarididae Baird, 1853 имеется сообщение Т.Н. Сивковой и П.А. Косинцева [10]. Данными авторами проведено паразитологическое исследование содержимого кишечника двух мамонтов – Монгоченского (Гыданский полуостров) и Тадибе (полуостров Ямал). Работу проводили по общепринятой в палеопаразитологии методике с применением регидратации остатков и последующим использованием комбинированного и седиментационного методов. При паразитологическом исследовании содержимого кишечника Монгоченского мамонта паразитов обнаружено не было, тогда как анализ материала от мамонта из Тадибе позволил выявить два яйца нематод. Крупные размеры, округлая форма, наличие толстой слоистой оболочки позволили идентифицировать данные объекты как яйца представителей семейства Ascarididae Baird, 1853. Диаметр яиц составил $78,68 \pm 1,19$ и $87,94 \pm 0,47$ мкм, толщина стенки – $4,14 \pm 0,29$ и $4,48 \pm 0,34$ мкм, что сопоставимо с аналогичными показателями современных представителей.

Таким образом, при изучении останков мамонтов находки паразитов являются редкими и случайными, паразитологические исследования в области палеопаразитологии представляют особый интерес и являются актуальными. Целью наших работ было проведение палеопаразитологических исследований проб содержимого желудочно-кишечного тракта и обнаружение яиц и личинок нематод у шерстистого Быковского мамонта (*Mammutus primigenus* (Blumenbach, 1799)) плейстоценового периода.

Материал и методика

Исследования проводились на базе Отдела изучения мамонтовой фауны АН РС (Я) в феврале 2024 г. Материалом послужило содержимое желудочно-кишечного тракта шерстистого ма-



Рис. 1. Содержимое кишечника, обнаруженное в слое вечной мерзлоты

Fig. 1. Intestinal contents found in the permafrost layer

монта, найденного в Булунском районе на полуострове Быковский. Обнаружение вмерзшего скелета мамонта позволило провести раскопочные работы с учетом оттайки мерзлого грунта. Необходимые нам пробы были отобраны с 22 по 28 июня 2022 г. и доставлены инженером-исследователем И.С. Павловым. Так как останки мамонта были обнаружены в слое вечной мерзлоты, отобранный материал был в замороженном хорошо сохраненном виде. Для гельминтологических исследований всего было отобрано четыре пробы, с общим объемом 2 кг из разных участков кишечника: 1 проба – 1 кг, 2 проба – 200 г, 3 проба – 200 г, 4 проба – 600 г.

В связи с тем что после размораживания материал был идентичен с пробой свежей фекалии, при лабораторных исследованиях были использованы традиционные методы гельминтооооскопии: метод нативного мазка и метод Фюллеборна [1].

Исследования проводили микроскопом Nikon eclipse E 200. Морфометрические данные снимали с помощью окулярного микрометра и цифровой камеры МС-8.3С. При статистической обработке использовали приложение «Microsoft Excel».

Результаты и обсуждение

Яйца нематод

На рисунках 2–7 приведены яйца гельминтов шерстистого мамонта, обнаруженные методами Фюллеборна и нативного мазка. Всего было обнаружено 13 яиц.

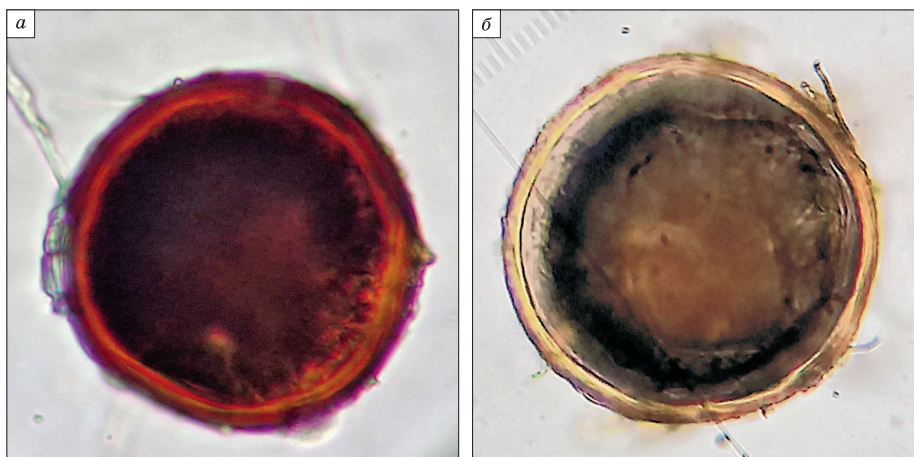


Рис. 2. Яйца аскариды, обнаруженные: *a* – методом Фюллеборна; *б* – методом нативного мазка (×400)
Fig. 2. Ascaris eggs: *a* – Fulleborn method; *б* – native smear method (×400)

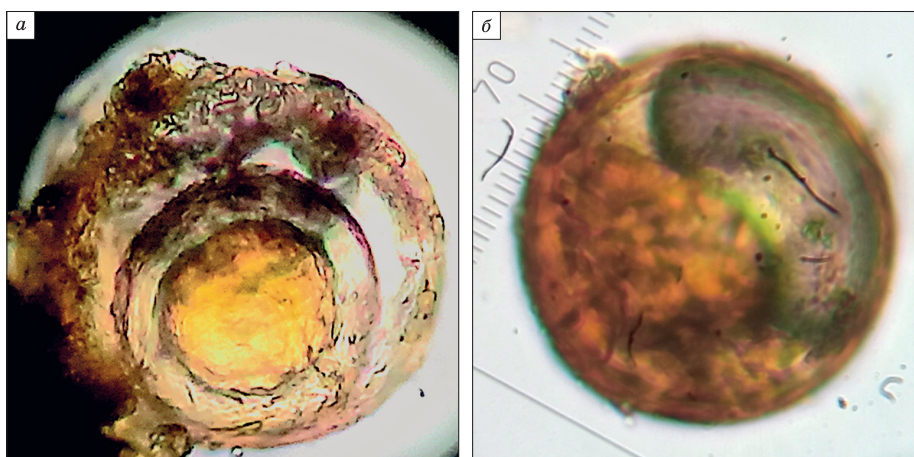


Рис. 3. Яйцо с двухслойной оболочкой (*a*) и яйцо с личинкой (×400) (*б*)
Fig. 3. *a* – egg with a double layer; *б* – egg with a larva shell (×400)

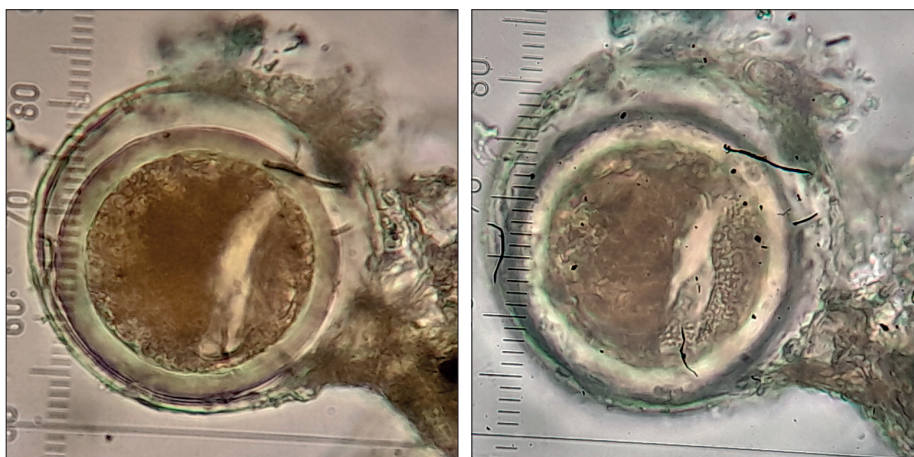


Рис. 4. Яйцо с двухслойной оболочкой и личинкой при разных позициях (×400)
Fig. 4. An egg with a double-layered shell and a larva at different positions (×400)

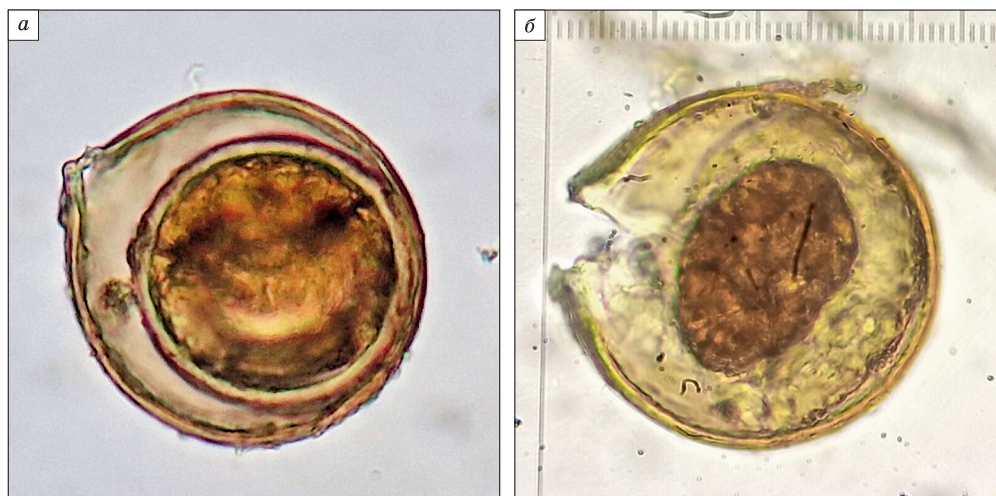


Рис. 5. Яйцо на стадии выпячивания (а) и яйцо с разорвавшейся оболочкой (×400) (б)

Fig. 5. а – an egg at the protruding stage; б – an egg with a ruptured shell (×400)

Как видно из рисунков 2–5, обнаруженные яйца имели хорошо сохраненную округлую форму, признаков деформирования не обнаружено. Четко видны контуры толстой оболочки, что позволило измерить размеры и толщину оболочек всех выявленных яиц. Отчетливость внутренней структуры изучаемых палеообъектов позволила также определить, что яйца находились на разных стадиях развития. Так, на рис. 3, б, 4, б и 5, б внутри яиц хорошо визуализируются личинки, что свидетельствует о зрелой форме яйца. На рис. 5, а зафиксировано зрелое яйцо на стадии выпячивания, а на рис. 5, б – яйцо с явно выраженной разорвавшейся оболочкой для выхода личинки.

Диаметр яиц аскарид мамонта (*Mammutus primigenus* (Blumenbach, 1799)) составил $73,25 \pm 1,47$ мкм; толщина оболочки – $4,10 \pm 0,20$ мкм.

Таким образом, исходя из вышеприведенных морфометрических данных, крупного размера, округлой формы и наличия толстой слоистой оболочки яиц, мы идентифицировали данные объекты как яйца представителей семейства Ascarididae Baird, 1853. По строению, как видно из рис. 6 и 7, они напоминают яйца современных параскарид лошадей. Для сравнения с яйцами мамонта были исследованы пять проб фекалий от якутской породы лошади. Всего было обнаружены 19 яиц. Размеры яиц, обнаруженных в пробах лошадей, *Parascaris equorum* составили: диаметр – $84,70 \pm 2,06$ мкм, толщина оболочки – $5,35 \pm 0,32$ мкм.

Результаты наших исследований подтверждаются данными А.В. Хрусталева, А.Б. Савицкого [8] о том, что яйца паразитов, в частности нематод, могут сохранять свою оболочку и даже частично свою внутреннюю структуру на протяжении десятков тысяч лет.

Личинки нематод

Нами впервые обнаружены личинки и фрагменты личинок класса Nematoda у шерстистого

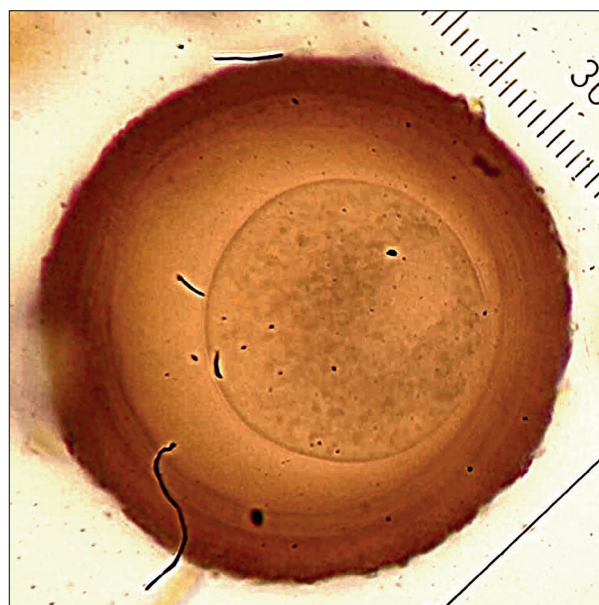


Рис. 6. Яйцо *Parascaris equorum* якутской лошади (×400) (метод Фюллеборна)

Fig. 6. Egg of *Parascaris* (×400) (by the Fulleborn method) equorum from the Yakut horse

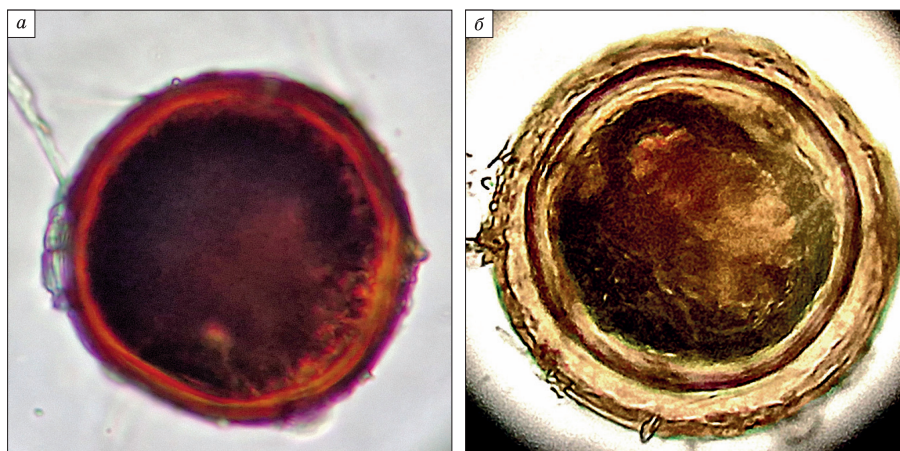


Рис. 7. Яйцо аскаридного типа мамонта: *а* – метод Фюллеборна; *б* – нативного мазка ($\times 400$)

Fig. 7. Ascarid type egg from the mammoth: *a* – by the Fulleborn method; *b* – by native smear ($\times 400$)

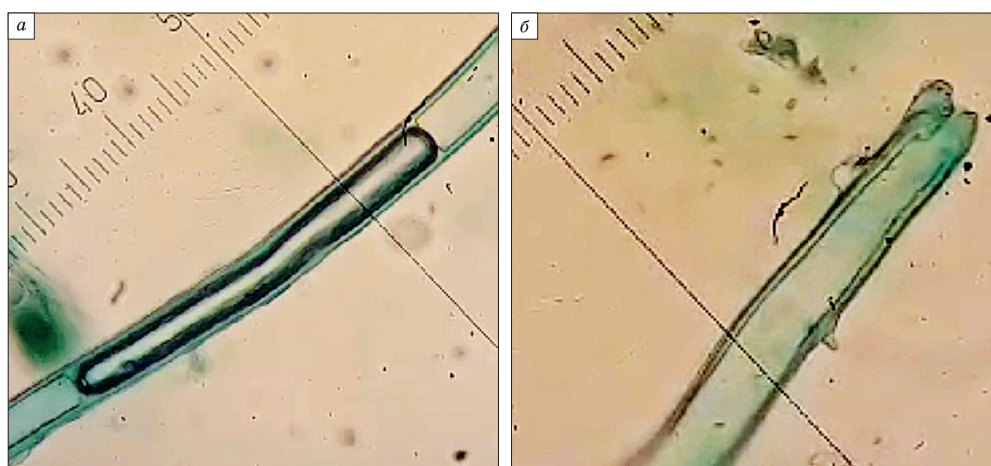


Рис. 8. Средний сегмент (*а*) и кутикула личинки с шипами (*б*) личинки нематоды №1 ($\times 400$)

Fig. 8. *a* – middle segment; *b* – larva's culicle of the larva with thorns in nematode No. 1 ($\times 400$)

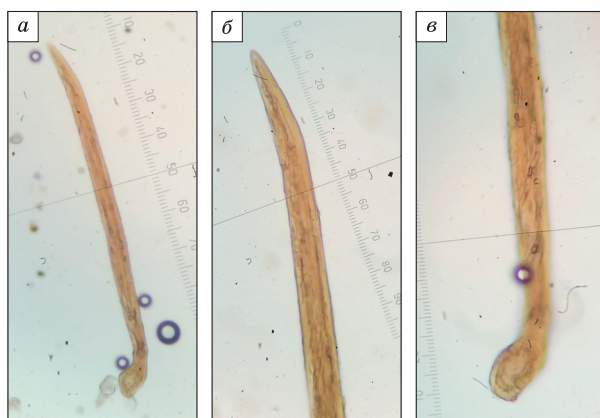


Рис. 9. Личинка нематоды № 2, *а* – общий вид, длина 910 мкм ($\times 100$); *б* – головной конец; *в* – хвостовой конец ($\times 400$)

Fig. 9. *a* – nematode larva No. 2, length 910 microns ($\times 100$); *b* – head end; *c* – tail end ($\times 400$)

мамонта. На рис. 8–11 приведены личинки, выявленные методом нативного мазка. Обнаруженные личинки целые, имеют продолговато-удлиненную форму с четким контуром стенки оболочки, хорошо различаются головной и хвостовой концы. Всего обнаружены четыре разновидности целых личинок. При микроскопической оценке личинок гельминтов невозможно прийти к однозначному решению в определении их до вида.

Закключение

Палеопаразитология является одним из новых направлений паразитологии, которая занимается обнаружением эндо- и эктопаразитов в различном ископаемом материале. Нами впервые проведены палеогельминтологические исследования сохранившегося в замороженном виде содержимого

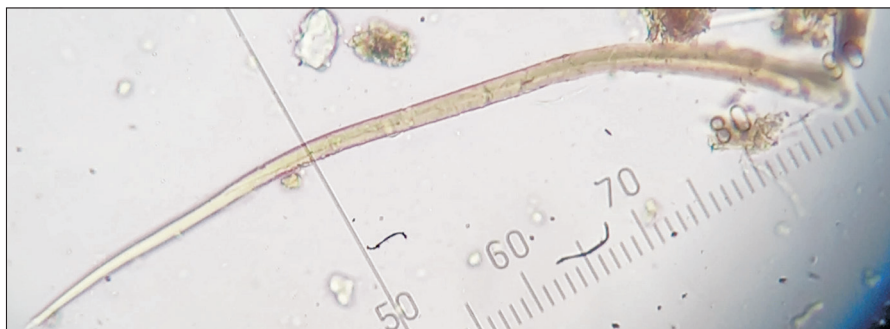


Рис. 10. Личинка нематоды № 3, длина 650 мкм (×100)

Fig. 10. Nematode larva No. 3, length 650 microns (×100)

желудочно-кишечного тракта шерстистого Быковского мамонта плейстоценового периода. Так как останки мамонта были обнаружены в слое вечной мерзлоты и отобранный материал был в хорошо сохраненном виде, нами были использованы традиционные гельминтологические методы исследования: метод нативного мазка и метод Фюллеборна. Впервые нами на замороженно-оттаянных пробах желудочно-кишечного тракта шерстистого мамонта были обнаружены яйца и личинки гельминтов из класса Nematoda, в том числе яйца аскарид подотряда Ascaridata, сем. Ascarididae Baird, 1853. Всего было обнаружено 13 яиц. Хорошая сохранность палеоматериала позволила нам визуализировать яйца на разных стадиях развития и измерить размеры и толщину оболочки обнаруженных яиц. Диаметр яиц аскарид шерстистого мамонта (*Mammutus primigenus* (Blumenbach, 1799)) составил $73,25 \pm 1,47$ мкм; толщина оболочки $4,10 \pm 0,20$ мкм. Также нами впервые обнаружены четыре разновидности целых личинок и фрагменты личинок типа Nematelminthes, класса Nematoda. Полученные результаты подтверждают данные других авторов в том, что яйца паразитов, в частности нематод, могут сохранять свою оболочку и даже частично свою внутреннюю структуру на протяжении десятков тысяч лет. Полученные результаты несомненно дополняют знания по паразитам древних ископаемых животных и требуют дополнительных исследований.

Список литературы / References

1. Кандыба А.В., Зоткина Л.В., Павлов И.С. и др. Комплексное изучение палеолитических объектов Арктической зоны (местонахождение Муостях, Булунский район, Республика Саха Якутия). *Северо-Восточный гуманитарный вестник*. 2022;(39)2:24–34.



Рис. 11. Личинка нематоды № 4, длина 370 мкм (×100)

Fig. 11. Nematode larva No. 4, length 370 microns (×100)

Kandyba A.V., Zotkina L.V., Pavlov I.S., et al. Comprehensive study of Paleolithic objects in the Arctic zone (Muostakh Site, Bulunsky District, Republic of Sakha Yakutia). *North-Eastern Journal of Humanities*. 2022; 39(2):24–34. (In Russ.)

2. Кандыба А.В., Дьяконов В.М., Павлов И.С. и др. Полевые исследования на территории Булунского района (Республика Саха (Якутия)) в 2020 году. В кн.: *Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий*. Т. 26. Новосибирск: Изд-во ИАЭТ СО РАН; 2020. С. 107–112.

Kandyba A.V., Dyakonov V.M., Pavlov I.S., et al. Field research in Bulunsky district in Republic of Sakha (Yakutia) in 2020. In: *Problems of Archeology, Ethnography and Anthropology of Siberia and Neighboring Territories*. Vol. 26. Novosibirsk: IAET SB RAS Publ.; 2020, pp. 107–112. (In Russ.)

3. Кандыба А.В., Павлов И.С., Бочкарев В.В. и др. Полевые исследования на территории Булунского района (Республика Саха (Якутия)) в 2021 году. В кн.: *Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий*. Т. 27. Новосибирск: Изд-во ИАЭТ СО РАН; 2021. С. 128–133.

Kandyba A.V., Pavlov I.S., Bochkarev V.V., et al. Field research in Bulunsky district in Republic of Sakha (Yakutia) in 2021. In: *Problems of Archeology, Ethnography, Anthropology of Siberia and Neighboring Territories*.

ries. Vol. 27. Novosibirsk: IAET SB RAS Publ.; 2021, pp. 128–133. (In Russ.)

4. Кандыба А.В., Павлов И.С., Павлова Н.И., Протопопов А.В. Полевые исследования на территории Булунского района (Республика Саха (Якутия)) в 2022 году. В кн.: *Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий*. Т. 28. Новосибирск: ИАЭТ СО РАН; 2022. С. 116–121.

Kandyba A.V., Pavlov I.S., Pavlova N.I., Protopopov A.V. Field research in Bulunsky district in Republic of Sakha (Yakutia) in 2022. In: *Problems of Archeology, Ethnography, Anthropology of Siberia and Neighboring Territories*. Vol. 28. Novosibirsk: IAET SB RAS Publ.; 2022, pp. 116–121.

5. Баляницкий-Бируля Ф.А. Гистологические и микрохимические наблюдения над тканями Березовского мамонта. В кн.: *Научные результаты экспедиции, снаряженной Императорской академией наук для раскопки мамонта, найденного на реке Березовке в 1901 году*. СПб.; 1909. С. 1–20.

Balyanitsky-Birulya F.A. Histological and microchemical observations on the tissues of the Berezovsky mammoth. In: *Scientific results of an expedition equipped by the Imperial Academy of Sciences to excavate a mammoth found on the Berezovka River in 1901*. St. Petersburg; 1909, pp. 1–20. (In Russ.)

6. Гламаздин И.Г., Сердюк Н.В., Панова О.А. и др. Паразитологические исследования органов и тканей Сопкаргинского мамонта (*M. primigenius*) (Таймыр, Россия). В кн.: Курочкина К.Г. (ред.) *Теория и практика борьбы с паразитарными болезнями: Материалы докладов научной конференции, г. Москва, 20–21 мая, 2014. Вып. 15*. Москва; 2014. С. 73–76.

Glamazdin I. G., Serdyuk N.V., Panova O.A., et al. Parasitological investigation of Sopkarginsk mammoth (*M. primigenius*) organs and tissues (Taimir, Russia). In: Kurochkina K.G. (ed.) *Theory and practice of combating parasitic diseases: Proceedings of the scientific conference, Moscow, May 20–21, 2014, Issue 15*. Moscow; 2014, pp. 73–76. (In Russ.)

7. Хрусталева А.В., Савинецкий А.Б. Находка яиц гельминтов в ископаемых экскрементах животных. *Паразитология*. 1992;26(2):122–129.

Khrustalev A.V., Savinetsky A.B. Occurrence of helminths' eggs in quaternary deposits of animals' feces. *Parazitologiya*. 1992;26(2):122–129. (In Russ.)

8. Glamazdin I., Panova O., Serdyuk N., Maschenko E. Preliminary results of parasitological research on a woolly mammoth, *Mammuthus primigenius* from Taimyr Peninsula, Russia. In: *Abstracts of papers: 74th annual meeting of Society of vertebrate paleontology*, November 5–8, 2014. Berlin; 2014. P. 139.

9. Сердюк Н.В., Машченко Е.Н. Обзор известных паразитов шерстистого мамонта (*Mammuthus primigenius* Blumenbach 1799). *Труды Зоологического института РАН*. 2018;322(3):306–314. <https://doi.org/10.31610/trudyzin/2018.322.3.306>

Serdyuk N.V., Mashchenko E.N. Parasitic diseases of woolly mammoth (*Mammuthus primigenius* Blumenbach 1799). *Proceedings of the Zoological Institute of the Russian Academy of Sciences*. 2018;322(3):306–314. <https://doi.org/10.31610/trudyzin/2018.322.3.306>

10. Сивкова Т.Н., Косинцев П.А. Обнаружение яиц аскарид у мамонта. В кн.: *Теория и практика борьбы с паразитарными болезнями: Материалы Международной научной конференции, г. Москва, 17–19 мая 2023 г. Вып. 24*. М.; 2023. С. 426–430.

Sivkova T.N., Kosintsev P.A. Finding of ascaris eggs in mammoth. In: *Theory and practice of combating parasitic diseases: Proceedings of the International Scientific Conference, Moscow, May 17–19, 2023, Issue 24*. Moscow; 2023, pp. 426–430. <https://doi.org/10.31016/978-5-6048555-6-0.2023.24.426-430>

11. Акбаев М.Ш., Василевич Ф.И., Акбаев Р.М. и др. *Паразитология и инвазионные болезни животных: Учебник и учебные пособия*. Москва: Колос; 2008. 776 с.

Akbaev M.Sh., Vasilevich F.I., Akbaev R.M., et al. *Parasitology and invasive animal diseases: Textbook and manuals*. Moscow: Kolos; 2008. 776 p. (In Russ.)

Об авторах

АНДРЕЕВА Марина Витальевна, кандидат ветеринарных наук, ведущий научный сотрудник, доцент, <https://orcid.org/0009-0004-1291-9126>, SPIN: 6417-0165, e-mail: amv-65@mail.ru

ПАВЛОВ Иннокентий Семенович, инженер-исследователь, <https://orcid.org/0000-0002-4417-1800>, SPIN: 7658-8446, e-mail: pavlovinn@mail.ru

ВЛАДИМИРОВ Леонид Николаевич, член-корреспондент РАН, академик Академии наук РС (Я), доктор биологических наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0001-6026-3679>, Scopus Author ID: 57004575000, SPIN: 2189-0659, e-mail: vladimirovln@mail.ru

ПРОТОПОПОВ Альберт Васильевич, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-6543-4596>, SPIN: 7311-5540, e-mail: a.protopopov@mail.ru

МАЧАХТЫРОВ Григорий Николаевич, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-8328-4744>, ResearcherID: ABA-4349-2021, SPIN: 2088-3016, e-mail: aylga@mail.ru

МАЧАХТЫРОВА Варвара Анатольевна, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-0988-0943>, ResearcherID: ABA-4356-2021, SPIN: 6781-3467, e-mail: varvara-an@mail.ru

Вклад авторов

Андреева М. В. – методология, проведение исследования, проведение статистического анализа, создание черновика рукописи

Павлов И. С. – ресурсное обеспечение исследования, проведение исследования

Владимиров Л. Н. – разработка концепции, руководство исследованием

Протопопов А. В. – администрирование проекта

Мачахтыров Г. Н. – разработка концепции, проведение исследования, методология

Мачахтырова В. А. – администрирование данных, проведение исследования

Конфликт интересов

Один из авторов – член-корреспондент РАН, академик Академии наук РС (Я), доктор биологических наук, профессор Владимир Л.Н. является главным редактором журнала «Природные ресурсы Арктики и Субарктики». Авторам неизвестно о каком-либо другом потенциальном конфликте интересов, связанном с этой статьей.

About the authors

ANDREEVA, Marina Vitalievna, Cand. Sci. (Vet.), Leading Researcher, Associate Professor, <https://orcid.org/0009-0004-1291-9126>, SPIN: 6417-0165, e-mail: amv-65@mail.ru

PAVLOV, Innokentiy Semenovich, Research Engineer, <https://orcid.org/0000-0002-4417-1800>, SPIN: 7658-8446, e-mail: pavlovin@mail.ru

VLADIMIROV, Leonid Nikolaevich, Correspondent Member of the RAS, Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Dr. Sci. (Biol.), Professor, <https://orcid.org/0000-0001-6026-3679>, Scopus Author ID: 57004575000, SPIN: 2189-0659, e-mail: vladimirovln@mail.ru

PROTOPOPOV, Albert Vasilyevich, Dr. Sci. (Biol.), Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-6543-4596>, SPIN: 7311-5540, e-mail: a.protopopov@mail.ru

MACHAKHTYROV, Grigory Nikolaevich, Cand. Sci. (Biol.), Leading Researcher, ResearcherID: ABA-4349-2021, <https://orcid.org/0000-0002-8328-4744>, SPIN: 2088-3016, e-mail: aylga@mail.ru

MACHAKHTYROVA, Varvara Anatolyevna, Cand. Sci. (Biol.), Leading Researcher, Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-0988-0943>, ResearcherID: ABA-4356-2021, SPIN: 6781-3467, e-mail: varvara-an@mail.ru

Authors' contribution

Andreeva M. V. – methodology, investigation, formal analysis, original draft

Pavlov I. S. – resources, investigation

Vladimirov L.N. – conceptualization, investigation

Protopopov A.V. – project administration

Machakhtyrov G. N. – conceptualization, investigation, methodology.

Machakhtyrova V. A. – data curation, investigation

Conflict of interest

One of the authors, Vladimirov L.N., Corresponding Member of RAS, Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Dr. Sci. (Biol.) is the Editor-in Chief for the journal “Arctic and Subarctic Natural Resources”. The authors are not aware of any other potential conflict of interest relating to this article.

Поступила в редакцию / Submitted 14.04.2024

Поступила после рецензирования / Revised 22.05.2024

Принята к публикации / Accepted 30.05.2024

Оригинальная статья

Пути проникновения и перспективы инвазии азиатского барсука *Meles leucurus* Hodgson 1847 (Carnivora, Mustelidae) на территорию Якутии

Е. Г. Шадрина✉

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

✉e-shadrina@yandex.ru

Аннотация

В статье приводятся сведения о двух находках азиатского барсука на территории Юго-Западной Якутии в 2000-х гг. и обсуждаются возможности вселения нового вида в таежные экосистемы Якутии. Находки приурочены к долине р. Лена и ее левого притока р. Нюя. Первый пункт расположен на берегу Лены более чем в 700 км ниже по течению от самой северной точки ранее известного постоянного обитания вида в долине р. Лена и в 300 км ниже от предыдущей находки в Якутии (в середине XX в.). Второй пункт расположен в 80 км северо-западнее первого – в долине р. Нюя, на расстоянии 1 км от ближайшей речки и в 30 км от р. Лена. Можно предположить, что случаи миграции барсука на территорию Якутии связаны с климатическими изменениями. Возможны три пути миграции азиатского барсука за пределы основного ареала на территорию Якутии: по долине р. Лена, где имеются биотопы, сходные с привычными лесостепными местообитаниями вида; от долины р. Нижняя Тунгуска по долинам рек Нюя и Чона – в бассейны рек Лена и Вилюй; третий – выселение по правобережным притокам р. Лена со стороны Патомского нагорья. В Центральной и Западной Якутии имеются биотопы, потенциально пригодные для обитания барсука, но многолетняя мерзлота и ограниченность кормовых ресурсов являются лимитирующими факторами, препятствующими расселению вида на север.

Ключевые слова: азиатский барсук, *Meles leucurus*, расширение ареала, биологические инвазии, Якутия

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по проекту «Популяции и сообщества животных водных и наземных экосистем криолитозоны восточного сектора российской Арктики и Субарктики: разнообразие, структура и устойчивость в условиях естественных и антропогенных воздействий» (тема № FWRS-2021-0044; гос. регистрация №121020500194-9).

Благодарности. Автор благодарит за помощь в получении материала охотника-любителя В.Я. Юрова, а также сотрудников Ленской районной инспекции Министерства экологии, природопользования и лесного хозяйства РС(Я) Б.Р. Мыреева и Ф.А. Тарасова.

Для цитирования: Шадрина Е.Г. Пути проникновения и перспективы инвазии азиатского барсука *Meles leucurus* Hodgson 1847 (Carnivora, Mustelidae) на территорию Якутии. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(2):268–276. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-268-276>

Original article

The ways of penetration and prospects of invasion of the Asian badger *Meles leucurus* Hodgson 1847 (Carnivora, Mustelidae) into the territory of Yakutia

Elena G. Shadrina✉

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

✉e-shadrina@yandex.ru

Abstract

Two cases of the Asian badger findings in the territory of the South-Western Yakutia in 2000s were discussed, as well as the possibility of this species penetration into the taiga ecosystems of Yakutia. The findings were made in the Lena River valley and its left tributary, the Nyuya River. The most remote site is on the right side of the Lena River, over

700 km downstream from the northernmost site where the species is reliably known to inhabit in the Lena River valley, and 300 km from the previous finding site in Yakutia (in the mid-20th century). The second site is located 80 km to the northwest of the first site, in the Nyuya River valley, 1 km from the nearest river, and 30 km from the Lena River. It can be assumed that the cases of badger migration to the territory of Yakutia are associated with climatic changes. There are three possible migration ways for the Asian badger from its primary geographic range into Yakutia: through the Lena River valley, where it can encounter biotopes resembling the forest-steppe habitats typical for this species; from the Nizhnyaya Tunguska River valley through the Nyuya and Chona Rivers into the valleys of the Lena and Vilyuy Rivers; and the third way, through the right-bank tributaries of the Lena River from the Patom Highlands. There are biotopes potentially suitable for the badger in the Central and Western Yakutia, but permafrost and limited food availability can be limiting factors hindering the expansion of the species northwards.

Keywords: Asian badger, *Meles leucurus*, range extension, biological invasions, Yakutia

Funding. This study was conducted within the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation “Animal populations and communities of aquatic and terrestrial ecosystems in the cryolithozone of the Eastern sector of the Russian Arctic and Subarctic: diversity, structure and sustainability under natural and anthropogenic influences” (theme No. 0297-2021-0044, registration No. 121020500194-9).

Acknowledgements. We express our gratitude to V.Ya. Yurov, a hunter, for his help in acquiring the material, along with the staff of the Lena District Inspectorate at the Ministry of Ecology, Nature Management and Forestry of the RS (Ya) B.R. Myreev and F.A. Tarasov.

