

ПРИРОДНЫЕ РЕСУРСЫ АРКТИКИ И СУБАРКТИКИ

(до 2018 г. «Наука и образование»)

Научный журнал

2023, Том 28, № 1

Основан в 1996 г.
Выходит 4 раза в год

Учредители:

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

В журнале публикуются научные статьи по геологии,
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
Ю.М. Григорьев, д-р физ.-мат. наук

Ответственный секретарь

З.А. Корнилова

Адрес редакции:

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

<https://nras.asrsya.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

Подписной индекс в каталоге Почта России – ПР046
Входит в Перечень ВАК Минобрнауки РФ (22.12.2020)
Включен в базу данных Russian Science Citation Index (RSCI)

© Академия наук РС (Я), 2023
© ФИЦ «Якутский научный центр», 2023
© Северо-Восточный федеральный университет
им. М.К. Аммосова, 2023
© Министерство образования и науки РС (Я), 2023

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

ARCTIC AND SUBARCTIC NATURAL RESOURCES

(until 2018 “Nauka i Obrazovanie”)

Scientific journal

2023, Vol. 28, No. 1

Founded in 1996
4 issues per year

Founders:

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

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

Editor-in-Chief

L.N. Vladimirov

Corresponding Member, RAS

Deputy Editors-in-Chief:

V.Yu. Fridovsky

Corresponding Member, RAS

Yu.M. Grigoriev

Dr.Sci. (Phys.-Math.)

Executive Editor

Z.A. Kornilova

Editorial Office Address:

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

<https://nras.asrsya.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)
Subscription Index in the Russian Post Catalogue – ПР046
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), 2023
© Federal Research Centre “The Yakut
Scientific Centre of SB RAS”, 2023
© M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, 2023
© Ministry of Education and Science of RS (Ya), 2023

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.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

Общая биология

Арчибалд Дж. – д-р, Межд. фонд охраны журавлей, Барабу, США

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
Соломонов Н.Г. – чл.-корр. РАН, СВФУ, 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

Аннин Б.Д. – акад. РАН, ИГиЛ СО РАН, Новосибирск, Россия
Григорьев Ю.М. – д.ф.-м.н., СВФУ, Якутск, Россия
Дейонг Джонг – д-р, проф., Университет 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

General Biology

George Archibald – Dr., International Crane Foundation, Baraboo, USA
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
N.G. Solomonov – Corresponding Member, RAS, M.K. Ammosov NEFU, 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

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

СОДЕРЖАНИЕ

Колонка главного редактора.....	7
---------------------------------	---

Науки о Земле

Геология и полезные ископаемые

<i>Минин В.А., Толстов А.В., Мальцев М.В.</i> Структурно-вещественные неоднородности кимберлитов как отражение особенностей их петрогенеза.....	9
<i>Хусаинова А.Ш., Калинин Ю.А., Бортникова С.Б., Гаськова О.Л.</i> Минералы Au и Ag в хвостохранилище переработанных руд (Салаир, Россия).....	27
<i>Заякина Н.В., Васильева Т.И.</i> Оксалаты кальция среди минералов Якутии и в организме человека	40
<i>Колосов П.Н.</i> Особенности литологического строения пестроцветной свиты нижнего кембрия в районе Ой-Муранского рифового массива (Якутия)	47

Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

<i>Чжан Р.В., Якимов А.А., Чжан А.А., Заболотник П.С.</i> К оценке устойчивости ограждающей дамбы г. Якутск	56
<i>Черепанова А.М., Шепелев А.Г.</i> Содержание различных форм углерода в покровных отложениях ледового комплекса Центральной Якутии.....	68

Общая биология

Экология

<i>Сысо А.И., Десяткин Р.В., Николаева М.Х., Иванова А.З., Десяткин А.Р., Филиппов Н.В., Худяев С.А.</i> Элементный химический состав почв и растений Северной Якутии, его эколого-биогеохимическая оценка	78
<i>Оконешникова М.В., Иванова А.З.</i> Почвы островов Крестовский и Четырехстолбовой Государственного природного заповедника «Медвежь острова» (Восточно-Сибирское море).....	94
<i>Чевычелов А.П., Захарова О.Г., Бурнашева М.П.</i> Фосфатное состояние мерзлотных почв Центральной Якутии	104
<i>Вольперт Я.Л., Шадрина Е.Г., Охлопков И.М.</i> Млекопитающие Якутии: изменения представлений о составе териофауны за последние 50 лет и аннотированный список. Ч. 2. Хищные, Китообразные, Парнокопытные.....	117

Биологические ресурсы

<i>Иванова Е.И., Сосина Н.К., Кузнецова Л.В., Николин Е.Г., Софронова Е.В., Ефимова А.П., Исакова В.Г., Слепцова А.П.</i> Типовые образцы растений Гербария Института биологических проблем криолитозоны СО РАН (SASY)	128
<i>Владимиров Л.Н., Мачахтыров Г.Н., Мачахтырова В.А., Шадрина Я.Л., Андреева М.В.</i> Опыт гибридизации и перспективы его применения в овцеводстве	142

Материаловедение

<i>Лепов В.В., Бисонг С.М., Голых Р.Н.</i> Многоуровневый подход к моделированию процессов разрушения материалов с субмикроструктурой, применимых в условиях Арктики и Субарктики	156
<i>Сукнёв С.В.</i> Изменение упругих свойств частично насыщенного известняка в процессе высыхания	172

Память

Галанин Алексей Александрович.....	179
------------------------------------	-----

CONTENTS

Editorial.....	7
----------------	---

Earth sciences

Geology and mineral resources

<i>Minin V.A., Tolstov A.V., Maltsev M.V.</i> Heterogeneity in kimberlite structure and composition as a reflection of its petrogenesis peculiarities.....	9
<i>Khusainova A.Sh., Kalinin Yu.A., Bortnikova Sv.B., Gaskova O.L.</i> Minerals Au and Ag in the tailing dump of the processed ores (Salair, Russia)	27
<i>Zayakina N.V., Vasileva T.I.</i> Calcium oxalates among minerals of Yakutia and in the human body.....	40
<i>Kolosov P.N.</i> Features of the lithological structure of the Lower Cambrian Pestrotsvet Formation near the Oi-Muran reef massif (Yakutia).....	47

Engineering geology, permafrost and soil science

<i>Zhang R.V., Yakimov A.A., Zhang A.A., Zabolotnik P.S.</i> Assessment of flood-control dam stability in Yakutsk (Russia)	56
<i>Cherepanova A.M., Shepelev A.G.</i> The content of various carbon forms in the cover sediments of the ice complex in Central Yakutia	68

General biology

Ecology

<i>Syso A.I., Desyatkin R.V., Nikolaeva M.Ch., Ivanova A.Z., Desyatkin A.R., Filippov N.V., Khudyaev S.A.</i> Elemental chemical composition of soils and plants of Northern Yakutia, its ecological and biogeochemical assessment	78
<i>Okoneshnikova M.V., Ivanova A.Z.</i> Soils of the Krestovsky and Chetyryokhstolbovoy islands in the National Nature Reserve "Bear Islands" (East Siberian Sea)	94
<i>Chevychelov A.P., Zakharova O.G., Burnasheva M.P.</i> The phosphate status of permafrost soils in Central Yakutia	104
<i>Volpert Ya.L., Shadrina E.G., Okhlopov I.M.</i> Mammals of Yakutia: Changes in the understanding of the composition of the mammal fauna over the past 50 years and an Annotated list. Part 2. Carnivorous, Cetaceans, and Artiodactyls.....	117

Biological resources

<i>Ivanova E.I., Sosina N.K., Kuznetsova L.V., Nikolin E.G., Sofronova E.V., Efimova A.P., Isakova V.G., Sleptsova A.P.</i> Herbarium of the Institute for Biological Problems of Cryolithozone (SASY): Plant type specimens.....	128
<i>Vladimirov L.N., Machakhtyrov G.N., Machakhtyrova V.A., Shadrina Ya.L., Andreeva M.V.</i> Experience of hybridization and prospects for its application in sheep breeding.....	142

Materials science

- Lepov V.V., Bisong S.M., Golykh R.N.* Foundation of multilevel approach to fracture modeling for materials with submicrostructure applicable for Arctic and Subarctic environment..... 156
- Suknev S.V.* Change in the elastic properties of partially saturated limestone during drying conditions..... 172

Memory

- In memory of Alexey A. Galanin..... 179

**Уважаемые читатели журнала
«Природные ресурсы Арктики и Субарктики –
Arctic and Subarctic Natural Resources!»**

Цели издания и название журнала «Природные ресурсы Арктики и Субарктики» обязывают нас соответствовать задачам и вносить соответствующий вклад в реализацию «Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года». Задачи журнала обозначены как публикация результатов научных исследований, посвященных Арктике и Субарктике и научному обоснованию освоения этих территорий. Публикации в рубриках «Науки о Земле», «Экология», «Биологические ресурсы», «Материаловедение» направлены на изучение природных ресурсов Арктики и Субарктики, наращивание минерально-сырьевой базы региона с учетом требований устойчивости экосистем, внедрение современных технологий в условиях криолитозоны, исследование опасных и кризисных природных явлений.

К последним обычно относят общую и яркую характеристику огромной области – холода как влияющего только негативно на социально-экономическую деятельность на этих территориях. И основной задачей, в том числе науки, объявляется борьба с холодом, защита от дискомфортных зимних температур. Вместе с тем известно, что живые организмы, экосистемы в процессе эволюции эффективно адаптировались к воздействию холода, «научились» не просто приспосабливаться к нему как к основному климатическому фактору среды обитания, а использовать его как необходимое условие своего существования в этих природных условиях.

Примерами адаптивности к холоду можно привести растительный и животный мир Якутии, «морозильной камеры» планетарного масштаба. К суровым климатическим условиям, где зимняя температура ниже -65°C и распространена самая устойчивая многолетняя мерзлота в Северном полушарии, приспособился и человек.

Адаптированные к холоду дикие животные и птицы, используя механизм перестройки биоэнергетических процессов и терморегуляции, оп-



тимизируют метаболизм в зимний период, вплоть до спячки. Запасание большого количества «криопротекторов» в организмах зимующих насекомых, хвоинках хвойных деревьев обеспечивает их жизнедеятельность даже при сверхнизких отрицательных температурах.

Мохово-лишайниковый слой тундры сохраняет мерзлоту от протаивания. Мерзлота в период вегетации дает влагу для развития растений, что обеспечивает синтез в организмах растений более высоких концентраций и повышенное структурное разнообразие веществ регуляторного и защитного действия, соответственно ускоренное прохождение всех стадий вегетации и запасание питательных веществ на зимний период.

Успешно внедряются технологии получения тепловой энергии за счет фазовых переходов льдистых грунтов в зимний период. Применение «грунтовых» тепловых насосов приводит к охлаждению грунта. В условиях криолитозоны эта технология выполняет две функции: укрепления (за-

мораживания) грунта основания фундамента сооружения и одновременного его теплоснабжения.

Человек не только приспособился к холоду, но защищает и использует мерзлоту. Разработаны сверхрентабельные технологии использования холодового ресурса многолетнемерзлых пород и зимнего холода для долговременного хранения стратегических запасов семян растений, фуража, продовольствия. Создаются криохранилища нефти и нефтепродуктов, природного газа в виде сверхнасыщенных газогидратов. Развиваются отрасли животноводства, основанные на разведении холодаадаптированных животных (северный олень, якутская лошадь и якутская корова) и создании новых, адаптированных к холоду, пород сельскохозяйственных животных (овцеводство и др.). Внедрены такие методы защиты мерзлоты, как ускоренное восстановление после лесных пожаров, вырубок леса, рекультивация земель, защита мерзлоты под зданиями и сооружениями.

Холод мало изучен, при этом его влияние – не только в последствиях глобальных похолоданий на Земле, он распространен в холодной Вселенной. Человек на Севере не планирует бороться с природой, с холодом, а стремится жить с ней в состоянии «динамического равновесия». Эволю-

ция цивилизационной деятельности в условиях криолитозоны должна быть направлена на разработку природоподобных технологий для практического использования холодового ресурса для осуществления наиболее эффективной и устойчивой экономической деятельности. Публикация на страницах журнала результатов научных исследований по изучению арктических и субарктических областей способствует расширению знаний о природном феномене – холоде.

В 2022 г. Министерством науки и высшего образования РФ проведена большая работа по совершенствованию российских баз данных научных журналов, введению категорирования. Открывая 28-й год издания журнала, мы должны отметить, что журнал «Природные ресурсы Арктики и Субарктики» получил высокую оценку. Включение журнала в престижные российские базы способствует повышению статуса журнала, выполнению его основных функций.

Уважаемые авторы, рецензенты, члены редколлегии! Поздравляю вас с признанием нашего общего труда, желаю вам крепкого здоровья, дальнейших творческих успехов и достижения поставленных целей!

*Главный редактор,
Президент Академии наук
Республики Саха (Якутия),
член-корреспондент РАН
Л. Н. Владимиров*

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Геология и полезные ископаемые

УДК 552.323.6:553(576.56)

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-9-26>

Оригинальная статья

Структурно-вещественные неоднородности кимберлитов как отражение особенностей их петрогенеза

В. А. Минин^{1,✉}, А. В. Толстов², М. В. Мальцев³

¹Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

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

³Вилуйская ГРЭ, АК «АЛРОСА» (ПАО), г. Мирный, Российская Федерация

✉ minin@igm.nsc.ru

Аннотация

Приведены новые данные по геологическому строению и петрохимическим характеристикам первой кимберлитовой трубки в Сюльдюкарском кимберлитовом поле и ее позиции в Ыгыаттинском алмазоносном районе. Впервые выполнена петрографическая идентификация петрохимических разновидностей кимберлитов в данном районе. Изучены с использованием современного аппаратного комплекса составы породообразующих и акцессорных минералов кимберлитов. Показано, что направленное изменение структурно-вещественных характеристик кимберлитов от периферических к центральным частям в протяженных вертикальных телах типа Сюльдюкарской трубки выражено в смене кальциевых кимберлитов магниевыми кимберлитами. Отмечается, что Mg-кимберлиты характеризуются наиболее крупными кристаллами алмаза, гранатов и ильменитов, повышенными содержаниями магния и ряда других компонентов. Все эти изменения в кимберлитах обусловлены процессами дифференциации течения. Приведенные сведения позволяют применять полученные петрологические результаты по кимберлитам Сюльдюкарской трубки в качестве поисковых критериев прогнозирования и выявления новых кимберлитовых тел в Ыгыаттинском алмазоносном районе.