For citation: Shadrina E.G. The ways of penetration and prospects of invasion of the Asian badger *Meles leucurus* Hodgson 1847 (Carnivora, Mustelidae) into the territory of Yakutia. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(2):268–276. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-268-276>

Введение

В последние десятилетия происходит интенсификация процесса биологических инвазий, что во многом связано с глобальными изменениями климата, позволившими чужеродным видам распространиться в регионы, в которых они ранее не могли выжить и размножиться [1–4]. Инвазивные виды угрожают биоразнообразию во всем мире [5], а чужеродные хищные млекопитающие наносят особый ущерб, способствуя значительному сокращению численности и исчезновению аборигенных видов [6]. В этих условиях большое значение приобретает мониторинг расселения хищных млекопитающих за пределы видового ареала, при этом надо отметить, что не все инвайдеры представляют опасность для экосистем вселения. Существует мнение, что в каждом отдельном случае необходимы детальный анализ и разработка методов регулирования численности, которые могут варьировать от полного уничтожения до терпимости и даже рассмотрения новых видов в качестве обогащения местного биоразнообразия [2]. Необходимость тщательного анализа каждого случая проникновения чужеродных видов приобретает особую актуальность для северных экосистем. При этом следует учитывать две противоположно направленных тенденции. С одной стороны, климатические условия ограничивают возможности интродукции и самостоятельного расселения видов в северных регионах, с другой – вселение новых видов в ценозы, характеризующиеся низким видовым раз-

нообразием, может привести к серьезным негативным экологическим и социально-экономическим последствиям [7].

Фауна наземных хищных млекопитающих Якутии включает 14 видов, из них 8 видов относятся к сем. Куны Mustelidae [8, 9]. Суровые климатические условия обусловили относительно невысокое видовое богатство и низкий потенциал для возможностей интродукции и самопроизвольного расселения видов. Помимо вышеупомянутых видов, вплоть до второй половины XX в. были известны упоминания заходов на территорию Якутии в отдельные годы трех видов хищников, не включенных в териофауну региона, – солонгоя *Mustela altaica* Pallas 1811, амурского тигра *Panthera tigris* L. 1758 и барсука *Meles meles* L. 1758 [8]. В начале XXI в. отмечены документально подтвержденный заход тигра [10] и два захода барсука [11, 12]. Относительно барсука надо отметить, что в результате ревизии рода *Meles* в настоящее время считается, что собственно *Meles meles* приурочен к европейской части РФ, тогда как на азиатской территории обитает *Meles leucurus* Hodgson, 1847 [13].

В литературе отсутствуют точные сведения о прохождении северо-восточной границы ареала азиатского барсука, что связано со слабой изученностью его распространения в регионе. Основные различия разных вариантов границы ареала вида заключаются в отношении территории Забайкалья: одни авторы включают ее в ареал (рис. 1) [14], по мнению других, граница ареала огибает с юга

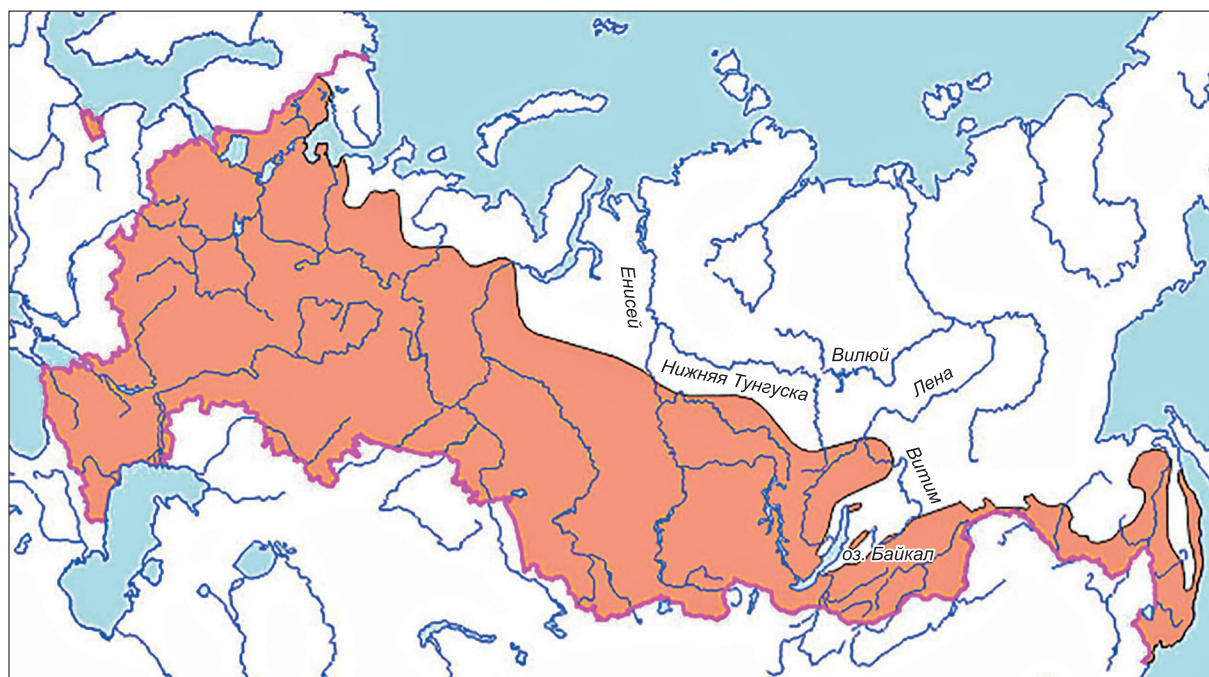


Рис. 1. Ареал рода *Meles* [16]

Fig. 1. The range of the *Meles* genus [16]

оз. Байкал и Витимское плоскогорье, затем спускается к долине р. Амур и включает Приморье (см. рис. 1) [15–17]. В последней сводке по млекопитающим России границу азиатского барсука описывают как проходящую по р. Лена в районе устья р. Витим, где граница поворачивает к югу по р. Киренга, подходя близ ее верховий к западному берегу оз. Байкал [13]. Возможно, что описание границы по долине р. Лена вплоть до устья р. Витим связано с находкой барсука осенью 1953 г. [8]. Эта находка была единственной на территории Якутии вплоть до начала XXI в. Ранее 1953 г. заходы вида на территории Якутии не регистрировались, и повторных случаев не отмечено до начала 2000-х гг., когда в течение первых двух десятилетий XXI в. зарегистрировано два случая, причем относительно недалеко друг от друга и значительно восточнее первой находки. Возможное появление нового вида в фауне Якутии представляет несомненный интерес. Барсук играет важную роль в экосистемах, уничтожая сельскохозяйственных и лесных вредителей, благодаря роющей деятельности активно преобразует почвенный и растительный покров [18, 19]; он относится к пушно-промысловым видам, но шкура ценится невысоко, и в последнее время добычи сошли на нет; так называемый барсучий

жир широко используется как средство народной медицины.

Целью данной работы было проанализировать новые сведения о находках азиатского барсука на северо-восточном пределе распространения и возможные пути расширения ареала в этом направлении.

Результаты

Первый из достоверно известных нам случаев добычи барсука отмечен на правобережье р. Лена напротив устья р. Ньюи (рис. 2, п. 5). В 2008 г. охотник-любитель В.Я. Юров добыл молодую самку средней упитанности в начале охотничьего сезона (предположительно, в конце октября). Судя по остаткам пищи, она в течение нескольких дней жила на берегу реки возле зимовья, прячась под перевернутой лодкой, питаясь рыбой, приготовленной охотниками для приманки [11]. Размеры можно оценить лишь приблизительно (судя по размерам шкуры и частично поврежденного черепа), их можно охарактеризовать как средние для вида (см. таблицу): средняя длина тела 60–90 см, хвоста 16–20 см [17], самцы значительно крупнее самок, наибольшая длина черепа самцов варьирует в пределах 106–140 мм, самок – 110–137 мм [20]. Судя по про-

порциям черепа, стертости зубов и развитию черепных швов и гребней, возраст данной особи оценивается менее 1 года.

Второй случай захода отмечен 10 октября 2014 г., в долине р. Нюя (левый приток р. Лена первого порядка). Эта находка (см. рис. 2, п. 6) расположена более чем в 80 км северо-западнее находки 2008 г., причем удалена не только от долины р. Лена (30 км по прямой), но и от ее притока 1-го порядка (4 км по прямой). Зверь был добыт охотниками на правом берегу р. Малый Мурбай (Оччугуй Мурбайы) на расстоянии примерно 1 км от уреза воды. Судя по всему, он активно перемещался, возможно, искал место для зимовки. Это взрослое животное с хорошо развитым заглазничным сужением, черепными гребнями и выраженной стертостью коренных зубов и резцов.

Обсуждение результатов

Надо отметить, что постоянное обитание азиатского барсука в долине Верхней Лены подтверждено Д.Ф. Леонтьевым [21], который отмечает, что, начиная с 1980-х гг., граница ареала барсука значительно продвинулась в северном направлении и к началу 2000-х годов из приангарского и приленского лесостепья он распространился по р. Лена до широты г. Киренск. В период наших исследований на территории Юго-Западной Якутии в 1999–2013 гг. в долине р. Лена, в нижнем

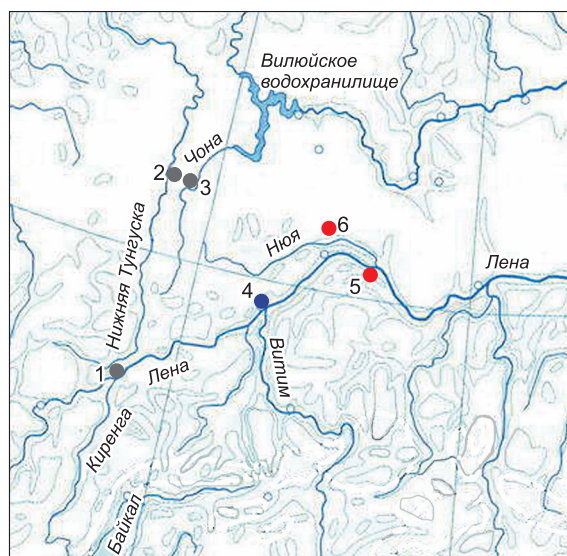


Рис. 2. Места обитания азиатского барсука на территории Иркутской области и заходы на территорию Якутии. 1–3 – Иркутская область [21]: 1 – устье р. Киренга, 2 – долина р. Нижняя Тунгуска, 3 – долина р. Чона; 4–6 – Якутия: 4 – устье р. Витим, 1953 г. [8], 5 – устье р. Нюя, 2008 г., 6 – долина р. Нюя, 2014 г. (5, 6 – наши данные)

Fig. 2. The habitation sites of Asian badger in the north of the Irkutsk Oblast and its findings in the territory of Yakutia. 1–3 – Irkutsk oblast [21]; 1, the mouth of the Kirenga River; 2, the Lower Tunguska River valley; 3, the Chona River valley; 4–6 – Yakutia; 4, the mouth of the Vitim River, 1953 [8]; 5, the mouth of the Nyuya River, 2008; 6, the Nyuya River valley, 2014 (5–6 our data)

Морфометрические показатели азиатского барсука *Meles leucurus*, добытого на территории Якутии

Morphometric parameters of the Asian badger *Meles leucurus*, captured in the territory of Yakutia

Показатель Parameters	Экз. № 1, 2008 г. / Specimen 1, 2008 60,500946° с.ш., 116,293004° в.д.*	Экз. № 2, 2014 г. / Specimen 2, 2014 60,972988° с.ш., 115,097766° в.д.*
Пол / возраст	♀ / < 1 года	? / > 2 лет
Длина тела, см	~ 72	–
Длина хвоста, см	~ 15	–
Череп		
Общая длина, мм	~120	121,8
Кондилобазальная длина, мм	–	114,2
Скуловая ширина, мм	67,6	66,3
Межглазничное сужение, мм	25,8	24,8
Заглазничное сужение, мм	24,7	18,5
Длина верхнего ряда коренных зубов, мм	26,8	30,6
Длина нижнего ряда коренных зубов, мм	28,8	36,1
Стертость бугорков коренных зубов	Не выражена	M ₃
Стертость резцов нижней челюсти	Не выражена	Значительная

* Координаты указаны со слов охотников.

* Coordinates are given by the hunters' account.

течении р. Витим, а также еще пяти ее притоков не отмечено свидетельств обитания барсука (следов, нор, троп). Опросы местных жителей показали, что облик барсука им неизвестен, хотя одним из традиционных занятий населения является охота и все местные виды хорошо опознаются при опросах. Поэтому можно утверждать, что граница, указанная Д.Ф. Леонтьевым [21], наиболее реально отражает распространение азиатского барсука в долине р. Лена, а животное, найденное в районе устья р. Витим в 1953 г., можно считать уникальной находкой, не повторявшейся в течение длительного времени.

Ближайшими регионами обитания *Meles leucurus*, помимо долины Верхней Лены, являются Прибайкалье и Забайкалье, но изученность вида там невысока. Наиболее обычен вид в лесостепи бассейна р. Селенга, редок в северных таежных районах, а в высокогорье (гольцовой и подгольцовой зонах) отсутствует. В Иркутской области вид встречается на большей части территории, но в северных районах крайне редок и селится там спорадически. Более обычен в лесостепных и примыкающих к ним районах [22]. Северная граница в Предбайкалье достигает р. Киренга. В Забайкалье проходит от восточного берега Байкала (р. Баргузин) через верховья р. Витим и истоки Олекмы и выходит к р. Шилка [23]. Полностью отсутствуют сведения о распространении азиатского барсука на севере Читинской области, а также неизвестно, насколько далеко на север продвинулась граница ареала в долине р. Витим и на Патомском нагорье. Относительно долины р. Витим наши наблюдения показали отсутствие вида в районе устья и 30 км выше по течению. Известно, что он встречается по всей территории Бурятии, но в северной части республики с очень низкой плотностью, причем снижение началось еще с 70-х гг. XX в. [24, 25].

Таким образом, самый северный пункт достоверно известного обитания азиатского барсука в долине р. Лена расположен примерно в 440 км выше устья р. Витим и в 730 км от устья р. Нюя. Учитывая расстояние и сложность рельефа, представляет интерес вопрос о путях проникновения обоих зверей в район устья р. Нюя, особенно левобережной находки (2014 г.). При этом есть основания полагать, что, несмотря на снижение численности азиатского барсука во многих регионах, в настоящее время наблюдается продвижение вида на север. В 2008 г. азиатский барсук был добыт по Нижней Тунгуске севернее п. Ёр-

богачен, и, по неуточненным данным, возможно его обитание по р. Чона (правый приток верхнего течения р. Виллой), также по крайней мере до широты п. Ёрбогачен [21]. В Западной Сибири известны находки азиатского барсука до 65° с.ш. [26].

Можно предположить разные варианты путей миграции азиатского барсука на территории Якутии, связанные с долинами рек. Известно, что долины северных рек играют важную роль в проникновении животных за пределы оптимума ареалов, способствуя расселению на север [27–29]. Наиболее очевидным вариантом является расселение по долине р. Лена, по берегам которой можно найти биотопы, сходные с привычными лесостепными местообитаниями вида. Второй вариант – проникновение с запада, от поселений в долине р. Нижняя Тунгуска, и далее по долинам рек Нюя и Чона – в бассейны рек Лена и Виллой; этот вариант может быть связан с антропогенным фактором – функционированием нефтепроводной системы «Восточная Сибирь – Тихий океан», он стал возможен с 2009 г. Трубопровод проходит от Прибайкалья, где известно обитание вида, по территории Южной Якутии от Ленского до Нерюнгринского районов. На юго-западе трасса тянется по левобережью р. Лена почти параллельно ей, вплоть до г. Олекминск. Вдоль всего трубопровода имеется широкая хорошо отсыпанная грунтовая дорога, проезд по которой ограничен служебным автотранспортом, обслуживающим систему, что в сочетании с вышеупомянутой низкой антропофобностью может играть роль в облегчении перемещения вида. Третий вариант – выселение по правобережным притокам р. Лена со стороны Патомского нагорья; надо отметить, что этот вариант – гипотетический, так как обитание азиатского барсука здесь не подтверждено, но обе находки 2000-х годов ближе всего расположены именно к этому району, причем в 2008 г. – на правобережье Лена, недалеко от места впадения нескольких правобережных притоков р. Лена с Патомского нагорья. Известно, что в глубь горных систем барсук проникает по поймам рек [30], т. е. миграция вдоль водотоков на Патомское нагорье от верховьев р. Витим и затем вниз по течению других речек к долине Лены не исключена.

Говоря о потенциальных возможностях расширения ареала азиатского барсука на север в пределах Якутии, необходимо учитывать, прежде всего, биотопические предпочтения, связанные с обилием кормовых объектов и почвенны-

ми условиями для рытья нор и зимовки [31–33]. Известно, что в бассейне оз. Байкал барсук наиболее обычен в лесостепных районах, крайне редок в северных таежных и отсутствует в высокогорье [25]. Поселения барсука отмечают в основном по заросшим кустарником степным ложбинам, в лесостепи, светлохвойных и смешанных лесах предгорий, а также на участках, граничащих с полями, выгонами, сенокосами [25]. Вид избегает заболоченных пространств и больших таежных массивов, а также затопляемых пойменных биотопов; на островах селится только при наличии возвышенных участков и останцов надпойменных террас [26, 32], но при этом предпочитает соседство с водоемами, обеспечивающее обилие кормовой базы [33]. Таким образом, для обустройства нор азиатский барсук предпочитает биотопы на хорошо дренируемых аллювиальных почвах, и, помимо этого, важным условием поддержания свода норы является развитие дерновины.

Кроме того, важным сдерживающим фактором распространения многих норных животных на север является наличие многолетней мерзлоты, определяющей глубину залегания нор. Надо отметить, что практически вся территория Якутии относится к области сплошного распространения криолитозоны, и только на крайнем юго-западе имеются участки островного распространения многолетнемерзлых пород [34, 35]. Р.А. Чикачев [36] отмечает, что нигде в пределах обитания амурского подвида *Meles leucurus* не отмечено наличие многолетней мерзлоты, и приблизительная северная граница ареала барсука, по данным В.Г. Гептнера с соавторами [16], во многом повторяет границу сплошного распространения многолетнемерзлых пород на территории России [35].

Таким образом, если учитывать только мерзлотные условия, то область, потенциально пригодная для расширения ареала азиатского барсука, в пределах Якутии очень невелика, но при этом надо принимать во внимание и другие факторы, в частности, специфику климата и рельефа – небольшое количество осадков в сочетании с распространением в пойме аллювиальных отложений способствовало образованию в среднем течении рек Лена и Вилюй остепненных луговых биотопов и даже очагов степной растительности [37, 38]. Этой особенностью объясняется обитание в регионе азиатского длиннохвостого суслика *Urocitellus (undulatus) undulatus* Pallas, 1779, основные местообитания которого при-

урочены к остепненным склонам, биотопам высокой поймы, а также к аласным лугам среди тайги [8]. Глубина залегания многолетнемерзлых пород здесь доходит до 2 м, что позволяет суслику обустраивать зимовочные норы глубокого залегания. Возможно, что при проникновении в такие биотопы азиатский барсук также сможет найти подходящие условия для зимовки. В литературе имеются данные, свидетельствующие о том, что при наличии подходящих участков для строительства нор азиатский барсук даже в северной части ареала способен образовывать локальные группировки с высокой плотностью поселений [32]. Районы распространения остепненных биотопов относятся к числу наиболее антропогенно освоенных в Якутии, но для барсука характерна крайне низкая антропофобность, что позволяет ему селиться в непосредственной близости от человека [31, 32]. Более того, вид успешно использует для устройства поселений антропогенно-нарушенные участки местности – ямы, траншеи, копи [31], а для родственного *Meles meles* известны даже случаи вредоносной деятельности на территории населенных пунктов, что свидетельствует об успешной адаптации к антропогенным изменениям среды [39]. С другой стороны, с большой долей вероятности можно утверждать, что из-за низкой антропофобности недавние вселенцы будут подвергаться опасности при встречах с человеком, что снизит вероятность образования стабильных поселений. Примечательно, что направленная интродукция другого представителя куньих – степного хорька – как вида, предпочитающего остепненные биотопы, по сути, потерпела неудачу – в долине Средней Лены на местах выпусков образовались локальные поселения крайне низкой численности, не проявляющие тенденции к росту и саморасселению. Это может быть связано как с жестким прессом абиотических факторов, так и с ограниченностью кормовых ресурсов [7]. Можно предположить, что и для азиатского барсука даже в случае расширения ареала в северо-восточном направлении кормовой фактор будет также играть роль лимитирующего. В любом случае, в ближайшей перспективе негативных последствий инвазии нового вида не ожидается.

Заключение

Таким образом, находки 2000-х годов на территории Якутии, а также литературные данные о продвижении вида на север в других частях

ареала свидетельствуют о способности преодолевать в ходе расселения достаточно большие расстояния и о возможности расширения ареала азиатского барсука *Meles leucurus* на северо-восток по долине р. Лена, как минимум, вплоть до устья р. Нюя. Подходящие для обитания вида биотопы имеются также значительно дальше в долинах Средней Лены и Вилюя, а в качестве лимитирующих могут выступить кормовой фактор и наличие мест, подходящих для обустройства убежищ. Для уточнения северо-восточной границы ареала вида необходимо проведение более детальных териологических исследований, но в целом можно предположить, что даже в случае расширения ареала азиатского барсука на территорию Якутии в ближайшей перспективе негативных последствий данной биологической инвазии не ожидается.

Список литературы / References

- Hellmann J.J., Byers J.E., Bierwagen B.G., Dukes J.S. Five potential consequences of climate change for invasive species. *Conservation Biology*. 2008;22(3):534–543. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2008.00951.x>.
- Walther G., Roques A., Hulme P.E., et al. Alien species in a warmer world: risks and opportunities. *Trends in Ecology & Evolution*. 2009;24(12):686–693. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.06.008>
- Хляп Л.А., Варшавский А.А., Бобров В.В. Разнообразие чужеродных видов млекопитающих в различных регионах России. *Российский журнал биологических инвазий*. 2011;4(3):79–88.
- Khlyap L.A., Warshavsky A.A., Bobrov V.V. Diversity of alien mammal species in different regions of Russia. *Russian Journal of Biological Invasions*. 2011;2:293–299. <https://doi.org/10.1134/S2075111711040059>
- Дгебуадзе Ю.Ю. Чужеродные виды в Голарктике: некоторые результаты и перспективы исследований. *Российский журнал биологических инвазий*. 2014;7(1):2–8.
- Dgebuadze Y.Y. Invasions of alien species in Holarctic: Some results and perspective of investigations. *Russian Journal of Biological Invasions*. 2014;5:61–64. <https://doi.org/10.1134/S2075111714020039>
- Clavero M., García-Berthou E. Invasive species are a leading cause of animal extinctions. *Trends in Ecology & Evolution*. 2005;20(3):110. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.01.003>
- Doherty T.S., Glen A.S., Nimmo D.G., et al. Invasive predators and global biodiversity loss. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2016;113(40):11261–11265. <https://doi.org/10.1073/pnas.1602480113>.
- Шадрина Е.Г., Вольперт Я.Л., Охлопков И.М. Интродукция млекопитающих в Якутии: анализ результативности, перспектив и негативных последствий. *Российский журнал биологических инвазий*. 2021;14(4):134–156. <https://doi.org/10.35885/1996-1499-2021-14-4-134-156>
- Shadrina E.G., Volpert Ya.L., Okhlopov I.M. Introduction of mammals in Yakutia: Analysis of effectiveness, prospects, and negative impacts. *Russian Journal of Biological Invasions*. 2022;13(1):105–122. <https://doi.org/10.1134/S2075111722010131>
- Тавровский В.А., Егоров О.В., Кривошеев В.Г. и др. *Млекопитающие Якутии*. М.: Наука; 1971. 660 с.
- Tavrovskij V.A., Egorov O.V., Krivosheev V.G., et al. *Mammals of Yakutia*. Moscow: Nauka; 1971. 660 p. (In Russ.)
- Поляков А.В., Аникин Р.К., Соколов В.В. Об акклиматизации степного хорька в Якутии. В кн.: Сафонов В.Г. (ред.). *Обогащение фауны и разведение охотничьих животных: Материалы Всесоюзн. науч.-произв. конф., посвященной 100-летию со дня рождения проф. П.А. Мантейфеля, г. Киров, 19–21 мая 1982 г.* Киров; 1982. С. 97.
- Polyakov A.V., Anikin R.K., Sokolov V.V. About the acclimatization of the steppe polecat in Yakutia. In: Safonov V.G. (ed.). *Enrichment of fauna and breeding of game animals: Proceedings of the All-Union conference dedicated to the 100th anniversary of prof. P.A. Manteyfel, Kirov, May 19–21, 1982*. Kirov; 1982, p. 97. (In Russ.)
- Амурский тигр в Якутии. Подробности. Центр «Амурский тигр». URL: https://amur-tiger.ru/ru/press_center/news/1656/ Дата публикации 25.11.2021. (Дата обращения: 09.04.2021).
- Amur tiger in Yakutia. Details. The Amur Tiger Center. URL: http://amur-tiger.ru/ru/press_center/news/1656/ 25.11.2021. (Accessed: 09.04.2021). (In Russ.)
- Шадрина Е.Г. Находка барсука *Meles meles* L. (1758) на территории юго-западной Якутии. *Вестник ЯГУ*. 2009;6(2):136–138.
- Shadrina E.G. Finding of badger *Meles meles* L. (1758) in the territory of southwest of Yakutia. *Vestnik YaGU*. 2009;6(2):136–138. (In Russ.)
- Шадрина Е.Г. Заходы азиатского барсука *Meles leucurus* на территорию Якутии. В кн.: *Млекопитающие России: фаунистика и вопросы териогеографии: Материалы научной конференции, г. Ростов-на-Дону, 17–19 апреля 2019 г.* М.: Тов-во науч. изданий КМК; 2019. С. 318–320.
- Shadrina E.G. Penetration of the Asian badger *Meles leucurus* to the territory of Yakutia. In: *Mammals of Russia: faunistics and zoogeographical issues, Rostov-on-Don, April 17–19, 2019*. Moscow: KMK Scientific Press; 2019, pp. 318–320. (In Russ.)
- Абрамов А.В., Хляп Л.А. Отряд *Carnivora*/ Order CARNIVORA Bowdich, 1821. В кн.: Павлинов И.Я., Лисовский А.А. (ред.). *Млекопитающие России: систематико-географический справочник*: Сб. тр. Зоологического музея МГУ, Т. 52. М.: Т-во науч. изданий КМК; 2012. С. 313–382.
- Abramov A.V., Khlyap L.A. Order Carnivora. In: Pavlinov I.Ya., Lisovsky A.A. (eds.). *The Mammals of Rus-*

- sia: *A Taxonomic and Geographic Reference. Proceedings of the MSU Zoological Museum, Vol. 52*. Moscow: KMK Sci Press; 2012, pp. 313–382.
14. Флинт В.Е., Чугунов Ю.Д., Смирин В.М. *Млекопитающие СССР*. М.: Мысль; 1965. 438 с.
- Flint V.E., Chugunov Yu.D., Smirin V.M. *Mammals of the USSR*. Moscow: Mysl' Publ.; 1965. 438 p. (In Russ.)
15. Соколов В.Е. *Систематика млекопитающих (китообразные, хищные, ластоногие, трубкозубые, хоботные, даманы, сирены, парнокопытные)*. М.: Высшая школа; 1979. 528 с.
- Sokolov V.E. *Systematics of mammals (cetaceans, carnivores, pinnipeds, aardvarks, proboscis, damans, sirens, artiodactyls)*. Moscow: Vysshaya shkola; 1979. 528 p. (In Russ.)
16. Гептнер В.Г., Наумов Н.П., Юргенсон П.Б. и др. *Млекопитающие Советского Союза. Т. 2. Морские коровы и хищные*. М.: Высшая школа, 1967. 1004 с.
- Geptner V.G., Naumov N.P., Yurgenson P.B., et al. *Mammals of the Soviet Union. Vol. 2. Sirens and carnivores*. Moscow: Vysshaya shkola; 1967. 1004 p. (In Russ.)
17. Павлинов И.Я., Крускоп С.В., Варшавский А.А., Борисенко А.В. *Наземные звери России. Справочник-определитель*. М.: Т-во научн. изданий КМК; 2002. 298 с.
- Pavlinov I.Ya., Krusokop S.V., Varshavskii A.A., Borisenko A.V. *Terrestrial animals. Reference guide*. Moscow: KMK Scientific Press; 2002. 298 p. (In Russ.)
18. Obidziński A., Głogowski R. Changes of forest flora composition in vicinity of dens of red fox and sets of Euroasian badger. *Polish Journal of Ecology*. 2005; 53(2):197–213.
19. Евстигнеев О.И., Солонина О.В. *Фитоценотический портрет барсука европейского*. М.: Изд-во «Перо», 2020. 40 с.
- Evstigneev O.I., Solonina O.V. *Phytocenotic portrait of the European badger*. Moscow: Pero Publ.; 2020. 40 p. (In Russ.)
20. *Наземные млекопитающие Дальнего Востока СССР. Определитель*. Кривошеев В.Г. (ред.). М.: Наука; 1984. 358 с.
- Terrestrial mammals in the Far East of the USSR. Reference guide*. Krivosheev V.G. (ed.). Moscow: Nauka; 1984. 358 p. (In Russ.)
21. Леонтьев Д.Ф. Динамика северной границы распространения промысловых млекопитающих Верхоленья за XX век. *Российский журнал биологических инвазий*. 2011;4(4):25–32.
- Leont'ev D.F. Dynamics of the northern boundary of spreading of game mammals in Irkutsk Oblast (Eastern Siberia) in the 20th century. *Russian Journal of Biological Invasions*. 2012;3(1):16–21. <https://doi.org/10.1134/S2075111712010055>
22. Попов В.В. Млекопитающие Иркутской области (аннотированный список). *Байкальский зоологический журнал*. 2011;1(6):69–78.
- Popov V.V. Mammals of the Irkutsk region (annotated list). *Bajkal'skij zoologicheskij zhurnal*. 2011;1(6):69–78. (In Russ.)
23. Борисова Н.Г., Абрамов А.В., Старков А.И. и др. Фауна млекопитающих Республики Бурятия. В кн.: *Фауна и экология млекопитающих Забайкалья: Труды Зоологического института РАН*, Т. 288. СПб.; 2001. С. 3–95.
- Borisova N.G., Abramov A.V., Starkov A.I., et al. Mammalian fauna of the Republic of Buryatia. In: *Fauna and ecology of mammals of Transbaikalia: Proceedings of the Zoological Institute of the Russian Academy of Sciences, Vol. 288*. St. Petersburg; 2001, pp. 3–95. (In Russ.)
24. Смирнов М., Носков В. Барсук в Бурятской АССР. *Охота и охотничье хозяйство*. 1977;(2):12–14.
- Smirnov M., Noskov V. Badger in the Buryat ASSR. *Ohota i ohotnich'e hozyajstvo*. 1977;(2):12–14. (In Russ.)
25. Швецов Ю.Г., Смирнов М.Н., Монахов Г.И. *Млекопитающие бассейна озера Байкал*. Новосибирск: Наука; 1984. 258 с.
- Shvecov YU.G., Smirnov M.N., Monahov G.I. *Mammals of the Lake Baikal basin*. Novosibirsk: Nauka; 1984. 258 p. (In Russ.)
26. Головатин М.Г., Пасхальный С.П. Северная находка азиатского барсука в Западной Сибири. *Фауна Урала и Сибири*. 2015;(1):119–122.
- Golovatin M.G., Paskhal'nyi S.P. The northern finding of the Asian badger in Western Siberia. *Fauna of the Urals and Siberia*. 2015;(1):119–122. (In Russ.)
27. Телегин В.И. Долины северных рек как места концентрации и пути проникновения таежных видов животных на крайний север. В кн.: Иоганзен Б.Г. (ред.). *Природа поймы реки Оби и ее хозяйственное освоение: Труды Томского гос. ун-та. Сер. Биол.* Томск: Изд-во Томского университета; 1963. С. 343–349.
- Telegin V.I. Northern river valleys as places of concentration and routes of entry of taiga animal species to the far north. In: Ioganzen B.G. (ed.). *The nature of the Ob' River floodplain and its economic development: Tomsk State University. Ser. Biol.* Tomsk: Tomsk University Publishing House; 1963, pp. 343–349. (In Russ.)
28. Максимов А.А. *Структура и динамика биоценозов речных долин*. Новосибирск: Наука; 1974. 260 с.
- Maksimov A.A. *The structure and dynamics of biocenoses of river valleys*. Novosibirsk: Nauka; 1974. 260 p. (In Russ.)
29. Дубровский В.Ю. Речные системы гумидных зон и аналогичные им образования в аридных зонах как фактор формирования видового богатства фаун природных зон Палеарктики (на примере мелких млекопитающих). *Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел биологический*. 2014; 119(5):3–12.
- Dubrovskii V.Yu. River systems of humid zones and similar formations in arid zones as a factor in the formation of species richness of faunas of natural zones of the Palearctic: small mammals. *Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Biological Ser.* 2014;119(5):3–12. (In Russ.)
30. Юдин В.Г. Барсук на Дальнем Востоке СССР. В кн.: Соколов В.Е. (ред.). *Экологические основы охраны и рационального использования хищных млекопитающих*. М.: Наука; 1984. С. 11–15.
- Yudin V.G. Badger in the Far East of the USSR. In: Sokolov V.E. (ed.). *Ecological foundations of protection and rational use of predatory mammals*. Moscow: Nauka; 1984. P. 11–15. (In Russ.)

тающих: Материалы Всесоюзного совещания, г. Москва, 23–27 января 1978 г. М.: Наука; 1979. С. 353–354.

Yudin V.G. Badger in the Far East of the USSR. In: V.E. Sokolov (ed.) *Ecological foundations of the protection and rational use of predatory mammals: Proceedings of the All-Union Meeting, Moscow, January 23–27, 1978*. Moscow: Nauka; 1979, pp. 353–354. (In Russ.)

31. Дворников М.Г., Чашин П.В. Природно-географические особенности экологии барсука (*Meles brisson*, 1762). *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2008;10(2):464–472.

Dvornikov M.G., Chashchin P.V. Biogeographic features of the badger (*Meles brisson*, 1762) ecology. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2008;10(2):464–472. (In Russ.)

32. Марков Н.И. Пространственное распределение и структура поселений барсука (*Meles leucurus*, Hodgson, 1847) островных территорий поймы р. Оби. *Экология*. 2009;(6):454–458.

Markov N.I. Spatial Distribution and Structure of Badger (*Meles leucurus* Hodgson, 1847) Setts in Islands of The Ob River Floodplain. *Russian Journal of Ecology*. 2009;40(6):429–433.

33. Чикачев Р.А., Таразанова И.С. Факторы выбора мест устройства нор азиатского барсука (*Meles leucurus*) на Зейско-Буреинской равнине. *Вестник Бурятского государственного университета. Биология, география*. 2015;(4а):59–63.

Chikachev R.A., Tarazanova I.S. Factors for Selection of Sites Device nor the Asian Badger (*Meles leucurus*) at Zeya-Bureya Plain. *BSU bulletin. Biology, geography*. 2015;(4а):59–63. <https://doi.org/10.18097/1994-0866-2015-0-4а-59-63>. (In Russ.)

34. Многолетняя мерзлота (криолитозона). *Атлас сельского хозяйства Якутской АССР*. Председатель ред. коллегии И.А. Матвеев. М.: Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР; 1989. С. 27.

Permafrost (cryolithozone). *Atlas of agriculture of the Yakut ASSR*. Chairman of the Editorial Board I.A. Matveev. Moscow: The Main Directorate of Geodesy and Cartography under the Council of Ministers of the USSR; 1989. P. 27. (In Russ.)

35. Вечная мерзлота. В кн.: Свешников В.В. (ред.). *Национальный атлас России. Т. 2. Природа и экология*. М.: Федеральное агентство геодезии и картографии (Роскартография); 2004–2008. 495 с. URL: <http://национальныйатлас.рф/cd2/240-242/240-242.html>. (Дата обращения 11.02.2021).