Ключевые слова: Якутская алмазоносная провинция, Сюльдюкарская трубка, кимберлит, петрохимия, петрология, дифференциация течения

Финансирование. Работа выполнена по государственному заданию ИГАБМ СО РАН и ИГМ СО РАН. Финансирующая организация: Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Для цитирования: Минин В.А., Толстов А.В., Мальцев М.В. Структурно-вещественные неоднородности кимберлитов как отражение особенностей их петрогенеза. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(1):9–26. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-9-26>

Original article

Heterogeneity in kimberlite structure and composition as a reflection of its petrogenesis peculiarities

V. A. Minin^{1,✉}, A. V. Tolstov², M. V. Maltsev³

¹Sobolev Institute of Geology and Mineralogy,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

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

³Vilyuiskaya GRE, AK "ALROSA" (PJSC), Mirny, Russian Federation

✉ minin@igm.nsc.ru

Abstract

New data on the geological structure and petrochemical characteristics of the first kimberlite pipe in the Syuldyukar kimberlite field and its position in the Ygyatta diamond-bearing area are presented. The petrographic identification of

the petrochemical varieties of kimberlites in this area was performed for the first time. The compositions of the rock-forming and accessory minerals of kimberlites were studied using a modern hardware complex. The results showed that the directed change in the structural and material characteristics of kimberlites from peripheral to central parts in extended vertical bodies of the Syuldyukar tube type is expressed in the replacement of calcium kimberlites by magnesium kimberlites. Mg-kimberlites are characterized by the largest crystals of diamond, garnets, and ilmenites, high concentrations of magnesium, and a number of other components. All of these changes in kimberlites are caused by flow differentiation. This information allowed us to apply the obtained petrological results to the kimberlites of the Syuldyukar tube as search criteria for forecasting and identifying new kimberlite bodies in the Ygyatta diamond-bearing area.

Keywords: Yakut diamond-bearing province, Syuldyukar pipe, kimberlite, petrochemistry, petrology, flow differentiation

Funding. This study was carried out within the framework of the state assignment to the DPMGI SB RAS and IGM SB RAS and financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. Analytical work was conducted at the “Analytical Center for Multi-Elemental and Isotope Research SB RAS”.

For citation: Minin V.A., Tolstov A.V., Maltsev M.V. Heterogeneity in kimberlite structure and composition as a reflection of its petrogenesis peculiarities. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(1):9–26. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-9-26>

Введение

При исследовании особенностей формирования массивов интрузивных горных пород важнейшей задачей является получение представления об их внутренней структуре. Обычно использующийся для этих целей метод картирования состоит в экстраполяции границ неоднородностей вниз до разумной глубины и получении объемной модели тела. Информативными признаками неоднородности, в данном контексте, служат поверхности раздела, отделяющие один этап интрузивного процесса от другого, следы расслоенности и зональности, выражающиеся в смене минеральных парагенезисов, в изменении текстурно-структурного облика породы, составов минералов, состава породы в целом, и многие другие. Знание о распределении неоднородностей, в свою очередь, позволяет обоснованно выбирать вероятную петрологическую модель процесса, ответственного за их возникновение, а также вскрывать причины концентрирования-рассеивания рудного компонента.

При исследовании кимберлитовых диатрем эта простая методическая схема дает сбой, поскольку процессы серпентинизации, практически повсеместно фиксируемые в кимберлитовых телах, ограничивают возможности выявления минералогической зональности. Эти же процессы затрудняют фиксацию интрузивных контактов между продуктами различных фаз внедрения, если таковые имеются. Петрографические характеристики кимберлитов нередко разительно меняются, в том числе и вследствие серпентинизации, в пределах одного штуфного образца. Границы, проведенные между визуально выявленными разновидностями пород, по этим причинам не могут экстраполироваться

на глубину и, соответственно, не могут нести информацию о структуре кимберлитового тела. Единственным доступным способом, позволяющим количественно оценить возможные неоднородности в объеме кимберлитового тела, по мнению авторов, является системное изучение вариаций химического состава всех слагающих его пород.

Ниже представлены результаты анализа вещественного состава кимберлитов недавно открытой Сюльдюкарской трубки Якутской алмазоносной провинции [8]. Пробы для исследования отбирались по разрезам разведочных скважин через 1–5 м, включая 10-метровые интервалы, каменный материал которых использовался впоследствии для определения алмазоносности кимберлита. В результате были охарактеризованы все гипсометрические уровни трубки, что позволило расшифровать ее внутреннюю структуру и оценить возможные механизмы дифференциации кимберлитового вещества.

Геологическое положение и строение Сюльдюкарской трубки

Сюльдюкарская трубка представляет собой первую находку кимберлитов в среднем сегменте протяженной Вилуйско-Мархинской алмазоносной зоны, в южной части которой локализовано Мирнинское кимберлитовое поле, а в северной – Накынское (рис. 1). Трубка располагается в левом борту р. Сюльдюкар в верховьях ее левого притока р. Сян. Кимберлиты прорывают известняки и мергели раннего кембрия и с размывом перекрываются средне-позднекарбовыми и пермскими полимиктовыми песчаниками и алевролитами.

Сюльдюкарская кимберлитовая диатрема состоит из двух сближенных уплощенных в ши-

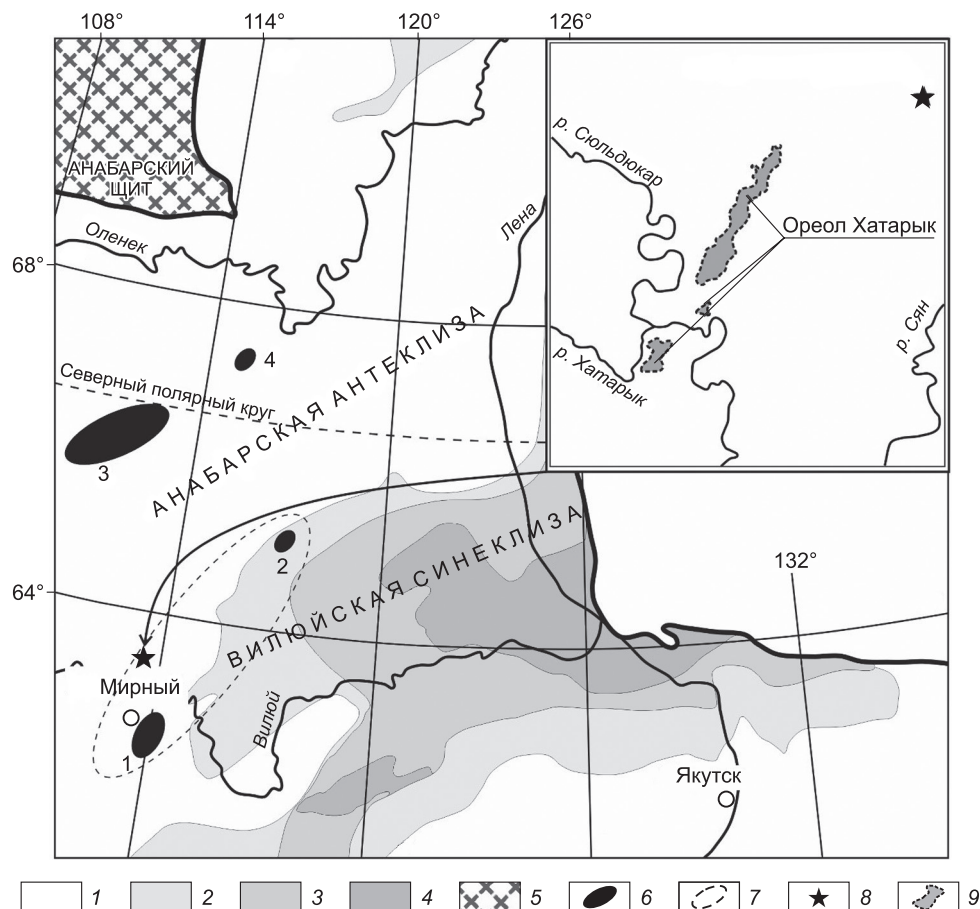


Рис. 1. Схема расположения продуктивных кимберлитовых полей Якутской провинции относительно рельефа кристаллического фундамента восточной части Сибирской платформы (по материалам [14]):

1–4 – изогипсы фундамента 0÷–3, –3÷–6, –6÷–10 и –10÷–14 км соответственно; 5 – область выхода кристаллического фундамента на дневную поверхность; 6 – кимберлитовые поля (1 – Мирнинское, 2 – Накынское, 3 – Далдино-Алакитское, 4 – Верхне-Мунское); 7 – Вилуйско-Мархинская алмазоносная зона; 8 – Сюльдюкарская трубка; 9 – Хатырыкский ореол

Fig. 1. The layout of productive kimberlite fields of the Yakutian province relative to the relief of the crystalline basement of the eastern part of the Siberian platform (based on materials [14]):

1–4 – foundation isohypses 0÷–3, –3÷–6, –6÷–10 and –10÷–14 km, respectively; 5 – the area of the crystalline basement exit to the daytime surface; 6 – kimberlite fields (1 – Mirninskoye, 2 – Nakynskoye, 3 – Daldino-Alakitskoye, 4 – Verkhne-Munskoye); 7 – Vilyuysko-Markhinskaya diamond-bearing zone; 8 – Syuldyukar pipe; 9 – Khatyryk aureole

ротном направлении тел (рис. 2). По аналогии с современными вулканами, можно предполагать, что она сформировалась в результате внедрения двух порций кимберлитового расплава, окончательная кристаллизация которых произошла в гипабиссальных условиях на глубинах от 300 до 500 м [1]. Тектоническая трещина, по которой внедрялись расплавы, круто (75–80°) погружается на север. В эндоконтакте кимберлитов не фиксируется изменений их структурного облика. Во вмещающих карбонатных породах (зона экзоконтакта) встречаются редкие и маломощные инъекции (апофизы) кимберлитового материала. В радиусе 10–20 м от трубки в карбонатных по-

родах фиксируются маломощные (до 3 см) и непротяженные прожилки гипс-кальцит-ангидристового состава.

Петрохимическая характеристика кимберлитов

Анализ распределения содержаний главных оксидов по разрезам буровых скважин показал, что составы кимберлитов трубки подвержены весьма значительным вариациям. На расстоянии первых метров концентрации отдельных компонентов отклоняются на 20–30 % от средних значений в обе стороны. При таком разбросе значений исследование основных тенденций изменения со-

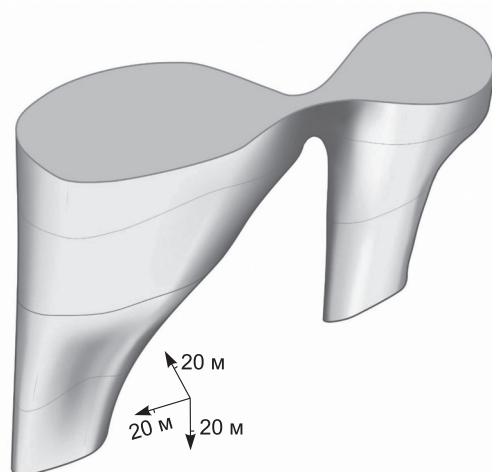


Рис. 2. Объемная модель Сюльдюкарской трубки, построенная по данным разведочного бурения

Fig. 2. 3-D model of the Syuldyukar pipe, constructed according to the data of exploration drilling

става кимберлитов в масштабе трубки возможно только методом группировки данных, в частности, выделением квазиоднородных по своему химическому составу групп пород. Используя для этого метод кластерного анализа (К-метод, программный пакет «Statistica»), установили, что в породах трубки отчетливо обособливаются две дискретные совокупности – Са-кимберлиты и Mg-кимберлиты (табл. 1). Нанесение полученных результатов на разрезы скважин показало, что каждый кластер занимает вполне определенное место в пространстве – Mg-кимберлиты приурочены к осевым частям тел, кальциевые, облекая магниевые, формируют их внешнюю «оболочку» (рис. 3). Сюльдюкарская трубка, таким образом, представляет собой комбинацию двух дифференцированных тел, в которых кимберлиты центральных частей обогащены магниевым компонентом,

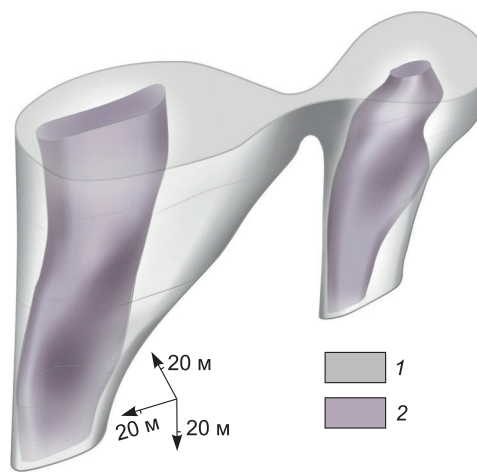


Рис. 3. Внутренняя структура Сюльдюкарской трубки, построенная по петрохимическим данным:

1 – кимберлиты Са-кластера, 2 – кимберлиты Mg-кластера

Fig. 3. The internal structure of the Syuldyukar pipe, constructed according to petrochemical data:

1 – kimberlites of the Ca cluster, 2 – kimberlites of the Mg cluster

а периферических – кальциевым. Помимо Са и Mg кимберлиты центральных и периферических частей тел различаются по содержаниям Ti, Al и K (табл. 2).

Описанный феномен не является уникальным для Якутской кимберлитовой провинции. Направленные (от периферии к центру) увеличение содержаний MgO и, соответственно, снижение СаО установлены в кимберлитах Ботуобинской трубки [9], в кимберлитах обоих тел трубки Удачная, трубки Новинка [12].

Появление такого рода вещественной неоднородности в протяженных трубообразных телах возможно в двух случаях – либо в результате нескольких последовательных внедрений из про-

Таблица 1

Средние содержания главных оксидов в кластерных группах кимберлитов Сюльдюкарской трубки

Table 1

Average contents of the main oxides in the kimberlite cluster groups of the Syuldyukar pipe

Кластер	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI
1	24,58	1,08	2,36	5,07	0,07	22,54	19,07	0,02	0,39	0,56	23,29
2	16,07	1,71	3,30	5,14	0,11	12,15	30,23	0,03	0,93	0,66	28,46

Примечание: 1 – магниевый кластер (n = 42), 2 – кальциевый кластер (n = 56). Анализы выполнялись ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН.

Note: 1 – magnesium cluster kimberlites (n = 42), 2 – calcium cluster kimberlites (n = 56). The analyses were carried out by Analytical Center for Multi-Elemental and Isotope Research SB RAS.

**Средние составы петрохимических разновидностей кимберлитов
Западного и Восточного тел Сюльдюкарской трубки**

Table 2

**Average compositions of petrochemical varieties of kimberlites
of the Western and Eastern bodies of the Syuldyukar pipe**

Оксид	Западное тело			Восточное тело		
	Са-кимб.	Mg-кимб.	Среднее по телу	Са-кимб.	Mg-кимб.	Среднее по телу
SiO ₂	15,11	23,18	18,09	18,69	26,45	22,92
TiO ₂	1,72	1,22	1,54	1,66	0,90	1,24
Al ₂ O ₃	3,22	2,34	2,90	3,50	2,38	2,89
Fe ₂ O ₃	5,19	5,22	5,20	5,00	4,88	4,94
MnO	0,11	0,08	0,10	0,09	0,06	0,07
MgO	11,03	20,45	14,51	15,22	25,33	20,74
CaO	31,87	21,26	27,95	25,73	16,14	20,50
Na ₂ O	0,04	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02
K ₂ O	0,84	0,42	0,68	1,17	0,36	0,73
P ₂ O ₅	0,67	0,62	0,65	0,64	0,48	0,55
LOI	28,88	24,16	27,14	27,31	22,13	24,48
CaO/MgO	2,9	1,0	1,9	1,7	0,6	1,0
Количество анализов	41	24	65	15	18	33

межуточной камеры, либо в процессе дифференциации одной порции расплава в статических и/или динамических условиях [4, 10]. Отсутствие интрузивных контактов и постепенные взаимопереходы между породными разновидностями в исследуемых телах позволяют отдать предпочтение второму варианту. Реалистичность модели кристаллизационной дифференциации подтверждается и расчетными методами, согласно которым состав Mg-кимберлита может быть превращен в состав Са-кимберлита простым удалением 30–32 % оливина (рис. 4).

Петрографическая идентификация петрохимических данных

Непременной составной частью кимберлитов Сюльдюкарской трубки, как, впрочем, и большинства кимберлитов Якутской провинции, являются обломки различных пород, захваченные проторасплавом в процессе его движения к поверхности и консолидации. В подавляющем большинстве случаев это фрагменты вмещающих трубку кембрийских пород, представленные известняками, доломитами, мергелями. В 10 образцах из 140 обнаружены единичные обломки долеритов. Ксенолиты ультраосновных пород в доступной для исследо-

вания коллекции отсутствуют. Размеры ксенолитов карбонатных пород по длинной оси варьируют от 2–3 мм до 5–10 см, в среднем составляя 5–15 мм. Их количество колеблется от 0,1 до 40–50 объемных %. Используя в качестве репера предложенное Клементом и Скиннером [24] значение 15%, мы разделили всю совокупность на кимберлитовые брекчии¹ (>15 % ксенолитов) и собственно кимберлиты (<15 % ксенолитов). Сопоставление полученных результатов с ранее описанными петрохимическими типами кимберлитов показало, что в кимберлитах Са-кластера брекчии составляют 61 % от всей выборки, а в Mg-кластере – 9 %. Таким образом, ксенолиты вмещающих пород преимущественно концентрируются в кимберлитах периферических частей тел.

Рассмотрим структурно-текстурные особенности кимберлитов исходя из их принадлежно-

¹ В классификационных схемах последнего времени [23, 35] предлагается исключить из употребления термин «брекчия» применительно к кимберлитам, заменив его характеристиками, базирующимися на определении размеров и количеств ксенолитов в породе. В контексте данного исследования для более компактного представления материала мы сочли возможным вернуться к термину «кимберлитовая брекчия».

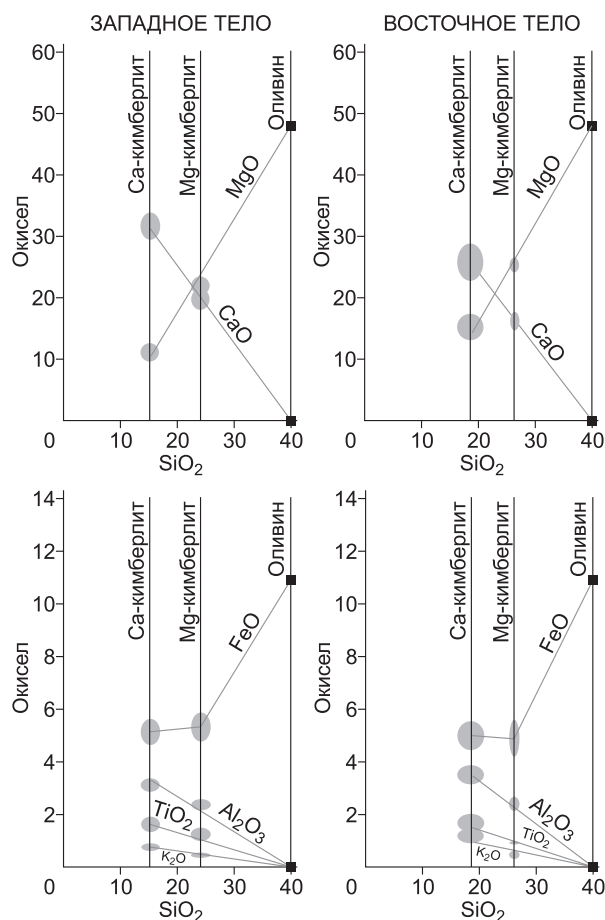


Рис. 4. 95%-е доверительные эллипсы средних составов петрохимических разновидностей кимберлитов Сюльдюкарской трубки и средний состав оливина кимберлитов Якутской провинции. Как видно, фигуративные точки всех компонентов располагаются на прямых линиях, показывая, что образование Mg- и Са-кимберлитов связано главным образом с кристаллизацией оливина. Состав Mg-кимберлита может быть превращен в состав Са- удачением 30–32 % оливина

Fig. 4. 95 % confidence ellipses of average compositions of petrochemical varieties of kimberlites of the Syuldyukar pipe and the average composition of olivine of kimberlites of the Yakutian province. The figurative points of all components are located on straight lines, showing that the formation of Mg- and Ca-kimberlites is mainly due to the crystallization of olivine. The composition of Ca-kimberlite can be converted into a composition of Mg-kimberlite by removing 30–32 % olivine

сти к выделившимся петрохимическим кластерным группам.

Кимберлиты кальциевого кластера. характеризуются однородным мелко-среднезернистым сложением и отчетливой порфировой структурой. Порфировые вкрапленники, количество которых составляет ~15–25 %, представлены (в порядке убывания) кальцитом, оливином, флогопи-

том, ильменитом. Оливин полностью замещен серпентиновым агрегатом. Размер вкрапленников не превышает 1,2–1,5 мм, максимальное их количество попадает в интервал 0,3–0,6 мм. В зависимости от количественных соотношений оливина и кальцита породы кластера варьируют от кальцитовых до кальцит-оливиновых (кальцит/оливин ~4/1–3/2) разностей. Кимберлиты характеризуются равномерным распределением вкрапленников, формирующих порфировую, иногда с элементами гломеропорфировой, структуру породы в целом (рис. 5, а). Основная масса состоит из ориентированных в одном направлении лейстовидных кристаллов кальцита, промежутки между которыми выполняет микрокристаллический кальцит-флогопит-рутил-апатитовый агрегат (рис. 5, б). С увеличением количества оливина трахитоидные структуры основной массы сменяются массивными, сформированными кристаллами кальцита и оливина, погруженными в серпентин-кальцит-флогопитовый базис. Во всех без исключения кимберлитах присутствуют пиропы, альмандины, шпинели, в 14 % образцов обнаружены алмазы.

Перечисленные петрографические характеристики в равной степени проявлены как в кимберлитах, лишенных ксенолитов, так и в кимберлитовых брекчиях.

Кимберлиты магниевого кластера – это массивного сложения порфировые породы, количество вкрапленников в которых составляет 20–35 %. Вкрапленники представлены оливином, ильменитом, флогопитом, кальцитом (рис. 6, а). Оливин полностью замещен серпентиновым или кальцит-серпентиновым минеральными агрегатами. Размер вкрапленников в среднем составляет 0,5–1,2 мм, при разбросе значений от 0,2 до 5–6 мм. Основная (связующая) масса сложена кристаллами оливина, флогопита и кальцита, погруженными в скрытокристаллическую серпентиновую массу с апатитом, ильменитом, рутилом (рис. 6, б). В Mg-кимберлитах, так же, как и в Са-кимберлитах, постоянно присутствуют пиропы, альмандины и шпинели, алмаз встречается чаще – в 18 % образцов.

Структурно-текстурные характеристики кимберлитов Mg-кластера, как видно, мало чем отличаются от таковых кимберлитов Са-кластера. Различия между этими двумя типами пород касаются только количественных соотношений кальцита и оливина. В породах Са-кластера кальцит составляет более 50 об. %, в кимберлитах Mg-кла-

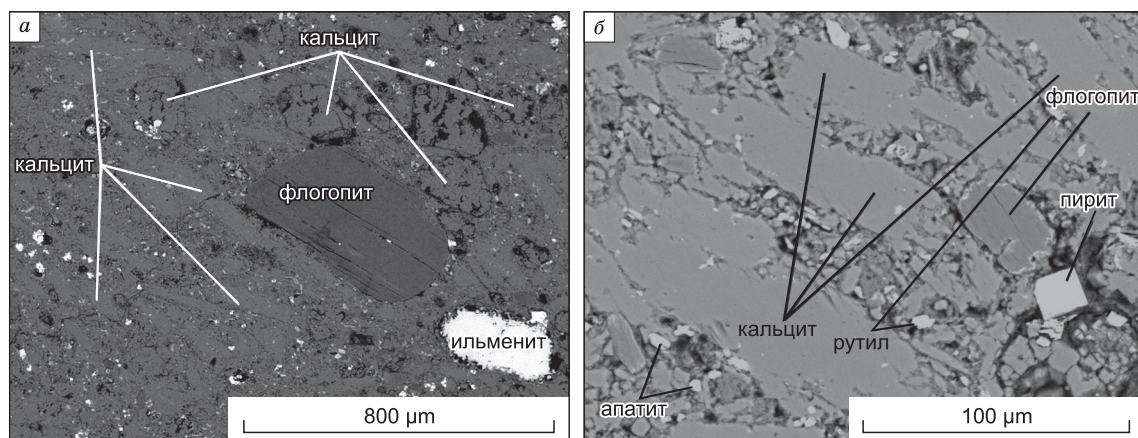


Рис. 5. Электронное изображение (BSE) части полированной поверхности Са-кимберлита Сюльдюкарской трубки (а). Порфировые вкрапленники представлены округлыми изометричными либо вытянутыми лейстовидными кристаллами кальцита, таблитчатыми кристаллами флогопита, эллипсовидными кристаллами ильменита. В правом верхнем углу снимка видно, что порфировые вкрапленники образуют скопления (элементы гломеропорфировой структуры). Основная масса сложена субпараллельно ориентированными лейстовидными кристаллами кальцита, промежутки между которыми заполнены скрытокристаллическим кальцит-флогопитовым агрегатом. В основной массе и во вкрапленниках флогопит хлоритизирован либо полностью замещен минералами группы хлоритов. Мелкие яркие кристаллы основной массы представлены (по мере увеличения яркости) рутилом, апатитом, пиритом. Увеличенный фрагмент основной массы кальцитового кимберлита (б)

Fig. 5. a) Backscattered-electron (BSE) imaging of a part of the polished surface of the Ca-kimberlite of the Syuldukar pipe. Porphyry phenocrysts are represented by rounded isometric or elongated leystoid calcite crystals, tabular phlogopite crystals, ellipsoid ilmenite crystals. In the upper right corner of the image, porphyry phenocrysts form clusters (elements of the glomeroporphyre structure). The main mass is composed of subparallel-oriented leystoid calcite crystals, the gaps between which are filled with a cryptocrystalline calcite-phlogopite aggregate. In the main mass and in the phenocrysts, phlogopite is chloritized, or completely replaced by minerals of the chlorite group. Small bright crystals of the main mass are represented (as the brightness increases) by rutile, apatite, pyrite. **б)** An enlarged fragment of the main mass of calcite kimberlite

стера оливин преобладает над кальцитом, в них, соответственно, повышены содержание оливинных порфировых вкрапленников и их размер. Особенности минерального состава кимберлитов, а именно соотношение в них оливина и кальцита, таким образом, полностью коррелируют их химическому составу.

Составы минералов

Составы минералов исследовались на рентгеноспектральном микроанализаторе «Camebax-Micro» в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН по методике, разработанной в Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева [6]. Пределы обнаружения большинства элементов при рядовом анализе составляют порядка 0,03 % [5]. Прецизионные измерения содержаний Na и Ni [7, 36] повышают пределы обнаружения этих элементов до 0,01 и 0,005 % соответственно.

Пиропы образуют округлой формы зерна с неровной, кавернозной, матовой поверхностью малинового с различными оттенками цвета. Их размеры колеблются от 0,15 до 5,0 мм, в боль-

шинстве случаев составляя 0,3–1,0 мм. Нередко на пиробах фиксируется келифитовая оболочка, толщина которой может достигать 1–2 мм. Содержания пиропов в породах варьируют в пределах 100–200 г/т.