Permafrost. In: Sveshnikov V.V. (ed.). *National Atlas of Russia. Vol. 2. Nature and Ecology*. Moscow: Federal Agency of Geodesy and Cartography (Roskartografiya), 2004–2008. 495 p. URL: <http://nacional'nyjatlasyrf/cd2/240-242/240-242.html>. (Accessed:11.02.2021). (In Russ.)

36. Чикачев Р.А. Описание, географическое распространение амурского подвида азиатского барсука (*Meles leucurus amurensis*). *Байкальский зоологический журнал*. 2017;1(20):91–94.

Chikachev R.A. Description, geographical distribution of the Amur Subspecies of Asian Badger (*Meles leucurus amurensis*). *Bajkal'skij zoologicheskij zhurnal*. 2017;1(20):91–94. (In Russ.)

37. *Луга Якутии*. Отв. ред. Андреев В.Н. М.: Наука; 1975. 176 с.

Meadows of Yakutia. Andreev V.N. (ed.). Moscow: Nauka; 1975. 176 p. (In Russ.)

38. Скрыбин С.З., Караваяев М.Н. *Зеленый покров Якутии*. Якутск: Якутское книжное изд-во; 1991. 176 с.

Skryabin S.Z., Karavaev M.N. *The green cover of Yakutia*. Yakutsk: Yakut Publishing House; 1991. 176 p. (In Russ.)

39. Davison J., Huck M., Delahay R.J., Roper T.J. Urban badger setts: Characteristics, patterns of use and management implications. *Journal of Zoology*. 2008;275(2):190–200. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7998.2008.00424.x>

Об авторе

ШАДРИНА Елена Георгиевна, доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-9660-0072>, SPIN: 6919-8134, e-mail: e-shadrina@yandex.ru

Конфликт интересов

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

About the author

SHADRINA, Elena Georgievna, Dr. Sci. (Biol.), Professor, Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-9660-0072>, SPIN: 6919-8134, e-mail: e-shadrina@yandex.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 14.03.2023

Поступила после рецензирования / Revised 16.11.2023

Принята к публикации / Accepted 20.02.2024

**Адаптивные изменения жирнокислотного состава
Oxytropis scheludjakovae и *Oxytropis strobilacea*
при температурных условиях вегетационного сезона
в Центральной Якутии**

**Г. В. Филиппова^{✉,1}, Д. Н. Андросова¹, Н. С. Данилова¹,
И. А. Прокопьев^{1,2}, И. В. Воронов¹**

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

²Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

[✉]nureeva@yandex.ru

Аннотация

Несмотря на то, что механизмам адаптационной устойчивости растений уделяется все большее внимание, для многих видов растений информация является неполной или вовсе отсутствует. Впервые методом газожидкостной хроматографии исследованы жирнокислотный (ЖК) состав вегетативных и генеративных органов двух видов рода *Oxytropis* – *O. scheludjakovae* и *O. strobilacea*, а также динамика качественного и количественного содержания ЖК в течение всего вегетационного сезона. Растения произрастали в условиях интродукции в коллекционном питомнике природной флоры Якутии Якутского ботанического сада (ЯБС). Установлено, что основную группу жирных кислот составляли кислоты с 14–24 углеродными атомами. Не выявлено существенных отличий по качественному составу ЖК эндемичного вида Северо-Востока *O. scheludjakovae* от вида *O. strobilacea*, имеющего более широкий ареал. Наибольшее содержание суммы ЖК (19,5 мг/г_{ткани}) отмечено в листьях *O. scheludjakovae* в июне; в листьях *O. strobilacea* – в июне и июле (17,0 мг/г_{ткани}). Показано, что основной насыщенной ЖК двух изученных видов рода *Oxytropis* являлась пальмитиновая кислота (от 20,3 до 29,6 % от суммы кислот), а ненасыщенной ЖК – линоленовая кислота, доля которой в тканях соцветий и цветоносов составляла около 40,0 % от общей суммы ЖК и до 58 % в тканях листьев. Адаптация исследованных видов растений к повышению среднесуточной температуры воздуха происходила за счет снижения суммы ненасыщенных ЖК, а к понижению температуры, наоборот, повышения их содержания. Для вида *O. strobilacea*, имеющего более широкий ареал, расчетный коэффициент ненасыщенности ЖК в течение всего вегетационного периода имел более высокие значения, чем у *O. scheludjakovae*.

Ключевые слова: адаптация, жирнокислотный состав, жирные кислоты, *Oxytropis scheludjakovae* Karav. et Jurtz., *Oxytropis strobilacea* Bunge, Центральная Якутия

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ по проектам «Растительный покров криолитозоны таежной Якутии: биоразнообразие, средообразующие функции, охрана и рациональное использование» (тема № FWRS-2021-0023; гос. регистрация № AAAA-A21-121012190038), «Физиолого-биохимические механизмы адаптации растений, животных, человека к условиям Арктики/Субарктики и разработка биопрепаратов на основе природного северного сырья повышающих эффективность адаптационного процесса и уровень здоровья человека в экстремальных условиях среды» (тема № FWRS-2021-0025; гос. регистрация в ЕГИСУ № AAAA-A21-121012190035-9) с применением оборудования ЦКП ФИЦ «ЯНЦ СО РАН» (грант № 13.ЦКП.21.0016) и проекту «Оценка изменений корреляционной структуры метаболитных сетей в процессе роста и развития грибов и растений с позиций системной биологии» (тема № FWRS-2021-0025; гос. регистрация № AAAA-A18-118032390136-5).

Для цитирования: Филиппова Г.В., Данилова Н.С., Андросова Д. Н., Прокопьев И.А., Воронов И.В. Адаптивные изменения жирнокислотного состава *Oxytropis scheludjakovae* и *Oxytropis strobilacea* при температурных условиях вегетационного сезона в Центральной Якутии. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(2):277–286. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-277-286>

Adaptive changes in the fatty acid composition of *Oxytropis scheludjakovae* and *Oxytropis strobilacea* under temperature fluctuations during the growth season in Central Yakutia

Galina V. Filippova^{✉,1}, Daria N. Androsova¹, Nadezhda S. Danilova¹,
Ilya A. Prokopiev^{1,2}, Ivan V. Voronov¹

¹Institute for Biological Problems of Cryolithozone,

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

²Komarov Botanical Institute, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation

✉ nureeva@yandex.ru

Abstract

Although there is growing interest in understanding the mechanisms of plant adaptive resistance, there is still incomplete or missing information for many plant species. In this study, we conducted an analysis of the fatty acid composition in the vegetative and generative organs of two species belonging to the *Oxytropis* genus, namely *O. scheludjakovae* and *O. strobilacea*. Gas-liquid chromatography was used to analyze the qualitative and quantitative changes in fatty acids throughout the growing season. The plants were grown in the natural flora collection nursery at the Yakutsk Botanical Garden. The main fatty acids identified had carbon atoms ranging from 14 to 24. There were no significant differences in fatty acid composition between the endemic species *O. scheludjakovae* and the more widely distributed species *O. strobilacea*. The highest total fatty acid content (19.5 mg/g tissue) was observed in the leaves of *O. scheludjakovae* in June and in the leaves of *O. strobilacea* (17.0 mg/g tissue) in June and July. Palmitic acid was the primary saturated fatty acid in both species, while linolenic acid was the main unsaturated fatty acid. The adaptation of these plants to temperature changes was reflected in the variation of unsaturated fatty acid content. *O. strobilacea* showed higher values of fatty acid unsaturation coefficient throughout the growing season compared to *O. scheludjakovae*.

Keywords: adaptation, fatty acid composition, fatty acids, *Oxytropis scheludjakovae* Karav. et Jurtz., *Oxytropis strobilacea* Bunge, Central Yakutia

Funding. This study was conducted within the framework of the state assignment of the Ministry of Higher Education and Science of the Russian Federation under the projects: “Vegetation cover of the permafrost zone of the taiga Yakutia: biodiversity, habitat-forming functions, protection and rational use” (theme No. FWRS-2021-0023; registration No. AAAA-A21-121012190038), “Physiological and biochemical mechanisms of adaptation of plants, animals, humans to the conditions of the Arctic / Subarctic and the development of biological products based on natural northern raw materials that increase the efficiency of the adaptation process and the level of human health in extreme environmental conditions” (theme No. FWRS-2021-0025; registration No. AAAA-A21-121012190035-9) with the use of the equipment provided by Core Shared Research Facilities of the Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre SB RAS” (grant No. 13.CSRF.21.0016), and “Assessment of changes in the correlation structure of metabolite networks during the growth and development of fungi and plants from the standpoint of systems biology” (theme No. FWRS-2021-0025; registration No. AAAA-A18-118032390136-5).

For citation: Filippova G.V., Danilova N.S., Androsova D.N., Prokopiev I.A., Voronov I.V. Adaptive changes in the fatty acid composition of *Oxytropis scheludjakovae* and *Oxytropis strobilacea* under temperature fluctuations during the growth season in Central Yakutia. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(2):277–286. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-277-286>

Введение

Представителями рода *Oxytropis* – Остролодочник являются около 380 видов и подвидов растений. Произрастают в умеренной и арктической зонах Северного полушария [1].

Сведения по химическому составу тканей представителей рода *Oxytropis* немногочисленны и недостаточны, а по некоторым видам и вовсе отсутствуют. В тканях растений рода *Oxytropis*

содержится значительное количество вторичных метаболитов: флавоноиды, алкалоиды, кумарины, сапонины. Отвары и экстракты травы некоторых видов рода *Oxytropis* обладают седативным, сердечно-сосудистым, мочегонным, противовоспалительным, ранозаживляющим, антимикробным и антигипоксическим свойствами, обусловленными разнообразием их химического состава [2].

Способность растительных организмов синтезировать вещества, поддерживающие гомеостаз, является биохимическим адаптационным механизмом формирования устойчивости к окружающим условиям среды и одним из факторов, определяющих пределы ареала видов [3–5]. Большой интерес вызывают холодоустойчивые виды растений, метаболизм которых адаптирован к суровым климатическим условиям. Растительные липиды играют важную роль в росте, фотосинтезе, а также тесно связаны с дыханием, адаптацией к неблагоприятным условиям среды, активно изменяют обмен веществ в осенний период и повышают устойчивость растений к низким температурам [3].

Ключевую роль в механизмах холодоустойчивости, позволяющих растениям обитать в экстремальных климатических условиях, отводят липидам клеточных мембран, при этом устойчивость клеток растений обуславливается возможностью к фазовым переходам в зависимости от температуры окружающей среды, т. е. к изменению текучести мембран [6]. Поддержание функциональных свойств растительного организма обеспечивается посредством изменения качественного и количественного состава жирных кислот, прежде всего, соотношения насыщенных и ненасыщенных ЖК [7–9]. Вместе с тем, при акклиматизации к низким положительным температурам отмечается повышение ненасыщенности жирных кислот в липидах мембран микросомальных фракций и тилакоидов [7, 10–12].

Известно, что при осеннем закаливании растений, произрастающих в условиях криолитозоны, наблюдается высокая резистентность к холоду за счет увеличения содержания полиненасыщенных ЖК [13, 14]. Кроме того, имеются сведения о межвидовой изменчивости состава ЖК диких видов из числа лекарственных растений, произрастающих в условиях Предбайкалья, что выражается в различном соотношении содержания основных насыщенных и ненасыщенных ЖК [15]. Также отмечалось, что в листьях представителей *Polypodiophyta*, произрастающих в условиях приполярья Урала, основную группу ЖК составляли кислоты с длиной цепи 16–24 атомов углерода [16].

Цель работы – исследование адаптивных изменений жирнокислотного профиля в надземных органах двух видов рода *Oxytropis* (*O. scheludjakovae* и *O. strobilacea*) в температурных условиях вегетационного сезона Центральной Якутии.

Методы и материалы

Объектами исследования являлись два вида растений сем. Fabaceae, рода *Oxytropis* DC – *Oxytropis scheludjakovae* Karav. et Jurtz. и *Oxytropis strobilacea* Bunge, выращиваемые в коллекции растений природной флоры Якутии Якутского ботанического сада (ЯБС) на мерзлотных лугово-черноземных супесчаных почвах.

O. scheludjakovae – степной эндемик северо-востока России, ареал которого связан с реликтовыми степными сообществами. В Якутии встречается в бассейнах рек Яна и Индигирка и в центральной части республики (бассейн р. Амга, нижнее течение р. Алдан и окрестности г. Якутск). Кроме Якутии, отмечен также в Колымском, Охотско-Колымском и Оомолонском флористических районах Магаданской области [17, 18]. Распространен в пределах лесной зоны, приурочен к южным склонам коренных берегов рек или прилежащих горных массивов [19].

O. strobilacea – довольно распространенный в Сибири вид. Встречается в Восточной и Западной Сибири, на Дальнем Востоке, на Казахском Алтае, в Монголии и Северном Китае [20]. В Якутии произрастает в центральной части, на юге и юго-западе республики. Растет в сухих лесах и их опушках, на остепненных лугах, степных и щебнистых склонах, на скалах, на выходах карбонатных пород, галечниках и на песчаных наносах на берегах рек [21]. Основываясь на современном распространении вида, Г.А. Пешкова [22] считает, что *O. strobilacea* был обычным растением плейстоценовой степи.

Остролодочники – многолетние бесстебельные растения с утолщенным корнем и укороченными подземными побегами. Выступая на поверхность, эти побеги несут листья и безлистные побеги – цветоносы [23]. Зимнезеленые, в начале мая отмечается разворачивание новых молодых листьев. Бутонизация – во второй половине мая, цветение непродолжительное, в первой декаде июня, в течение 10–15 дней. Семена созревают в июле, легко осыпаются [24].

O. scheludjakovae в ЯБС выращивается с 1966 г., посеян семенами, собранными в бассейне р. Индигирка. *O. strobilacea* выращивается с 1970 г., пересажен с остепненного берегового склона в устье р. Буотома.

Отбор образцов надземных вегетирующих органов растений проводили строго до полудня в первой декаде каждого месяца с июня по сен-

тябрь 2015 г. Среднюю пробу готовили путем измельчения воздушно-сухого сырья до размеров 1–2 мм.

Исследование липидных веществ (жирных кислот) проводили методом газожидкостной хроматографии. Для получения метиловых эфиров ЖК использовали метод кислотного гидролиза [25], 50 мг измельченных воздушно-сухих тканей исследуемых видов растений помещали в герметичные контейнеры, добавляли 1 мл 2,5%-й H_2SO_4 , растворенной в метаноле, и помещали на 1,5 ч в термошейкер при 80 °C и 1000 об./мин. После охлаждения до комнатной температуры (20 °C) к полученному раствору добавляли 1 мл 0,9%-го раствора NaCl. Далее метиловые эфиры жирных кислот экстрагировали 0,5 мл гексана. Полученную смесь помещали в шейкер на 1 мин, затем центрифугировали 1 мин при 10 000g. Метиловые эфиры жирных кислот отбирали декантацией из супернатанта. Для анализа отбирали 200 мкл.

Гексановый экстракт эфиров ЖК помещали в автосамплер хроматографа «МАЭСТРО» 7820/5975, построенного на базе газового хроматографа Agilent 7820 и масс-спектрометрического детектора 5975 того же производителя. Для разделения использовали капиллярную колонку HP-INNOWax (30 м, 0,25 мм, 0,25 мкм), скорость газа-носителя (гелий) 2 мл/мин. Для ввода пробы объемом 10 мкл использовали лайнер без деления потока, температура инжектора 270 °C. Температурная программа разделения: 40 °C (5 мин); 250 °C (4 °C/мин, 5 мин). Температура линии, соединяющей хроматограф и масс-спектрометр, 270 °C, температура источника ионов – 230 °C, температура детектора – 150 °C. Регистрацию осуществляли по полному ионному току (режим SCAN).

Для определения концентрации метиловых эфиров ЖК была проведена калибровка с использованием набора стандартов метиловых эфиров ЖК фирмы Supelco. 37-Component FAME Mix (кат. номер 18919-1MP). При построении калибровочной кривой среднеквадратичное отклонение составляло менее 1 % для всех использованных стандартов метиловых эфиров ЖК.

Все аналитические измерения выполнены в трех повторностях. Результаты экспериментов представлены в виде средней арифметической величины и ее стандартного отклонения. Расчет проводился с помощью пакета AnalystSoft, StatPlus – программа статистического анализа, v.2007.

Результаты и обсуждение

Результаты химического состава ЖК вегетативных органов и динамика жирнокислотного состава листьев в период вегетации исследуемых видов растений представлены в таблицах 1 и 2.

Установлено, что листовые пластинки *O. scheludjakovae*, собранные в июне, и листья *O. strobilacea*, собранные в июне и июле, имели высокое содержание как насыщенных, так и ненасыщенных ЖК, по сравнению с тканями листьев, отобранными в другие месяцы вегетационного периода, и тканями соцветий и цветоносов. Суммарное содержание ЖК составляло 19,5 мг/г_{ткани} у *O. scheludjakovae* и около 17,0 мг/г_{ткани} у *O. strobilacea*.

Основной насыщенной ЖК вегетативных частей двух изученных видов рода *Oxytropis* являлась пальмитиновая кислота (от 20,3 до 29,6 % от суммы кислот). Ее максимальное содержание в листьях *O. scheludjakovae* и *O. strobilacea* отмечено в июне и составляло 4,21 мг/г_{ткани} и 3,90 мг/г_{ткани} соответственно. Пальмитиновая кислота (C 16:0) является одной из наиболее распространенных в природе насыщенных ЖК. У ряда видов растений ее содержание в мембранах оргanelл при воздействии водного дефицита, холодового стресса может значительно увеличиваться [26].

Кроме пальмитиновой кислоты в тканях вегетативных частей изученных видов растений обнаружены насыщенные ЖК с 17, 18, 20, 21, 22, 23, 24 атомами углерода. Следует отметить, что от суммы ЖК на долю стеариновой кислоты (C 18:0) приходилось от 3,3 (цветонос) до 4,9 % (соцветия) у *O. scheludjakovae* и от 3,2 (цветонос) до 5,7 % (соцветия) у *O. strobilacea*. В тканях листьев исследуемых видов растений в течение всего вегетационного периода доля стеариновой кислоты находилась в пределах 4,0 %. Доля арахидиновой кислоты (C 20:0) в тканях вегетативных органов растений составляла от 2,0 до 5,5 %, бегеновой (C 22:0) – от 1,7 до 4,0 %. Доля остальных предельных ЖК не превышала 2,0 %.

Обращает на себя внимание факт наличия жирных кислот с нечетным количеством углеродов – маргариновой (C 17:0), генэйкозановая (C 21:0), трикозановая (C 23:0) кислоты, которые крайне редко и в низких концентрациях встречаются в растительном мире. При этом у *O. scheludjakovae* генэйкозановая кислота (C 21:0) отсутствовала только в тканях цветоносов, а у *O. strobilacea* она не идентифицировалась ни в тканях цветоносов, ни в листьях, собранных в ав-

Таблица 1

Содержание ЖК (мг/г_{сухой ткани}) в вегетативных и генеративных органах и сезонная динамика ЖК в листьях, суммы насыщенных и ненасыщенных жирных кислот и коэффициента ненасыщенности *Oxytropis scheludjakovae*

Table 1

FA content (mg/g_{dry tissue}) in vegetative and generative organs and seasonal dynamics of FA in leaves, total saturated and unsaturated fatty acids and unsaturation coefficient of *Oxytropis scheludjakovae*

Жирная кислота Fatty acid	Соцветия Inflorescences	Цветонос Peduncle	Листья Leaves			
	Июнь June		Июль July	Август August	Сентябрь September	
C14:0	—	—	0,12±0,03	0,17±0,02	0,09*	0,20±0,02
C16:0	2,52±0,58	2,68±0,12	4,21±0,33	3,63±0,23	3,09±0,05	3,40±0,12
C17:0	0,04±0,01	0,03*	0,07*	0,07*	0,07*	0,09*
C18:0	0,44±0,11	0,32±0,01	0,70±0,05	0,65±0,03	0,61±0,01	0,64±0,02
C18:2Δ9,12	1,60±0,41	2,29±0,10	2,00±0,1	1,71±0,02	1,56±0,08	1,93±0,12
C18:3Δ9,12,15	3,50±0,59	4,01±0,16	11,03±0,86	9,21±0,62	7,07±0,06	8,97±0,28
C20:0	0,45±0,06	0,18*	0,62±0,04	0,45±0,02	0,59±0,01	0,43±0,01
C 21:0	0,02*	—	0,01*	0,01*	0,01*	0,02*
C22:0	0,36±0,03	0,24*	0,46±0,02	0,44±0,03	0,55±0,02	0,48±0,01
C23:0	0,01*	0,02*	0,02	0,02*	0,02*	0,03*
C24:0	0,10±0,02	0,08*	0,17±0,01	0,17±0,01	0,22*	0,19*
ΣFA	9,07±1,85	9,89±0,42	19,45±1,45	16,57±0,96	13,91±0,16	16,42±0,55
ΣSFA	3,97±0,85	3,58±0,15	6,41±0,51	5,64±0,35	5,27±0,10	5,51±0,19
ΣUFA	5,10*	6,30±0,27	13,04±0,95	10,93±0,64	8,63±0,08	10,91±0,35
K	1,28±0,02	1,75*	2,03±0,05	1,93±0,06	1,63±0,03	1,97*

Примечание. ΣUFA – сумма ненасыщенных ЖК, ΣSFA – сумма насыщенных ЖК, ΣFA – общая сумма ЖК. К (коэффициент ненасыщенности) – ΣUFA / ΣSFA. * – стандартное отклонение по выборке < 0,01.

Note. ΣUFA represents the sum of unsaturated fatty acids, ΣSFA represents the sum of saturated fatty acids, ΣFA represents the total amount of FA. K (unsaturation factor) – ΣUFA / ΣSFA. * – sample standard deviation < 0.01.

густе. Кроме того, была отмечена отличительная особенность жирнокислотного состава *O. scheludjakovae*, которая выражалась в наличии миристиновой кислоты (C 14:0) в листьях в течение всего вегетационного периода с максимумом в сентябре – 0,20 мг/г_{ткани} и минимумом в августе – 0,09 мг/г_{ткани}, тогда как в тканях листьев *O. strobilacea* эта ЖК была зафиксирована только в июле (0,20 мг/г_{ткани}).

В составе ненасыщенных жирных кислот в тканях исследуемых видов растений были идентифицированы две полиненасыщенные жирные кислоты: диеновая – линолевая (C 18:2Δ9,12) и триеновая – линоленовая (C 18:3Δ9,12,15). В тканях цветоносов *O. scheludjakovae* и *O. strobilacea* содержание линолевой кислоты составляло 2,29 и 2,04 мг/г_{ткани}, соответственно, на ее долю от суммы ЖК приходилось 22,0–23,0 %. В соцветиях доля линолевой кислоты составляла 17,6 % (1,6 мг/г_{ткани}) у *O. scheludjakovae* и

16,4 % (1,67 мг/г_{ткани}) у *O. strobilacea*. В листьях исследуемых видов растений в течение вегетационного периода на долю данной кислоты приходилось от 10,0 до 12,5 % от суммы ЖК. Максимальное содержание линолевой кислоты (2,00 мг/г_{ткани}) отмечено в июне и сентябре у *O. scheludjakovae* и только в сентябре у *O. strobilacea*.

Установлено, что в жирнокислотном составе исследованных видов растений основной ЖК является линоленовая, доля которой составляла около 40,0 % от общей суммы жирных кислот в тканях соцветий и цветоносов (до 4,00 мг/г_{ткани}) и до 58 % в тканях листьев. Наибольшее ее содержание отмечалось у *O. scheludjakovae* в листьях, собранных в июне, и составляло 11,03 мг/г_{ткани} и у *O. strobilacea* июне, июле около 10,0 мг/г_{ткани}. Минимальное содержание зафиксировано в августе – 7,07 и 6,58 мг/г_{ткани} у *O. scheludjakovae* и *O. strobilacea* соответственно.

Таблица 2

Содержание ЖК (мг/г_{сухой ткани}) в вегетативных и генеративных органах
и сезонная динамика ЖК в листьях, суммы насыщенных и ненасыщенных жирных кислот
и коэффициента ненасыщенности *Oxytropis strobilacea*

Table 2

Content of fatty acids (mg/g_{of dry tissue}) in vegetative and generative organs and seasonal dynamics
of fatty acids in leaves, the sum of saturated and unsaturated fatty acids
and the coefficient of unsaturation of *Oxytropis strobilacea*

Жирная кислота Fatty acid	Соцветия Inflorescences	Цветонос Peduncle	Листья Leaves			
	Июнь June		Июль July	Август August	Сентябрь September	
C14:0	—	—	—	0,20±0,02	—	—
C16:0	2,84±0,12	2,57*	3,90±0,08	3,56±0,07	2,80±0,05	3,14±0,12
C17:0	0,07*	0,03*	0,07*	0,01*	0,05*	0,13*
C18:0	0,54±0,02	0,29*	0,65±0,01	0,72±0,01	0,50±0,01	0,62±0,02
C18:2Δ9,12	1,67±0,01	2,04*	1,71±0,04	1,78±0,06	1,25±0,04	1,92±0,13
C18:3Δ9,12,15	3,96±0,03	3,76±0,02	10,04±0,19	9,83±0,29	6,58±0,10	8,60±0,24
C 20:0	0,53±0,09	0,20±0,01	0,49*	0,38±0,03	0,33*	0,42±0,03
C 21:0	0,03*	—	0,01*	0,01*	—	0,01*
C22:0	0,34±0,05	0,22±0,02	0,35*	0,28±0,01	0,39*	0,42±0,03
C 23:0	0,03*	0,02*	0,01*	0,02*	0,01*	0,03*
C24:0	0,14±0,02	0,08±0,01	0,12*	0,01*	0,17*	0,16±0,01
ΣFA	10,18±0,39	9,24±0,07	17,39±0,33	17,02±0,42	12,13±0,17	15,49±0,53
ΣSFA	4,53±0,34	3,44±0,04	5,64±0,11	5,40±0,13	4,29±0,04	4,95±0,23
ΣUFA	5,64±0,05	5,80±0,03	11,75±0,23	11,62±0,31	7,83±0,14	10,53±0,29
К	1,24±0,08	1,68±0,01	2,08±0,01	2,15±0,03	1,82±0,02	2,12±0,04

Примечание. ΣUFA – сумма ненасыщенных ЖК, ΣSFA – сумма насыщенных ЖК, ΣFA – общая сумма ЖК. К (коэффициент ненасыщенности) – ΣUFA / ΣSFA. * – стандартное отклонение по выборке < 0,01.

Note. ΣUFA represents the sum of unsaturated fatty acids, ΣSFA represents the sum of saturated fatty acids, ΣFA represents the total amount of FA. К (unsaturation factor) – ΣUFA / ΣSFA. * – sample standard deviation < 0,01.

Известно, что повышение или понижение температуры окружающей среды приводит к изменению содержания насыщенных и ненасыщенных ЖК в тканях растительных организмов. Для отражения изменения их соотношения среди прочих используется коэффициент ненасыщенности (К), характеризующий степень ненасыщенности липидов [22]. Показано, что при повышении среднесуточной температуры до 18,9 °С (август) коэффициент ненасыщенности жирных кислот в тканях листьев исследуемых видов растений снижается (см. рисунок). Так, для тканей листьев *O. scheludjakovae* коэффициент ненасыщенности (К) снизился до 1,63 против 2,03 в июне и 1,93 июля, а у *O. strobilacea* – до 1,82 по сравнению с значениями в июне (2,08) и июле (2,15). При понижении среднесуточной температуры до 8,8 °С (сентябрь) коэффициент ненасыщен-

ности вновь повышался и составлял: 1,97 для *O. scheludjakovae* и 2,12 для *O. strobilacea*.

Закключение

Впервые проанализирован состав ЖК надземных частей у представителей рода *Oxytropis*, произрастающих в условиях Центральной Якутии. Основную группу жирных кислот составляли кислоты с 14–24 углеродными атомами. Не выявлено существенных отличий по качественному составу ЖК эндемичного вида северо-востока *O. scheludjakovae* от вида *O. strobilacea*, имеющего более широкий ареал.

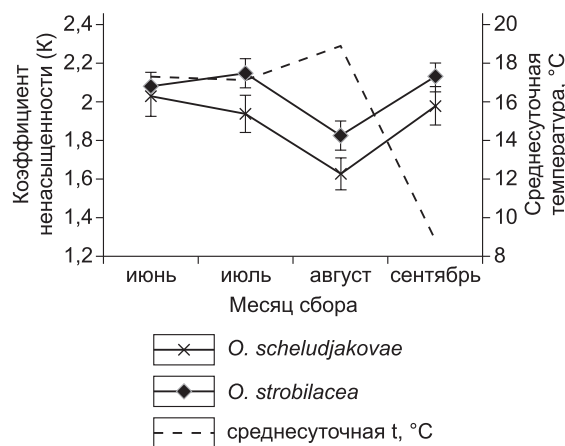
Наибольшее содержание суммы ЖК отмечено в июне в листьях *O. scheludjakovae*; в июне–июле – у *O. strobilacea*. Показано, что основной насыщенной ЖК вегетативных частей двух изученных видов рода *Oxytropis* являлась пальми-

тиновая кислота (от 20,3 до 29,6 % от суммы кислот), а ненасыщенной ЖК – линоленовая кислота, доля которой в тканях соцветий и цветоносов составляла около 40,0 % от общей суммы ЖК и до 58 % в тканях листьев. Выявлена особенность жирнокислотного состава *O. scheludjakovae*, которая выражалась наличием мристиновой кислоты (C 14:0) в тканях листьев в течение всего вегетационного периода, с максимумом в сентябре – 0,20 мг/г_{ткани} и минимумом в августе – 0,09 мг/г_{ткани}, тогда как в тканях листьев *O. strobilacea* наличие этой ЖК было зафиксировано только в июле (0,20 мг/г_{ткани}).

Установлено, что при адаптации исследованных видов растений к повышению среднесуточной температуры воздуха происходило снижение суммы ненасыщенных ЖК, а к понижению температуры, наоборот, повышение их содержания в тканях растений. Для вида *O. strobilacea*, имеющего более широкий ареал, расчетный коэффициент ненасыщенности ЖК в течение всего вегетационного периода имел более высокие значения, чем у *O. scheludjakovae*.

Список литературы / References

1. Yakovlev G.P., Sytin A.K., Roskov Yu.R. *Legumes of Northern Eurasia: A Checklist*. Kew: Royal Botanic Gardens; 1996, pp. 295–360.
2. Бахтина С.М., Лесиовская Е.Е., Саканян Е.И. и др. Противогипоксическая и анальгезирующая активности некоторых видов остролодочника. *Казанский медицинский журнал*. 1995;76(3):205–208.
Bahtina S.M., Lesiovskaya E.E., Sakanyan E.I., et al. Antihypoxic and analgesic activity of some species of *Oxytropis*. *Kazan medical journal*. 1995;76(3):205–208. (In Russ.).
3. Хочачка П.В., Сомеро Д. *Биохимическая адаптация*: Пер. с англ. М.: Мир; 1988. 568 с.
Hochachka P.V., Somero D. *Biochemical adaptation*. Moscow: Mir; 1988. 568 p. (In Russ.).
4. Колесниченко А.В., Войников В.К. *Белки низкотемпературного стресса растений*. Иркутск: Арт-Пресс; 2003. 196 с.
Kolesnichenko A.V., Vojnikov V.K. *Proteins of low-temperature stress in plants*. Irkutsk: Art-Press; 2003. 196 p. (In Russ.).
5. Богданова Е.С., Васюков В.М., Розенцвиг О.А. Сравнительный анализ жирнокислотного состава различных видов *Thymus* (Lamiaceae). *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки*. 2023;41(1):83–92.
Bogdanova E.S., Vasjukov V.M., Rozentsvet O.A. Comparative analysis of the fatty acid composition of various species of *Thymus* (Lamiaceae). *University pro-*



Коэффициент ненасыщенности (K) жирных кислот в тканях листьев *Oxytropis scheludjakovae* и *Oxytropis strobilacea* в зависимости от среднесуточной температуры воздуха

Coefficient of unsaturation (K) of fatty acids in the leaf tissues of *Oxytropis scheludjakovae* and *Oxytropis strobilacea* based on the average daily air temperature.

ceedings. *Volga region. Natural Sciences*. 2023;41(1):83–92. (In Russ.)

6. Лось Д.А. Структура, регуляция экспрессии и функционирование десатураз жирных кислот. *Успехи биологической химии*. 2001;41:163–198.

Los' D.A. Structure, expression regulation and functioning of fatty acid desaturases. *Uspekhi Biologicheskoi Khimii*. 2001;41:163–198. (In Russ.)

7. Новицкая Г.В., Суворова Т.А., Трунова Т.И. Липидный состав листьев в связи с холодостойкостью растений томатов. *Физиология растений*. 2000;47(6): 829–835.

Novitskaya G.V., Suvorova T.A., Trunova T.I. Lipid composition of tomato leaves as related to plant cold tolerance. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2000; 47:728–733. <https://doi.org/10.1023/A:1026646826048>

8. Марковская Е.Ф., Шерудило Е.Г., Рипатти П.О., Сысоева М.И. Роль липидов в устойчивости семядольных листьев огурца к постоянному и кратковременному периодическому действию низкой закалывающей температуры. *Труды Карельского научного центра РАН*. 2009;(3):67–74.

Markovskaya E.F., Sherudilo E.G., Ripatti P.O., Sysoeva M.I. Role of lipids in resistance of cucumber cotyledon to continuous and short-term periodic effect of low hardening temperatures. *Transactions of Karelian Research Centre of Russian Academy of Science*. 2009;(3): 67–74. (In Russ.)

9. Соболева О.М., Кондратенко Е.П., Сухих А.С. Модификация жирнокислотного профиля как адаптация ячменя к окислительному стрессу. *Химия растительного сырья*. 2022.(3):229–236.

Soboleva O.M., Kondratenko E.P., Sukhikh A.S. Modification of the fatty acid profile as adaptation of barley to

oxidative stress. *Chemistry of plant raw material*. 2022;(3): 229–236. (In Russ.)

10. Novitskaya G.V., Suvorova T.A. Alterations in membrane lipid composition in winter wheat seedlings during cold acclimation. *Russian Journal of Plant Physiology*. 1994;41:474–479.

11. Новицкая Г.В., Сальникова Е.Б., Суворова Т.А. Изменение ненасыщенности жирных кислот липидов растений озимой и яровой пшеницы в процессе закаливания. *Физиология и биохимия культурных растений*. 1990;22:257–264.

Novitskaya G.V., Sal'nikova E.B., Suvorova T.A. Changes in unsaturation of fatty acids in winter and spring wheat plant lipids during hardening. *Physiology and biochemistry of cultivated plants*. 1990;22:257–264. (In Russ.).

12. Новицкая Г.В., Трунова Т.И. Связь холодостойкости растений с содержанием липидов мембран хлоропластов. *Докл. РАН*. 2000;371(2):258–260.

Novitskaya G.V., Trunova T.I. Relationship between cold resistance of plants and the lipid content of their chloroplast membranes. *Doklady Biochemistry*. 2000;371(1-6): 50–52.

13. Нохсоров В.В., Дударева Л.В., Петров К.А. Сезонная динамика содержания липидов и жирных кислот в тканях злаков *Avena sativa* и *Bromopsis inermis*. *Известия Иркутского государственного университета. Серия: Биология. Экология*. 2022;40:73–79.

Nohsarov V.V., Dudareva L.V., Petrov K.A. Seasonal dynamics of lipid and fatty acid content in tissues of common oat (*Avena sativa*) and smooth brome grass (*Bromopsis inermis*). *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Biology. Ecology*. 2022;40:73–79. (In Russ.)

14. Петров К.А., Перк А.А., Чепалов В.А., Охлопкова Ж.М. Особенности жирнокислотного состава некоторых растений Якутии в период формирования криорезистентности. *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова*. 2011;8(2): 26–29.

Petrov K.A., Perk A.A., Chepalov V.A., Ohlopko-va Zh.M. Characteristics of fatty acid composition of some plants of Yakutia during the development of cryo-resistance. *Vestnik of North-Eastern Federal University*. 2011;8(2):26–29. (In Russ.)

15. Граскова И.А., Дударева Л.В., Живетьев М.А. и др. Динамика сезонных изменений жирнокислотного состава, степени ненасыщенности жирных кислот и активности ацил-липидных десатураз в тканях некоторых лекарственных растений, произрастающих в условиях Предбайкалья. *Химия растительного сырья*. 2011;(4):223–230.

Graskova I.A., Dudareva L.V., Zhivet'ev M.A., et al. Dynamics of seasonal changes in the fatty acid composition, the degree of unsaturation of fatty acids and the activity of acyl-lipid desaturases in the tissues of some medicinal plants growing in the Pre-Baikal region. *Chemistry of plant raw material*. 2011;(4):223–230. (In Russ.)

16. Розенцвет О.А., Богданова Е.С., Головки Т.К., Захожий И.Г. Состав липидов листьев некоторых представителей *Polypodiophyta* на приполярном Урале. *Химия растительного сырья*. 2013;(4):127–134.

Rozentsvet O.A., Bogdanova E.S., Golovko T.K., Zahozhiy I.G. Composition of lipids of the leaves of some representatives of Polypodiophyta in the Polar Urals. *Chemistry of plant raw material*. 2013;(4):127–134. (In Russ.)

17. Хохряков А.П. *Флора Магаданской области*. М.: Наука; 1985. 396 с.

Hohryakov A.P. *Flora in the Magadan region*. Moscow: Nauka; 1985. 396 p. (In Russ.)

18. Синельникова Н.В. Сем. Fabaceae. В кн.: Беркутенко А.Н. (ред.). *Флора и растительность Магаданской области: (конспект сосудистых растений и очерк растительности)*. Магадан: ИБПС ДВО РАН; 2010. С. 179–186.

Sinel'nikova N.V. Sem. fabaceae. In: Berkutenko A.N. (ed.). *Flora and vegetation of the Magadan region*. Magadan: IBPN FEB RAS; 2010, pp. 179–186. (In Russ.)

19. Юрцев Б.А., Караваев М.Н. Новый остролодочник из секции *Baicalia* Bge. в горных степях северо-восточной Якутии. *Бюл. МОИП. Отд. биол.* 1961;66(4): 34–41.

Yurtsev B.A., Karavaev M.N. *Oxytropis* § *Baicalia* Bge. in steppis montanis Jakutiae boreali-orientalis. *Byul. MOIP. Otd. biol.* 1961;66(4):34–41. (In Russ.)

20. Положий А.В. *Oxytropis* DC. – Остролодочник. В кн.: *Флора Сибири. Том 9. Fabaceae (Leguminosae). В 14 томах*. Новосибирск: Наука; 1994:74–151

Polozhij A.V. *Oxytropis* DC. – *Ostrolodochnik*. In: *Flora Sibiriae. Tomus 9. Fabaceae (Leguminosae). In 14 tomis*. Novosibirsk: Nauka; 1994:74–151. (In Russ.)

21. Кузнецова Л.В., Захарова В.И. *Конспект флоры Якутии: Сосудистые растения*. Новосибирск: Наука; 2012. 265 с.

Kuznecova L.V., Zaharova V.I. *Overview of the flora in Yakutia: Vascular plants*. Novosibirsk: Nauka; 2012. 265 p. (In Russ.)

22. Пешкова Г.А. *Флорогенетический анализ степной флоры гор Южной Сибири*. Новосибирск: Наука; 2001. 192 с.

Peshkova G.A. *Florogenetic analysis of the steppe flora of the mountains in Southern Siberia*. Novosibirsk: Nauka; 2001. 192 p. (In Russ.)

23. Данилова Н.С. *Интродукция многолетних травянистых растений флоры Якутии*. Якутск: ЯНЦ СО РАН; 1993. 162 с.

Danilova N.S. Introduction of perennial herbaceous plants of the flora in Yakutia. Yakutsk: YaSC SB RAS; 1993. 162 p. (In Russ.)

24. Данилова Н.С. Эндемы и субэндемы Центральной Якутии в интродукции. *Бюллетень Главного ботанического сада*. 2013;199(1):3–9.

Danilova N.S. Endemics and sub-endemics of Central Yakutiya under introduction. *Bulletin Main Botanical Garden*. 2013;199(1):3–9. (In Russ.)

25. Miquel M., Browse J. *Arabidopsis* mutants deficient in polyunsaturated fatty acid synthesis. *The Journal of biological chemistry*. 1992;267(3):1502–1509.

26. Алаудинова Е.В., Миронов П.В. Липиды меристем лесобразующих хвойных пород центральной Сибири в условиях низкотемпературной адаптации. 2. Особенности метаболизма жирных кислот фосфолипидов меристем *Larix sibirica* Lebeb., *Picea obo-*

ta L. и *Pinus sylvestris* L. *Химия растительного сырья*. 2009;(2):71–76.

Alaudinova E.V., Mironov P.V. Lipids of meristems of forest-forming coniferous species of Central Siberia under conditions of low-temperature adaptation. 2. Features of the metabolism of fatty acids in phospholipids of the meristems of *Larix sibirica* Lebeb., *Picea obovata* L. and *Pinus sylvestris* L. *Chemistry of plant raw material*. 2009;(2):71–76. (In Russ.)

Об авторах

ФИЛИППОВА Галина Валерьевна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-2024-6062>, SPIN: 8460-0822, e-mail: nureeva@yandex.ru

Андросова Дария Николаевна, кандидат биологических наук, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-1521-0556>, SPIN: 7355-0928, e-mail: darija_androsova@mail.ru

ДАНИЛОВА Надежда Софроновна, доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-6532-7977>, ResearcherID: S-8136-2016, Scopus Author ID: 144580, SPIN: 7793-3635, e-mail: nad9.5@mail.ru

ПРОКОПЬЕВ Илья Андреевич, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-8755-7140>, ResearcherID: L-1301-2018, Scopus Author ID: 55037004900, SPIN: 6197-9570, e-mail: ilya.a.prokopiev@gmail.com

ВОРОНОВ Иван Васильевич, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-5460-4024>, SPIN: 3470-6013, e-mail: viv_2002@mail.ru

Вклад авторов

Филиппова Г.В. – разработка концепции, администрирование данных и проекта

Андросова Д.Н. – создание черновика рукописи, ресурсное обеспечение исследования

Данилова Н.С. – создание черновика рукописи, редактирование рукописи

Прокопьев И.А. – методология, верификация данных, проведение статистического анализа

Воронов И.В. – проведение исследования, создание черновика рукописи

Конфликт интересов

Один из авторов – доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник Данилова Н.С. является заместителем главного редактора журнала «Природные ресурсы Арктики и Субарктики». Авторам неизвестно о каком-либо другом потенциальном конфликте интересов, связанном с этой статьей.

About the authors

FILIPPOVA, Galina Valer'evna, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-2024-6062>, SPIN: 8460-0822, e-mail: nureeva@yandex.ru

ANDROSOVA, Daria Nikolaevna, Cand. Sci. (Biol.), Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-1521-0556>, SPIN: 7355-0928, e-mail: darija_androsova@mail.ru

DANILOVA, Nadezhda Sofronofna, Dr. Sci. (Biol.), Professor, Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-6532-7977>, ResearcherID: S-8136-2016, Scopus Author ID: 144580, SPIN: 7793-3635, e-mail: nad9.5@mail.ru

PROKOPIEV, Ilya Andreevich, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-8755-7140>, ResearcherID: L-1301-2018, Scopus Author ID: 55037004900, SPIN: 6197-9570, e-mail: ilya.a.prokopiev@gmail.com

VORONOV, Ivan Vasil'evich, Cand. Sc. (Biol.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5460-4024>, SPIN: 3470-6013, e-mail: viv_2002@mail.ru

Authors' contribution

Filippova G.V. – conceptualization, project administration

Androsova D.N. – original draft, resources

Danilova N.S. – original draft, review & editing

Prokopiev I.A. – methodology, validation, formal analysis

Voronov I.V. – investigation, original draft

Conflict of interest

One of the authors, Danilova N.S., Dr. Sci. (Biol.), Professor, Chief Researcher 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 14.03.2023

Поступила после рецензирования / Revised 23.04.2024

Принята к публикации / Accepted 14.05.2024

УДК [582.542.11:581.14]:[57.033:54-38] (985)
<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-287-294>

Оригинальная статья

Оценка устойчивости дикорастущих злаков северо-западного сектора Российской Арктики к хлоридному засолению

К. Б. Таскина✉, Н. М. Казнина

Институт биологии КНЦ РАН, г. Петрозаводск, Российская Федерация
✉ tasamayaksenia@gmail.com

Аннотация

Дикорастущие злаки широко распространены во всех типах растительности. Известна их важная роль в природе и хозяйственной деятельности человека. В частности, они находят применение в восстановлении почв, нарушенных антропогенным воздействием. Возможность использования дикорастущих злаков для восстановления засоленных участков суши и прибрежных территорий изучена слабо. Вследствие этого было исследовано воздействие разных концентраций хлорида натрия (20, 40, 60, 80, 100 и 200 мМ) на прорастание семян и начальные этапы роста четырех видов многолетних злаков (*Agrostis capillaris* L., *Deschampsia cespitosa* (L.) P. Beauv., *Phalaris arundinacea* L., *Phleum pratense* L.), произрастающих на территории Беломорского района Республики Карелия, который относится к арктической зоне. Исследования выявили ярко выраженную зависимость прорастания семян и начального роста проростков от концентрации соли в корнеобитаемой среде и от вида растений. Так, все изученные виды успешно проросли при концентрациях хлорида натрия от 20 до 80 мМ, тогда как повышение концентрации соли до 100 и 200 мМ вызывало задержку прорастания у большинства из них. Выявлено также, что у злаков рост корня и побега замедлялся (в разной степени в зависимости от вида) при использовании NaCl в концентрации 60 мМ и выше, однако полного торможения роста не наблюдалось. Учитывая, что изученные виды злаков устойчивы к низким температурам вегетационного сезона, характерным для мест их произрастания, высказано предположение о возможности их использования в фиторемедиации арктических территорий со степенью засоления до 100 мМ (0,6 % солености). На основании анализа полученных данных по всхожести и начальному росту проростков составлен ряд солеустойчивости (по убыванию) изученных видов многолетних злаков: *P. pratense* > *A. capillaris* > *P. arundinacea* > *D. cespitosa*.
Ключевые слова: прорастание семян, рост, засоление, арктические территории, *Agrostis capillaris* L., *Deschampsia cespitosa* (L.) P. Beauv., *Phalaris arundinacea* L., *Phleum pratense* L.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания КарНЦ РАН по теме «Механизмы устойчивости и адаптации растений к неблагоприятным факторам внешней среды» за счет средств федерального бюджета (проект № FMEN-2022-0004).

Для цитирования: Таскина К.Б., Казнина Н.М. Оценка устойчивости дикорастущих злаков северо-западного сектора Российской Арктики к хлоридному засолению. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(2):287–294. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-287-294>

Original article

Assessment of the resistance of wild grasses in the northwestern region of the Russian Arctic to chloride salinization

Ksenia B. Taskina✉, Natalia M. Kaznina

Institute of Biology, Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russian Federation
✉ tasamayaksenia@gmail.com

Abstract

Wild grasses are prevalent across various types of vegetation, playing a significant role in both natural ecosystems and human economic endeavors. The potential of using grasses to restore areas affected by tidal erosion and saline soils has not been fully investigated. A study was conducted to examine the impact of different levels of NaCl salinity (rang-

ing from 20 to 200 mM) on seed germination and early growth of *Agrostis capillaris* L., *Deschampsia cespitosa* (L.) P. Beauv., *Phalaris arundinacea* L., and *Phleum pratense* L. These plants are commonly found in the Arctic region within the Belomorsky district of the Republic of Karelia. Through research, a direct connection was discovered between the germination of seeds and the growth of seedlings based on the salt levels in the root environment and the type of grass species present. In summary, all species successfully germinated at NaCl concentrations of 20–80 mM. However, germination rates decreased at 100 and 200 mM in most cases. When exposed to NaCl concentrations of 60 mM and higher, the growth of root and shoot in the grasses was slowed down to some extent (depending on the species), but not completely inhibited. Due to the resilience of wild grasses to cold temperatures, it is proposed that they could be used in the phytoremediation of Arctic areas with a salinity level of up to 100 mM (0.6 % salinity). An analysis of the data resulted in a ranking of grass species based on their salt resistance: *P. pratense* > *A. capillaris* > *P. arundinacea* > *D. cespitosa*.

Keywords: Keywords: seeds germination, plant growth, salinity, arctic territories, *Agrostis capillaris* L., *Deschampsia cespitosa* (L.) P. Beauv., *Phalaris arundinacea* L., *Phleum pratense* L.

Funding. This study was conducted within the framework of the state assignment for the Karelian Research Centre of the RAS “Mechanisms of plant resistance and adaptation to adverse environmental factors” (project No. FMEN-2022-0004).

For citation: Taskina K.B., Kaznina N.M. Assessment of the resistance of wild grasses in the northwestern region of the Russian Arctic to chloride salinization. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(2):287–294. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-287-294>

Введение

Дикорастущие представители семейства Poaceae имеют широкую географию распространения. В большинстве случаев это многолетние растения, которые практически во всех типах растительности занимают содоминирующее, а в некоторых зонах (луга, степи, саванны) – доминирующее положение в фитоценозах. Заросли этих злаков важны для гнездования, а семена – для питания птиц и мелких грызунов [1]. Кроме того, многолетние злаки широко используются в качестве кормовых растений для домашних животных, многие из них являются основными компонентами естественных сенокосов и пастбищ [2]. Необходимо отметить и участие дикорастущих злаков в восстановлении почв, нарушенных вследствие антропогенного воздействия, в частности, при высоких концентрациях тяжелых металлов в окружающей среде [3, 4].

Возможность использования дикорастущих злаков для восстановления засоленных участков суши и прибрежных территорий изучена слабо [5, 6]. Вместе с тем в последнее время засоление почв становится все более актуальной проблемой во многих странах, что связано с постоянным увеличением площади засоленных территорий. Наиболее опасное и в то же время самым распространенное засоление – натрий-хлоридное [7]. При повышении концентрации ионов натрия и хлора в корнеобитаемой среде у растений тормозятся рост и развитие, замедляются процессы фотосинтеза и дыхания, снижаются продуктивность и способность к репродукции. Это приводит к уменьшению флористического биоразно-

образия на засоленных территориях, а иногда и к полной деградации естественных фитоценозов. Вследствие этого поиск видов растений, способных успешно расти на почвах с высоким уровнем засоления, и изучение их солеустойчивости чрезвычайно важны с точки зрения возможного их использования в фиторемедиации засоленных территорий.

Изучение в этом плане растений, произрастающих в арктической зоне, особенно актуально, поскольку северные фитоценозы характеризуются низкой продуктивностью, а их естественное восстановление происходит крайне медленно и в нем участвует сравнительно ограниченное число видов. При этом, несмотря на очаговый характер антропогенных нарушений, в настоящее время все чаще наблюдается деградация целых экосистем, следствием которой является нарушение растительного покрова [8].

К главным особенностям арктических почв относят засоление верхних слоев. При этом для прибрежных территорий арктической зоны также характерен натрий-хлоридный тип засоления. Его распространенность в грунте вдоль арктического побережья Евразии и на островах изменяется преимущественно в пределах 0,05–2 % [7]. С увеличением антропогенной нагрузки на арктические территории возрастает и риск увеличения степени засоления почв, что может привести к снижению флористического биоразнообразия. Вследствие этого изучение устойчивых к засолению видов, в том числе среди представителей семейства Poaceae, становится весьма актуальным.

Цель настоящей работы заключалась в оценке устойчивости к засолению ряда дикорастущих видов семейства Poaceae, произрастающих в арктической зоне Российской Федерации. Исследования проводились на начальных этапах развития растений, поскольку именно в фазе проростков они наиболее чувствительны к засолению [9, 10], а оценка их солеустойчивости, проведенная на этом этапе развития, считается более точной [11].

Материалы и методы исследования

Объектами исследования служили дикорастущие виды семейства Poaceae: полевица тонкая (*Agrostis capillaris* L.), щучка дернистая (*Deschampsia cespitosa* (L.) P. Beauv.), двукосточник тростниковый (*Phalaris arundinacea* L.) и тимopheвка луговая (*Phleum pratense* L.), различающиеся по чувствительности к засолению. В частности, *A. capillaris* (рыхлодерновинная форма) и *P. arundinacea* (дерновинный корневищный злак) умеренно чувствительны к высоким концентрациям солей в субстрате, тогда как *D. cespitosa* (плотнoderновинная форма) и *P. pratense* (рыхлодерновинная форма) характеризуются высокой чувствительностью к засолению [1, 2].

Семена злаков были собраны в природных (дикорастущих) популяциях Беломорского района Республики Карелия, входящего в арктическую зону РФ. Солеустойчивость видов оценивали по дружности (энергии) прорастания и всхожести семян, а также по ряду морфофизиологических

показателей на начальных этапах роста проростков. Семена злаков проращивали в лабораторных условиях в чашках Петри, в темноте при температуре 22 °C. В качестве контроля использовали дистиллированную воду, в вариантах опыта в раствор вносили соль NaCl (х.ч.) в концентрациях 20, 40, 60, 80, 100 и 200 мМ. Энергию прорастания определяли через 7 сут, всхожесть семян – через 14 сут [12]. Для изучения морфометрических показателей злаки выращивали под светоустановкой при температуре 22–25 °C, влажности 60–70 %, ФАР 100 мкмоль/(м² · с) и 14-ч часовом фотопериоде. Спустя 14 сут измеряли морфометрические показатели проростков (длину корня и высоту побега).

Для определения энергии прорастания и всхожести семян были взяты четыре чашки Петри для каждого варианта опыта, по 25 семян в каждой [13]. Для измерения морфометрических показателей биологическая повторность в пределах каждого варианта опыта составляла 10 растений. В таблицах и на рисунках представлены средние значения и их стандартные ошибки. Достоверность различий между контролем и опытом оценивали с помощью критерия Стьюдента при уровне значимости $P < 0,05$.

Результаты

Проведенные исследования выявили определенные различия в устойчивости изученных видов злаков к засолению. Так, у *D. cespitosa* энергия прорастания семян заметно снижалась (по

Таблица 1

Влияние разных концентраций NaCl на энергию прорастания семян дикорастущих злаков

Table 1

Impact of defferent levels of NaCl on the germination energy of wild grass seeds

Концентрация NaCl, мМ NaCl concentration, mM	Вид растения Plant species			
	<i>A. capillaris</i>	<i>P. arundinacea</i>	<i>P. pratense</i>	<i>D. cespitosa</i>
0 (Контроль) 0 (Control)	19,25±1,25	15,00±0,91	23,25±1,11	18,25±0,48
20	19,00±1,29	13,75±1,70	22,75±0,48	17,25±1,70
40	19,50±0,50	12,50±2,18	23,25±0,85	13,25±0,63*
60	15,00±1,87	10,2±0,63*	21,25±0,85	12,25±0,85*
80	15,00±1,00*	11,75±1,31*	23,25±0,25	12,00±2,38*
100	10,75±1,93*	8,00±0,71*	24,50±0,29	9,25±1,11*
200	3,50±0,87*	1,75±0,25*	19,50±0,29*	1,75±1,11*

Примечание. Здесь и в табл. 2 * – различия с контролем достоверны при $P < 0,05$.
Note. Here and in table 2 * – differences with the control are significant at $P < 0.05$.

Таблица 2

**Влияние разных концентраций NaCl
на всхожесть семян дикорастущих злаков**

Table 2

Impact of different levels of NaCl on the germination of wild grass seeds

Концентрация NaCl, мМ NaCl concentration, mM	Вид растения Plant species			
	<i>A. capillaris</i>	<i>P. arundinacea</i>	<i>P. pratense</i>	<i>D. cespitosa</i>
0 (Контроль) 0 (Control)	21,50±0,50	19,25±0,85	23,75±0,95	19,25±0,25
20	20,25±1,18	17,00±0,91	23,75±0,63	19,00±1,41
40	22,50±1,04	16,75±1,65	23,50±0,96	17,50±1,66
60	19,25±1,45	13,25±0,85*	22,75±0,95	18,50±1,26
80	18,25±1,55	13,75±0,95*	23,25±0,25	17,50±1,19
100	14,75±2,21*	12,50±1,44*	24,50±0,29	12,75±1,11*
200	3,75±0,75*	2,00±0,41*	21,50±0,50	5,25±1,60*

сравнению с контролем) уже при использовании хлорида натрия в концентрации 40 мМ, у *P. arundinacea* значительное уменьшение этого показателя отмечалось при концентрации соли 60 мМ, а у *A. capillaris* – при 80 мМ (табл. 1). Наиболее устойчивым к засолению видом оказалась *P. pratense*, у которой только наибольшая (200 мМ) концентрация NaCl приводила к снижению энергии прорастания семян.

По всхожести семян наименее устойчивым видом оказался *P. arundinacea*, у которого значительное снижение числа всхожих семян наблюдалось при использовании хлорида натрия в концентрациях 60 мМ и выше (табл. 2). У *D. cespitosa* и *A. capillaris* всхожесть семян заметно сни-

жалась при более высоких концентрациях соли (100 и 200 мМ), в наибольшей степени – при 200 мМ. В отличие от этого, у *P. pratense* при всех изученных уровнях засоления всхожесть семян была высокой и не отличалась от контрольного варианта.

На начальных этапах роста и развития растения характеризуются высокой чувствительностью к стрессовым воздействиям. Поэтому изучение их стрессоустойчивости целесообразно проводить именно на этих этапах [9–11]. Морфометрический анализ проростков многолетних злаков выявил определенные различия в ответной реакции на засоление. Так, у *A. capillaris* и *P. pratense* замедление роста корня наблюдалось уже при

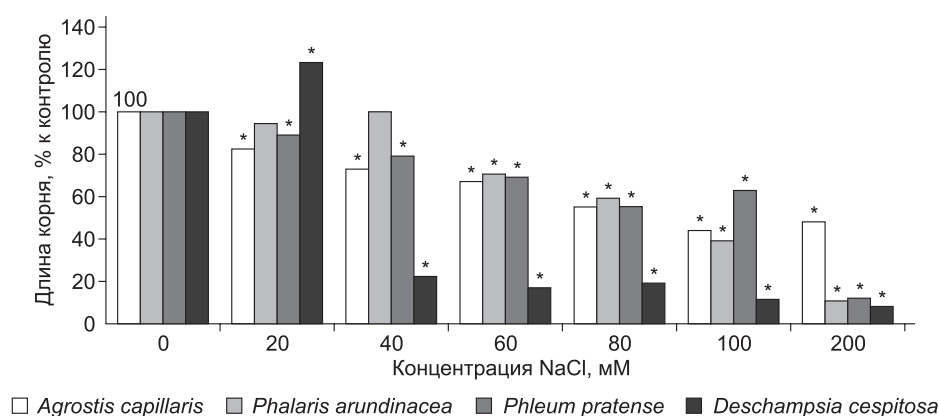


Рис. 1. Влияние разных концентраций NaCl на длину корня дикорастущих злаков. Здесь и на рис. 2 * – различия с контролем не достоверны

Fig. 1. Impact of different levels of NaCl concentrations on the root length of wild grasses. Here and in fig. 2 * – differences with the control are not significant.

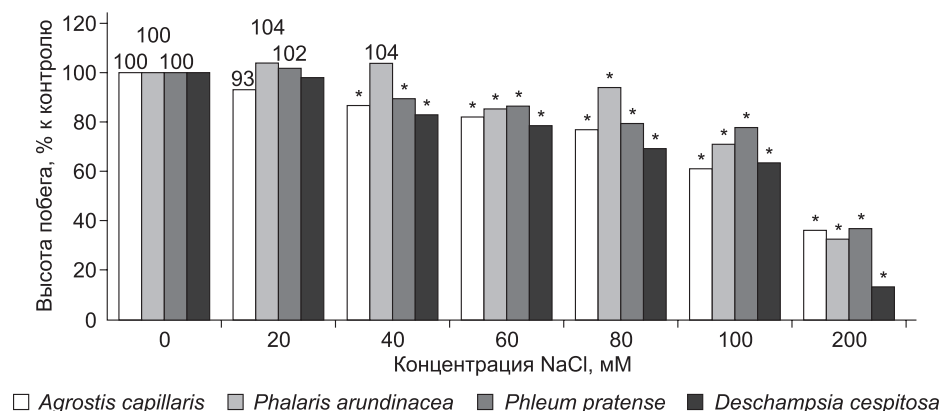


Рис. 2. Влияние разных концентраций NaCl на высоту побега дикорастущих злаков

Fig. 2. Impact of different levels of NaCl concentrations on the shoot length of wild grasses

концентрации хлорида натрия 20 мМ, тогда как у *D. cespitosa* в этих условиях длина корня, наоборот, оказалась больше, чем в контроле, а значительное уменьшение этого показателя отмечалось лишь при 40 мМ NaCl и выше (рис. 1). У *P. arundinacea* торможение роста корня наблюдалось только при концентрации соли 60 мМ и выше. Вместе с тем при сильном засолении (200 мМ) в меньшей степени уменьшалась (на 55 % по отношению к контролю) длина корня у *A. capillaris*, тогда как у других видов злаков она снижалась более, чем на 90 %.

Отрицательное воздействие хлорида натрия на рост побега было выражено в несколько меньшей степени, чем корня. В частности, при концентрации хлорида натрия 20 мМ замедления роста побега не наблюдалось ни у одного из изученных видов (рис. 2). При концентрации соли 40 мМ и выше обнаружилось уменьшение высоты побега у *A. capillaris*, *P. pratense* и *D. cespitosa*, а при концентрации 60 мМ и выше – у *P. arundinacea*. Наиболее сильное снижение высоты побега отмечено у всех видов злаков при наибольшей концентрации NaCl (200 мМ). Результаты исследования выявили также, что наименее устойчивой к засолению оказалась *D. cespitosa*, у которой высота побега при наибольшей концентрации соли уменьшалась на 90 % по сравнению с контролем, тогда как у остальных видов – менее чем на 65 %.

Обсуждение результатов

Важная роль многолетних злаков в восстановлении растительности на засоленных почвах [14] во многом объясняется их высокой ценотической активностью и повышенной устойчивостью к различным неблагоприятным факторам внеш-

ней среды [15]. Кроме того, способность этих злаков к кущению и формированию дернины позволяет им успешно осваивать нарушенные территории, что крайне важно в условиях увеличивающейся антропогенной нагрузки. Ранее нами отмечалась перспективность использования некоторых видов многолетних злаков в технологии фиторемедиации загрязненных тяжелыми металлами территорий, расположенных в северных регионах [4, 15]. Что касается засоления, то такого рода данных крайне мало. Хотя логично предположить, что эти виды окажутся способными успешно произрастать и на засоленных почвах, в том числе в суровых почвенно-климатических условиях арктической зоны.

Одним из методов сравнительного определения солеустойчивости разных видов (сортов) растений является изучение их способности к прорастанию в неблагоприятных условиях внешней среды. В многочисленных работах указывается на значительное снижение всхожести семян при высоких концентрациях солей в почве. Вместе с тем показано, что устойчивость разных видов к засолению неодинакова. Например, у *P. arundinacea* L. энергия прорастания и всхожесть семян снижалась уже при концентрации соли 50 мМ, у *Lolium rigidum* Gaudin и *Sorghum bicolor* (L.) Moench – при 100 мМ [16], а у *Zea mays* L. уменьшение числа проросших семян отмечали лишь при концентрации хлорида натрия 245 мМ [17]. В наших исследованиях наименее устойчивым оказался *P. arundinacea*, у которого уже при использовании хлорида натрия в концентрации 60 мМ (0,35 % солёности) снижалась всхожесть семян, а наиболее устойчивая – *P. pratense*, всхожесть семян которой оставалась высокой даже

при использовании наибольшей концентрации соли (200 мМ, 1,2 % солености).

Показатели роста растений, как известно, являются хорошими индикаторами их устойчивости к различным стрессорам, в том числе к избытку соли в корнеобитаемой среде [13]. При этом у более солеустойчивых видов, как правило, они снижаются (по отношению к контролю) в меньшей степени, чем у более чувствительных. Так, у растений *Hordeum maritimum* With. [18], *H. hystris* Roth. [19] и *Arrhenatherum elatius* (L.) P. Beauv. ex J. Presl & C. Presl. [20] при концентрации хлорида натрия 200 мМ замедления роста корня и побега не наблюдалось. Вместе с тем у *Dactyloctenium radulans* (R. Br.) P. Beauv. уменьшение линейных размеров корня и побега было отмечено уже при 100 мМ NaCl [17].

Негативное влияние засоления на рост корня и побега во многом связано с нарушением водного баланса и ионного гомеостаза клеток. В частности, при высоких концентрациях ионов Na⁺ и Cl⁻ снижается водный потенциал раствора в прикорневой среде, что приводит к дегидратации клеток растений и нарушению водного обмена [21]; изменяется элементный состав растений [22]; нарушается состояние клеточных мембран и снижается активность ферментов [23, 24]. У всех изученных нами видов злаков отмечалось замедление роста корня и в несколько меньшей степени роста побега, что наиболее отчетливо проявлялось при использовании хлорида натрия в наиболее высокой концентрации (200 мМ). При этом обнаружены отчетливые видовые различия в устойчивости растений разных видов к засолению. В частности, *A. capillaris* по морфометрическим параметрам оказалась более солеустойчивым видом, *P. pratense* и *P. arundinacea* – менее устойчивыми, а *D. cespitosa* – самым чувствительным к засолению видом.

Заключение

В целом изученные виды многолетних злаков способны успешно прорасти и поддерживать активность ростовых процессов на начальных этапах онтогенеза при концентрации хлорида натрия 20, 40 и 80 мМ (0,12, 0,23, 0,48 % солености). Повышение концентрации до 100 мМ (0,6 % солености) вызывает некоторую (менее чем на 30 % по сравнению с контролем) задержку прорастания у большинства из них. Учитывая, что изученные виды злаков устойчивы и к низким температурам вегетационного сезона, характерным

для мест их произрастания, можно предположить возможность использования этих видов в фиторемедиации арктических территорий с указанной степенью засоления. В условиях сильного засоления (200 мМ – 1,2 % солености) всхожесть семян изученных злаков значительно снижалась (на 70–90 % по сравнению с контролем), за исключением *P. pratense*. При этом у всех видов заметно тормозился рост корня (на 55–90 % по отношению к контролю) и побега (65–94 %), что в дальнейшем может отрицательно сказаться на их жизнеспособности в этих условиях.

На основании анализа полученных данных по всхожести и начальному росту проростков можно составить следующий ряд солеустойчивости (в порядке убывания) изученных видов многолетних злаков: *P. pratense* > *A. capillaris* > *P. arundinacea* > *D. cespitosa*.

Список литературы / References

1. *Plants database. National plant data team.* URL: <http://plants.usda.gov>.
2. Цвелев Н.Н. *Злаки СССР.* Л.: Наука; 1976. 787 с. Tsvelev N.N. *Poaceae USSR.* Leningrad: Nauka; 1976. 787 p. (In Russ.)
3. Bezel V.S., Zhuikova T.V. Chemical pollution: Transfer of chemical elements to the aboveground phytomass of herbaceous plants. *Russian Journal of Ecology.* 2007; 38(4):238–246. <http://doi.org/10.1134/S1067413607040042>.
4. Казнина Н.М., Лайдинен Г.Ф., Батова Ю.В., Титов А.Ф. Устойчивость семенного потомства растений из природных популяций *Deschampsia cespitosa* арктической зоны к повышенным концентрациям цинка. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики.* 2022; 27(1):70–79. <http://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-1-70-79>.
5. Kaznina N.M., Laidinen G.F., Batova Y.V., Titov A.F. Resistance of seed progeny of plants from natural populations of *Deschampsia cespitosa* in the Arctic zone to elevated zinc concentrations. *Arctic and Subarctic Natural Resources.* 2022;27(1):70–79. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-1-70-79>
5. Imadi S., Shah S., Kazi A., et al. Chapter 18 – Phytoremediation of saline soils for sustainable agricultural productivity. In: Ahmad P. (ed.). *Plant Metal Interaction.* Elsevier; 2016, pp. 455–468. <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-803158-2.00018-7>
6. Jampasri K., Sittiwongpeng K., Raknak K. Effect of salinity on the growth and cadmium accumulation of *Vetiveria nemoralis*. *Environment and natural resources journal.* 2017;15(2):62–70. <http://doi.org/10.14456/enrj.2017.13>.
7. Трофимов В.Т., Красилов Н.С. Засоленные мерзлые грунтовые толщи Арктического побережья России и их инженерно-геологические особенности.

Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический. 2017;92(4):49–57.

Trofimov V.T., Krasilova N.S. Saline frozen soils of Russian Arctic coast and their engineering geological specific. *Bulletin of Moscow society of naturalists. Geological series*. 2017;92(4):49–57. (In Russ.)

8. Тишков А.А., Белоновская Е.А., Глазов П.М. и др. Антропогенная трансформация арктических экосистем России: подходы, методы, оценки. *Арктика: экология и экономика*. 2019;36(4):38–51. <http://doi.org/10.25283/2223-4594-2019-4-38-51>.

Tishkov A.A., Belonovskaya Y.A., Glazov P.M., et al. Anthropogenic transformation of the Russian Arctic ecosystems: approaches, methods, assessments. *Arctic: Ecology and Economy*. 2019;36(4):38–51. <http://doi.org/10.25283/2223-4594-2019-4-38-51>. (In Russ.)

9. Шарипова Г.В., Веселов Д.С. Ростковая реакция на засоление растений разных сортов ячменя и ее связь с водным обменом. *Физиология и биохимия культурных растений*. 2011;43(2):129–135.

Sharipova G.V., Veselov D.S. Growth reaction to salinity of different varieties of barley and its relationship with the water exchange. *Physiology and biochemistry of culture plants*. 2011;43(2):129–135. (In Russ.)

10. Кононенко Н.В., Диловарова Т.А., Канавский Р.В. и др. Оценка морфологических и биохимических параметров устойчивости различных генотипов пшеницы к хлоридному засолению. *Вестник РУДН. Серия: Агрономия и животноводство*. 2019;14(1):18–39. <https://doi.org/10.22363/2312-797X-2019-14-1-18-39>

Kononenko N.V., Diloarova T.A., Kanavsky R.V., et al. Evaluation of morphological and biochemical resistance parameters to chloride salination in different wheat genotypes. *RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries*. 2019;14(1):18–39. <http://doi.org/10.22363/2312-797X-2019-14-1-18-39>. (In Russ.)

11. Niknam V., Bagherzadeh M., Ebrahimzadeh H., Sokhansanj A. Effect of NaCl on biomass and contents of sugars, proline and proteins in seedlings and leaf explants of *Nicotiana tabacum* grown in vitro. *Biologia Plantarum*. 2004;48:613–615. <https://doi.org/10.1023/B:BIOP.0000047163.70240.69>.

12. ГОСТ-12038-84: Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. 01.07.86. М.: ИПК Издательство стандартов; 2004. 10 с.

State Standard 12038-84. Agricultural seeds. Methods for determination of germination. Moscow: Standart Publ.; 2004. 10 p. (In Russ.)

13. Диагностика устойчивости растений к стрессовым воздействиям: Методическое руководство. Л.: ВИР; 1988. 228 с.