Сопоставление составов пиропов из кимберлитов магниевого и кальциевого кластеров показывает, что пределы варьирования концентраций практически всех оксидов в них перекрываются (табл. 3). Исключением является только титан – повышенные концентрации этого элемента присущи преимущественно пиропам кимберлитов Са-кластера. При этом пиропы с малыми и высокими содержаниями титана не образуют единого изоморфного ряда, формируя в координатах TiO_2 – Na_2O обособленные, не пересекающиеся друг с другом кристаллизационные тренды (рис. 7). Используя наметившийся разрыв в распределении содержаний TiO_2 , мы разделили все проанализированные пиропы кимберлитов Са-кластера на высоко- и низкотитанистые (табл. 4). Оказалось, что обе разновидности пиропов более чем в трети случаев находятся в породе в совместной ассоциации, образуя само-

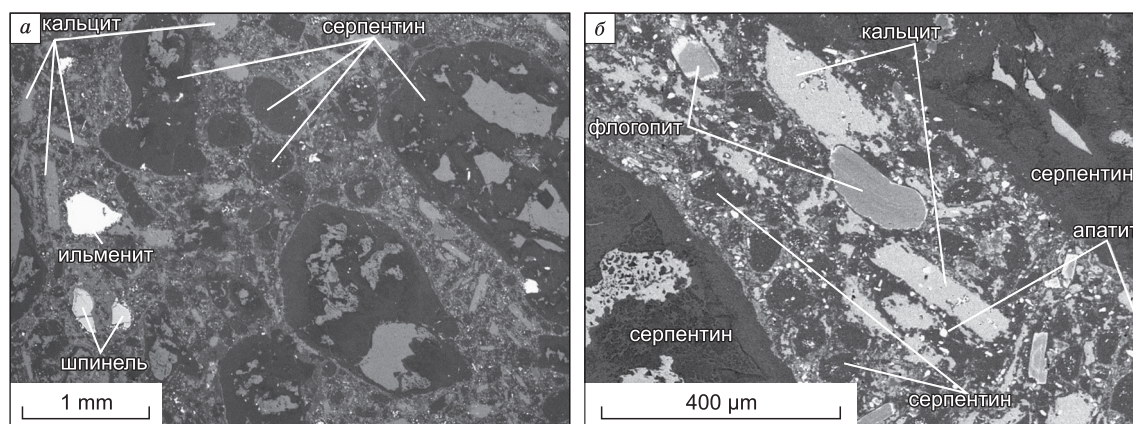


Рис. 6. Электронное изображение (BSE) части полированной поверхности Mg-кимберлита Сюльдюкарской трубки (а). Вкрапления представлены оливином, полностью замещенным серпентиновым или кальцит-серпентиновым минеральными агрегатами, ильменитом, флогопитом, кальцитом. Каркас связующей массы составляют удлиненные кристаллы кальцита, погруженные в скрытокристаллический серпентиновый, иногда с примесью хлорита и карбоната, базис, цементирующий мелкие кристаллы апатита, ильменита, шпинели, рутила. Увеличенный фрагмент основной массы Mg-кимберлита (б)

Fig. 6. a) Backscattered-electron (BSE) imaging of a part of the polished surface of the Mg-kimberlite of the Syuldyukar pipe. The phenocrysts are represented by olivine, completely replaced by serpentine or calcite-serpentine mineral aggregates, ilmenite, phlogopite, and calcite. The framework of the cohesive mass is composed of elongated calcite crystals immersed in latently crystalline serpentine, sometimes with an admixture of chlorite and carbonate, base, cementing small crystals of apatite, ilmenite, spinel, and rutile. **б)** Enlarged fragment of the main mass of Mg-kimberlite

стоятельные кристаллы без признаков реакционного либо эволюционного взаимодействия. Коноды сосуществующих низко- и высокотитанистых пиропов образуют пучок субпараллельных линий (см.рис. 7), фиксируя родство этих двух минеральных видов в рамках единого кристаллизационного процесса.

В кимберлитах Mg-кластера пиропы с повышенными концентрациями титана встречаются гораздо реже, чем в породах Ca-кластера. Так, в выборке из 138 кристаллов в разряд высокотитанистых попал только один пироп из кимберлитов Восточного тела (см. табл. 4).

Альмандины встречаются в кимберлитах трубки Сюльдюкарская в примерно равных количествах с пиропом (~50–200 г/т), образуя округлые без явных следов дробления кристаллы с кавер-

нозной поверхностью и оранжевой с красновато-коричневыми оттенками окраской. Сопоставление составов альмандинов с составами кимберлитов, из которых они были извлечены, показало, что минералы магниевого петрохимического кластера содержат повышенные количества MgO и, соответственно, пониженные FeO в сравнении с таковыми кальциевого кластера (табл. 5).

Ильмениты являются наиболее распространенными минералами тяжелой фракции кимберлитов, слагая от 0,2 до 1,0 % объема породы. Они образуют округлые с первичной микропирамидальной поверхностью кристаллы размером от долей миллиметра до 1–3 мм. Их отличительной особенностью, как и пиропов, является полимодальный характер распределения концен-

Таблица 3

Средние составы пиропов кимберлитов кальциевого ($n = 215$) и магниевого ($n = 138$) кластеров Сюльдюкарской трубки

Table 3

Average compositions of pyrope kimberlites from the calcium ($n = 215$) and magnesium ($n = 138$) clusters of the Syuldyukar pipe

Кластер	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	FeO	Total
Ca	41,61	0,25	19,40	5,03	0,42	19,45	5,35	0,04	0,00	8,24	99,80
Mg	41,56	0,09	19,77	4,84	0,50	19,07	5,55	0,03	0,00	8,13	99,54

Т а б л и ц а 4

Средние составы низко- и высокотитанистых пиропов кимберлитов Сюльдюкарской трубки, находящихся в совместной ассоциации

Table 4

Average compositions of low- and high-titanium pyrope of Syuldyukar pipe kimberlites, in joint association

Оксид	Номер образца																	
	Са-кластер, Западное тело									Са-кластер, Восточное тело								
	16/24-70	16/24-93	20/22-32.2	20/22-130	20/22-135	28/22-101	32/22-58.2	32/24-180	Мг-кластер, Восточное тело	28/22-115.5								
SiO ₂	41,43	42,10	41,41	42,51	42,38	41,94	41,39	41,71	41,86	42,28	41,60	42,24	41,47	42,28	41,96	42,23	41,53	41,39
TiO ₂	0,07	0,72	0,06	0,73	0,17	0,49	0,07	0,63	0,17	1,03	0,10	0,69	0,17	0,59	0,18	0,35	0,09	0,40
Al ₂ O ₃	17,77	19,67	19,32	19,26	20,62	18,93	16,98	17,88	19,45	17,68	19,10	19,90	18,90	18,98	20,26	20,03	19,17	18,66
Cr ₂ O ₃	6,75	2,52	5,52	3,27	3,47	5,02	8,38	5,92	5,38	5,40	5,89	3,53	6,06	4,40	4,25	4,37	5,66	5,82
MnO	0,37	0,30	0,52	0,25	0,35	0,37	0,47	0,36	0,53	0,31	0,42	0,27	0,44	0,23	0,50	0,45	0,50	0,49
MgO	19,85	20,58	18,73	21,38	21,15	20,40	18,74	19,69	18,66	20,34	18,65	20,14	18,54	20,80	19,50	20,41	19,19	19,29
CaO	5,62	4,79	5,66	4,67	4,65	5,01	6,22	5,73	5,65	5,28	5,71	5,34	5,70	4,96	5,10	4,03	5,36	5,02
Na ₂ O	0,02	0,05	0,03	0,08	0,06	0,06	0,04	0,06	0,07	0,11	0,03	0,09	0,04	0,09	0,03	0,08	0,03	0,07
K ₂ O	0,00	0,00	0,00	0,00	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.		
FeO	7,37	8,65	8,44	7,42	7,15	7,53	7,69	8,06	8,02	7,70	8,71	7,91	8,79	7,70	8,44	8,40	7,98	8,24
Total	99,25	99,37	99,70	99,56	99,99	99,76	99,98	100,02	99,79	100,12	100,20	100,09	100,11	100,02	100,23	100,34	99,50	99,38
Количество анализов	5	1	5	1	2	6	3	13	1	1	33	2	17	4	3	1	14	1

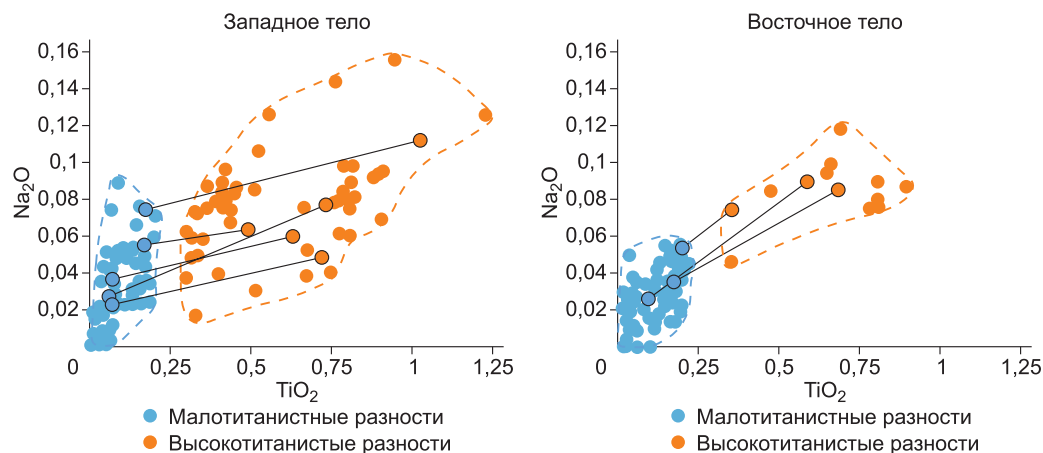


Рис. 7. Вариации содержаний TiO_2 и Na_2O (мас.%) в пиропе кимберлитов Са-кластера Сюльдюкарской трубки. Отчетливо видны разрыв в распределении содержаний титана и разная направленность кристаллизационных трендов низко- и высокотитанистых разностей. В Западном теле высокотитанистые пиропы составляют 42 % от всей выброски, в Восточном – 12 %. Коноды находящихся в совместной ассоциации низко- и высокотитанистых пиропов построены по данным табл. 4

Fig. 7. Variations in TiO_2 and Na_2O contents (wt.%) in pyrope kimberlites of the Ca-cluster of the Syuldyukar pipe. A gap in the distribution of titanium contents and different direction of crystallization trends of low- and high-titanium varieties are clearly seen. In the western body, high-titanium pyropes account for 42 % of the entire outburst, and in the eastern body, 12 %. The conodas of low- and high-titanium pyropes in the joint association are plotted according to Table 4

траций оксида титана с отчетливым минимумом, приходящимся на значения 42 % TiO_2 (рис. 8).

Такой концентрационный трог можно с большой долей вероятности интерпретировать как границу, отделяющую один минеральный вид от другого. Физические свойства ильменитов Сюльдюкарской трубки подтверждают сказанное – минералы с концентрациями TiO_2 более 42 % парамагнитны, а разности с TiO_2 менее 42 % ферримагнитны. В последних содержания Fe_2O_3 , оцененные по данным стехиометрических пересчетов, не опускаются ниже 23 %, что позволяет уверенно классифицировать их как гемоильмениты. Гемоильмениты всегда находятся в совместной ассоциации с ильменитами (табл. 6). Следы реакционного взаимодействия между этими минеральными фазами не обнаружены. На

вариационных диаграммах коноды в парах гемоильменит–ильменит образуют, как и в случае с пиропами, пучок субпараллельных линий (рис. 9). Ранжирование составов минералов по породным петрохимическим кластерам показывает, что гемоильменит-ильменитовая ассоциация в Mg-кимберлитах смещается в сравнении с Са-кимберлитами в область составов с повышенными количествами Ti, Mg и, соответственно, пониженными Fe^{3+} (см. рис. 9).

Алмазы. Содержания алмазов в кимберлитах Сюльдюкарской трубки определялись специалистами Ботубинской ГРЭ в 6–15-метровых интервалах керна разведочных скважин. Вес отдельных проб кимберлита варьировал от 20 до 200 кг, суммарный вес проанализированных проб составил 21 091 кг. Сгруппировав результаты

Таблица 5

Средние составы алмандинов кимберлитов кальциевого ($n = 193$) и магниевого ($n = 59$) кластеров Сюльдюкарской трубки

Table 5

Average compositions of almandines kimberlites of the calcium ($n = 193$) and magnesium ($n = 59$) clusters of the Syuldyukar pipe

Кластер	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Cr_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	FeO	Total
Ca	39,26	0,15	21,46	0,10	0,60	9,05	6,70	0,02	0,00	22,74	100,09
Mg	39,81	0,14	21,70	0,09	0,58	10,58	6,70	0,02	0,00	20,38	99,99

определения содержаний алмазов по петрохимическим типам кимберлитов, мы вычислили для каждого тела среднюю алмазоносность и средние содержания кристаллов алмаза в 1 т породы (табл. 7). Полученный цифровой материал показал, что:

1. Наиболее высоким продуктивным потенциалом обладают кимберлиты Mg-кластера. Средние содержания алмазов в них составляют 0,43 карат/т в Западном теле и 0,84 карат/т в Восточном. В кимберлитах Са-кластера алмазоносность ниже – 0,14 карат/т в Западном теле и 0,06 карат/т в Восточном.

2. Для Mg-кимберлитов характерны повышенные в сравнении с Са-кимберлитами содержания кристаллов алмаза в 1 т породы. В Западном теле величина этого параметра в кимберлитах Са-кластера равняется 17 шт./т, а в кимберлитах Mg-кластера 28, в Восточном – 3 и 57 шт./т соответственно.