Diagnostics of plant resistance to stress: (methodological guide). Leningrad: VIR Publ.; 1988. 228 p. (In Russ.)

14. Дедова Э.Б. Повышение природно-ресурсного потенциала деградированных земель Калмыкии комплексной мелиорацией: Автореф. дис. ... докт. с.-х. наук. Москва. 2012. 48 с.

Dedova E.B. Increasing the natural resource isolation of degraded lands of Kalmykia by integrated reclamation: Abstr. ... Diss. Doct. Sci, Moscow. 2012. 48 p. (In Russ.)

15. Лайдинен Г.Ф., Казнина Н.М., Батова Ю.В., Титов А.Ф. Влияние промышленного загрязнения почвы тяжелыми металлами на растения *Phleum pratense* (Poaceae) в условиях Северной Карелии. *Растительные ресурсы*. 2021;57(4):359–369. <https://doi.org/10.31857/S0033994621040063>.

Laydinen G.F., Kaznina N.M., Batova Yu.V., Titov A.F. Effect of industrial heavy metal soil contamination on *Phleum pratense* (Poaceae) in the Northern Karelia. *Plant resources*. 2021;57(4):359–369. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0033994621040063>

16. Cong L.L., Zhang X.Q., Li Y.X., et al. Response of reed Canary grass to salt stress during seed germination and vegetative stage. *Advanced Materials Research*. 2012;518–523:5355–5362. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.518-523.5355>

17. Uçarlı C. Effects of salinity on seed germination and early seedling stage. In: Fahad S., Saud S., Chen Y., Wu C., Wang D. (eds.). *Abiotic stress in plants*. IntechOpen. 2020; pp. 1–21. <https://doi.org/10.5772/intechopen.93647>.

18. Ferchichi S., Hessini K., Dell Aversana E., et al. *Hordeum vulgare* and *Hordeum maritimum* respond to extended salinity stress displaying different temporal accumulation pattern of metabolites. *Functional Plant Biology*. 2018;45(11):1096–1109. <https://doi.org/10.1071/fp18046>.

19. Lombardi T., Lupi B. Salt-tolerance in wild *Hordeum* (Poaceae) species: Differences between *H. maritimum* With. and *H. hystrix* Roth. *Atti della società Toscana di scienze naturali*. 2006;113:31–35.

20. Zan W., Xi Y.F., Xuemin W., Hongwen G. Growth and physiological response of tall oat grass to salinity stress. *African Journal of Biotechnology*. 2011;10(37):7126–7130. <https://doi.org/10.5897/AJB11.809>

21. Балнокин Ю.В. Ионный гомеостаз и солеустойчивость растений. М.: Наука; 2012. 99 с.

Balnokin Y.V. *Ionic homeostasis and salt resistance of plants*. Moscow: Nauka; 2012. 99 p. (In Russ.)

22. Rajendran K., Tester M., Roy S.J. Quantifying the three main components of salinity tolerance in cereals. *Plant Cell Environment*. 2009;32(3):237–249. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2008.01916.x>.

23. Zhu J.K. Genetic analysis of plant salt tolerance using Arabidopsis. *Plant Physiology*. 2000;124(3):941–948. <https://doi.org/10.1104/pp.124.3.941>.

24. Roychoudhury A., Paul S., Basu S. Cross-talk between abscisic acid-dependent and abscisic acid-independent pathways during abiotic stress. *Plant Cell Report*. 2013;32(7):985–1006. <https://doi.org/10.1007/s00299-013-1414-5>.

25. Semida W.M., Rady M.M. Pre-soaking in 24-epibrassinolide or salicylic acid improves seed germination, seedling growth, and anti-oxidant capacity in *Phaseolus vulgaris* L. grown under NaCl stress. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*. 2014;89(3):338–344. <https://doi.org/10.1080/14620316.2014.11513088>

Об авторах

ТАСКИНА Ксения Борисовна, главный биолог, <https://orcid.org/0000-0001-5322-9798>, ResearcherID: rid44902, SPIN: 5899-1112, e-mail: tasamayaksenia@gmail.com

КАЗНИНА Наталья Мстиславовна, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-3092-563X>, ResearcherID: A-5917-2014, SPIN: 9653-3490, e-mail: kaznina@krc.karelia.ru

Вклад авторов

Таскина К.М. – проведение статистического анализа, проведение исследования, администрирование данных, создание черновика рукописи, редактирование рукописи, визуализация

Казнина Н.М. – разработка концепции, ресурсное обеспечение исследования, редактирование рукописи, руководство исследованием

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

TASKINA, Ksenia Borisovna, Chief Biologist, <https://orcid.org/0000-0001-5322-9798>, ResearcherID: rid44902, SPIN: 5899-1112, e-mail: tasamayaksenia@gmail.com

KAZNINA, Natalia Mstislavovna, Dr. Sci. (Biol.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-3092-563X>, ResearcherID: A-5917-2014, SPIN: 9653-3490, e-mail: kaznina@krc.karelia.ru

Authors' contribution

Taskina K.B. – formal analysis, investigation, data curation, original draft, review & editing, visualization

Kaznina N.M. – conceptualization, resources, review & editing, supervision

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 09.02.2023

Поступила после рецензирования / Revised 20.04.2023

Принята к публикации / Accepted 15.05.2024

Биологические ресурсы

УДК 581.192.2: 581.52

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-295-302>

Оригинальная статья

Биохимический состав ягод и плодов на территории Юго-Западного Таймыра

А. А. Кайзер¹, К. А. Лайшев^{✉,2}, А. А. Южаков²

¹Научно-исследовательский институт сельского хозяйства и экологии Арктики –
филиал ФИЦ «Красноярский научный центр СО РАН»,
г. Норильск, Российская Федерация

²Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр РАН,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ layshev@mail.ru

Аннотация

Впервые представлены результаты исследований биохимического состава плодов и ягод, произрастающих на территории Юго-Западного Таймыра: черника обыкновенная (*Vaccinium myrtillus*), смородина печальная (*Ribes triste*), голубика обыкновенная (*Vaccinium uliginosum*), шиповник иглистый (*Rosa acicularis*), брусника обыкновенная (*Vaccinium vitis-idaea*), шикша почти-голарктическая (*Empetrum subholarcticum*), рябина сибирская (*Sorbus sibirica*), морошка обыкновенная (*Rubus chamaemorus*). Установлено, что сырой протеин преобладает в плодах шиповника, голубике и рябине. По содержанию сырой клетчатки доминируют плоды шиповника и красной смородины, а сырого протеина – черника, красная смородина и морошка. По содержанию калия и кальция доминируют шиповник, рябина, высокое содержание натрия отмечается в ягодах черники, красной смородины и шиповника, фосфора – в шикше, рябине, а магния – в бруснике, рябине, голубике и морошке. Суммарное содержание аминокислот выше в красной смородине, чернике и морошке. Установлено, что в образцах красной смородины, черники, шикши, морошки отмечается преобладание незаменимых аминокислот над заменимыми в 1,2–3,5 раза. Отмечается высокое содержание лейцина, изолейцина, валина и треонина. Проведенные исследования подтверждают высокую биологическую ценность плодового сырья, произрастающего на территории Юго-Западного Таймыра, и целесообразность использования его при производстве биологически активных пищевых добавок функциональной направленности.

Ключевые слова: Арктическая зона РФ, ягоды, макроэлементы, биологически активные вещества

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственных заданий НИИСХИЭА ФКНЦ СО РАН «Оценка состояния компонентов природных комплексов Норило-Пясинской экосистемы в условиях техногенного загрязнения» (№ 122022600041-8) и СЗЦППО-СПбФИЦ РАН «Разработка фундаментальных, методологических и технологических основ увеличения производства сельскохозяйственной продукции на Северо-Западе и в Арктической зоне РФ, обеспечивающие продовольственную и экологическую безопасности регионов» (№ 122041900025-6).

Для цитирования: Кайзер А.А., Лайшев К.А., Южаков А.А. Биохимический состав ягод и плодов на территории Юго-Западного Таймыра. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(2):295–302. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-295-302>

Original article

The biochemical composition of wild berries and fruits growing in the Southwestern Taimyr

Andrey A. Kaiser¹, Kasim A. Laishev^{✉,2}, Alexander A. Yuzhakov²

¹Scientific-Research Institute of Agriculture and Ecology of the Arctic – Division of Federal Research Center
“Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”,
Norilsk, Russian Federation

²St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation

✉ layshev@mail.ru

Abstract

This article presents research findings on the chemical composition of fruits and berries found in the Southwestern Taimyr region, including bilberry (*Vaccinium myrtillus*), northern redcurrant (*Ribes triste*), blueberry (*Vaccinium ul-*

iginosum), prickly wild rose (*Rosa acicularis*), lingonberry (*Vaccinium vitis-idaea*), almost-holarctic crowberry (*Empetrum subholarcticum*), Siberian rowan (*Sorbus sibirica*), and cloudberry (*Rubus chamaemorus*). We revealed that rowan, blueberries, and prickly wild rose are particularly rich in crude fat. Additionally, prickly wild rose, and red currants were found to be high in crude fiber content, while bilberries, red currants, and cloudberry were dominant in crude protein. Potassium and calcium content were highest in prickly wild rose and rowan, while bilberries, red currants, and prickly wild rose had high sodium content. Moreover, crowberries and rowan berries were rich in phosphorus, and lingonberries, rowan berries, bilberries, and cloudberry were abundant in magnesium. Red currants, bilberries, and cloudberry had the highest total amino acid content, with essential amino acids being more prevalent than non-essential ones in redcurrant, bilberry, crowberry, and cloudberry samples. The content included high levels of leucine, isoleucine, valine, and threonine. Overall, the fruits and berries in the Southwestern Taimyr region have significant biological value and could be effectively used in creating functional biologically active substances.

Keywords: Arctic zone of the Russian Federation, berries, macroelements, biologically active substances

Funding. This study was conducted within the framework of the state assignments for the Scientific-Research Institute of Agriculture and Ecology of the Arctic of the Federal Research Center of the SB RAS (No. 122022600041-8) and St. Petersburg Federal Research Center of the RAS (No. 122041900025-6).

For citation: Kaiser A.A., Laishev K.A., Yuzhakov A.A. The biochemical composition of wild berries and fruits growing in the Southwestern Taimyr. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(2):295–302. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-295-302>

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется продовольственной безопасности в Арктической зоне РФ. Рассматривая отрасли традиционного природопользования, следует отметить, что сбор дикоросов по объемам продукции значительно уступает домашнему оленеводству, охотничьему и рыбному промыслам. Сбор дикоросов значительно уступает в количествах получаемой продукции. По данным М.Н. Казанцевой [1], в России сейчас используются только 1,3 % запаса черники, 1,5 брусники, 2,5 % клюквы и голубики, хотя многие эксперты отмечают, что общие эксплуатационные запасы брусники только в Ханты-Мансийском автономном округе составляют 5,3 тыс. т, клюквы – 0,2 тыс. т, голубики – 5,5 тыс. т [1–4].

К функциональным относят продукты из сырья растительного и животного происхождения, систематическое употребление которых регулирует обмен веществ. Такие продукты должны содержать в сбалансированном количестве белки, жиры, углеводы, минеральные вещества, витамины, антиоксиданты и другие биологически активные вещества [5].

Следует отметить, что дикоросы, собранные в Арктической зоне РФ, это настоящий клад для разработки и широкого использования их в качестве функциональных продуктов питания [6–8].

На нашей арктической территории особую ценность представляют дикорастущие растения, высоконасыщенные антиоксидантами и антоцианами

а также приспособленные к условиям окружающей среды, проявляющие иммунитет ко многим заболеваниям [9–13].

Накопление минеральных веществ и аминокислот в растениях зависит от экологических и биологических особенностей вида, анатомических и физиологических органов растения, способности растений накапливать те или иные органические и неорганические соединения [14–16].

Цель исследований – на основе аналитических исследований изучить биохимический состав ягод и плодов, произрастающих на территории юго-западной части полуострова Таймыр, для оценки возможности использования их в производстве биологически активных пищевых добавок функциональной направленности.

Материал и методы

Материалом для исследования являются плоды и ягоды, произрастающие на территории Юго-Западного Таймыра: черника обыкновенная (*Vaccinium myrtillus*), смородина печальная (*Ribes triste*), голубика обыкновенная (*Vaccinium uliginosum*), шиповник иглистый (*Rosa acicularis*), брусника обыкновенная (*Vaccinium vitis-idaea*), шикша почти-голарктическая (*Empetrum subholarcticum*), рябина сибирская (*Sorbus sibirica*), морошка обыкновенная (*Rubus chamaemorus*).

После сбора и обработки сырья для сохранения термолабильных биологически активных веществ сушку материала проводили в инфракрас-

Таблица 1

Показатели общего анализа плодово-ягодного сырья

Table 1

Criteria for the overall evaluation of fruit and berry raw materials

Образец	Сырой жир, %	Сырая клетчатка, %	Сырой протеин, %	Калорийность к/кал/100 г
Черника	3,35	9,51	13,12	82,63
Красная смородина	1,46	20,3	12,35	50,54
Рябина	3,80	13,89/	7,29	54,36
Брусника	2,59	7,59/	7,98	55,23
Голубика	4,32	8,09 /	8,01	70,92
Шиповник	4,74	31,20/	9,11	77,16
Шикша	2,90	26,76/	9,08	62,42
Морошка	3,72	25,04/	12,05	81,68

ной сушилке СКВ 04.00.000 при температуре 30–35 °С с принудительным воздухообдувом и последующим измельчением на мельнице МПР-2 до порошкообразного состояния с размерами частиц 0,04–0,07 мм. Были отобраны образцы каждого вида сырья для проведения химических исследований.

Исследования нативного порошка на содержание аминокислот и витаминов проводили на современном аналитическом приборе «Капель 105М», по «Методике измерений содержания свободных форм водорастворимых витаминов в премиксах, витаминных концентратах, смесях и добавках, в том числе жидких, методом капиллярного электрофореза с использованием системы капиллярного электрофореза «Капель 105/105М», минеральный состав и наличие тяжелых металлов определяли на вольтамперметрическом приборе «ТА Лаб», сырую клетчатку и сырой протеин – на экстракторе для определения сырой клетчатки «F-6», жир – экстракторе жиров «SX-6 MP» в лаборатории НИИСХ и ЭА ФКНЦ СО РАН г. Норильск.

Результаты и обсуждение

Пищевая ценность продукции определяется количественными соотношениями таких пищевых веществ, как белок, жир, клетчатку, углеводы, которые несут в себе суммарную энергетическую ценность.

Установлено, что сырого жира больше в плодах рябины, голубики и шиповника. По содержанию сырой клетчатки доминируют плоды шиповника и красной смородины, а сырого протеина – черника, красная смородина и морошка.

Результаты общего анализа плодов и ягод представлены в табл. 1.

Уровень калорийности исследуемых образцов невысокий: 50,54–82,63 ккал/100 г. Энергетическая ценность, кДж: в чернике 340, красной смородине – 208,17, рябине – 223,90, бруснике – 227,49, голубике – 292,12, шиповнике – 317,82, шикше – 257,11, морошке – 336,44.

Результаты исследований макроэлементов позволяют установить, что отмечается преобладание калия и кальция, по содержанию которых доминируют шиповник, рябина, голубика и шикша (табл. 2).

Отмечается высокое содержание натрия в ягодах черники, красной смородины и шиповника, фосфора – шикше, рябине, голубике и морошке, магния – бруснике, рябине, голубике и морошке.

Наряду с минеральными элементами важную роль в организме играют аминокислоты, участвуя во многих процессах обмена и синтеза. В исследованных плодах и ягодах содержится 14 аминокислот, из них семь незаменимых (табл. 3).

Ценным является наличие незаменимых аминокислот, которые не синтезируются в организме и должны поступать с пищей. В образцах красной смородины, черники, шикши, морошки незаменимые аминокислоты преобладают над заменимыми в 1,2–3,5 раза. Отмечается высокое содержание лейцина, изолейцина, валина и треонина.

Следует отметить, что, по данным исследователей, лейцин оказывает положительное влияние на заживление ран, сращивание костей, повышает иммунитет и нормализует уровень глюкозы в крови, изолейцин обеспечивает мышцы энергией, способствует их росту, участвует в

Таблица 2

Содержание макроэлементов в плодово-ягодном сырье, мг/кг

Table 2

Content of macroelements in fruit and berry raw materials, mg/kg

Образец	Кальций	Калий	Натрий	Фосфор	Магний
Черника	13,52	17,24	15,68	6,24	1,68
Красная смородина	7,45	17,24	15,66	Не обн.	1,57
Рябина	16,60	48,00	4,28	10,64	3,86
Брусника	9,15	20,4	5,73	2,61	3,86
Голубика	19,26	36,48	5,75	8,73	3,43
Шиповник	31,56	50,88	8,68	2,86	1,96
Шикша	9,26	27,54	2,74	11,51	—
Морошка	8,11	17,05	4,03	7,54	3,19

Таблица 3

Содержание аминокислот в плодово-ягодном сырье, %

Table 3

Amino acid content in fruit and berry raw materials, %

Аминокислота	Черника	Кр. смородина	Рябина	Брусника	Голубика	Шиповник	Шикша	Морошка
Аргинин	1,01	0,43	0,54	1,45	2,08	0,92	0,55	0,09
Лизин	0,25	0,39	0,31	0,14	0,43	0,32	0,15	0,45
Тирозин	0,25	0,19	0,01	0,10	0,34	0,22	0,14	0,32
Фенилаланин	0,29	0,29	0,44	0,12	0,71	0,25	0,04	0,69
Гистидин	0,08	0,17	0,16	0,06	0,33	0,14	0,04	0,22
Лейцин и изолейцин	8,34	10,65	0,82	0,37	1,11	0,84	5,31	4,32
Метионин	0,23	0,23	0,72	0,25	0,71	0,33	0,14	0,23
Валин	0,53	0,50	0,39	0,15	0,52	0,26	0,28	0,65
Пролин	0,38	0,40	0,55	0,25	0,67	0,63	0,15	0,57
Треонин	0,36	0,61	0,36	0,16	0,40	0,40	0,06	0,47
Серин	0,60	0,69	0,69	0,18	0,39	0,69	0,41	0,70
Аланин	0,46	0,48	0,63	0,19	0,59	0,69	0,28	0,51
Глицин	0,85	1,01	0,74	0,36	0,85	0,67	0,40	0,98
Незаменимые	10,00	12,67	3,04	1,19	1,09	2,04	5,98	6,81
Заменимые	3,25	3,37	3,32	2,34	5,25	3,94	1,97	3,39
Суммарное содержание	13,25	16,04	6,66	3,53	6,34	5,98	7,95	10,20

выработке гемоглобина, валин является отличным энергетическим источником для клеток мышц, обладает способностью восстанавливать ткань печени, треонин обеспечивает формирование эмали зубов и увеличивает прочность костей, метионин препятствует возникновению кожных заболеваний, обеспечивает нормальное функционирование печени, фенилаланин повышает активность и работоспособность человека, улучшает память, умственные способности [17–20].

Следующая группа биологически активных веществ в исследуемых образцах представлена комплексом водорастворимых витаминов группы В, которые являются мощными антиоксидантами (табл. 4). Во всех образцах ягод регистрируется весь комплекс витаминов.

По содержанию витамина В₁ (тиамин) доминируют шиповник, голубика, рябина и черника. В остальных образцах его уровень в 10,5–56 раз ниже. Самая высокая концентрация витамина

Таблица 4

Содержание витаминов в плодово-ягодном сырье, мг/кг

Table 4

Content of vitamins in fruit and berry raw materials, mg/kg

Витамин	Черника	Красная смородина	Рябина	Брусника	Голубика	Шиповник	Шикша	Морошка
B ₁	0,19	0,17	0,22	0,02	0,23	1,01	0,07	0,41
B ₂	0,57	0,71	2,35	0,23	0,28	0,64	0,19	0,05
B ₃	6,41	0,46	1,61	0,86	1,92	2,87	3,57	0,21
B ₅	5,74	0,91	3,85	1,98	4,55	6,85	4,30	11,90
B ₆	0,23	1,95	6,94	0,10	0,14	1,53	0,41	39,06
B _c	1,05	1,20	0,33	2,63	1,92	0,42	2,27	0,81

B₂ (рибофлавин) регистрируется в плодах рябины, в других образцах его содержание в 3,0–3,6 раза ниже, по сравнению с плодами рябины. Содержание витамина B₃ (никотиновая кислота, РР) довольно высокое в чернике, шикше, шиповнике, голубике и рябине. Довольно высоко содержание витамина B₅ (пантотеновая кислота) в морошке, шиповнике, чернике, голубике и шикше. Наиболее высокое содержание витамина B₆ (пиридоксин) регистрируется в морошке, рябине, красной смородине, шиповнике и шикше. В остальных ягодах его концентрация на порядок ниже. По содержанию витамина B_c (фолиевая кислота) выделяются брусника, шикша, голубика и морошка.

Оценивая значение витаминов группы В, напомним, что В₁ необходим для пищеварения. Он имеет первостепенное значение в обмене углеводов, оказывает положительное действие на нервную систему в борьбе со стрессами, улучшает работу сердца, В₂ – участвует в энергетическом обмене белков и регуляции состояния центральной нервной системы, В₃ принимает участие в углеводном, жировом, белковом обмене, в осуществлении контроля за содержанием холестерина, нормализации работы желудочно-кишечного тракта, улучшении секреции и состава сока поджелудочной железы, а также работы печени, В₅ играет важную роль в обмене веществ, оказывает нормализующее влияние на нервную систему, на функции надпочечников и щитовидной железы, В₆ необходим для усвоения белков и жиров организмом, способствует образованию эритроцитов, В_c служит в организме в качестве коферментов, вовлеченных в биосинтез белка, необходим для продуцирования новых клеток кожи и волос [17, 21–23].

Закключение

Установлено, что по содержанию сырого жира доминируют плоды шиповника, голубики и рябины, по содержанию сырой клетчатки – плоды шиповника и красной смородины, сырого протеина – черника, красная смородина и морошка, а по калорийности – черника и морошка.

По содержанию калия доминируют шиповник и рябина, а кальция – шиповник и голубика. Высокое содержание натрия отмечается в ягодах черники, красной смородины, фосфора – в шикше и рябине, а магния – в бруснике, рябине.

Суммарное содержание аминокислот выше в красной смородине, чернике и морошке; в образцах красной смородины, черники содержание преобладание незаменимых аминокислот выше, чем заменимых, в 3,0–3,5 раза.

Анализ содержания витаминов группы В в отдельных ягодах и плодах дикоросов, произрастающих на Юго-Западном Таймыре, показал, что по содержанию витамина В₁ доминируют плоды шиповника, В₂ – ягоды рябины, В₃ – черники (6,41), В₅ и В₆ – морошки, а В_c – брусники.

Проведенные исследования подтверждают высокую биологическую ценность исследованных плодов и ягод, произрастающих на территории Юго-Западного Таймыра. По наличию аминокислот, макроэлементов, витаминов группы В они могут быть отнесены к функциональным пищевым ингредиентам для создания функциональных продуктов, которые, в соответствии с ГОСТ Р 52349-2005 и научными данными других исследователей, предназначены для систематического употребления в составе пищевых рационов всеми возрастными группами здорового населения [24–26].

Список литературы / References

1. Казанцева М.Н. Урожайность ягодных кустарничков (Ericaceae) в тундровых сообществах Тазовского района Ямало-Ненецкого автономного округа. *Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН*. 2019;1:23–29.
2. Kazantseva M.N. Productivity of berry bushes (Ericaceae) in tundra communities of the Tazovsky district of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug. *Bulletin of the North-East Science Center*. 2019;1:23–29. (In Russ.)
3. Егошина Т.Л. Биологический запас плодов клюквы в России и его динамика в 2000–2016 годах. В кн.: Мохнаткин В.Г. (ред.). *Актуальные проблемы экологии и природопользования в современных условиях: Материалы Международной научно-практической конференции, г. Киров, 05–07 декабря 2017 г. Часть 1*. Киров: Вятская государственная сельскохозяйственная академия; 2018. С. 168–171.
4. Egoshina T.L. Dynamics of cranberry fruits biological stock in Russia in 2000–2016. In: Mokhnatkin V.G. (ed.). *Current problems of ecology and nature management: Proceedings of the International Scientific-practical Conference, Kirov, December 5–7, 2017. Part 1*. Kirov: Vyatsk State Agrotechnological University; 2018, pp. 168–171. (In Russ.)
5. Егошина Т.Л., Дубинина Н.Г., Казанцева М.Н. и др. Недревесные растительные ресурсы Томской и Тюменской областей. В кн.: *Современное состояние недревесных растительных ресурсов России*. Киров: Всероссийский научно-исследовательский институт охотничьего хозяйства и звероводства им. Б.М. Житкова РАСХН; 2003. С. 75–88.
6. Egoshina T.L., Dubinina N.G., Kazantseva M.N., et al. Non-timber plant resources of the Tomsk and Tyumen regions. In: *Current state of non-timber plant resources in Russia*. Kirov: Russian Research Institute of Game Management and Fur Farming; 2003, pp. 75–88. (In Russ.)
7. Лайшев К.А., Забродин В.А., Дубовик И.К. и др. Концептуальные основы оценки природного и аграрного потенциалов Арктической зоны Российской Федерации. *Вестник Государственного аграрного университета Северного Зауралья*. 2015;30(3):64–73.
8. Layshev K.A., Zabrodin V.A., Dubovik I.K., et al. Conceptual bases of assessment of the natural and agricultural potential of the Arctic zone of the Russian Federation. *Bulletin of Northern Trans-Ural state agricultural university*. 2015;30(3):64–73. (In Russ.)
9. Казаков Л.А. *Растения – целебный источник производства отечественных функциональных продуктов питания XXI века*. М.: Демиург-Арт; 2005. 303 с.
10. Kazakov L.A. *Plants as a healing source for the production of domestic functional food products of the 21st century*. Moscow: Demiurg-Art; 2005. 303 p. (In Russ.)
11. Федоров А.А., Ефремова М.И., Чирикова Н.К. Перспективы использования растительных ресурсов Якутии. *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*. 2016;4-4:89–90.
12. Fedorov A.A., Efremova M.I., Chirikova N.K. Prospects for the use of plant resources in Yakutia. *Current problems in the humanities and natural sciences*. 2016; 4-4:89–90. (In Russ.)
13. Буракова Л.Н., Мозжерина И.В. Подбор сырья для приготовления функциональных продуктов питания с иммуномодулирующими свойствами для людей, проживающих в условиях Арктики. В кн.: *Региональный рынок потребительских товаров: перспективы развития, качество и безопасность товаров, особенности подготовки кадров в условиях развивающихся IT-технологий: Материалы VII Международной научно-практической конференции, г. Тюмень, 27 апреля 2018 года*. Тюмень: Тюменский индустриальный университет; 2018. С. 128–131.
14. Burakova L.N., Mozzherina I.V. Selection of raw materials for the preparation of functional food products with immunomodulatory properties for people living in the Arctic. In: *Regional consumer goods market: development prospects, quality and safety of goods, features of personnel training in the conditions of developing IT technologies: Proceedings of the 7th International Scientific and Practical Conference*; 2018, pp. 128–131. (In Russ.)
15. Белина С.А., Неверов В.Ю., Тригуб В.В. Разработка функционального продукта из арктического сырья. В кн.: Попов В.Г. (ред.). *Региональный рынок потребительских товаров и продовольственная безопасность в условиях Сибири и Арктики: Материалы VIII Международной научно-практической онлайн-конференции, г. Тюмень, 26 апреля 2019 г.* Тюмень: Тюменский индустриальный университет; 2019. С. 88–91.
16. Belina S.A., Neverov V.Yu., Trigub V.V. Development of a functional product from Arctic raw materials. In: Popov V.G. (ed.). *Regional consumer goods market and food security in Siberia and the Arctic: Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Online Conference, Tyumen, April, 26, 2019*. Tyumen: Tyumen Industrial University, pp. 88–91. (In Russ.)
17. Фоменко С.Е., Кушнерова Н.Ф., Спрыгин В.Г. и др. Химический состав и биологическое действие экстракта из плодов рябины. *Химия растительного сырья*. 2015;(2):161–168. <https://doi.org/10.14258/jcrpm.201502571>
18. Fomenko S.E., Kushnerova N.F., Sprygin V.G., et al. Chemical composition and biological activity of the rowanberry extract. *Chemistry of raw plant material*. 2015;(2): 161–168. (In Russ.)
19. Величко Н.А., Берикашвили З.Н. Исследования химического состава ягод голубики обыкновенной и разработка рецептур напитков на ее основе. *Вестник КрасГай*. 2016;118(7):126–128.
20. Velichko N.A., Berikashvili Z.N. The study of the chemical composition of berries of blueberry and common development of formulations of drinks on its basis. *Bulletin of KrasGau*. 2016;118(7):126–128. (In Russ.)
21. Акимов М.Ю. Роль плодов и ягод в обеспечении человека жизненно важными биологически актив-

ными веществами. *Достижения науки и техники АПК*. 2019;33(2):55–60. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10214>

Akimov M.Yu. Role of fruits and berries in providing human with vital biologically active substances. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2019;33(2):55–60. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10214>

13. Степанов К.М., Петрова Л.В., Егорова В.Р. и др. Продукты местного производства в структуре питания населения арктической зоны Якутии. *Вестник АГАТУ*. 2021;4(4):58–64.

Stepanov K.M., Petrova L.V., Egorova V.R., et al. Local products in the food structure of Arctic zone of Yakutia produced products in the nutritional structure of the population of the Arctic zone of Yakutia population. *Vestnic ASAU*. 2021;4(4):58–64. (In Russ.)

14. Андреева Н.В., Малогулова И.Ш. Виды шикши как перспективный источник БАВ в условиях Якутии. *Современные наукоемкие технологии*. 2013;9:51–52.

Andreeva N.V., Malogulova I.Sh. Types of shiksha as a promising source of biologically active substances in the conditions of Yakutia. *Modern high technologies*. 2013;9:51–52. (In Russ.)

15. Нилова Л.П., Малютенкова С.М., Кайгородцева М.С. Морошка: особенности биохимического состава, антиоксидантные свойства, использование. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии»*. 2017;5(4):19–26. <https://doi.org/10.14529/food170403>

Nilova L.P., Malyutenkova S.M., Kaygorodtseva M.S. Cloudberries: features of biochemical composition, antioxidant properties and use. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Food and Biotechnologies*. 2017;5(4):19–26. <https://doi.org/10.14529/food170403>. (In Russ.)

16. Серба Е.М., Волкова Г.С., Соколова Е.Н. и др. Плоды брусники – перспективный источник биологически активных веществ. *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2018;4(4):48–58.

Serba E.M., Volkova G.S., Sokolova E.N., et al. Lingonberry fruits are a promising source of biologically active substances. *Storage and Processing of Agricultural Raw Materials*. 2018;4(4):48–58. (In Russ.)

17. Ленинджер А.Л. Биохимия. Молекулярные основы структуры и функций клетки. М.: Мир; 1974. 957 с.

Leninger A.L. *Biochemistry. The Molecular Basis of Cell Structure and Function*. Moscow: Mir; 1974. 957 p. (In Russ.)

18. Непомнящих С.Ф., Куклина Л.Б., Гуцол Л.О. и др. Значение незаменимых аминокислот в жизнедеятельности человека (обзорный материал). В кн.: *Актуальные вопросы совершенствования методологии социальной и профилактической медицины: Материалы XV межрегиональной научно-практической конференции, г. Иркутск, 25–26 апреля, 2019 г.* Иркутск: Иркутский государственный медицинский университет Минздрава России; 2019. С. 112–119.

Nepomnyashchikh S.F., Kuklina L.B., Gutsol L.O., et al. The importance of essential amino acids in human life (review material). In: *Current issues in improving the methodology of social and preventive medicine: Proceedings of the 15th Interregional Scientific and Practical Conference, Irkutsk, April 25–26, 2019*. Irkutsk: Irkutsk State Medical University; 2019, pp. 112–119. (In Russ.)

19. Калугина Е.А., Коношина С.Н. Физиологическое значение и качественное определение аминокислот. В кн.: *Химия и жизнь: сборник XX Международной научно-практической студенческой конференции, г. Новосибирск, 13 мая 2021 г.* Новосибирск: Издательский центр НГАУ «Золотой колос»; 2021. С. 149–153.

Kalugina E.A., Konoshina S.N. Physiological significance and qualitative determination of amino acids. In: *Chemistry and Life: Proceedings of the 20th International Scientific and Practical Student Conference, Novosibirsk, May 13, 2021*. Novosibirsk: Zolotoy Kolos; 2021, pp. 149–153. (In Russ.)

20. Калугина Е.А. Физиологическое значение и качественное определение отдельных аминокислот. В кн.: Сукиасян А.А. (ред.). *Информационные технологии как основа эффективного инновационного развития: Сборник статей Международной научно-практической конференции, г. Самара, 27 августа 2023 г.* Уфа: Общество с ограниченной ответственностью «OMEGA SCIENCE»; 2023. С. 90–93.

Kalugina E.A. Physiological significance and qualitative determination of individual amino acids. In: Sukiasyan A.A. (ed.). *Information technology as the basis for effective innovative development: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Samara, August 27, 2023*. Ufa: OMEGA SCIENCE; 2023, pp. 90–93. (In Russ.)

21. Ларин Ф.С., Моисеенок А.Г., Воскобоев А.И. и др. В кн.: Островский Ю.М. (ред.). *Метаболические эффекты недостаточности функционально связанных В-витаминов*. Минск: Наука и техника; 1987. С. 7–148.

Larin F.S., Moiseenok A.G., Voskoboev A.I., et al. In: Ostrovsky Yu.M. (ed.). *Metabolic effects of deficiency of functionally related B vitamins*. Minsk: Nauka i Technika; 1987, pp. 7–148. (In Russ.)

22. Уфлянд Н.М. Биологическое значение витаминов в жизни человека. В кн.: *Природноресурсный потенциал, экология и устойчивое развитие регионов России: Сборник статей XXI Международной научно-практической конференции, г. Пенза, 23–24 января 2023 г.* Пенза: Пензенский государственный аграрный университет; 2023. С. 259–263.

Uflyand N.M. Biological significance of vitamins in human life. In: *Natural resource potential, ecology and sustainable development of Russian regions: Proceedings of the 21st International Scientific and Practical*

Conference, Penza, January 23-24, 2023. Penza: Penza State Agrarian University; 2023, pp. 259–263. (In Russ.)

23. Потолицына Н.Н., Бойко Е.Р. Обеспеченность витаминами В1, В2 организма коренных северян, ведущих полукочевой и оседлый образ жизни. *Журнал медико-биологических исследований*. 2021;9(3):295–304. <https://doi.org/10.37482/2687-1491-Z067>

Potolitsyna N.N., Boyko E.R. Provision of vitamins B1, B2 to the body of indigenous northerners leading a semi-nomadic and sedentary lifestyle. *Journal of Medical and Biological Research*. 2021;9(3):295–304. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/2687-1491-Z067>

24. ГОСТ Р 52349-2005 *Продукты пищевые. Продукты пищевые функциональные. Термины и определение*. М.: Стандартинформ; 2006. 12 с.

GOST R 52349-2005 *Food products. Functional food products. Terms and definition*. Moscow: Standartinform; 2006. P. 12. (In Russ.)

25. Забодалова Л.А. *Научные основы создания продуктов функционального назначения: Учебно-методическое пособие*. СПб.: Университет ИТМО, Институт холода и биотехнологий; 2015. 84 с.

Zabodalova L.A. *Scientific foundations for creating functional products: Educational and methodological manual*. St. Petersburg; 2015. 84 p. (In Russ.)

26. Берестова А.В. *Основы функционального питания: Учебное пособие*. Оренбург: ОГУ; 2021. 167 с.

Berestova A.V. *Basics of functional nutrition: Textbook*. Orenburg: Orenburg State University; 2021. 167 p. (In Russ.)