Алмазы Сюльдюкарской трубки характеризуются невысокой степенью сохранности. Около 50 % от их общего количества представляют собой обломки и осколки кристаллов. Среди целых кристаллов до 35 % приходится на ламинарные робододекаэдрониды, октаэдрониды составляют около 15, переходные от октаэдра к ромбододекаэдру кристаллические формы составляют ~25, додекаэдрониды и округлые кристаллы – 15 %. Кристаллы кубического габитуса редки, их количество не превышает 0,1–0,2 % от всей выборки².

Сопоставление морфологических характеристик алмазов Западного и Восточного тел Сюльдюкарской трубки показало наличие существенных различий между ними. В Западном теле максимально представлены ромбододекаэдрониды, в Восточном преобладают кристаллы переходных от октаэдра к ромбододекаэдру форм (рис. 10). Различия между телами, как мы помним, фиксируются и на уровне химических составов слагающих их пород – кимберлиты Западного тела обогащены TiO_2 и CaO , Восточного – MgO и K_2O (см. табл. 3).

Можно, следовательно, утверждать, что морфологические особенности алмазов и их содержания так же, как и вещественные характеристики гранатов, ильменитов, варьируют в достаточно строгом соответствии с колебаниями химического состава вмещающих их кимберлитов.

² Кристалломорфология алмазов (283 шт.) Сюльдюкарской трубки исследовалась специалистами Виллюйской ГРЭ и НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО).

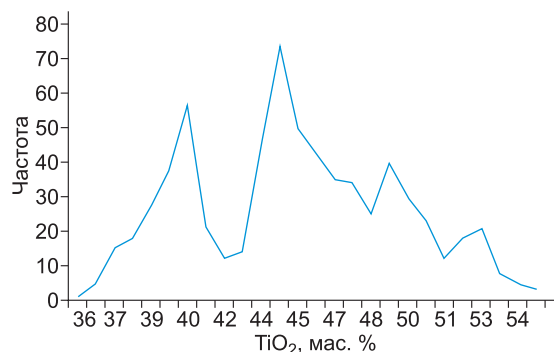


Рис. 8. Распределение частот содержаний TiO_2 в ильменитах кимберлитов Сюльдюкарской трубки ($n = 443$)

Fig. 8. Distribution of frequencies of TiO_2 content in ilmenite kimberlites of the Syuldyukar pipe ($n = 443$)

Обсуждение результатов

Итак, Сюльдюкарская трубка представляет собой комбинацию двух дифференцированных субвертикальных тел, в которых породы центральных частей обогащены магниевым компонентом, а периферических – кальциевым. Петрографически это выражается в постепенной (не интрузивной) смене кальцитовых кимберлитов оливиновыми. Возникновение такой зональности весьма удовлетворительно объясняется фракционированием оливина, удаление которого приводит к накоплению кальциевого и большинства других компонентов в остаточном расплаве (см. рис. 4), но какова причина концентрации оливина в осевой части протяженного вертикального тела?

Сегрегация кристаллов с накоплением кумулятов в сторону от стенок магматического канала может происходить в движущейся магме, содержащей и кристаллические фазы. Возможность такого процесса (дифференциация течения) была теоретически и экспериментально обоснована Бхаттачарджи, Смитом, Неру и Комаром [19–21, 29].

Основными положениями модели дифференциации течения являются:

- твердые частицы в ламинарном потоке мигрируют от стенок в направлении центральной оси канала в случае как вертикального, так и горизонтального его расположения;
- скорость миграции возрастает с увеличением размера и плотности частицы.

Из этих положений вытекает два важных следствия, позволяющих оценивать правомерность применения модели к конкретному геологическому объекту. Первое – в породах, являющихся

Таблица 6
Средние составы гемолменитов (Гем) и ильменитов (Илм) кимберлитов Сюльдюкарской трубки, находящихся в совместной ассоциации

Table 6
Average compositions of haemolmenites (Gem) and ilmenites (Ilm) from kimberlites of the Syuldyukar pipe in joint association

Оксид	Образец																	
	Са-кластер									Мг-кластер								
	Западное тело			Восточное тело			Западное тело			Восточное тело			Западное тело			Восточное тело		
	12/26-180.1	Гем.	Илм.	12/26-204.1	Гем.	Илм.	28/20-112	Гем.	Илм.	28/20-80	Гем.	Илм.	12/22-80.2	Гем.	Илм.	12.24-115	Гем.	Илм.
TiO ₂	40,11	45,94	39,51	46,25	39,31	45,74	45,74	39,60	47,80	47,80	40,42	49,45	49,45	39,52	48,67	39,04	47,60	37,68
Al ₂ O ₃	0,69	0,66	0,68	0,68	0,71	0,58	0,78	0,42	0,73	0,73	0,27	1,63	0,54	0,71	0,63	0,74	0,62	0,71
Cr ₂ O ₃	0,29	0,34	0,24	0,36	0,35	0,78	0,42	0,42	0,42	0,42	0,27	1,63	0,54	0,71	0,63	0,74	0,62	0,71
FeO	50,04	42,87	50,78	42,35	50,88	42,14	50,68	39,18	49,39	36,14	49,39	36,14	49,39	36,14	50,57	38,54	50,32	38,42
MnO	0,17	0,23	0,17	0,24	0,17	0,24	0,16	0,16	0,27	0,27	0,16	0,32	0,32	0,12	0,27	0,14	0,23	0,13
MgO	6,26	8,75	5,97	8,58	6,14	8,47	6,02	9,76	9,76	6,12	6,12	10,94	10,94	5,58	10,18	5,67	9,82	8,36
NiO	0,06	0,10	0,04	0,07	0,09	0,06	0,06	0,06	0,08	0,08	0,06	0,14	0,14	0,04	0,12	0,05	0,12	0,04
V ₂ O ₅	0,40	0,43	0,43	0,47	0,45	0,43	0,44	0,44	0,40	0,40	0,45	0,41	0,41	0,46	0,45	0,45	0,38	0,45
Nb ₂ O ₅	0,20	0,13	0,17	0,12	0,14	0,17	0,19	0,19	0,14	0,14	0,17	0,14	0,14	0,19	0,12	0,18	0,14	0,16
Total	98,22	99,43	98,00	99,12	98,23	98,62	98,27	98,87	97,73	99,71	97,35	99,62	97,13	98,46	96,89	97,96	96,89	97,96
n	10	13	9	9	1	7	11	10	12	3	1	5	11	7	4	11	4	11

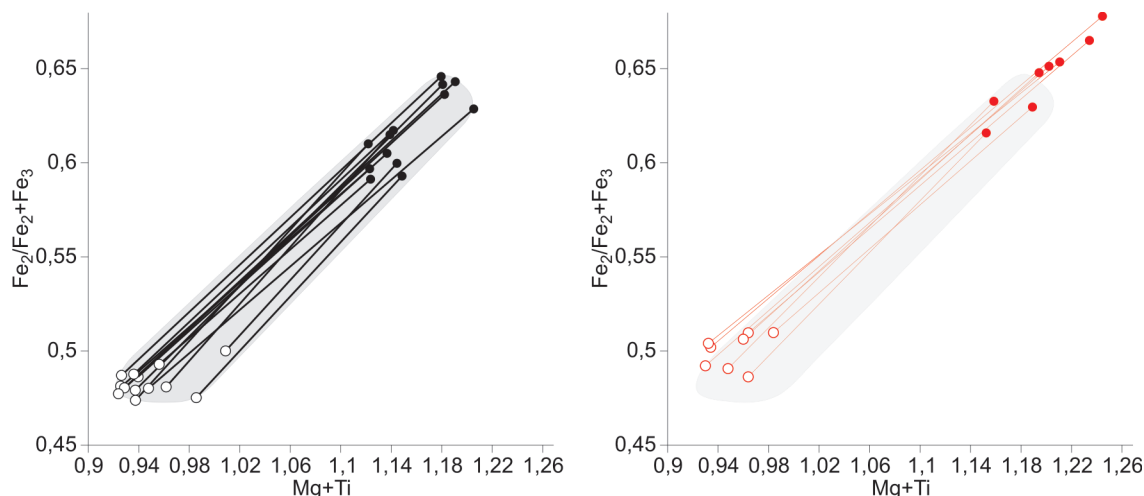


Рис. 9. Вариации $\text{Ti}+\text{Mg}$ и $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{2+}+\text{Fe}^{3+}$ (ат. %) в сосуществующих гемоильменитах (открытые кружки) и ильменитах (залитые кружки) кимберлитов Са-кластера (черный цвет) и Mg-кластера (красный цвет) Сюльдюкарской трубки. Серым цветом залита область составов минералов из пород Са-кластера

Fig. 9. Variations of $\text{Ti}+\text{Mg}$ and $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{2+}+\text{Fe}^{3+}$ (at. %) in coexisting hemoilmenites (open circles) and ilmenites (filled circles) of Ca-cluster kimberlites (black color) and Mg-cluster (red color) of the Suldyukar pipe. The area of mineral composition from the Ca-cluster rocks is shown in gray

ся «продуктами» дифференциации течения, вкрапленники центральных частей тела должны быть более высокотемпературными, нежели вкрапленники периферии. Второе – размер вкрапленников должен коррелировать с химическим составом породы.

В кимберлитах Сюльдюкарской трубки, как мы уже отмечали, оливины полностью замещены минералами группы серпентина (полные псевдоморфозы) и поэтому проверить наличие-отсутствие минералогической зональности по составу этого минерала не представляется возможным. Помимо оливина, стабильной ликвидусной фазой кимберлитового расплава, по экспериментальным

данным, является гранат [11, 13, 16, 27, 32]. Сопоставление пиропов из пород различных частей трубки показало, что в слагающих периферические части тел Са-кимберлитах широко распространены разности, обогащенные Ti, а в Mg-кимберлитах центральных частей тел титанистые пиропы отсутствуют (см. выше). Поскольку вхождение титана в структуру пироба становится менее энергетически выгодным с повышением температуры [2], можно сделать вывод, что пиропы Mg-кимберлитов центральных частей трубки являются более высокотемпературными в сравнении с пиропами периферийных частей. Альмандины кимберлитов центральных частей

Таблица 7

Средние параметры алмазонасности в петрохимических разновидностях кимберлитов Западного и Восточного тел Сюльдюкарской трубки

Table 7

Average parameters of diamondiferousness in petrochemical varieties of kimberlites of the Western and Eastern bodies of the Suldyukar pipe

Параметр	Западное тело			Восточное тело		
	Са-кластер	Mg-кластер	Все тело	Са-кластер	Mg-кластер	Все тело
Содержание алмазов, карат/т	0,14	0,43	0,26	0,06	0,84	0,51
Количество кристаллов в 1 т породы	17	28	18	3	57	38

Примечание. Количество проб – 192 шт., общий вес проб – 21091 кг.

Note. Number of samples – 192 pcs., total weight of samples – 21091 kg.

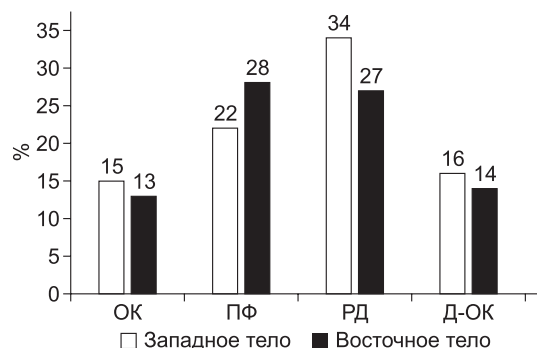


Рис. 10. Габитус кристаллов алмаза, извлеченных из кимберлитов Сюльдюкарской трубки: ОК – октаэдры, ПФ – переходные формы кристаллов от октаэдра к ромбододекаэдру, РД – ромбододекаэдрониды, Д-ОК – додекаэдрониды и округлые алмазы

Fig. 10. Habitus of diamond crystals extracted from kimberlites of the Syuldyukar pipe: ОК – octahedrons, ПФ – transitional crystal forms from octahedron to rhombododecahedron, РД – rhombododecahedrons, Д-ОК – dodecahedrons and rounded diamonds

Западного и Восточного тел обнаруживают повышенные концентрации магния в сравнении с алмадинами периферических частей тел (см. табл. 5), являясь, соответственно, более высокотемпературными образованиями. Для ильменитов устанавливается аналогичная картина (см. рис. 9) – минералы из кимберлитов центральных частей тел более магнезиальны в сравнении с ильменитами пород краевых частей.

Для проверки второго положения рассматриваемой гипотезы мы попытались оценить степень сопряженности между составом породы и размерами кристаллов алмаза. Сгруппировав результаты определения алмазоносности в ядрах разведочных скважин по 50-метровым интервалам, мы вычислили для каждого из них средний вес кристалла алмаза. По этим же интервалам были сгруппированы химические составы кимберлитов. Сопоставление поинтервальных оценок тех и других показало существование между ними устойчивых корреляционных связей. Кристаллы, обладающие повышенным весом, а следовательно, и большим размером, тяготеют к области составов магнезиальных кимберлитов, мелкие кристаллы, напротив, расположились в поле кальциевых кимберлитов (рис. 11). Перенеся полученные данные на объемную модель трубки, мы можем констатировать, что более крупные кристаллы алмаза располагаются в осевых частях тел, а более мелкие – в периферийных.

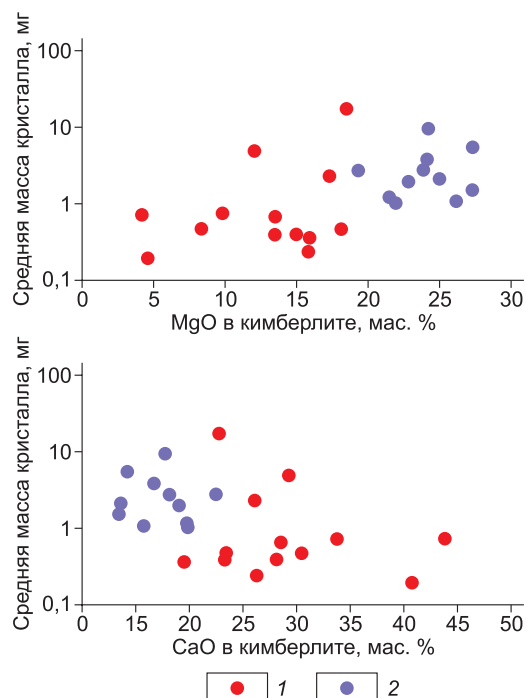


Рис. 11. Зависимость средних весов кристаллов алмаза от концентраций MgO и CaO в кимберлитах Са-кластера (1) и Mg-кластера (2) Сюльдюкарской трубки

Fig. 11. Dependence of the average diamond crystal weights on the concentrations of MgO and CaO in the Ca-cluster kimberlites (1) and the Mg-cluster (2) of the Syuldyukar pipe

Таким образом, направленное от центра к периферии изменение химического состава кимберлитов, составов минералов-вкрапленников, акцессорных минералов, содержаний и морфологии кристаллов алмаза полностью соответствует модели дифференциации течения в ламинарном потоке. Как известно, дифференциация течения является весьма распространенным и, соответственно, детально исследованным механизмом эволюции базит-ультрабазитовых расплавов, формирующих дайковые и пластовые тела [3, 17, 18, 22, 26, 28, 31, 33, 34]. Обнаружение геологических свидетельств проявления данного механизма в кимберлитах позволяет говорить об отсутствии принципиальных различий в реологических свойствах протокимберлитовых и базит-ультрабазитовых расплавов.

Обратимся еще раз к рис. 4. Отчетливо видно, что в парадигму преимущественного удаления из расплава оливина по схеме дифференциации течения не укладывается железо – концентрации этого оксида остаются примерно на одном уровне во всех разновидностях пород. Единст-

венно возможной причиной такого аномального поведения железа относительно остальных компонентов может быть только постмагматическая серпентинизация оливина, в результате которой железо переходит в раствор и получает возможность к перераспределению в пределах остывающего тела [15]. Повсеместно присутствующие в кимберлитах Сюльдюкарской трубки зоны ожелезнения (рис. 12), пленки оксидов железа на минеральных зернах и ксенолитах вмещающих пород подтверждают реалистичность такого сценария. Не обсуждая детали, отметим, что серпентинизация накладывается на первичную магматическую зональность, подчеркивая, наряду с распределением ксенолитов вмещающих пород, отсутствие свидетельств катастрофического освобождения летучих из расплава, переводящего процесс внедрения в взрывную фазу [30].

Выводы

1. Зональная внутренняя структура обоих тел Сюльдюкарской трубки, выражающаяся в постепенной (не интрузивной) смене от периферии к центральным частям Са-кимберлитов Mg-кимберлитами удовлетворительно объясняется фракционированием оливина. Состав Mg-кимберлита может быть превращен в состав Са-кимберлита удалением 30–32 % оливина.

2. Вкрапленники гранатов и ильменитов из Mg-кимберлитов осевых частей тел обнаруживают сдвиг в более высокотемпературную область составов относительно вкрапленников из Са-кимберлитов краевых частей. Наиболее крупные кристаллы алмазов и их (алмазов) основные концентрации приурочены к Mg-кимберлитам осевых частей тел.

3. Сегрегация вкрапленников оливина, а также наиболее высокотемпературных гранатов и ильменитов, в осевых частях тел происходила по механизму дифференциации течения в процессе движения кимберлитового расплава по протяженному трубообразному каналу.

4. Комбинация двух тел в Сюльдюкарской трубке предполагает, как минимум, наличие промежуточной камеры на пути следования кимберлитового расплава в верхние этажи литосферы. Как правило, такие двойные системы (камера-подводящий канал) не возникают в единичном количестве, но входят в состав крупных магматических структур. Следовательно, можно прогнозировать существование нового кимберлитового поля на сопредельных с трубкой территориях.

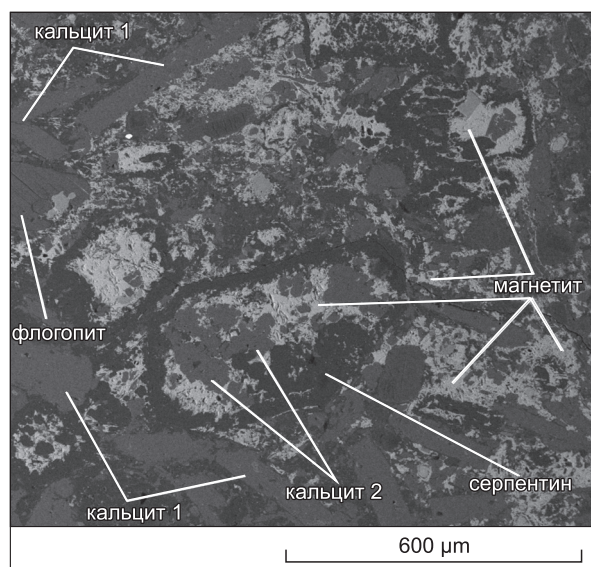


Рис. 12. Электронное изображение (BSE) части полированной поверхности Mg-кимберлита Сюльдюкарской трубки (обр. 12/24-125). Замещение основной массы породы магнетитом, а вкрапленников оливина – агрегатом магнетита и кальцита: кальцит 1 – лейстовидные кристаллы первичного кальцита, слагающие каркас породы; кальцит 2 – новообразованный кальцит, замещающий совместно с магнетитом вкрапленники оливина, о форме кристалла оливина позволяет судить тонкая кайма серпентина

Fig. 12. Backscattered-electron (BSE) imaging of a part of the polished surface of the Mg-kimberlite of the Syuldyukar pipe (sample No. 12/24-125). Replacement of the main mass of the rock by magnetite, and olivine phenocrysts by an aggregate of magnetite and calcite: кальцит 1 – leucite-like crystals of primary calcite, composing the rock framework; кальцит 2 – newly formed calcite, replacing together with magnetite olivine phenocrysts, the shape of olivine crystal allows to judge the thin border of serpentine

Список литературы /References

1. Горев Н.И., Герасимчук А.В., Проценко Е.В., Толстов А.В. Тектонические аспекты строения Вилуйско-Мархинской зоны, их использование при прогнозировании кимберлитовых полей. *Наука и образование*. 2011;(3):5–10.
[Gorev N.I., Gerasimchuk A.V., Protsenko E.V., Tolstov A.V. The tectonic aspects of the structure of the Vilyui-Markha zone, their use in forecasting kimberlite fields. *Nauka i obrasovanie*. 2011;(3):5–10. (In Russ.)]
2. Еремин Н.Н., Гостищева Н.Д., Бобров А.В., Бенделиани А.А., Бурова А.И. Оценка вхождения ионов Ti⁴⁺ в состав мантийных гранатов: результаты атомитетического моделирования. *Кристаллография*. 2021;66(1):48–51.
[Eremine N.N., Gostishheva N.D., Bobrov A.V., Bendeliani A.A., Burova A.I. The evaluation of the occurrence of Ti⁴⁺ ions in the mantle garnets: results of at-

omistic modeling. *Kristallografiya*. 2021;66(1):48–51 (In Russ.)]

3. Изох А.Э., Вишневецкий А.В., Калугин В.М., Оюунчимэг Т. Петрология и геодинамическая позиция Урэгнурской пикритовой вулканоплутонической ассоциации (Западная Монголия). *Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту), Материалы Всероссийского научного совещания по Интеграционным программам Отделения наук о Земле Сибирского отделения РАН, Иркутск, 9–14 окт., 2007*. Иркутск; 2007:89–91.89–91

[Izox A.E., Vishnevskij A.V., Kalugin V.M., Oyuunchime'g T. Petrology and geodynamic position of the Ureg Nur Picrite Volcano Plutonic Association (Western Mongolia). *Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian mobile Belt (from the ocean to the continent)*, Irkutsk, IZK SB RAS, Materials of the All-Russian Scientific Meeting on Integration Programs of the Department of Earth Sciences of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, 9-14 October, 2007. Irkutsk; 2007:89–91. (In Russ.)]

4. Кокс К.Г., Белл Дж.Д., Панкхерст Р.Дж. *Интерпретация изверженных горных пород*. М.: Недра; 1982. 414 с.

[Koks K.G., Bell Dzh.D., Pankxerst R.Dzh. *Interpretation of igneous rocks*. М.: Nedra; 1982. (In Russ.)]

5. Королюк В.Н., Лаврентьев Ю.Г., Усова Л.В., Нигматулина Е.Н. О точности электронно-зондового анализа породообразующих минералов на микроанализаторе JXA-8100. *Геология и геофизика*. 2008;49(3): 221–225.

[Korolyuk V.N., Lavrent'ev Yu.G., Usova L.V., Nigmatulina E.N. The accuracy of electron probe analysis of rock-forming minerals on the JXA-8100 microanalyzer. *Geol. i geofiz.* 2008;49(3):221–225. (In Russ.)]

6. Лаврентьев Ю.Г., Усова Л.В., Кузнецова А.И., Летов С.В. Рентгеноспектральный квантометрический микроанализ важнейших минералов кимберлитов. *Геология и геофизика*. 1987;28(5):75–81.

[Lavrent'ev Yu.G., Usova L.V., Kuznecova A.I., Letov S.V. X-ray spectral quantum-metric microanalysis of the most important minerals of kimberlites. *Geol. i geofiz.* 1987;28(5):75–81. (In Russ.)]

7. Лаврентьев Ю.Г., Усова Л.В., Королюк В.Н., Логвинова А.М. Электронно-зондовое определение примесей цинка и никеля в хромшпинелидах для целей геотермометрии перидотитов. *Геология и геофизика*. 2005;46(7):741–745.

[Lavrent'ev Yu.G., Usova L.V., Korolyuk V.N., Logvinova A.M. Electron probe determination of zinc and nickel impurities in chrome spinelides for the purposes of peridotite geothermometry. *Geol. i geofiz.* 2005;46(7): 741–745. (In Russ.)]

8. Мальцев М.В., Толстов А.В., Фомин В.М., Старкова Т.С. Новое кимберлитовое поле в Якутии и типоморфные особенности его минералов-индикаторов.

Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2016;(3):86–94.

[Mal'tsev M.V., Tolstov A.V., Fomin V.M., Starkova T.S. A new kimberlite field in Yakutia and typomorphic features of its indicator minerals. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya*. 2016;(3):86–94. (In Russ.)]

9. Минин В.А., Василенко В.Б., Кузнецова Л.Г., Толстов А.В., Зинчук Н.Н. Особенности распределения кальция в кимберлитах Якутской провинции. *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: материалы всероссийской научно-практической конференции, 2–4 апреля 2013 г.* 2013;II:21–24.

[Minin V.A., Vasilenko V.B., Kuznecova L.G., Tolstov A.V., Zinchuk N.N. Features of calcium distribution in kimberlites of the Yakut province. *Geology and mineral resources of the North-East of Russia: materials of the All-Russian scientific and practical conference, April 2-4, 2013*. 2013;II:21–24. (In Russ.)]

10. Мюллер Р., Саксена С. *Химическая петрология*. М.: Мир;1980. 517 с.

[Myuller R., Saksena S. *Chemical Petrology*. М.: Mir;1980. (In Russ.)]

11. Пальянов Ю.Н., Сокол А.Г., Хохряков А.Ф., Крук А.Н. Условия кристаллизации алмаза в кимберлитовом расплаве по экспериментальным данным. *Геология и геофизика*. 2015;56(1-2):254–272.

[Pal'yanov Yu.N., Sokol A.G., Khohryakov A.F., Kruk A.N. Conditions of diamond crystallization in kimberlite melt according to experimental data. *Geologiya i geofizika*. 2015;56(1-2):254–272. (In Russ.)]

12. *Петрохимия кимберлитов*. М.: Недра;1991. 304 с. [Petrochemistry of kimberlites. М.: Nedra;1991. (In Russ.)]

13. Сокол А.Г., Крук А.Н. Условия генерации кимберлитовых магм: обзор экспериментальных данных. *Геология и геофизика*. 2015;56(1-2):316–336.

[Sokol A.G., Kruk A.N. Conditions of generation of kimberlite magmas: review of experimental data. *Geologiya i geofizika*. 2015;56(1-2):316–336. (In Russ.)]

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

[Tectonics, Geodynamics and Metallogeny of the Sakha Republic (Yakutia). (Ed. Parfenov L.N., Kuzmin M.I.). Moscow: Nauka/Interperiodika; 2001. (In Russ.)]

15. Чантурия В.А., Двойченкова Г.П., Стегницкий и др. Экспериментальное обоснование кинетики формирования ионного состава оборотных водных систем и методики оценки эффективности способов их обесшламливания для условий переработки алмазосодержащего сырья. *Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб.* 2012;48(89):150–159.

[Chanturiya V.A., Dvojchenkova G.P., Stegnitskiy и др. Experimental substantiation of the kinetics formation of the ionic composition of recycled water systems and methods for evaluat-

ing the effectiveness of their desalination methods for the conditions of processing of diamond-containing raw materials. *Zbagachennya korisnix kopalin: Nauk.-texn. zb.* 2012; 48(89):150–159. (In Russ.)]

16. Шарыгин И.С., Литасов К.Д., Шацкий А.Ф., Головин А.В., Отани Е., Похиленко Н.П. Экспериментальное исследование плавления кимберлита трубки Удачная-Восточная при 3–6,5 ГПа и 900–1500 °С. *Докл. РАН.* 2013;448(4):452–457.

[Sharygin I.S., Litasov K.D., Shaczkiy A.F., Golovin A.V., Otani E., Poxilenko N.P. Experimental study of the melting of kimberlite tube Udachnaya-Vostochnaya at 3–6.5 hPa and 900–1500 °C. *Dokl. RAN.* 2013 2012; 48(89):452–457. (In Russ.)]

17. Asquith G.B. Flow differentiation in tertiary lamprophyres (camptonites) Sacramento Mountains, Otero County, New Mexico. *J. Geol.* 1973; 81:643–647.

18. Bebie J., Gagny Cl., Importance of flow differentiation in magmatic evolution: an example from an ophiolitic sheeted complex. *J. Geol.* 1979;87:579–582.