Об авторах

КАЙЗЕР Андрей Александрович, доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0009-0002-7547-4553>, SPIN: 1270-8788, e-mail: doctor.kaizer@mail.ru

ЛАЙШЕВ Касим Анверович, доктор ветеринарных наук, профессор, академик РАН, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-2490-6942>, SPIN: 1839-1453, e-mail: layshev@mail.ru

ЮЖАКОВ Александр Александрович, доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-0633-4074>, Scopus Author ID: 57202281387, SPIN: 5423-0492, e-mail: alyuzhakov@yandex.ru

Вклад авторов

Кайзер А.А. – разработка концепции, методология, проведение статистического анализа, проведение исследования, создание черновика рукописи

Лайшев К.А. – методология, проведение исследования, редактирование рукописи, визуализация

Южак А.А. – методология, проведение статистического анализа, проведение исследования, редактирование рукописи

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

KAISER, Andrey Aleksandrovich, Dr. Sci. (Agr.), Chief Researcher, <https://orcid.org/0009-0002-7547-4553>, SPIN: 1270-8788, e-mail: doctor.kaizer@mail.ru

LAYSHEV, Kasim Anverovich, Dr. Sci. (Vet.), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-2490-6942>, SPIN: 1839-1453, e-mail: layshev@mail.ru

YUZHAKOV, Alexander Alexandrovich, Dr. Sci. (Agr.), Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-0633-4074>, Scopus Author ID: 57202281387, SPIN: 5423-0492, e-mail: alyuzhakov@yandex.ru

Authors' contribution

Kaiser A.A. – conceptualization, methodology, formal analysis, investigation, original draft

Layshev K.A. – methodology, formal analysis, review & editing, visualization

Yuzhakov A.A. – methodology, formal analysis, investigation, supervision

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 01.04.2024

Поступила после рецензирования / Revised 27.04.2024

Принята к публикации / Accepted 15.05.2024

УДК 574.34:634.0.228:633.878.32:502.478(571.56)
<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-303-312>

Оригинальная статья

Состав, структура и динамика тополевых лесов национального парка «Ленские Столбы»

А. П. Исаев[✉], Л. П. Габышева, А. П. Ефимова

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация
[✉]llp77@yandex.ru

Аннотация

Приведены результаты исследований тополевых лесов национального парка «Ленские Столбы». Детальных работ по изучению тополевых лесов парка до настоящей работы не было, были только представлены общие характеристики и краткие описания типов леса. В статье приведена подробная таксационная характеристика древостоев, проанализирована экологическая структура флоры тополевых лесов, сделан анализ динамики развития пойменной растительности, прослежен сукцессионный ряд на участках пойм рек Буотамы, Куранах и Лабыйа национального парка. На разных возрастных стадиях тополя образуемые им леса представляют собой серийные (временные) типы, закономерно развивающиеся в направлении: топольник редкотравный, разнотравно-хвощовый, разнотравно-вейниково-хвощовый (на стадии молодняка) → топольник разнотравно-кустарниковый (средневозрастной, приспевающий лес) → топольник крупнотравно-кустарниковый с елью и лиственницей (приспевающий, спелый, перестойный лес). По мере выхода из поемного режима развитие топольников неизбежно заканчивается сменой хвойными лесами. С распадом перестойного тополевого древостоя на его месте формируются еловые и лиственнично-еловые с березой леса. Топелевые леса на территории национального парка «Ленские Столбы» характеризуются высокой производительностью, древостои развиваются по нормам III–IV классов бонитета. Лесотаксационные исследования топольников позволили оценить взаимозависимость ряда их морфометрических характеристик. Корреляционный анализ подтвердил наличие достоверных зависимостей между отдельными таксационными показателями. Материалы статьи дополняют информацию о флоре и растительности национального парка «Ленские Столбы», а также всех тополевых лесов Якутии и могут быть основой для оценки дальнейшей динамики растительности тополевых лесов парка.

Ключевые слова: тополь душистый, *Populus suaveolens*, национальный парк «Ленские Столбы», сукцессии, экогенетический ряд лесной растительности

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ по проекту «Растительный покров криолитозоны таежной Якутии: биоразнообразие, средообразующие функции, охрана и рациональное использование» (тема № 121012190038-0) и проекту «Причинно-следственные основы динамики почвенного покрова и наземных экосистем криолитозоны на территории распространения легких пород в Центральной Якутии для разработки фундаментальных основ охраны квазиравновесных криоксерогенных территорий» (тема № 0297-2021-0026; ЕГИСУ НИОКТР № АААА-А21-121012190036-6) и с применением оборудования ЦКП ФИЦ «ЯНЦ СО РАН» (грант № 13.ЦКП.21.0016).

Для цитирования: Исаев А.П., Габышева Л.П., Ефимова А.П. Состав, структура и динамика тополевых лесов национального парка «Ленские Столбы». *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(2):303–312. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-303-312>

Original article

Composition, structure and dynamics of poplar forests in the Lena Pillars National Park

Alexander P. Isaev[✉], Lyudmila P. Gabysheva, Aytalina P. Efimova

Institute for Biological Problems of Cryolithozone,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation
[✉]llp77@yandex.ru

Abstract

This article presents the findings from research conducted on poplar forests within the Lena Pillars National Park. Prior to this study, there had been no detailed research on the poplar forests in the park; only general characteristics

and brief descriptions of forest types were available. The article provides a comprehensive description of tree stands, analyzes the ecological structure of the flora in poplar forests, examines the dynamics of floodplain vegetation, and traces the succession series in the floodplains of the Buotama, Kuranakh, and Labyya rivers within the National Park. At different stages of development, the forests formed by the poplar tree stand are serial (temporary) types, naturally progressing from rare-herb association, mix herb + *Equisetum pretense* + *Calamagrostis langsdorffii* (in young poplar stands) → mix herb + shrubs (middle-aged stands, ripening stands) → tall herb + shrub associations with spruce and larch (in ripening, and overmature forests). As the floodplain emerges, the development of poplar forests inevitably transitions to being replaced by coniferous forests. When the overmature poplar tree stand collapses, spruce and larch-spruce and birch forests form in its place. Poplar forests in the Lena Pillars National Park are characterized by high productivity; forest stands develop according to Bonitat classes 3–4. Research on the taxation of poplar forests has allowed for the evaluation of the interdependence of different morphometric traits of poplar trees. The correlation has verified the existence of consistent relationships between specific tax indicators. The findings from the study will contribute to understanding the plant life and vegetation in Lena Pillars National Park and the poplar forests of Yakutia. This data can be used to evaluate how the vegetation in the park's poplar forests may change in the future.

Keywords: Poplar, *Populus suaveolens*, Lena Pillars National Park, succession, ecogenetic series of forest vegetation

Funding. This study was conducted within the state assignment of the Ministry of Higher Education and Science of the Russian Federation under the projects: “Vegetation of the permafrost zone of the taiga Yakutia: biodiversity, environment-forming functions, protection and rational use” (theme No. FWRS-2021-0023, registration No. AAAA-A21-121012190038-0), “Causal foundations of the dynamics of soil cover and terrestrial ecosystems in the permafrost zone in the territory of distribution of sandy soils in Central Yakutia” (theme No. 0297-2021-0026; registration No. AAAA-A21-121012190036-6) using the equipment provided by Core Shared Research Facilities of the Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre SB RAS” (grant No. 13.CSRF.21.0016).

For citation: Isaev A.P., Gabysheva L.P., Efimova A.P. Composition, structure and dynamics of poplar forests in the Lena Pillars National Park. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(2):303–312. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-303-312>

Введение

Национальный парк «Ленские Столбы» является первой особо охраняемой территорией этой категории в Республике Саха (Якутия). Он организован в 1995 г. как национальный парк республиканского подчинения. В 2012 г. парк включен в Список объектов всемирного наследия ЮНЕСКО. С 2019 г. в целях сохранения природных комплексов и объектов в долине р. Лена на его базе образован одноименный национальный парк федерального значения.

С 60-х годов прошлого столетия проводятся исследования на территории парка, с 80–90-х годов активно ведутся научно-исследовательские работы по изучению геологии, почвенного покрова, растительности, животного мира. Тем не менее, публикаций о лесной растительности парка недостаточно. Ранее были проведены эпизодические исследования и краткие экспедиционные маршруты, которые дали лишь общие представления о лесном покрове парка [1, 2]. При обосновании создания парка было произведено картирование лесной растительности [3]. Результаты исследований опубликованы в виде сборников научных трудов «Национальный природный парк “Ленские Столбы”: геология, почвы, растительность, животный мир, охрана и исполь-

зование» [4] и «Природный парк “Ленские Столбы”: прошлое, настоящее и будущее» [5].

Национальный парк (НП) «Ленские Столбы» занимает площадь 1217,941 тыс. га. Общая площадь лесов парка составляет 428,5 тыс. га. Лесистость весьма высока – по данным учета лесного фонда она составляет 90 %. В лесном покрове преобладает лиственница – 88 %, на сосну приходится 3,5, на ельники и березняки – 8 % [3]. Участие тополевых лесов в покрове совсем незначительно. Они выступают как своеобразный элемент интразональной растительности и в сочетании с ивняками, ельниками, лугами дополняют общую картину природы парка. Топольевые леса являются ценными кормовыми угодьями для диких животных в течение всего года [6]. На территории парка топольники, как и во всей Центральной Якутии, редки и до настоящего времени остаются слабо изученными. С целью исследования их состава, структуры и динамики нами проведены обследования тополевых лесов в национальном парке «Ленские Столбы».

Материалы и методы исследований

В 2000–2003 гг. нами обследованы топольевые леса в устье рек Буотама, Куранах, Лабыйа и Синая на территории НП «Ленские Столбы». Поле-

вые исследования проведены с использованием общепринятых лесоводственно-геоботанических методов [7, 8] с закладкой пробных площадей, с описанием растительности и картированием древостоя. Общие лесоводственно-геоботанические описания лесной растительности выполнялись на площадках 200–400 м². Для понимания пространственной дифференциации лесного покрова изучение проводилось путем закладки эколого-геоботанических профилей по поперечнику пойм. В определении растений использованы «Определитель высших растений Якутии» [9, 10], отдельные тома «Флоры Сибири» [11–13]. В камеральный период проведены обработка собранных полевых материалов, сбор данных по теме исследования в гербарных фондах ИБПК СО РАН и других научных учреждений. Номенклатура высших сосудистых растений дана по «Конспекту флоры Якутии» [14], листостебельных мхов – по монографии «Разнообразие растительного мира Якутии» [15].

Результаты и обсуждение

Территория НП «Ленские Столбы» располагается на Центрально-Якутской аккумулятивной низменной равнине с переходом на юге в невысокую пластовую равнину высотой 100–250 м. Климат резко-континентальный, засушливый, с осадками 190–220 мм в год, характеризуется большой абсолютной амплитудой колебания температур, достигающей рекордных значений 100 °С. Продолжительность вегетационного периода составляет 125 дней. Территория исследований характеризуется распространением многолетней мерзлоты. Мерзлота ограничивает процессы почвообразования, оставляя небольшой деятельный слой. Глубина оттаивания почв составляет 0,3–2,8 м и зависит от механического состава почв, напочвенного покрова, древесной растительности, от крутизны и экспозиции склонов.

Для почв характерны большая пестрота и частое чередование почвенных разностей. Наиболее распространены мерзлотные боровые супесчаные слабооподзоленные и оподзоленные почвы под сосновыми и лиственничными насаждениями сухих мест произрастания; мерзлотные таежные слабо и средне оподзоленные почвы, мерзлотные таежные слабо и средне оподзоленные почвы и мерзлотные таёжные палево-слабоосолоделые почвы.

Леса, образованные топодем душистым, в пределах среднетаежной подзоны Якутии редки и

занимают небольшие площади [16]. Несмотря на незначительное распространение, топольники выполняют важные почвозащитные, противоэрозионные и водорегулирующие функции, являются ценными ягодными угодьями и нуждаются в повсеместной охране. Они встречаются в долине Алдана и его притоков, в поймах правобережных притоков р. Лена. На левобережье последней топольники почти отсутствуют, лишь в долине р. Виллой встречаются одиночные деревья или их небольшие группы. Топольные сообщества преимущественно приурочены к низким, средним и высоким поймам рек, что объясняется рядом причин. Во-первых, это связано с особенностями семенного размножения тополя, требующего для прорастания семян и развития самосева почти полуторамесячного переувлажнения поверхности почвы [17], а во-вторых, с особенностями корневой системы — наличием мощного, глубоко проникающего в грунт главного редкостороннего корня, развивающегося лишь в условиях глубокого оттаивания мерзлоты [18].

Возникновение топольников связано с первичным заселением свежих песчано-галечных аллювиев с невысоким содержанием иловатых фракций и со сменой ивняков, чозенников в процессе экогенеза пойменной растительности в долинах горных и горно-равнинных рек Якутии [1, 16]. Тополь душистый как пионерная порода образует насаждения, которые представляют собой первые стадии экогенетического процесса. Он растет медленнее ив и чозений, при этом значительно долговечнее их, поэтому в местах совместного произрастания чозениевые и ивовые леса постепенно замещаются чистыми тополевыми.

В типологическом отношении топольники бедны. Л.Н. Тюлина [19] в среднем течении р. Учур выделяла «топольник с подлеском из свидины», на реках Мая, Юдома – топольники редкотравный, хвощово-свидиновый. У И.П. Щербакова [20] приводится характеристика «топольника с чозенией хвощевого», описанного за пределами среднетаежной подзоны (в Верхнеколымском улусе Республики Саха) и близкого по основным показателям к топольникам среднетаежной подзоны Якутии.

На территории НП «Ленские Столбы» чистые топольники встречаются на высокой пойме р. Буотама в ее среднем и нижнем течении, на устьевых расширениях небольших речек (р. Лабыйа), а также неширокой узкой полосой вдоль береговой линии р. Синяя. Характерно, что круп-

ных лесных массивов тополь не образует, он произрастает, как правило, узкими сообществами вдоль русла или в виде небольших групповых насаждений различных конфигураций у выпуклых меандр. В среднем течении р. Буотама нами был описан зрелый топольник хвощово-крупнотравно-кустарниковый, представляющий собой один из этапов формирования топольников в ходе сукцессионного развития пойменной растительности. Участки этого типа леса встречаются вдоль реки (ленточно-островное размещение) на хорошо дренируемых песчано-галечных отложениях [16].

Для характеристики особенностей структурной организации тополевых древостоев национального парка «Ленские столбы» приведем пример топольника хвощово-крупнотравно-кустарникового, произрастающего на приустьевом участке левобережья р. Лабыйа (61°02'16" с.ш., 127°21'89" в.д., табл. 1). Для рощ этого типа леса характерны чистые (9Т1Е) или с небольшой примесью ели сибирской, нередко – крупных экземпляров ив (и. росистой, и. удской, и. прутьевидной), высокосомкнутые (0,8–1,0) древостои. Пространственная структура древостоя изученного топольника свидетельствует о высокой сомкнутости крон, как в вертикальном профиле (рис. 1, а), так и в горизонтальной проекции – 0,9–1,0 (рис. 1, б). Древостой двухъярусный. Деревья верхнего яруса крупные и стройные, высо-

та в возрасте 80 (120) лет 16,7 (20) м при диаметре стволов 19,4 (40) см, кроны развитые, густые, с хорошим облиствением. Протяженность крон у деревьев верхнего яруса превышает 9 м. Тополевая часть второго яруса представлена поколением 40(60)-летних деревьев высотой 7,5 (9) м, толщиной стволов 7,4 (10) м. В составе древостоя в исследованном лесном массиве в виде примеси и в качестве немногочисленного подроста встречается ель сибирская (рис. 2). В возрасте 40–60 лет ее высота составляет 4 (10,5) м при диаметре ствола 4,8 (11) см. Роль ели в сложении древостоев возрастает лишь по достижении тополем перестойного возраста.

Характерная черта тополя в условиях Якутии – неспособность к самовосстановлению под материнским пологом, т. е. леса, образованные ею, существуют, как правило, лишь одно поколение древостоя. Семена тополя бедны эндоспермом, поэтому для выживания и успешного закрепления всходов необходимы открытые аллювиальные субстраты без живого напочвенного покрова с достаточным освещением. Под материнским пологом такие условия обычно отсутствуют, в результате возобновление тополя становится невозможным. Как исключение из правил, в некоторых случаях может иметь место своеобразное омоложение, обновление тополевых древостоев. Подобное возможно лишь на хорошо освещенных

Таблица 1

Таксационная характеристика древостоя топольника хвощово-крупнотравно-кустарникового на территории НП «Ленские столбы» (устье р. Лабыйа)

Table 1

**Taxation characteristics of the poplar trees
near the mouth of the Labyia River (Lena Pillars National Park)**

Ярусы	Сомкнутость	Число стволов на 1 га	Состав	Господствующая высота, м	Максимальная высота, м	Высота прикрепления кроны, м	Господствующий диаметр, см	Максимальный диаметр, см	Сумма площадей сечения, м ² /га	Запас древесины м ³ /га	Возраст, лет	Бонитет	Средний прирост в высоту, м	Средний прирост в толщину, см	Средний прирост по запасу, м ³ /га
Тополь душистый															
1	0,9	1250	8,5Т	16,7±0,3	20	7,6±0,5	19,4±1,2	40	40,3	272	80 (120)	III-IV	0,21	0,24	3,40
2	0,4	650	0,5Т	7,5±0,3	9	4,2±0,4	7,4±0,5	10	2,9	16	40 (80)	IV	0,19	0,19	0,40
Всего	0,9	1900	9,0Т	16,7±0,3	20	6,5±0,4	19,4	40	43,2	288	80 (120)	IV-V	0,20	0,24	3,60
Ель сибирская															
2	-	650	1,0Е	4,0±0,7	10,5	0,9±0,2	4,8±0,7	11	1,5	34	60 (100)	Va	0,07	0,08	0,57
По всем породам															
Итого	1,0	2550	9Т1Е	16,7	20	5,4±0,4	19,4	40	44,7	322	80	III-IV	0,21	0,24	4,03

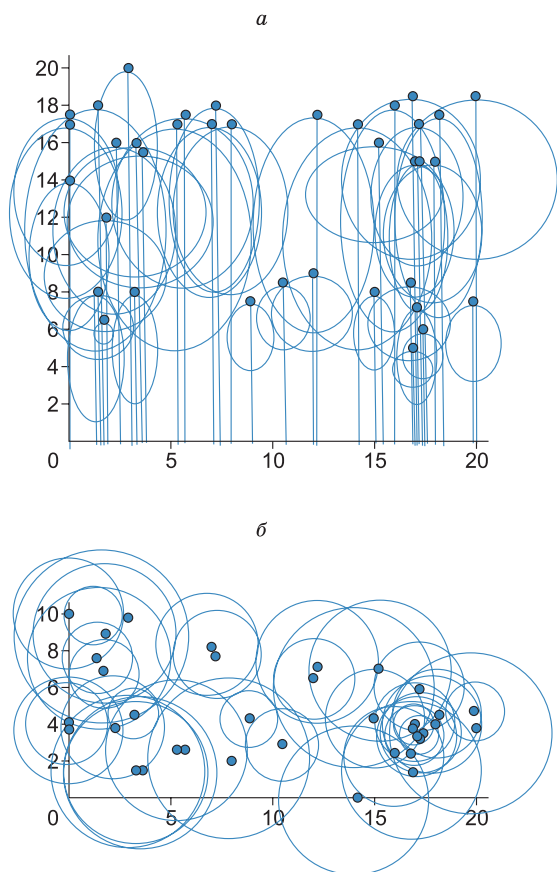


Рис. 1. Вертикальный профиль (а) и горизонтальная проекция крон (б) тополевой части древостоя хвощово-крупнотравно-кустарникового топольника (устье р. Лабыйя)

Fig. 1. Vertical profile (a) and horizontal projection of the crowns (b) of the poplar trees at the mouth of the Labyia River (Lena Pillars National Park)

местах, в полуденное время не попадающих под тень противоположного крутого берега и высоких скал. Суть явления заключается в том, что иногда во время бурных весенних паводков под зрелыми топольниками происходит частичное переотложение илистого, песчаного аллювия, что приводит к появлению нового слоя свежего субстрата. При стечении других благоприятных факторов такие случаи могут способствовать возникновению в прибрежной зоне второго поколения тополя под материнским пологом, причем они всегда имеют групповое расположение, произрастая в границах нанесенного слоя аллювия и в освещенных «окнах», прогалинах. Изредка встречающиеся двухъярусные тополевые древостои (см. рис. 1, а), очевидно, являются следствием подобных случаев. Кроме того, тополь душистый имеет свойство образовывать поросли и корневые отпрыски, соответственно, груп-

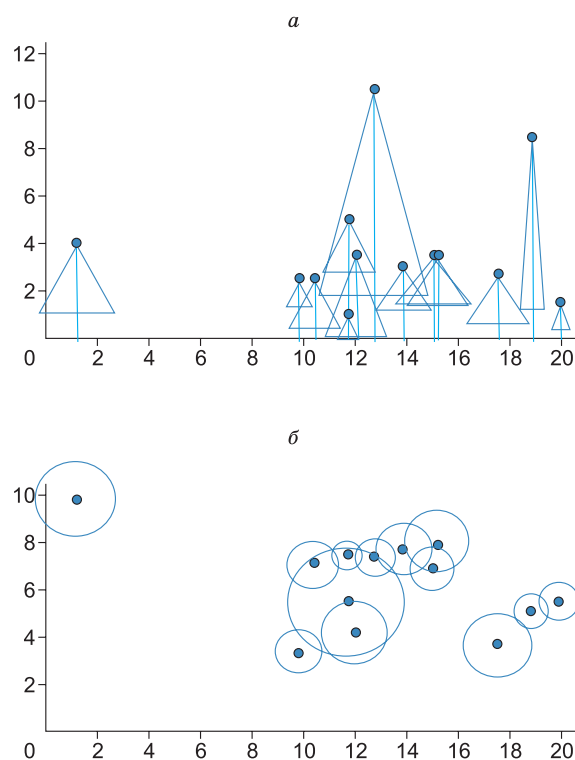


Рис. 2. Вертикальный профиль (а) и горизонтальная проекция крон (б) еловой части древостоя хвощово-крупнотравно-кустарникового топольника (устье р. Лабыйя)

Fig. 2. Vertical profile (a) and horizontal projection of the crowns (b) of the spruce trees at the mouth of the Labyia River (Lena Pillars National Park)

повое расположение также может быть обусловлено вегетативным происхождением деревьев.

Леса высокопроизводительные, древостои развиваются по нормам III–IV классов бонитета. В топольнике в устье р. Лабыйя запас древесины оценивался в 322 м³/га при сумме площадей сечения 43,2 м²/га. Средний прирост в высоту составил 21 см в год, в толщину – 0,24 см, по запасу древесины прирост тополевой части древостоя оценивался в среднем в 3,4 м³/га в год. Как показывает сравнение, на севере Якутии эти показатели ниже, на юге выше. По данным А.М. Бойченко, А.П. Исаева [21], в долине среднего течения р. Колымы запас древесины тополя достигал 160–180 м³/га, леса характеризовались III классом бонитета, высота стволов была до 20 м, диаметр – до 60 см. На устьях притоков р. Учур, по сведениям Л.Н. Тюлиной, тополь характеризовался I классом бонитета и высоким запасом

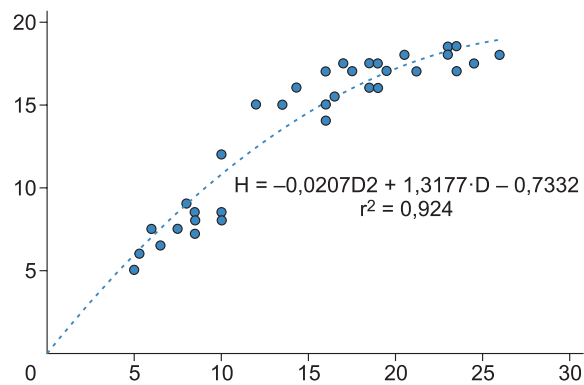


Рис. 3. Зависимость высоты ствола тополя (H, м) от толщины ствола (D, см) в хвощово-крупнотравно-кустарничковом топольнике, НП «Ленские Столбы», устье р. Лабыйя

Fig. 3. Correlation between the height of poplar tree trunks (H, measured in meters) and the diameter of the trunk (D, measured in centimeters) at the mouth of the Labyia River (Lena Pillars National Park)

древесины – 406 м³/га [19]. В поймах рек Мая и Юдома средний годичный прирост древостоя колебался от 2,2 до 3,5 м³/га [22].

Проведенные измерения морфометрических показателей древостоя позволили оценить имеющуюся взаимозависимость ряда таксационных характеристик исследованного топольника (рис. 3). Корреляционный анализ также подтвердил наличие достоверных зависимостей между отдельными таксационными показателями (табл. 2): высокая степень зависимости выявлена между высотой и диаметром ствола ($r = 0,88$), высотой и суммой площадей сечения ($r = 0,72$), суммой площадей сечения и запасом древесины ($r = 0,97$). Коэффициент корреляции остальных пар показателей ниже ($r = 0,51–0,59$).

Небольшие размеры образуемых тополем лесных массивов обуславливают экотонный характер сообществ, что предопределяет проникновение под полог леса различных экологических групп растений. Основу флористического состава растительного покрова зрелых топольников, как правило, составляют типичные луговые виды растений (рис. 4, а). Часто доминирует хвощ луговой, к которому обычно ближе к опушкам примешивается хвощ полевой. В травостое обильно и равномерно произрастают луговые злаки (вейник Лангсдорфа, арктополевица тростниковидная, костер сибирский). Экотонный характер лесного сообщества подчеркивается обилием видов лугового крупнотравья (какалия копьевидная, живокость высокая, аконит Кузнецова, вероника длиннолистная, крестовник дубравный, латук сибирский, крапива узколистная, тысячелистник обыкновенный, кровохлебка аптечная, василистники простой и малый, лилия пенсильванская и др.). Большинство растений светолюбивы, но и доля сциофитов значительна, что указывает на мозаичное освещение при высокой сомкнутости древостоя и подлеска (рис. 4, б). В составе флоры господствует мезофильно-гигрофильная группа видов (рис. 4, в). Роль ксерофитов незначительна, но они все же присутствуют, что указывает на некоторую нестабильность увлажнения – в середине вегетационного периода на приподнятых участках микрорельефа часто происходит иссушение верхних слоев почвы. Мхи не образуют выраженного покрова, редко встречаются *Rhytidiadelphus triquetrus*, *Sanionia uncinata*, *Climacium dendroides*, виды родов *Splachnum* и др. Лишайники, как правило, представлены лишь эпифитными видами.

Таблица 2

Корреляционная связь (r) между таксационными показателями тополевой части древостоя хвощово-крупнотравно-кустарничкового топольника. НП «Ленские столбы», устье р. Лабыйя

Table 2

Correlation (r) between taxation characteristics of the poplar trees at the mouth of the Labyia River (Lena Pillars National Park)

Таксационный показатель	H	Hкр	D	ΣSсеч	V
Высота ствола (H)		0,59	0,88	0,72	0,59
Высота прикрепления кроны (Hкр)	0,59		0,57	0,53	0,51
Диаметр ствола (D)	0,88	0,57		–	0,51
Сумма площадей сечения (ΣSсеч)	0,72	0,53	–		0,97
Запас древесины (V)	0,59	0,51	0,51	0,97	

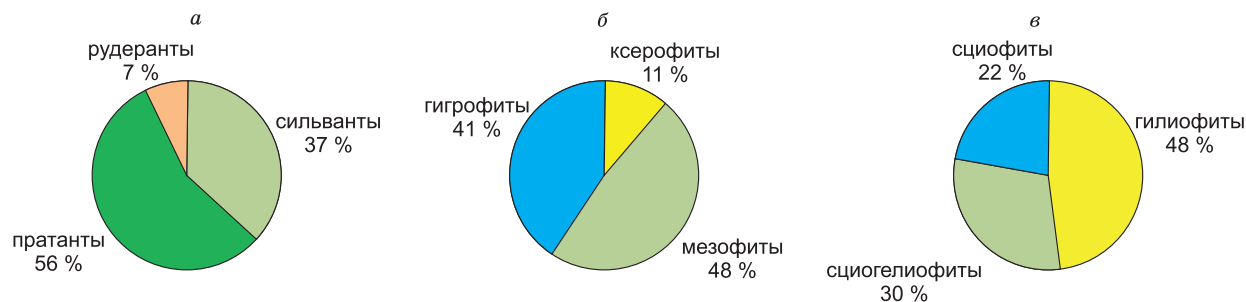


Рис. 4. Экологическая структура (%) флоры топольника: а – состав ценоморфа; б – состав гелиоморфа; в – ксероморфный состав

Fig. 4. Composition of ecological groups of the flora found in the poplar forest within the Lena Pillars National Park: а – composition of plants by coenotic groups; б – composition of plants based on phototropism; в – composition of plants based on ecotop moisture levels

В поймах рек Буотама, Куранах и Лабыйа нами прослежен сукцессионный ряд лесной растительности, где доминирующую роль играет тополь. Семеношение у него происходит ежегодно в начале лета. Лет семян, как правило, совпадает со временем схода полых вод. Сеянцы появляются на свежих илисто-песчано-галечных отложениях низких пойм наряду со всходами ив росистой (*Salix rorida*), прутьевидной (*S. viminalis*), удской и ольхи волосистой (*Alnus hirsuta*). В первые годы травяной покров практически отсутствует, наблюдаются лишь единичные гигрофильные растения. Эта редкотравная стадия сукцессии короткая, протекает лишь несколько лет. Затем начинается активный сингенез корневищного лугового разнотравья, злаков и постепенное накопление мертвого покрова, главным образом, из опада тополя, ольхи и ив. По достижении смешанным молодняком высоты 3–4 м травяной покров еще мозаичен, проективное покрытие – от 5 до 35 %. В нем чаще господствуют *Equisetum arvense*, *Calamagrostis langsdorffii*, встречается с небольшим обилием и высоким постоянством мезофильное луговое разнотравье: *Vicia cracca*, *Artemisia tanacetifolia*, *A. dracunculus*, *A. vulgaris*, *Astragalus* sp., *Valeriana alternifolia*, *V. capitata*, *Astra sibirica*, *Anemone sylvestris*, *Viola biflora*, *Moerhingia lateriflora*, *Castilleja rubra*, *Gallium boreale*, *G. dauricum*, *Lathyrus humilis*, *Campanula glomerata*, *Sanguisorba officinalis*, *Ranunculus* sp., *Veronica longifolia*. Из злаков, кроме вейника, характерны *Bromopsis sibirica*, *Poa pratensis*. В это время уже появляются первые всходы кустарников и хвойных (*Larix cajanderi*, *Picea obovata*, *Pinus sylvestris*), а также лиственных (*Betula pendula*, *Padus avium*) деревьев. Быстрый рост, высокое светолюбие, мощное развитие крон и корневых

систем обеспечивают тополию главенство в лесном фитоценозе, поэтому на первых стадиях сукцессий подрост хвойных пород все же единичен, появляющиеся в первые годы сеянцы большей частью погибают. Подобная обстановка складывается на стадии разнотравно-хвощового, разнотравно-вейниково-хвощового топольника.

С течением сукцессионного времени постепенно формируется 2-ярусный подлесок, в котором верхний ярус сложен *Salix rorida*, *S. viminalis*, *S. dasyclados*, *S. pyrolifolia*, *Swida alba*, *Crataegus dahurica*, нижний ярус образуют *Rosa acicularis*, *Spiraea media*, *Rubus matsumuranus*, *Sorbaria sorbifolia*, *Ribes triste*, *S. rhamnifolia*. С появлением кустарников и с развитием подрост хвойных в напочвенном покрове появляется типичный вид из свиты хвойных лесов *Linnaea borealis*. Моховой покров постепенно развивается, в нем характерны пятнистость, неравномерность, проективное покрытие в среднем 5–10 %, иногда достигает 40 %. Чаще доминируют *Sanionia uncinata*, *Pleurosimium shreberii*. Этот период можно охарактеризовать как разнотравно-кустарниковая стадия топольника. К этому времени тополевыи древостой достигает среднего возраста, и, как правило, под ним массово появляется благонадежный подрост ели, лиственницы.

Дальнейшее развитие тополевых лесов приводит к господству в травяном покрове крупнотравных видов, что являет собой последнюю стадию тополевых сукцессий – крупнотравно-кустарниковую. Разнотравье так же сохраняет свою позицию, но роль крупнотравья становится выше, что свидетельствует об относительном увеличении плодородия почв за счет многолетнего накопления опада, стабилизации режима увлажнения из-за выхода из сферы ежегодного за-

ливания полыми водами. Кустарники получают еще большее развитие, сомкнутость полога повышается, и в этой ситуации в нижних ярусах травяного покрова выживают лишь относительно теневыносливые виды. В это время молодняк хвойных пород уже выходит в древостой и начинает играть заметную роль. Со временем ель и лиственница, разрастаясь, расширяя свое влияние, в том числе повышая напряженность корневой конкуренции, заглушают тополь, и к моменту перестойности тополевого древостоя начинается распадаться. Лиственница как более светолюбивый вид в этих сообществах находится в сравнительно угнетенном состоянии, кроны узкие, несимметричные и чаще приурочены к «окнам», прогалинам. С течением времени на месте топольников формируются еловые и смешанные лиственнично-еловые с березой леса. Ель сибирская как кальцефил здесь находится в оптимальных условиях для своего роста и развития – почвы здесь часто имеют щелочную реакцию, так как с находящихся вблизи известковых пород активно смыываются карбонаты.

Таким образом, на разных возрастных стадиях тополя душистого образуются им леса представляют собой серийные типы, закономерно развивающиеся в направлении: топольник редкотравный, разнотравно-хвощовый, разнотравно-вейниково-хвощовый (на стадии молодняк) → топольник разнотравно-кустарниковый (средневозрастный, приспевающий лес) → топольник крупнотравно-кустарниковый с елью и лиственницей (приспевающий, спелый, перестойный лес).

Заключение

Леса из тополя душистого (*Populus suaveolens*) являются одними из пионерных формаций на галечных, песчано-галечных аллювиях горных, горно-равнинных рек и играют важную роль в экогенетической динамике долинных лесов. На территории НП «Ленские Столбы» в поймах рек Буотама, Куранах и Лабыя прослежен сукцессионный ряд лесной растительности, где доминирующую роль играет тополь. На разных возрастных стадиях тополя образуются им леса представляют собой серийные типы, закономерно развивающиеся в направлении: топольник редкотравный, разнотравно-хвощовый, разнотравно-вейниково-хвощовый (на стадии молодняк) → топольник разнотравно-кустарниковый (средневозрастный, приспевающий лес) → топольник крупнотравно-кустарниковый с елью и

лиственницей (приспевающий, спелый, перестойный лес). По мере выхода из поемного режима развитие топольников неизбежно заканчивается смешанной хвойными лесами – с распадом перестойного тополевого древостоя на его месте полноценное развитие получают еловые и лиственнично-еловые с березой леса. Топелевые леса на территории НП «Ленские Столбы» характеризуются высокой производительностью, древостой развиваются по нормам III–IV классов бонитета. Морфометрические исследования древостоя позволили оценить взаимозависимость ряда таксационных характеристик топольников. Корреляционный анализ подтвердил наличие достоверных зависимостей между отдельными таксационными показателями.

Список литературы / References

1. Тимофеев П.А. Лесная растительность НПП «Ленские Столбы». В кн.: Соломонов Н.Г. (ред.). *Национальный природный парк «Ленские Столбы»: геология, почвы, растительность, животный мир, охрана и использование: Сб. науч. трудов.* Якутск: Издательство Якутского ун-та; 2001. С. 120–130.

Timofeev P.A. Forest vegetation in the National Nature Park “Lena Pillars”. In: Solomonov N.G. (ed.). *National Nature Park “Lena Pillars”: Geology, soils, vegetation, fauna, protection and use: Collection of scientific papers.* Yakutsk: Yakut University Publishing House; 2001, pp. 120–130. (In Russ.)

2. Ефремов А.А., Чикидов И.И. Изучение сосновых молодняков в устье р. Буотама. В кн.: Соломонов Н.Г. (ред.). *Природный парк «Ленские Столбы»: прошлое, настоящее и будущее.* Якутск: Ин-т биологических проблем криолитозоны СО РАН, Мин-во охраны природы РС(Я); 2007: 177–182.

Efremov A.A., Chikidov I.I. Study of young pine trees at the mouth of the River Buotama. In: Solomonov N.G. (ed.) *Nature Park “Lena Pillars”: Past, present and future: Collection of scientific papers.* Institute of Biological problems of Cryolithozone SB RAS, Ministry of Nature Protection of the Republic of Sakha (Yakutia); 2007, pp. 177–182. (In Russ.)

3. Исаев А.П., Михалева Л.Г., Константинова Л.Д. и др. Карта лесов НПП «Ленские Столбы». В кн.: *Национальный природный парк «Ленские Столбы»: геология, почвы, растительность, животный мир, охрана и использование: Сб. науч. трудов.* Якутск: Издательство Якутского ун-та; 2001. С. 130–136.

Isayev A.P., Mikhaleva L.G., Konstantinova L.D., et al. Map of forests in the National Nature Park “Lena Pillars”. In: Solomonov N.G. (ed.). *National Nature Park “Lena Pillars”: Geology, soils, vegetation, fauna, protection and use: Collection of scientific papers.* Yakutsk: Yakut University Publishing House; 2001, pp. 130–136. (In Russ.)

4. *Национальный природный парк «Ленские Столбы»: геология, почвы, растительность, животный*

мир, охрана и использование: Сб. науч. трудов. Якутск: Издательство Якутского ун-та; 2001. 267 с.

National Nature Park "Lena Pillars": *Geology, soils, vegetation, fauna, protection and use: Collection of scientific papers*. Yakutsk: Yakut University Publishing House; 2001. 267 p. (In Russ.)

5. Природный парк «Ленские Столбы»: прошлое, настоящее и будущее: Сб. науч. трудов. Якутск: Ин-т биологических проблем криолитозоны СО РАН, Мин-во охраны природы РС(Я); 2007. 296 с.

Nature Park "Lena Pillars": *Past, present and future: Collection of scientific papers*. Yakutsk: Institute of Biological problems of Cryolithozone SB RAS, Ministry of Nature Protection of the Republic of Sakha (Yakutia); 2007. 296 p. (In Russ.)

6. Тимофеев П.А. *Леса Якутии: состав, ресурсы, использование и охрана*. Новосибирск: Изд-во СО РАН; 2003. 194 с.

Timofeev P.A. *Forests in Yakutia: composition, resources, use and protection*. Novosibirsk: SB RAS Publishing House; 2003. 194 p. (In Russ.)

7. Сукачев В.Н., Зонн С.В. *Методические указания к изучению типов леса*. М.: Изд-во АН СССР; 1961. 143 с.

Sukachev V.N., Zonn S.V. *Guidelines for studying forest types*. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1961. 143 p. (In Russ.)

8. Понятовская В.М. Учет обилия и особенности размещения видов в естественных растительных сообществах. В кн.: *Полевая геоботаника*. М., Л.: Изд-во АН СССР; 1964. С. 209–299.

Ponyatovskaya V.M. Studying the prevalence and spread of species in natural plant communities. In: *Field geobotany*. Moscow, Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1964, pp. 209–299. (In Russ.)

9. Андреев В.Н., Галактионова Т.Ф., Горовой П.Г. и др. *Определитель высших растений Якутии*. Новосибирск: Наука; 1974. 544 с.

Andreyev V.N., Galaktionova T.F., Gorovoy P.G., et al. *Key to the higher plants in Yakutia*. Novosibirsk: Nauka; 1974. 544 p. (In Russ.)

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

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

11. Красноборов И.М., Ломоносова М.Н., Тупицына Н.Н. и др. *Флора Сибири. Т. 13: Asteraceae (Compositae)*. В 14 т. Новосибирск: Наука. Сиб. предприятие РАН; 1997. 472 с.

Krasnoborov I.M., Lomonosova M.N., Tupitsyna N.N., et al. *Flora Sibiriae. Tomus 13: Asteraceae (Compositae)*. In 14 toms. Novosibirsk: Nauka. Siberian Enterprise RAS; 1997. 472 p. (In Russ.)

12. Тимохина С.А., Фризен Н.В., Власова Н.В. и др. *Флора Сибири. Т. 6: Portulacaceae – Ranunculaceae*. В 14 т. Новосибирск: ВО «Наука»; 1993. 310 с.

Timokhina S.A., Frizen N.V., Vlasova N.V., et al. *Flora Sibiriae. Tomus 6: Portulacaceae-Ranunculaceae*. In 14 toms. Novosibirsk: Nauka; 1993. 310 p. (In Russ.)

13. Положий А.В., Курбатский В.И., Выдрин С.Н. и др. *Флора Сибири. Т. 9: Fabaceae (Leguminosae)*. В 14 т. Новосибирск: ВО «Наука»; 1994. 280 с.

Polozhii A.V., Kurbatskii V.I., Vydrina, et al. *Flora Sibiriae. T. 9: Fabaceae (Leguminosae)*. In 14 toms. Novosibirsk: Nauka; 1994. 280 p. (In Russ.)

14. Кузнецова Л.В., Захарова В.И. *Конспект флоры Якутии: сосудистые растения*. Новосибирск: Наука; 2012. 265 с.

Kuznetsova L.V., Zakharova V.I. *Overview of the flora in Yakutia: vascular plants*. Novosibirsk: Nauka; 2012. 272 p. (In Russ.)

15. Захарова В.И., Кузнецова Л.В., Иванова Е.И. *Разнообразие растительного мира Якутии*. Новосибирск: Изд-во СО РАН; 2005. 326 с.

Zakharova V.I., Kuznetsova L.V., Ivanova E.I. *Variety of flora in Yakutia*. Novosibirsk: SB RAS Publishing House; 2005. 328 p. (In Russ.)

16. Тимофеев П.А., Исаев А.П., Щербаков И.П. и др. *Леса среднетаежной подзоны Якутии*. Якутск: ЯНЦ СО РАН; 1994. 140 с.

Timofeyev P.A., Isayev A.P., Shcherbakov I.P., et al. *Forests in the central taiga region of Yakutia*. Yakutsk: FRC YaSC SB RAS; 1994. 140 p. (In Russ.)

17. Зархина Е.С. *Тополевые леса. Леса Дальнего Востока*. М.: Лесная промышленность; 1969. 392 с.

Zarkhina E.S. *Poplar forests. Forests in the Far East*. Moscow: Lesnaya Promyshlennost' Publ.; 1969. 392 p. (In Russ.)

18. Стариков Г.Ф. *Леса Магаданской области*. Магадан: Кн. изд-во; 1958. 223 с.

Starikov G.F. *Forests in the Magadan region*. Magadan: Knizhnoe izdatel'stvo Publ.; 1958. 223 p. (In Russ.)

19. Тюлина Л.Н. *Лесная растительность средней и нижней части бассейна Учкура*. М.; Л.: Изд-во АН СССР; 1962. 150 с.

Tyulina L.N. *The forest flora in the central and lower regions of the Uchura basin*. Moscow, Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1962. 149 p. (In Russ.)

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

Shcherbakov I.P. *Forest cover in the northeastern region of the USSR*. Novosibirsk: Nauka; 1975. 344 c. (In Russ.)

21. Бойченко А.М., Исаев А.П. *Леса долины реки Колымы в среднем течении*. В кн.: *Проблемы экологии Якутии. Вып. 1. Биогеографические исследования*: Сб. науч. тр. Якутск: Изд-во Якутского госуниверситета; 1996. С. 95–101.

Boychenko A.M., Isaev A.P. *Forests in the middle reaches of the Kolyma River valley*. In: *The ecological issues of Yakutia. Issue 1. Biogeographical research*:

Collection of scientific papers. Yakutsk: Yakut State University Publishing House; 1996, pp. 95–101. (In Russ.)

22. Тюлина Л.Н. *Лесная растительность среднего и нижнего течения р. Юдомы и низовьев р. Май.* М.: Изд-во АН СССР; 1959. 222 с.

Tyulina L.N. *Forest vegetation along the middle and lower sections of the Yudoma River and the lower parts of the Mai River.* Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1959. 222 p. (In Russ.).

Об авторах

ИСАЕВ Александр Петрович, доктор биологических наук, ведущий 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

ЕФИМОВА Айталипа Павловна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-3684-3432>, Scopus Author ID: 57209230022, SPIN: 7078-3894, e-mail: aytaef@yandex.ru

Вклад авторов

Исаев А.П. – разработка концепции, методологии исследования, получение финансирования, проведение исследования, редактирование рукописи

Габышева Л.П. – разработка методологии, проведение исследования, создание черновика рукописи

Ефимова А.П. – проведение исследования, визуализация, создание черновика рукописи

Конфликт интересов

Один из авторов – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник Исаев А.П. является членом редакционной коллегии журнала «Природные ресурсы Арктики и Субарктики». Авторам неизвестно о каком-либо другом потенциальном конфликте интересов, связанном с этой статьей.

About the authors

ISAEV, Alexander Petrovich, Dr. Sc. (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

EFIMOVA, Aytalina Pavlovna, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-3684-3432>, ResearcherID: Scopus Author ID: 57209230022, SPIN: 7078-3894, e-mail: aytaef@yandex.ru

Authors' contribution

Isaev A.P. – conceptualization, methodology, funding acquisition, investigation, review & editing

Gabysheva L.P. – methodology, investigation, original draft

Efimova A.P. – investigation, visualization, original draft

Conflict of interest

One of the authors, Isaev A.P., Dr. Sci. (Biol.), Leading 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 10.04.2024

Поступила после рецензирования / Revised 15.05.2024

Принята к публикации / Accepted 28.05.2024

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 67.03; 519.6; 539.42:56; 663.672

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-313-325>

Оригинальная статья

Моделирование разрушения композиционного материала на основе ледовой матрицы

В. В. Лепов , И. И. Дьячковский

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН,
г. Якутск, Российская Федерация
 wisecold@mail.ru

Аннотация

Приводятся результаты работ, выполненных в рамках системно-структурного подхода с целью моделирования элементов конструкций из конструкционных материалов на основе ледовой матрицы, модифицированной высокопрочным базальтовым волокном. Теоретическое и численное моделирование процесса разрушения композиционного материала на основе ледовой матрицы, полученного намораживанием пресной воды с добавлением базальтовой фибры, производилось на основе экспериментальных данных, полученных при разрушении образцов чистого льда и композита на основе ледовой матрицы с различным содержанием наполнителя. Выполнен расчет эффективного модуля упругости получаемых композитов в зависимости от количества армирующего базальтового волокна. На основе серии тестовых расчетов образца композиционного материала на конечно-элементном комплексе ANSYS выявлено несоответствие расчетной прочности данным эксперимента, в связи с чем сделан перерасчет эффективного модуля упругости композита и введены поправки в модели Фойгта и Рейсса, учитывающие неравномерность распределения волокон и неидеальную адгезию с ледовой матрицей. Также по данным о диаметре и длине базальтовых волокон и их случайном распределении в упрочненном слое замороженного материала выполнен расчет по стохастической модели роста трещин на микроуровне. Получено удовлетворительное согласие скорости роста трещины с полученным КЭ-расчетом при использовании полученных эффективных модулей упругости и алгоритма SmartCrackGrowth. Уточненный метод определения эффективных модулей упругости и многоуровневая структурная модель расчета композиционного материала на основе ледовой матрицы рекомендуются для оценки прочности ледового покрова и сооружения зимних дорог с высокой несущей способностью и увеличенным периодом использования в условиях Арктики и Субарктики.

Ключевые слова: композиционный материал на основе ледовой матрицы, базальтовая фибра, модуль упругости, прочность на изгиб, разрушение, трещина, многомасштабное КЭ-стохастическое моделирование

Финансирование. Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук (проект № FWRS-2024-0035) в части теоретических расчетов и при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-52-53036) в части численного моделирования с использованием оборудования ЦКП ФИЦ «ЯНЦ СО РАН».

Благодарности. Авторы благодарны сотрудникам Отдела 30 ИФТПС СО РАН, в частности к.ф.-м.н., в.н.с. Сыромятниковой А.С. за предоставленные данные по разрушению образцов из льда и композитов на основе ледовой матрицы в условиях Центральной Якутии.

Для цитирования: Лепов В.В., Дьячковский И.И. Моделирование разрушения композиционного материала на основе ледовой матрицы. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(2):313–325. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-313-325>

Modeling of ice-matrix composite fracture

Valeriy V. Lepov✉, Ivan I. Dyachkovsky

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

✉wisecold@mail.ru

Abstract

This article discusses the results of a study that used the structural approach to conduct multiscale modeling of composite materials. These materials are composed of an ice matrix that has been enhanced with high-strength basalt fibers. The research involved numerical modeling to analyze the fracture process of composite materials made by freezing fresh water with added basalt fibers. The analysis included experimental data from samples of pure ice and composites with different amounts of filler. The effective modulus of elasticity of the composites was determined by considering the quantity of basalt fiber reinforcement. The discrepancy between the strength obtained by finite element complex ANSYS numerical calculation and the experimental data was revealed by a series of macroscopic test calculations of the composite material sample, according to which the effective modulus of elasticity of the composite was recalculated and corrections were introduced into the Voight and Reuss models, taking into account the non-uniform distribution of the fibers and the non-ideal adhesion between the fibers and water ice. A stochastic model of crack growth at the micro level was also used with the data on the diameter and length of basalt fibers and their random distribution in the layers of the composite material. Using the newly acquired effective elastic moduli and the SmartCrackGrowth algorithm, a satisfactory agreement of the crack growth rate with the obtained by stochastic calculation was achieved. The refined method of effective elastic moduli and multilevel model of stress-strain state calculation of composite materials are recommended for assessing the strength of ice cover and designing winter roads with high load-bearing capacity and long operational duration in the Arctic and Subarctic environments.

Keywords: ice-matrix composite, basalt fiber, elasticity, bending strength, fracture, crack, multiscale FE-stochastic modeling

Funding. This study was supported by the Program of Basic Fundamental Scientific Research of the State Academies of Sciences (No. FWRS-2024-0035) for theoretical calculations, and the Russian Science Foundation (No. 21-52-53036) for numerical modeling with the use of the equipment provided by Core Shared Research Facilities of the Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre SB RAS”.

Acknowledgements. The authors are grateful to their colleagues, especially Aitalina S. Syromyatnikova, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher, IPTPN SB RAS for providing experimental data on ice sample and ice matrix-based composite destruction in Central Yakutia.

For citation: Lepov V.V., Dyachkovsky I.I. Modeling of ice-matrix composite fracture. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(2):313–325. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-313-325>

Введение

Ключевой возможностью для освоения северных территорий, особенно арктической зоны, является длительный период ледостава, который позволяет эксплуатировать зимние дороги (зимники), обеспечивая: значительную часть зимнего завоза в северные и арктические районы Якутии, благодаря беспрепятственной транспортировке необходимых ресурсов, включая топливо и продукты, через многочисленные реки и озера, болотистую местность. Зачастую зимники являются единственным средством сообщения с удаленными населенными пунктами. Поэтому увеличение их пропускной и несущей способности (грузоподъемности), а также периода использо-

вания является актуальной хозяйственной и научно-технической задачей.

В лесных местностях известной технологией упрочнения зимников является их армирование досками и стволами деревьев, однако в случае безлесных арктических территорий наиболее эффективными признаны технологии армирования геосетками и георешетками одновременно с модификацией структуры ледовой матрицы [1]. Эти исследования основаны на многолетнем опыте исследований в условиях арктического региона с умеренно холодным климатом (Архангельская область) [2–4], однако работы по исследованию прочности композиционных материалов на основе ледовой матрицы в экстремальных клима-

тических условиях Республики Саха (Якутия) только начинаются [5, 6]. Их отличают большие размеры образцов для испытаний и использование естественного холода, что снижает стоимость эксперимента и приближает его к натурным испытаниям конструкций.

Материалы и оборудование

В работах, проведенных в ИФТПС СО РАН, массивные блоки из ледового материала изготавливались при послойном намораживании пресной воды в опалубке из пенополистирола с размерами полости: высота $h = 100$ мм, ширина $b = 500$ мм, длина $L = 870$ мм, при естественно низкой среднесуточной температуре -36 °C [5] и -50 °C [6]. При этом подготавливались и испытывались три вида образцов: из чистого льда (I); армированные на половину высоты (II) и полностью армированные (III) [6]. Наполнитель представлял собой волокна длиной 40 мм и диаметром 18 мкм из базальтового ровинга РБ(Т) 18-2400-041М.

Разрушающая нагрузка $P_{\text{разр}}$ определялась как средняя по результатам трех испытаний, а предел прочности на изгиб при растяжении рассчитывался по формуле $\sigma_{\text{изг}} = \frac{3P_{\text{разр}}l}{2bh^2}$, где l – расстояние между опорами. Важным вопросом для дальнейшего моделирования оставался расчет модуля упругости льда и композиционного материала на основе ледовой матрицы.

В работах по моделированию разрушения гетерогенных композитов на основе ледовой матрицы можно выделить исследования в области многоуровневого моделирования процессов спекания и застывания льда при изменении его фазового состояния, накопления повреждений и формирования пористости и работы, связанные со стохастическим моделированием процессов возникновения и роста микротрещин до достижения магистральной трещиной критической длины.

Морской лед рассматривался в работах Р.В. Гольдштейна с соавторами как бездефектное твердое тело, для которого справедливы соотношения механики сплошных сред и механики разрушения [7–9]. В другой задаче рассматривалось скопление разрушенного морского льда перед ледоколом в постановке, где предполагалась плоская трещина сжатия с замкнутым контуром и выносом продуктов разрушения из зоны расчета, при этом в результате решения кинетического уравнения получены аналитические соотно-

шения для скорости трещины и коэффициента интенсивности напряжений (КИН) [10]. Выявлено, что в режиме с непрерывным истечением продуктов разрушения из области высокого давления происходит неустойчивое развитие очагов разрушения в виде трещин сжатия, при этом управляющим становится процесс истечения, поддерживающий давление в центральной части контакта за счет сопротивления выносу. Данный режим наблюдается при взаимодействии ледового массива с индентором при высокой скорости относительного движения ледокола. Малые скорости характеризуются пульсирующим режимом контактных нагрузок и чередованием фаз устойчивого подрастания давления при накоплении продуктов разрушения в замкнутом объеме и неустойчивого движения очагов разрушения при истечении продуктов разрушения из области контакта.

Следует учитывать, что в случае стационарного воздействия нагрузок на ледовый массив при таком подходе модели деформации и разрушения льда не будут отличаться от моделей твердого тела, в то же время следует заметить, что поведение ледовой матрицы с включениями сильно отличается от поведения сплошных тел, а также подвержено влиянию фазового перехода в области температур, близких к нулю по шкале Цельсия.

Ряд исследователей уже обращали внимание на различия механического поведения армированных ледяных композиционных материалов [11, 12], однако немаловажным оказался и учет изменяющейся внутренней структуры в таких моделях, зачастую имеющей иерархическое строение [13–15]. Поэтому имеются существенные трудности в применении традиционных моделей и подходов теории сплошных сред, деформируемого твердого тела и механики разрушения для композиционных материалов со сложной и изменяющейся в зависимости от условий окружающей среды структурой. В этом случае перспективными становятся многоуровневые подходы, включая конечно-элементные и стохастические модели процессов разрушения [16–19].

Как известно, произвести учет внутренней изменяющейся структуры материала, имеющей стохастический характер, весьма сложно, однако дать адекватную оценку возможно с помощью мартингалов в теории случайных процессов, при этом наилучшим (среднеквадратичным) предсказанием поведения процесса является его текущее состояние. Такой подход [20] применяет-

ся в термодинамике из предположения о марковости происходящих процессов, что применимо и в случае процесса разрушения ледовой матрицы. Исходные данные для стохастического моделирования – механические свойства и данные о микроструктуре – получены на основе испытаний чистого льда и композита с ледовой матрицей, модифицированной базальтовой фиброй при различной ее концентрации [21].

Предполагается, что при температурах от $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже при статическом кратковременном нагружении лед ведет себя как твердое упругое тело, подчиняющееся закону Гука, а пластическая деформация при этом не успевает развиваться. Чистый речной лед имеет статический модуль упругости, или модуль деформации, который всегда меньше динамического, и зависит от температуры [20]:

$E_{\text{ст}}(T) = (90,5 + 0,21 \cdot T - 0,0017 \cdot T^2) \cdot 10^3 \text{ МПа}$, (1)
где T – абсолютная температура воздуха. Экспериментально модуль упругости материала при

изгибе можно определить как $E_{\text{изг}} = \frac{l^3 m}{4bh^3}$, где m , Н/мм, – наклон начального прямолинейного участка кривой нагружения. Он будет различаться для льда с различным содержанием фибры. Коэффициент интенсивности напряжений K_{IC} определялся приблизительно по эмпирической формуле для образца на трехточечный изгиб с трещиной согласно ISO 12135: «Металлические материалы. Единый метод определения квазистатической вязкости разрушения. Испытание на трехточечный изгиб», ASTM D5045-14 и E1290-08 для разрушающей нагрузки. Сложность связана с тем, что эти формулы рассчитаны на металлические или полимерные пластические материалы.

Оценка эффективного модуля упругости композиционного материала

Эффективные модули упругости (сдвига G и объемный K) композитного материала при отсутствии диаграммы нагружения могут быть найдены из модулей компонентов [21]. Известные подходы Фойгта и Рейсса [22] определяют границы эффективных значений модуля упругости композита на основе простого соотношения компонентов, без рассмотрения особенностей микроструктуры. В подходе Фойгта деформация в материале предполагается однородной, и верхняя граница модуля упругости по правилу смешения фаз

$$m' = \sum C_i m_i, \quad (2)$$

где C_i – объемные доли, m_i – модули упругости (сдвига G или объемного K) компонентов.

Нижнюю границу m'' , в предположении однородных напряжений, определяет модель Рейсса:

$$\frac{1}{m''} = \sum C_i \frac{1}{m_i}. \quad (3)$$

Среднее арифметическое значений m' и m'' называют средним модулем Фойгта–Рейсса–Хилла, по которому можно найти осредненные значения эффективных модулей $\langle G \rangle$ и $\langle K \rangle$ и получить эффективный модуль упругости:

$$\langle E \rangle = \frac{9 \cdot \langle G \rangle \cdot \langle K \rangle}{G + 3 \cdot \langle K \rangle}. \quad (4)$$

На практике результаты оценки эффективного модуля упругости по методу осреднения (2)–(4) хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными для ледовой матрицы другими методами [22, 23].

Свойства базальтовой фибры: прочность на растяжение $\sigma_{\text{раст}} = 3000 \text{ МПа}$, плотность $\rho_f = 2,6 \text{ г/см}^3$, $E = 100 \text{ ГПа}$, коэффициент Пуассона $\nu = 0,23$.

Тогда G и K для льда и базальтовой фибры определяются как

$$G = E/[2(1 - \nu)], \quad K = E/[3(1 - 2\nu)], \quad (5)$$

а для композита как средние значений, полученных по (2) и (3).

Результаты расчетов эффективного модуля упругости и полученные в эксперименте [6] представлены в табл. 1.

Предполагая, что между замороженными слоями матрицы создается равнопрочное соединение, а распределение несжимаемой базальтовой фибры равномерно случайное, можно визуализировать процесс разрушения и вычислить скорость роста трещины поперек замороженных слоев при различных концентрациях модификатора согласно табл. 2.

Как показали предварительные расчеты, разрушающая нагрузка не достигалась при полученных эффективных модулях упругости. Очевидно, что базальтовая фибра за счет неравномерного распределения и неполного сцепления с ледовой матрицей снижает прочностные характеристики композита. В этом случае подход Фойгта–Рейсса–Хилла должен быть модифицирован и увеличена доля матрицы на коэффициент неоднородности:

Таблица 1

Осредненные (эффективные) модули упругости льда, базальтовой фибры и композита лед–фибра, согласно (2)–(5)

Table 1

Averaged (effective) elastic moduli of ice, basalt fiber, and ice-fiber composite, according to (2)–(5)

Модуль	Лед	Базальтовая фибра	Ледовая матрица с базальтовой фиброй, об. %			
			0,3	0,75	1,5	2,25
<G>, МПа	329,4	61688	513,5	789,6	1249,8	1710
<K>, МПа	496,5	58642	670,9	932,6	1368,7	1804,8
<E>, МПа	423	95000	1227,4	1847,5	2874,5	3898,7

Таблица 2

Характеристики ледовой матрицы, содержащей базальтовую фибру

Table 2

Characteristics of the ice-matrix containing basalt fiber

Весовое (объемное) содержание фибры, %	Кол-во слоев фибры	Расстояние между слоями фибры, мм	Расстояние между фибрами в слое, мм	Разруш. нагрузка $P_{разр}$, Н	Предел прочности $\sigma_{изг}$, МПа	Эффект. модуль Юнга <E>, МПа	K_{IC} , МПа · м ^{-0,5}
0	—	—	—	4300	0,6	423	0,0111
0,8 (0,3)	7	1	0,3	6700	1,56	1227,4	0,0444
2 (0,75)	10	8,9	0,2	10125	2,27	1847,5	0,0671
4 (1,5)	12	7,2	0,11	15750	3,54	2874,5	0,1044
6 (2,25)	16	5,3	0,1	18000	4,04	3898,7	0,1193

$$\frac{1}{m''} = \Sigma(k_i C_i + (1 - k_i) C_j) \frac{1}{m_j}, \tag{6}$$

где $0 \geq k_i \geq 1$ – коэффициент неоднородности распределения наполнителя и/или сцепления i -й фазы с j -й матрицей. В случае исследуемого композита может быть принято $k = 0,224$, что учитывает 20-кратное превышение разрушающей нагрузки в эксперименте над расчетной.

Выбор начальных и граничных условий для численного решения

Расчет напряжения и деформации для дальнейшей оценки роста трещины производился в чистой и модифицированной базальтовой фиброй ледовой матрице средствами программного комплекса ANSYS 2020 R2 (образовательная лицензия). Для снижения трудоемкости расчета задавалась симметрия по плоскости XOY. Произведено разбиение на КЭ-сетку с тетраэдрической формой ячеек на 11 216 (до перестраивания) элементов. Для визуализации и расчета скорости роста трещины задается функция Smart Crack Growth, перестраивающая сетку по мере расчета,

при этом согласно алгоритму вокруг трещины выделяется сфера с измельченной КЭ-сеткой (рис. 1). Геометрия предварительной трещины задавалась в соответствии с экспериментом в виде треугольного надреза (рис. 2). Для статичной функции моделируемой трещины задается величина критического коэффициента интенсивности на-

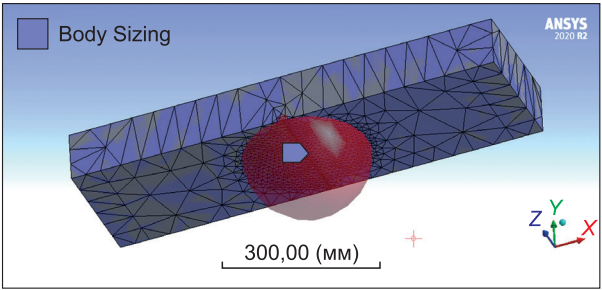


Рис. 1. Схема разбиения образца композиционного материала на элементы с выделенной сферой с измельченной сеткой для роста трещины

Fig. 1. Scheme for meshing the composite specimen with a selected sphere using a shredded mesh for crack growth

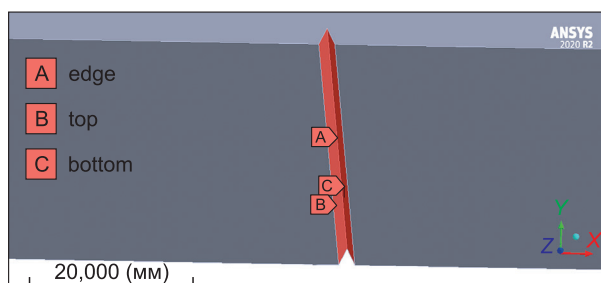


Рис. 2. Схема предварительно заданной трещины (надреза)

Fig. 2. Schematic image of a pre-defined crack (notch)

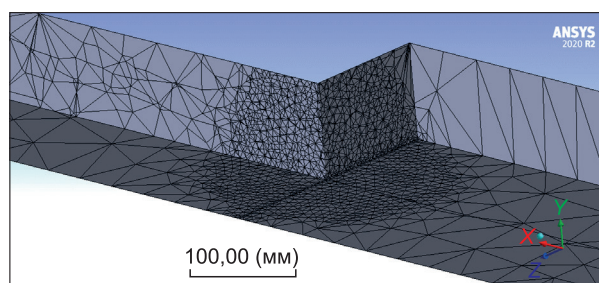


Рис. 3. Измельченная сетка разбиения в зоне роста трещины

Fig. 3. Shredded mesh in the crack growth zone

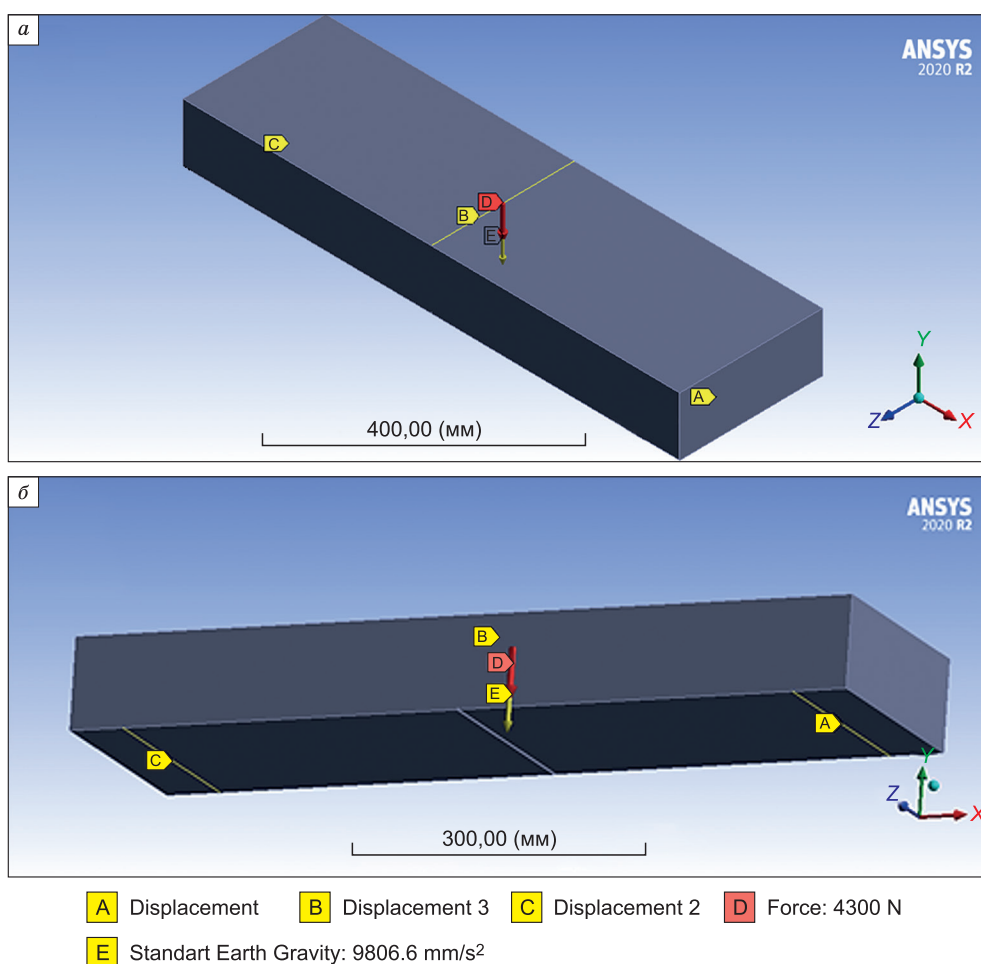


Рис. 4. Заданные начальные (а) и граничные (б) условия

Fig. 4. Defined the initial (a) and the boundary (b) conditions

пряжений K_{IC} для образца (из табл. 2). Вид сетки по разрезу сечения показан на рис. 3.

Следующим этапом моделирования является задание начальных (рис. 4, а) и граничных условий (рис. 4, б): 1) закрепление опоры А в направлении оси x (степень свободы 5) и за-

крепление по перемещениям в направлении x , y , z – опора В (степень свободы 3); 2) сила нагружения 4300 кН и дополнительно учтена сила гравитации ($40,5 \text{ кг} \cdot 9,806 \text{ м/с}^2 = 397 \text{ Н}$); 5) закрепление опоры А в направлении оси x (степень свободы 5) и закрепление по переме-

щениям в направлении x , y , z – опора В (степень свободы 3).

Результаты КЭ-моделирования

Расчет напряжений для чистой ледовой матрицы представлен на рис. 5. Из зависимости напряжений по времени (рис. 5, б) видно, что образец из льда разрушается хрупко при достижении максимальной прочности.

На рис. 6 показаны расчет распространения трещины по алгоритму Smart Crack Growth и зависимость длины трещины по времени. Подра-

стание трещины происходит скачком со скоростью около 0,1 м/с.

Распределение и кривая роста напряжений согласно расчету для ледовой матрицы, модифицированной 16 слоями базальтовой фибры (6 мас.%; 2,25 об.%), представлены на рис. 7.