19. Bhattacharji S. Mechanics of flow differentiation in ultramafic and mafic sills. *J. Geol.* 1967;75:101–112.

20. Bhattacharji S., Nehru C.E. Igneous differentiation models for the origin of Mount Johnson, a zoned montere-gion intrusion, Quebec, Canada. *24th Intern. Geol. Cong.* 1972;(14):3–17.

21. Bhattacharji S., Smith C.S. Flowage differentiation. *Science.* 1964;45:150–153.

22. Brouxel M. Geochemical consequences of flow differentiation in a multiple injection dike (Trinity ophiolite, California). *Lithos.* 1991;26:245–252.

23. Cas R.A.F., Porritt L., Pittari A., Hayman P. A practical guide to terminology for kimberlite facies: a systematic progression from descriptive to genetic, including a pocket guide. *Lithos.* 2009;112 (Suppl 1): 183–190.

24. Clement C.R., Skinner E.M.W. A textural-genetic classification of kimberlites. 1985;88:403–409.

25. Coe N., Le Roex A.P., Gurney J.J., Pearson D.G., Nowell G.M. Petrogenesis of the Swartuggens and Star Group II kimberlite dyke swarms, South Africa: Constraints from whole rock geochemistry. *Contrib Mineral Petrol.* 2008;156:627–652

26. Coetzee M.S., Bate M.D., Elsenbroek J.H. Flow differentiation: - An explanation for the origin and distri-

bution of plagioclase glomerocrysts in the Annas Rust dolerite sill, Vredefort Dome. *S. Afr. J. Geol.* 1995;98(3): 276–286.

27. Edgar A.D., Charbonneau H.E. Melting experiments on a SiO₂-poor, CaO-rich aphanitic kimberlite from 5-10 GPa and their bearing on sources of kimberlite magmas. *Amer. Miner.* 1993;78:132–142.

28. Gibb F.G.F. Flow differentiation in the xenolithic ultrabasic dykes of the Cuilins and Strathaird peninsula, Isle of Skye, Scotland. *J. Petrol.* 1968;9(3):411–443.

29. Komar P.D. Mechanical interactions of phenocrysts and flow differentiation of igneous dikes and sills. *Geol. Soc. Am. Bull.* 1972;83:973–988.

30. Kjarsgaard B.A. Kimberlite Pipe Models: Significance for Exploration. *Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration.* B. Milkereit. 2007:667–677.

31. Mangan M.T., Marsh B.D., Froelich A.J., Gottfried D. Emplacement and differentiation of the York Haven diabase sheet, Pennsylvania. *J. Petrol.* 1993;34(6):102.

32. Mitchell R.H. Experimental studies at 5-12 GPa of the Ondermatjie hypabyssal kimberlite. *Lithos.* 2004; 76:551–564.

33. Richardson S.H. Chemical variation induced by flow differentiation in an extensive Karroo dolerite sheet, southern Namibia. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1979;43: 1433–1441.

34. Ross M.E. Flow differentiation, phenocryst alignment, and compositional trends within a dolerite dike at Rockport, Massachusetts. *Geol. Soc. Am. Bull.* 1986;97: 232–240.

35. Scott Smith B.H., Nowicki T.E., Russell J.K., Webb K.J., Mitchell R.H., Hetman C.M., Harder M., Skinner E.M.W., Robey Jv.A. Kimberlite Terminology and Classification. *Proceedings of 10th International Kimberlite Conference, Volume 2, Special Issue of the Journal of the Geological Society of India.* 2013:1–17.

36. Sobolev N.V., Tomilenko A.A., Kuzmin D.V., Logvinova A.M., Bulbak T.A., Fedorova E.N., Nikolenko E.I., Reutskij V.N., Sobolev A.V., Batanova V.G., Grakhanov S.A., Kostrovitskij S.I., Yakovlev D.A., Anastasenkov G.F., Tolstov A.V. Prospects of search for diamondiferous Kimberlites in the Northeastern Siberian Platform. *Russian Geology and Geophysics.* 2018;(10):1365–1379.

Об авторах

МИНИН Владимир Алексеевич, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Researcher ID: M-2810-2018, <https://orcid.org/0000-0002-0438-2144>, e-mail: minin@igm.nsc.ru

ТОЛСТОВ Александр Васильевич, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Researcher ID: O-2643-2013, <https://orcid.org/0000-0002-6057-5987>, e-mail: tols61@mail.ru

МАЛЬЦЕВ Михаил Викторович, кандидат геолого-минералогических наук, заместитель главного геолога, e-mail: MaltsevMV@alrosa.ru

About the authors

MININ, Vladimir Alekseevich, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Researcher, Researcher ID: M-2810-2018, <https://orcid.org/0000-0002-0438-2144>, e-mail: minin@igm.nsc.ru

TOLSTOV, Aleksandr Vasilevich, Dr. Sci (Geology and Mineralogy), Chief Researcher, Researcher ID: O-2643-2013, <https://orcid.org/0000-0002-6057-5987>, e-mail: tols61@mail.ru

MALTSEV, Mikhail Viktorovich, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Deputy Chief Geologist, e-mail: MaltsevMV@alrosa.ru

Поступила в редакцию / Submitted 21.12.2022

Поступила после рецензирования / Revised 03.02.2023

Принята к публикации / Accepted 20.02.2023

УДК 553.08; 553.2

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-27-39>

Оригинальная статья

Минералы Au и Ag в хвостохранилище переработанных сульфидных руд (Салаир, Россия)

А. Ш. Хусаинова^{✉,1}, Ю. А. Калинин¹, С. Б. Бортникова², О. Л. Гаськова¹

¹Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

²Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

[✉]khusainova@igm.nsc.ru

Аннотация

В статье исследовано распределение минералов Au и Ag в хвостохранилище переработанных руд колчеданно-полиметаллического месторождения Салаирского рудного поля (Талмовские Пески, г. Салаир). Для изучения минерального и химического состава проб применялись современные прецизионные методы: атомная абсорбция, масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой, рентгеновская дифрактометрия, сканирующая электронная микроскопия. Установлено, что за длительный период существования хвостохранилища (более 90 лет) на глубине 0,6–0,8 м образовался горизонт вторичного обогащения (с содержаниями Au и Ag до 5,3 и 53,7 г/т соответственно). Золото и серебро неравномерно распределены по разрезу и находятся в трех формах: самородной (Au_s, Ag_s); минеральной (акантит, петровскит); изоморфной (в сульфидах и вторичных пленках). Выделенные остаточные и новообразованные золотосеребряные минералы свидетельствуют об активных гипергенных процессах растворения, миграции и осаждения Au и Ag. Преобразование самородных частиц происходит за счет как хемогенных, так и механических процессов.

Ключевые слова: сульфидное хвостохранилище, формы нахождения, типоморфные характеристики, золото, серебро, экзогенные процессы

Финансирование. Работа выполнена по государственному заданию ИГМ (FWZN-2022-0025) и ИНГГ СО РАН (№ 0266-2022-0028). Аналитические работы выполнены в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН.

Для цитирования: Хусаинова А.Ш., Калинин Ю.А., Бортникова С.Б., Гаськова О.Л. Минералы Au и Ag в хвостохранилище переработанных руд (Салаир, Россия). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(1):27–39. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-27-39>

Original article

Minerals Au and Ag in the tailing dump of the processed ores (Salair, Russia)

A. Sh. Khusainova^{✉,1}, Yu. A. Kalinin¹, Sv. B. Bortnikova², O. L. Gaskova¹

¹Sobolev Institute of Geology and Mineralogy,

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

²Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics,

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

[✉]khusainova@igm.nsc.ru

Abstract

This article provides data on the identification and distribution of Au-Ag minerals in the tailing dump of the processed ores in the pyrite-polymetallic deposit within the Salair ore field (Talmovskiy Sands, Salair). The mineral and chemical compositions of the samples were studied using atomic absorption, mass spectrometry with inductively coupled plasma, X-ray diffractometry, and scanning electron microscopy. We have established that a horizon of secondary enrichment was formed (with Au and Ag contents up to 5.3 and 53.7 g/t, respectively) over a long period of the tailing dump existence (more than 90 years) and at a depth of 0.6–0.8 meters. Gold and silver are unevenly distributed along

the section and are present in three species: 1) native (Au, Ags), 2) mineral (acantite, petrovskite), and 3) isomorphic (sulfides and secondary films). The identified residual and newly formed gold-silver minerals indicate active supergene processes of Au-Ag dissolution, migration, and precipitation. The transformation of native particles occurs through both chemogenic and mechanical processes.

Keywords: sulfide tailing, species, typomorphic characteristics, gold, silver, supergene processes

Funding. This study was performed within the state assignment to IGM (FWZN-2022-0025) and INGG SB RAS (0266-2022-0028). The chemical compositions of the samples were analyzed at the Analytical Center for Multi-Elemental and Isotope Research SB RAS.

For citation: Khusainova A.Sh., Kalinin Yu.A., Bortnikova Sv.B., Gaskova O.L. Minerals Au and Ag in the tailing dump of the processed ores (Salair, Russia). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(1):27–39. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-27-39>

Введение

Усиливающееся в последние десятилетия внимание к проблемам извлечения полезных компонентов из техногенных объектов (хвостохранилища переработанных руд, отвалы, в том числе некондиционных руд, и т. д.) несомненно [1–5]. Поскольку количество таких объектов неуклонно растёт, эффективное использование и повторная их переработка возможны лишь при достоверной оценке их ресурсов, определении форм (исходных и образованных в результате перетолжения) нахождения металлов и выявлении условий концентрирования. Поэтому изучение геохимической эволюции вещества в целом и рудной его составляющей в частности взаимосвязано и взаимообусловлено. Построить непротиворечивую геохимическую модель поведения Au и Ag в ходе экзогенной эволюции техногенного вещества – актуальная фундаментальная научная задача, имеющая важное практическое значение.

Цель работы заключается в оценке распределения и форм нахождения Au и Ag в переработанных рудах сульфидного хвостохранилища Талмовские Пески (Салаирский край).

Методы и материалы исследования

Объектом исследования являются отходы обогащения зоны окисления Au–Ag-содержащих барит-полиметаллических руд месторождений Салаирского рудного поля (рис. 1) (г. Салаир, Кемеровская обл.).

Месторождение относится к барит-полиметаллическому формационному типу с наложенным золотокварцево-штокверковым оруденением. В полиметаллических рудах золото встречается в виде вкрапленности в сульфидах (размерностью 10–50 мкм), со средним содержанием Au 0,8 и Ag 55 г/т, пробность варьирует в диапазоне 595–822 %. Золотокварц-карбонатные штокверковые руды различаются по содержа-

нию (среднее – Au 2,4 г/т; Ag 9,8 г/т), размерности (от тонкодисперсного до весьма крупного – до 5,0 мм), морфологическим формам, пробности (от 875 до 949 %) [6].

Начало эксплуатации Салаирских месторождений приходится на 30-е гг. XX в. Разрабатывались на Au верхние, наиболее богатые части рудных тел из зоны окисления. Для этих руд характерно сочетание очень твердых неокисленных кварц-баритовых линз с рыхло сцементированным глинистым материалом. Руды обогащались гравитационным и флотационным методами. С 1932 по 1942 г. отходы обогащения складировались в запруженное дамбой русло р. Мал. Талмовая в виде ленты протяженностью 7 км и шириной ~ 30 м. После заполнения отходами получившегося искусственного пруда ниже по течению сооружалась следующая дамба, и процесс повторялся. Мощность техногенных отложений не превышает 3 м, но их объем составляет около 1 млн т [7].

Минеральный и химический состав хвостов обогащения изучен в двух вертикальных разрезах шурфов. Описана зональность и опробованы все визуально различающие слои. В лабораторных условиях пробы были гомогенизированы и разделены на части. Из первой была измерена влажность весовым методом, и затем сухие пробы были истерты для анализов. Водные вытяжки (твердое/вода = 1/10) для определения концентраций подвижных форм элементов были приготовлены из второй части проб. Содержание Au и Ag в твердых пробах и в водных вытяжках определено методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на приборе Agilent 8800 (Agilent Technologies, США) (г. Томск).

Для определения содержаний Au и Ag в основных сульфидах Салаирских рудных тел под биноклем были отобраны мономинеральные фракции пирита, сфалерита, галенита и халь-

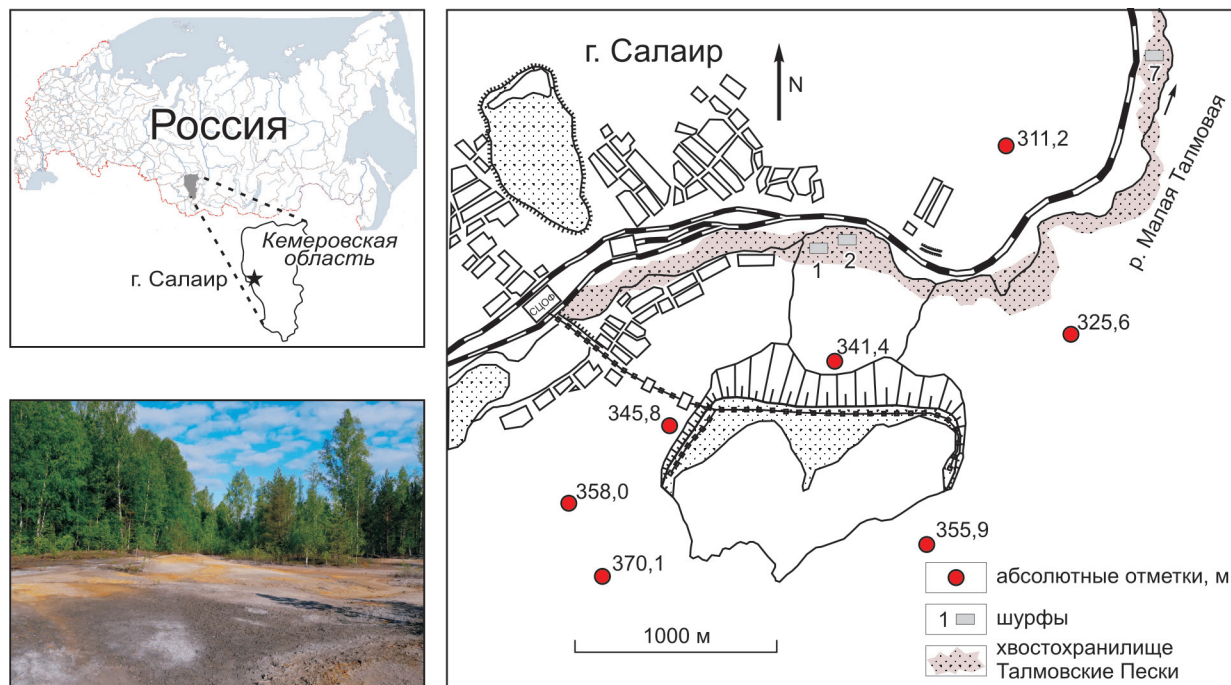


Рис. 1. Объект исследования (географическое положение)

Fig. 1. Object of study (geographical location)

копирита из образцов полиметаллических руд (фракции 0,1–0,25 мм). Вследствие мелких размеров сульфидов и взаимопрорастаний удалось отобрать небольшие навески монофракций из разных частей рудных тел. Отдельные пробы сульфидов были объединены для представительности анализа, в результате чего было проанализировано три пробы пирита, две – галенита, по одной пробе сфалерита и халькопирита. Содержание Au и Ag определялось с помощью метода атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) (аналитик В.Н. Ильина).