На рис. 8 показана конфигурация трещины до и после роста трещины по алгоритму Smart Crack. Согласно расчету, скорость трещины в случае чистого льда составит ~0,1 м/с, модифицированного базальтовой фиброй – более 10 м/с. Несмотря на многократно возросшую нагрузку, ско-

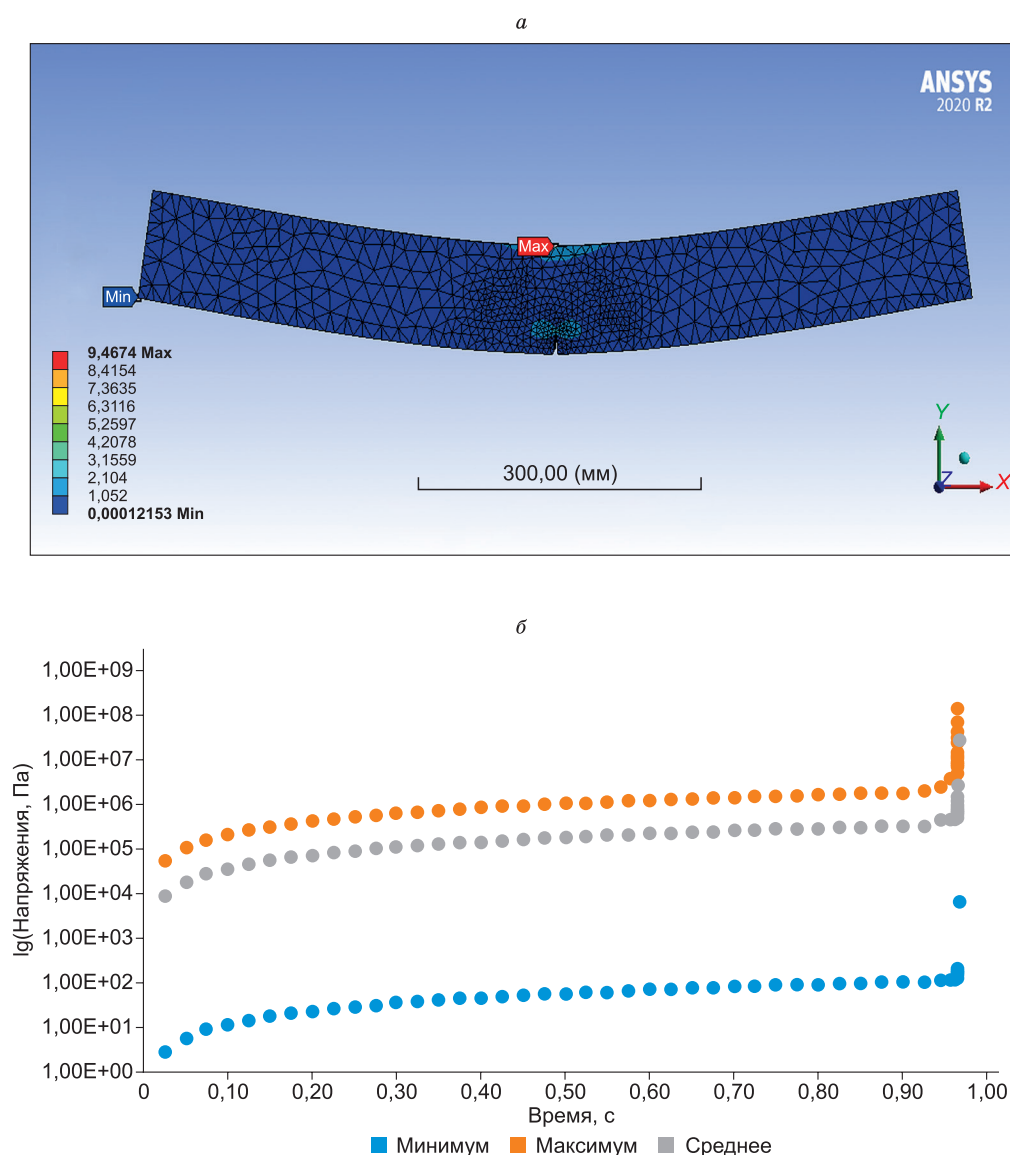


Рис. 5. Силовой расчет: а – распределение напряжений в образце: б – кривая изменения напряжений по времени в логарифмическом масштабе

Fig. 5. Calculation of equivalent stresses: а) a stress distribution in the specimen: б) stress-time curve on a logarithmic scale

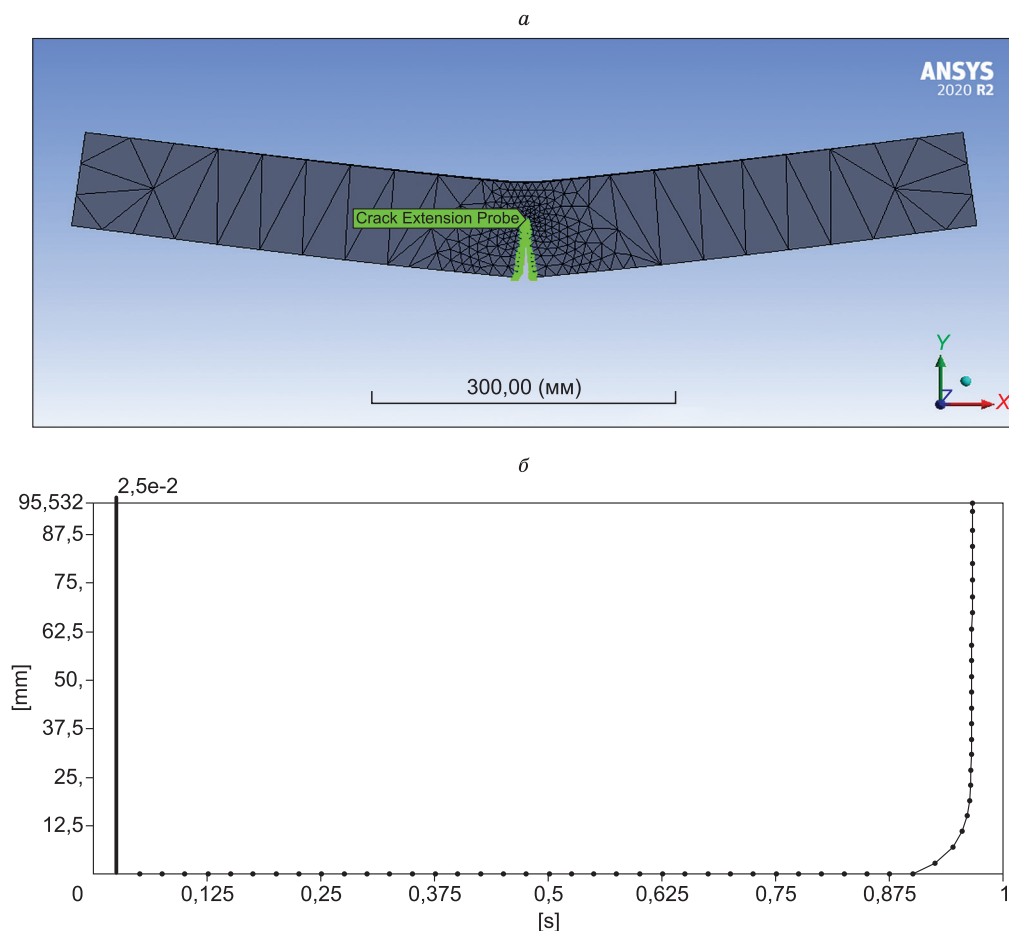


Рис. 6. Вид (а) и кривая роста трещины (б) после приложения нагрузки для образца из чистого пресного льда
Fig. 6. Visualization (а) and the curve (б) of the crack growth after loading for a pure fresh ice sample

рость трещины в композите выросла ненамного, составив около 0,16 м/с.

Трудоёмкость расчетов на мобильном 2-ядерном процессоре Intel Core i5-2450M 2501 МГц составила около 6 ч машинного времени для образца из чистого льда и около 5 ч для образца из композиционного материала. По результатам проведенных симуляций трещина образуется только при $K_{IC} = 9300$ для чистого льда и $K_{IC} = 27000 \text{ Па} \cdot \text{м}^{-0.5}$ – для армированного 16 волокнами фибры. В соответствии с этим были изменены теоретические величины эффективной прочности согласно [6].

Стохастическое моделирование роста трещины

В отличие от вязких материалов, таких как металлы и полимеры, в хрупких композитах на основе ледовой матрицы рост трещин подчиняется другим закономерностям. Модель роста

и слияния микротрещин в стохастической постановке учитывает закономерности движения дислокаций во льду [23], а также условие необратимости разрушения Бейли и критерий концентрационного разрушения, основанный на теории перколяции.

В стохастической модели роста трещины механические характеристики льда: модуль Юнга $E = 423 \text{ МПа}$, прочность при одноосном сжатии $\sigma_{сж} = 0,55 \text{ МПа}$, прочность при одноосном растяжении $\sigma = 0,4 \text{ МПа}$, плотность льда $\rho_{л} = 930 \text{ кг/м}^3$, коэффициент Пуассона $\nu = 0,358$. Средняя скорость звука (поперечных волн) $C_1 = 3200 \text{ м/с}$. Структура представлена на рис. 9.

Что касается прочности когезионной связи между ледовой матрицей и базальтовой фиброй, то с учетом увеличения объема твердой фазы по сравнению с жидкой на 10 % между фиброй и матрицей образуется прочное механическое сцепление, практически предотвращающее проскаль-

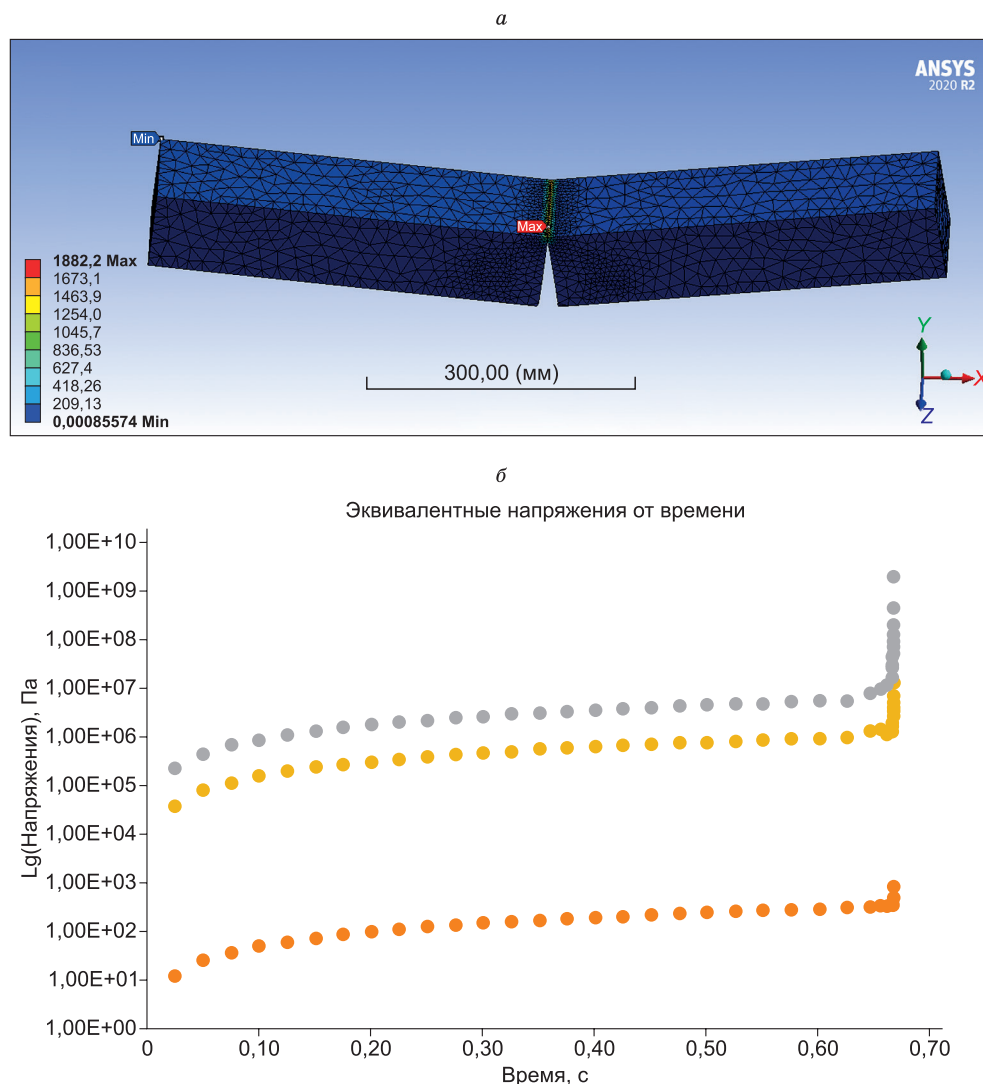


Рис. 7. Распределение (*a*) и кривая зависимости эквивалентных напряжений в логарифмическом масштабе по времени (*b*) при деформировании образца из ледового композита, содержащего 6 мас.% базальтовой фибры

Fig. 7. Distribution (*a*) and the curve of equivalent stresses in a logarithmic time scale (*b*) during the deformation of an ice composite specimen containing 6% (wt.) of basalt fiber

зывание при низкой температуре и образующее только концентраторы напряжений для движения трещины. Такое предположение, впрочем, будет верно даже для более высокой температуры в условиях сжатия, когда интенсивное таяние льда затруднено термодинамическими условиями фазового перехода.

Разработанная стохастическая модель [24] позволяет на микроуровне получать результаты, близкие к макроскопическим КЭ-расчетам. На рис. 10 показаны результаты компьютерной визуализации роста трещины для чистого льда и максимального содержания базальтовой фибры в ледовой матрице, в характерной области раз-

мером 800×400 мкм. Скорость трещины, полученная для максимальной концентрации фибры при критическом уровне концентрации напряжений, оказалась равной 0,17 м/с. Для чистого льда в условиях наличия естественных пузырьков размером 1 мкм скорость составила 0,11 м/с. Эти величины близки к полученным в макроскопическом расчете по КЭ-модели.

В случае стохастической модели трудоемкость расчета на 6-ядерном процессоре AMD Ryzen 5 1600X 3.60 ГГц составила около 50 ч.

Так же как и в случае построения многоуровневых моделей для древесины и бетона [15, 25], в случае ледового композита может быть выстрое-

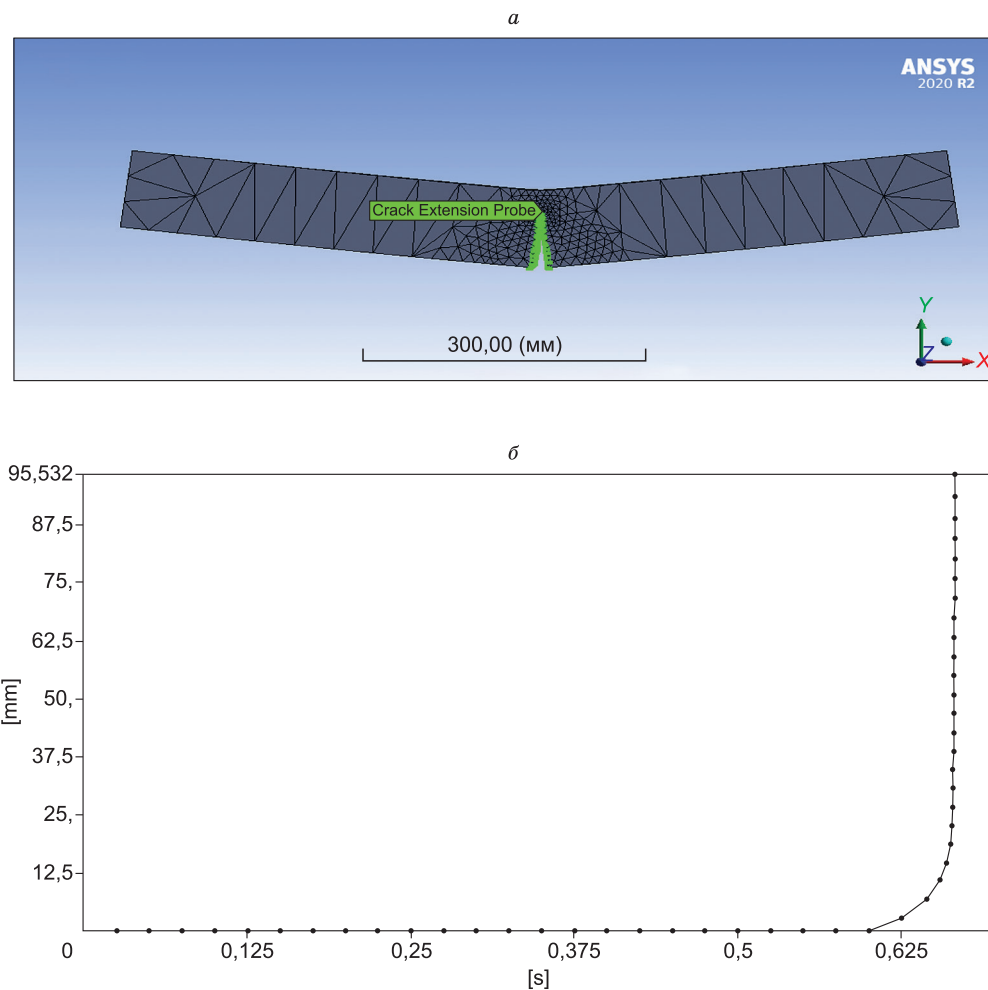


Рис. 8. Вид (а) и кривая роста трещины (б) после приложения нагрузки для образца из ледового композита, содержащего 6 мас.% базальтовой фибры

Fig. 8. Visualization (а) and the curve (б) of the crack growth after loading of an ice composite specimen containing 6% (wt.) of basalt fiber



Рис. 9. Структура поверхности разрушения ледового композита с содержанием базальтовой фибры 2,25 об. %

Fig. 9. Structure of the fracture surface of an ice composite with 2.25 vol.% basalt fiber content

на иерархическая последовательность критических КИН и скоростей трещины, согласно временным и пространственным масштабам протекания процессов разрушения в рамках системно-структурного подхода. Однако это требует более тщательных исследований микроструктуры, в том числе поверхностей разрушения льда и композитов на основе ледовой матрицы, что затруднено температурой фазового перехода и стабилизации их свойств ниже нуля градусов по шкале Цельсия (около 273 К).

Заключение

Метод многоуровневого численного моделирования в рамках системно-структурного подхода применен для оценки интенсивности разрушения и скорости роста трещины в композиционном материале на основе ледовой матрицы. Ввиду того, что оценка модуля упругости для такого материала как речной поликристаллический лед в силу различных условий его образования и сильно выраженного масштабного эффекта неточна в эксперименте и теоретически, то и для композиционного материала на его основе, в частности с базальтовой фиброй в качестве наполнителя, предложен модифицированный метод расчета эффективного модуля Юнга на основе подходов Фойгта и Рейсса путем введения коэффициента неоднородности и сцепления наполнителя с ледовой матрицей.

Скорость роста трещины оценивалась на основе макроскопического расчета по конечно-элементной модели с использованием комплекса ANSYS и алгоритма SmartCrack. Для визуализации и оценки скорости роста трещины на микроуровне применена стохастическая модель разрушения, дополненная кинетическим подходом Бейли и соотношениями теории перколяции [25].

Результаты стохастического моделирования роста трещин в массивах трещин и пор на микроуровне при критическом уровне концентрации напряжений показывают, что расчетная скорость развития разрушения сравнима с результатами, полученными путем конечно-элементного макроскопического расчета. Также расчетные скорости трещины, полученные для чистого льда и композита с максимальной концентрацией базальтовой фибры в ледовой матрице, оказались сравнимы с измеренными в натурном эксперименте с применением датчиков акустической эмиссии [2,17].

Это позволяет говорить о возможности моделирования процессов разрушения ледовых мас-

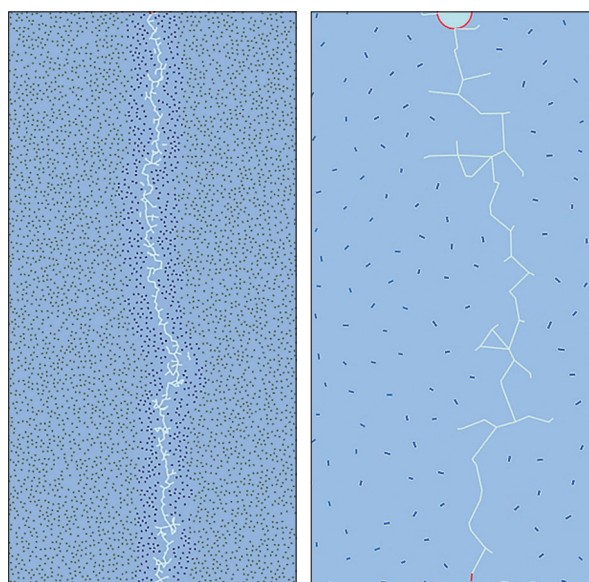


Рис. 10. Визуализация роста трещины: *a* – для чистого речного льда ($v = 0,11$ м/с) и армированного 6 мас.% базальтовой фибры ($v = 0,17$ м/с) (*б*)

Fig. 10. Visualization of the crack growth for: *a*) the pure ice ($v = 0.11$ m/s) and *б*) the composite with 6 % (by weight) of basalt fiber ($v = 0.17$ m/s)

сивов, с учетом условий их естественного и искусственного формирования в речных акваториях как для предотвращения паводковых явлений, так и для продления сроков эксплуатации зимних автомобильных дорог, позволяющих обеспечить транспортную доступность и связность отдаленных северных и арктических территорий, сократить сроки и снизить стоимость северного завоза топлива и продовольствия. Но для обеспечения достоверности и проверки моделей необходимо обустройство специального полигона для натурных испытаний дорог и техники российских Севера и Арктики в Республике Саха (Якутия).

Список литературы / References

1. Гончарова Г.Ю., Сиротюк В.В., Якименко О.В. и др. Повышение несущей способности и безопасности ледовых автозимников с помощью армирования и модификации льда. *Вестник СиБАДИ*. 2023;20(6): 786–797. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-786-797>
- Goncharova G.Y., Sirotiuk V.V., Yakimenko O.V., et al. Loadbearing capacity and safety for winter roads improvement reinforcement and ice modification. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20(6):786–797. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-786-797>.

2. Syromyatnikova A.S., Andreev Y.M., Sibirya-
kov M.M., et al. Fracture laws for composite materials
based on fresh ice during testing of bulky samples. *Rus-
sian Metallurgy (Metally)*. 2023;4:553–557. [https://doi.
org/10.1134/S0036029523040286](https://doi.org/10.1134/S0036029523040286)
3. Черепанов Г.П. *Механика хрупкого разрушения*.
М.: Наука; 1974. 640 с.
Cherepanov G.P. *Mechanics of brittle fracture*. Mos-
cow: Nauka, 1974. 640 p. (In Russ.)
4. Kujala P., Goldstein R.V., Osipenko N.M. Ship in
compressive ice – analysis of the ice failure process. *Re-
port M-165 by the Naval Architecture and Marine Engi-
neering*. Espoo: Helsinki University of Technology; 1990.
5. Goldstein R.V., Osipenko N.M., Tuhkuri J. Mode-
ling of edge cracking and flaking of brittle plates and
wedges. Report M-216. Otaniemi; 1997. 27 p.
6. Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М. О модели раз-
рушения льда при большой площади контакта. *Изве-
стия РАН. Механика твердого тела*. 2011;1:137–153.
Goldstein R.V., Osipenko N.M. On an ice failure
model with a large contact region. *Mechanics of Solids*.
2011;46(1):109–122.
7. Черепанин Р.Н., Нужный Г.А., Разомасов Н.А.
и др. Физико-механические свойства ледяных ком-
позиционных материалов, армированных волокнами
РУСАР-С. *Материаловедение*. 2017;(7):38–44.
Cherepanin R.N., Nuzhny G.A., Razomasov N.A., et
al. Physical-mechanical properties of ice composites rein-
forced with RUSAR-S fibers. *Materialovedenie*. 2017;(7):
38–44. (In Russ.)
8. Нужный Г.А., Бузник В.М., Черепанин Р.Н. и др.
Физико-механические свойства ледяных компози-
ционных материалов, армированных углеродными на-
полнителями. *Материаловедение*. 2020;(8):35–40.
Nuzhnyy G.A., Buznik V.M., Cherepanin R.N., et al.
Physical-mechanical properties of ice composite materials
reinforced with carbon fillers *Materialovedenie*. 2020;(8):
35–40. (In Russ.)
9. Лепов В.В., Лепова К.Я., Алымов В.Т., Ларио-
нов В.П. Стохастическое моделирование разрушения
гетерогенной повреждаемой среды. *Физическая мезо-
механика*. 2002;5(2):23–41.
Lepov V.V., Lepova K.Ya., Alymov V.T., Lario-
nov V.P. Stochastic modeling of fracture of heterogene-
ous damaged media. *Physical Mesomechanics*. 2002;5(2):
23–41. (In Russ.)
10. Weinan E., Engquist B., Huang Z.Y. Heterogene-
ous multiscale method: a general methodology for multi-
scale modeling. *Physical Review B*. 2003;67(9):092–101.
11. Панин В.Е., Егорушкин В.Е. Деформируемое
твердое тело как нелинейная иерархически организо-
ванная система. *Физическая мезомеханика*. 2011;14(3):
7–26.
Panin V.E., Egorushkin V.E. Deformable solid body
as a nonlinear hierarchically organized system. *Physical
Mesomechanics*. 2011;14(3):7–26. (In Russ.)
12. Федотов С.Н. Модели разрушения гетерогенных
материалов. *Физическая мезомеханика*. 2015;18(6):24–31.
Fedotov S.N. Fracture models of heterogeneous mate-
rials. *Physical Mesomechanics*. 2015;18(6):24–31. (In Russ.)
13. Fish J., Wagner G.J., Keten S. Mesoscopic and mul-
tiscale modelling in materials. *Nature Materials*. 2021;20(6):
774–786. <https://doi.org/10.1038/s41563-020-00913-0>
14. Лепов В.В., Ачикасова В.С., Иванова А.А., Ле-
пова К.Я. Структурный подход к многомасштабному
моделированию эволюционных процессов в материа-
лах с внутренней микроструктурой. *Наука и образо-
вание*. 2015;4(80):82–87.
Lepov V.V., Achikasova V.S., Ivanova A.A., Lepo-
va K.Y. Structural approach to multiscale modeling of
evolutionary processes in materials with internal micro-
structure. *Nauka i obrazovanie*. 2015;4(80):82–87. (In Russ.)
15. Лепов В.В., Бисонг С.М., Голых Р.Н. Много-
уровневый подход к моделированию процессов разру-
шения материалов с субмикроструктурой, примени-
мых в условиях Арктики и Субарктики. *Природные
ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023; 28(1):156–171.
<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-156-171>
16. Lepov V.V., Bisong S.M., Golykh R.N. Foundation of
multilevel approach to fracture modeling for materials
with submicrostructure applicable for Arctic and Subarc-
tic environment. *Arctic and Subarctic Natural Resources*.
2023;28(1):156–171. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-156-171>
17. Roldán É., Neri I., Chetrite R., et al. Martingales
for physicists: a treatise on stochastic thermodynamics
and beyond. *Advances in Physics*. 2024;1–258. <https://doi.org/10.1080/00018732.2024.2317494>
18. Сыромятникова А.С., Андреев Я.М., Сибиря-
ков М.М. и др. Исследование закономерностей разру-
шения композиционных материалов на основе прес-
ного льда при испытании массивных образцов. *Дефор-
мация и разрушение материалов*. 2022;(10):34–39.
Syromyatnikova A.S., Andreev Y.M., Sibirya-
kov M.M., et al. Investigation of fracture patterns of fresh ice based
composite materials during testing of massive specimens.
Deformation and Fracture of Materials. 2022;(10):34–39.
(In Russ.)
19. Берденников В.П. *Изучение модуля упругости
льда*. М.: Машиностроение; 1948. 123 с.
Berdennikov V.P. Study of the modulus of elasticity of
ice. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1948. 123 p. (In Russ.)
20. Победря Б.Е. *Механика композиционных мате-
риалов*. М.: МГУ; 1984. 335 с.
Pobedrya B.E. *Mechanics of Composite Materials*. Mos-
cow: Moscow State University; 1984. 335 p. (In Russ.)
21. Grimvall G. *Thermophysical properties of mate-
rials*. Amsterdam: Elsevier Science B.V.; 1999.
22. Кияшко М.В., Гринчук П.С., Кузнецова Т.А.
и др. Определение модуля упругости композицион-
ной керамики на основе SiC. *Письма в Журнал тех-
нической физики*. 2021;47(3):47–50. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2021.03.50577.18551>
23. Kiyashko M.V., Grinchuk P.S., Kuznetsova T.A., et
al. Determination of elastic modulus of sic-based com-

posite ceramics. *Technical Physics Letters*. 2021;47(2): 150–153.

22. Buznik V.M., Goncharova G.Yu., Grinevich D.V., et al. Strengthening of ice with basalt materials. *Cold Regions Science and Technology*. 2022;196:103490. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103490>

23. Gold LW. Engineering Properties of Fresh-Water Ice. *Journal of Glaciology*. 1977;19(81):197–212. <https://doi.org/10.3189/S0022143000215608>

24. Лепов В.В. Алгоритм стохастического моделирования роста трещины в массиве пор и/или трещин вязко-хрупкого материала, в том числе при воздейст-

вии коррозионной среды. *Ноу-хау*. ИФТПС СО РАН, ФИЦ ЯНЦ СО РАН; 2021.

Lepov V.V. *Stochastic model algorithm – formation of crack growth in an array of pores and/or cracks ductile-brittle material, including when exposed to corrosive environment*. Know-how. IPTPN SB RAS, FRC YaSC SB RAS; 2021.

25. Bisong S., Lepov V.V., Etinge A.R. Study of the mechanical behavior and multiscale simulation of the crack propagation in a bilinga wooden beam. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2024;90(3):52–61. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2024-90-3-52-61>.

Об авторах

ЛЕПОВ Валерий Валерьевич, доктор технических наук, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-2360-7983>, ResearcherID: F-9875-2011, Scopus Author ID: 6508081764, SPIN: 1397-6725, e-mail: wisecold@mail.ru

ДЬЯЧКОВСКИЙ Иван Иванович, инженер, аспирант, SPIN: 2489-5570, e-mail: e5dii@mail.ru

Вклад авторов

Лепов В.В. – разработка концепции, методология, программное обеспечение, проведение статистического анализа, проведение исследования, редактирование рукописи, визуализация, руководство исследованием, администрирование проекта

Дьячковский И.И. – программное обеспечение, верификация данных, проведение исследования, создание черновика рукописи, визуализация

Конфликт интересов

Один из авторов – доктор технических наук, главный научный сотрудник Лепов В.В. является членом редакционного совета журнала «Природные ресурсы Арктики и Субарктики». Авторам неизвестно о каком-либо другом потенциальном конфликте интересов, связанном с этой рукописью.

About the authors

LEPOV, Valeriy Valerievich, Dr. Sc. (Eng.), Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-2360-7983>, ResearcherID: F-9875-2011, Scopus Author ID: 6508081764, SPIN: 1397-6725, e-mail: wisecold@mail.ru

DYACHKOVSKY, Ivan Ivanovich, Engineer, Post-Graduate Student, SPIN: 2489-5570, e-mail: e5dii@mail.ru

Authors' contribution

Lepov V.V. – conceptualization, methodology, software, formal analysis, investigation, review & editing, visualization, supervision, project administration

Dyachkovsky I.I. – software, validation, investigation, original draft, visualization

Conflict of interest

One of the authors – Lepov V.V., Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher is a member of editorial board of “Arctic and Subarctic Natural Resources”. The authors are not aware of any other potential conflict of interest relating to this manuscript.

Поступила в редакцию / Submitted 24.04.2024

Поступила после рецензирования / Revised 21.05.2024

Принята к публикации / Accepted 31.05.2024

КОНФЕРЕНЦИИ

Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: состояние, перспективы, новые решения

В Якутске состоялась XIV Международная научно-практическая конференция «Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России». Мероприятие проходило с 26 по 29 марта 2024 г. в Институте геологии алмаза и благородных металлов СО РАН и было посвящено 300-летию Российской академии наук и 100-летию золотодобывающей промышленности РС(Я).

Организаторы конференции: Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, Сибирское отделение РАН и Академия наук Республики Саха (Якутия). С приветствиями к участникам обратились заместитель председателя СО РАН, научный руководитель ИГМ СО РАН, сопредседатель программного комитета конференции академик Н.П. Похиленко и директор ИГАБМ СО РАН, член-корреспондент РАН, сопредседатель программного комитета конференции В.Ю. Фридовский.

Конференция стала уже традиционным научным мероприятием, проходящим в преддверии профессионального праздника «Дня геолога». В 2024 г. статус международного мероприятия привлек внимание ученых из Китая, Киргизии, Ирана, Израиля и Австралии. Гибридный режим проведения секций позволил расширить географию участников конференции. Представители научных, образовательных и производственных организаций Москвы, Санкт-Петербурга, Новосибирска, Иркутска, Владивостока, Казани, Уфы, Салехарда, Кызыла, Сыктывкара, Магадана, Якутска и Мирного выступили с докладами, посвященными геологии, полезным ископаемым, мерзлотоведению и геоэкологии.

Всего на секциях «Геология и минералогия месторождений полезных ископаемых», «Тектоника, геодинамика и эволюция литосферы Северо-Востока России» и «Гидрогеология, геоэкология и мерзлотоведение» было заслушано 103 доклада. Активное участие в работе конфе-



Участники конференции «Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России», г. Якутск, 26–29 марта 2024 г.

ренции (около 30 % докладов) приняли молодые ученые, аспиранты и студенты. На секционных заседаниях были представлены доклады различной направленности. На секции «Геология и минералогия месторождений полезных ископаемых» одно из заседаний было посвящено вопросам кимберлитового магматизма, минералогии и строению кимберлитовых тел. Тематика докладов подсекции рудных месторождений отличалась широким спектром направлений исследования: благороднометалльные, редкометалльные и полиметаллические месторождения, рудовмещающая среда, минералогические, геохимические и геофизические критерии оруденения. Несколько докладов были посвящены месторождению Томтор, в частности, наряду с анализом условий формирования ниобий-иттрий-скандиевой минерализации были представлены результаты по перспективам добычи апатит-магнетитовых и марганцевых руд. Большое внимание в представленных докладах было уделено структурному контролю, условиям формирования оруденения и типоморфным признакам золота месторождений орогенного типа и карлин-типа как одних из наиболее перспективных для наращивания минерально-сырьевой базы и экономически привлекательных для горнодобывающих компаний.

На секции «Тектоника, геодинамика и эволюция литосферы Северо-Востока России» ряд докладов были посвящены различным аспектам магматизма, тектоники и геодинамики архипелага Северная Земля и северного Таймыра, Енисейского Кряжа, Сибирской платформы, Приколымья и Южной Якутии. Сообщения палеонтолого-стратиграфической направленности посвящены пограничным слоям перми и триаса, поздней юры и раннего мела, верхнего карбона и верхней перми, моделированию брахиопод, взаимоотношениям вендских микрофоссилий, стратиграфии и седиментологии верхнего триаса–нижней юры Вилюйской синеклизы. Представлены новые интерпретации сейсмических профилей в акватории моря Лаптевых и результаты кластерного анализа

сейсмичности Илин-Тасского землетрясения, одного из крупнейших за последнее время на территории хребтов Черского и Момского.

Секция «Гидрогеология, геоэкология и мерзлотоведение» также объединила большой спектр направлений в области мерзлотоведения, геоэкологии, инженерной геологии, гидрогеологии и геофизики. Ряд докладов был посвящен геоэкологическим исследованиям городской среды и промышленным территориям, активно обсуждались вопросы природного и техногенного засоления почв и грунтов, мониторинга городских водоемов и восстановления техногенно-преобразованных территорий разрабатываемых месторождений и населенных пунктов. Рассмотрены результаты почвенно-геохимических исследований, происхождения отложений ледового комплекса, экспериментальных исследований циклического промерзания и протаивания грунтов. Особый интерес вызвали процессы формирования высококонтрастных аномалий в донных осадках рек на территориях с фоновым содержанием элементов в почве.

На заключительном заседании было отмечено широкий круг тематик представленных докладов, разнообразие объектов изучения и высокий уровень полученных результатов.

В рамках работы конференции подписан договор о сотрудничестве между Институтом геологии алмаза и благородных металлов СО РАН и Иркутским государственным университетом, в качестве представителя которого на конференции участвовала заведующий кафедрой почвоведения и земельных ресурсов биолого-почвенного факультета ИГУ, профессор, доктор биологических наук Лопатовская О.Г.

Участники конференции провели открытые лекции для студентов Северо-Восточного федерального университета.

Сайт конференции <https://geo.ysn.ru>. Материалы конференции выставлены на сайте и на платформе <https://elibrary.ru>.

*Л.И. Полуфунтикова,
Заместитель директора Института геологии алмаза
и благородных металлов СО РАН*

Редактор *Н.А. Лившиц*
Корректурa *З.А. Корнилова*
Компьютерная верстка *И.В. Мелехов*
Обложка *Б.В. Яковлев*

Дата выхода в свет 28.06.2024. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая
Усл. п.л. 17,67. Тираж 100 экз. Заказ № 1715. Цена свободная.

Адрес редакции:

677007, г. Якутск, пр. Ленина, 33, тел. 8(4112) 33-57-11, <https://resar.elpub.ru>

Адрес издателя:

677007, г. Якутск, пр. Ленина, 33, ГБУ «Академия наук Республики Саха (Якутия)»,
тел. 8(4112) 33-57-11, e-mail: anrsya@mail.ru

Адрес типографии:

ООО «Компания «Дани-Алмас»
677008, г. Якутск, ул. Билибина, д. 10А
тел. 8(4112) 36-93-38, e-mail: ardah@inbox