Исследование минерального состава и типоморфных характеристик золота выполнено по крупнообъемной пробе (15 кг), промытой в лабораторных условиях. Общий минеральный состав пробы (концентрат, хвосты) определен методом рентгеновской дифрактометрии (XRD) на дифрактометре ARLX'TRA (излучение $\text{CuK}\alpha$) (Thermo Fisher Scientific (Ecublens) SARL, Швейцария) (г. Новосибирск).

При изучении самородного золота выявлялись специфические морфологические особенности и количественно оценивались признаки преобразования: характер поверхности, наличие сростков и пленок. При описании золота авторы опирались на труды «классиков» [8–12]. Изучение осуществлялось с помощью сканирующего элект-

ронного микроскопа (СЭМ) TESCAN MIRA 3LMU (Tescan, Чехия) с энергетическим спектрометром OXFORD (Oxford Instruments, Великобритания) в режимах вторичных и обратно-рассеянных электронов при различных увеличениях (при ускоряющем напряжении электронного пучка 20 кВ) (аналитик Карманов Н.С., Хлестов М.В.) (г. Новосибирск). Химический состав Au определялся методом локального микрорентгеноспектрального (микронзондового) анализа (МРСА) на установке Camebax micro (Камека, Франция), с ускоряющим напряжением 20 кВ, током зонда 70 нА (г. Новосибирск).

Результаты

Распределение содержаний Au и Ag по разрезам. Рассмотрим распределение содержаний Au и Ag и их водорастворимых форм по разрезам. В разрезе 1 в твердом веществе содержание Au варьирует 0,7 до 3,1 г/т (среднее 1,45 г/т), Ag – от 13 до 53,7 г/т (среднее 32,9 г/т) (рис. 2). В подстилающей почве содержание резко снижается (0,018 г/т Au и 1,9 г/т Ag). Распределение Au и Ag по вертикали идентично, что определяется их геохимической связью в первичных рудах. Однако концентрации их водорастворимых форм варьируют по разрезу закономерно, причем содержание соединений серебра становится на-

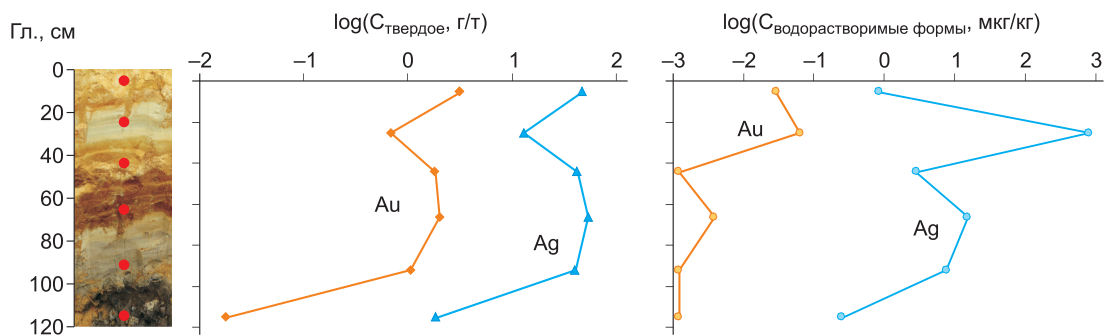


Рис. 2. Вертикальное распределение общих концентраций Au и Ag в твердом веществе и их водорастворимых форм по разрезу 1

Fig. 2. Vertical distribution of the total concentrations of Au and Ag in the solid and their water-soluble forms along section 1

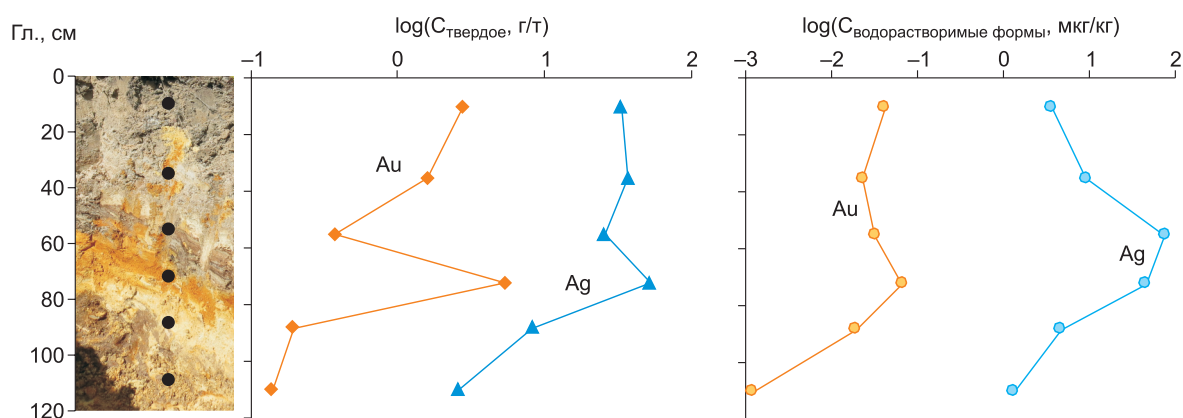


Рис. 3. Вертикальное распределение общих концентраций Au и Ag в твердом веществе и их водорастворимых форм по разрезу 2

Fig. 3. Vertical distribution of the total concentrations of Au and Ag in the solid and their water-soluble forms along section 2

много больше, чем золота: в твердом веществе соотношение Ag/Au составляет 15–38, а в водорастворимых формах – 1300–4000. Исключение составляет верхний горизонт, в котором концентрация водорастворимых форм серебра сравнительно низка.

По разрезу 2 (рис. 3) обнаружались те же закономерности: сходное распределение в твердом веществе (соотношение Ag/Au 10–69), содержание Au варьирует 0,2 до 5,3 г/т (среднее 1,72 г/т), Ag – от 8,1 до 52 г/т (среднее 26,3 г/т), а также отсутствует корреляция в распределении водорастворимых форм (Ag/Au 87–2300). При этом отсутствует взаимосвязь между общими содержаниями этих элементов в твердом веществе и количеством образующихся подвижных форм.

Минеральный состав. Усредненный минеральный состав складированных отходов представлен кварцем (66 %), кальцитом (11), баритом (9),

альбитом (4), мусковитом (3), хлоритом (2) и сульфидами (5 %). Среди сульфидов преобладает пирит (75–90 %), меньше сфалерита (8–19) и галенита (2–14 %), также отмечены единичные зерна халькопирита, арсенопирита, блеклой руды, акантита-I, самородного золота.

По данным рентгеноструктурного анализа (рис. 4) в пробах также отмечено небольшое количество магнетита (Fe_3O_4), сванбергита ($\text{SrAl}_3(\text{SO}_4)(\text{PO}_4)(\text{OH})_6$), англесита (PbSO_4), церуссита (PbCO_3), плюмбоярозита ($\text{Pb}_{0.5}\text{Fe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$), следы гетита (FeOOH), NaAl-квасцов ($\text{NaAl}(\text{SO}_4)_2$), торреита ($(\text{Mg}, \text{Mn}, \text{Zn})_7(\text{OH})_{12} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), баррандита ($(\text{Al}, \text{Fe})(\text{PO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). В легкой фракции присутствуют примеси гипса ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), анкерита ($\text{CaFe}(\text{CO}_3)_2$), Fe–Mg хлорита, слюды, плагиоклаза, малые примеси амфибола, натролита ($\text{Na}_2[\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

Таким образом, в условиях хвостохранилища происходят активное преобразование и окис-

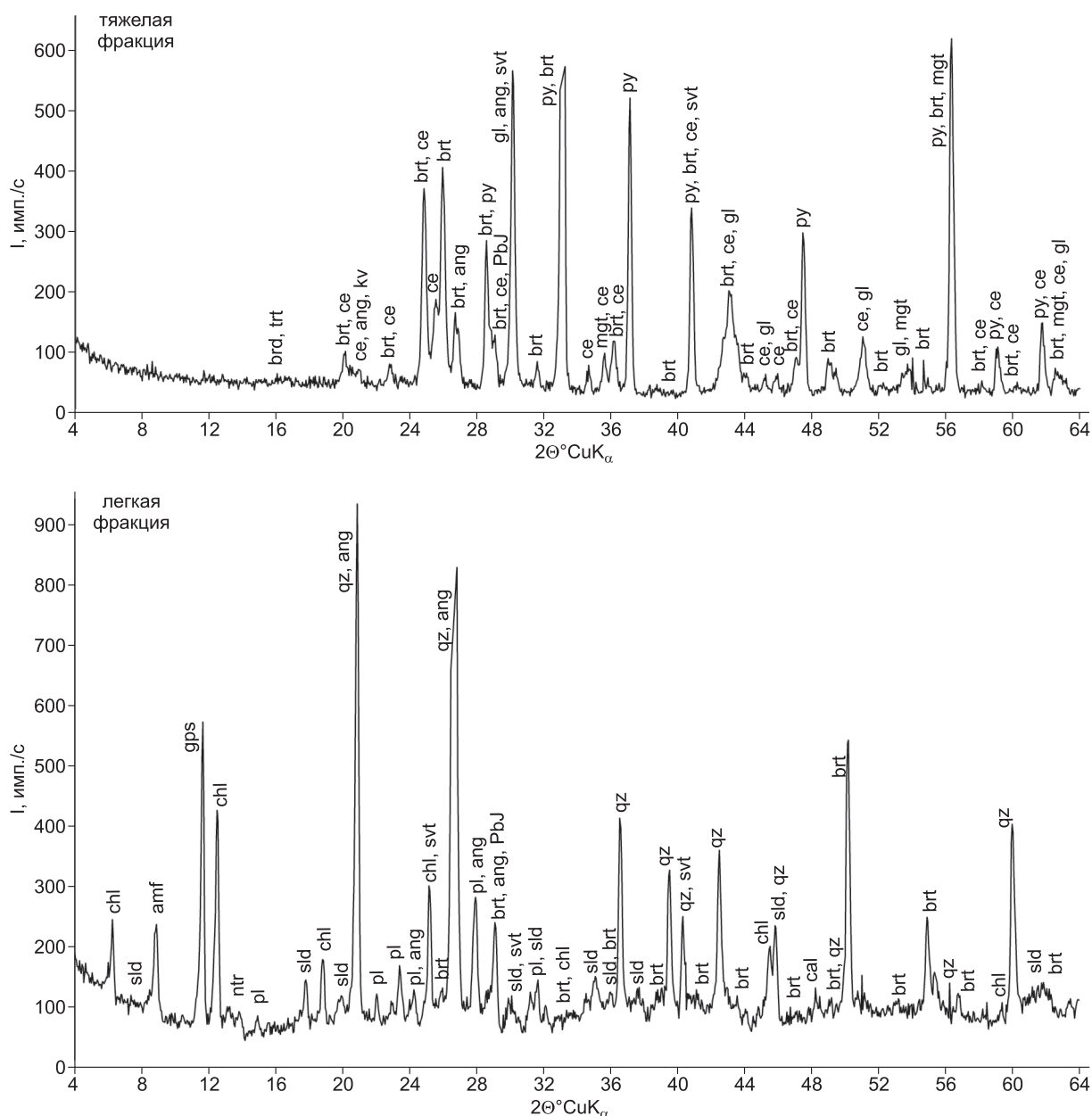


Рис. 4. Дифрактограммы проб переработанных руд – минеральный состав

Fig. 4. Diffractograms of the samples from the tailing dump of the processed ores – mineral composition

ление первичного вещества, способствующие образованию вторичных минералов сульфатного, гидросульфатного, гидросульфатно-фосфатного, гидроксофосфатного, карбонатного, гидроксидного и оксидного рядов. Широкое разнообразие вторичных минералов подтверждается развитием внутри тела хвостохранилища геохимических барьеров, которые в соответствии с классической pH-зависимостью их образования [13] расположены в следующей последовательности (pH-buffering sequences): (гидр)окси-

ды и сульфаты Fe, минералы Al, карбонаты Fe(Mg), карбонаты Ca (при pH около 8). Окислительно-восстановительные процессы являются еще одним важнейшим средством контроля подвижности металлов в хвостохранилищах [14].

Формы нахождения благородных металлов.

Золото и серебро обнаружены в трех формах нахождения:

1. Изоморфная (упорная) форма.

1.1. Изоморфная примесь в сульфидах. По данным ААС в пирите, сфалерите, халькопирите и

**Распределение Au и Ag (г/т)
в сульфидных минералах руд
Салаирских месторождений**

**Distribution of Au and Ag (g/t)
in the sulfide minerals of the ores
from the Salair deposits**

Металл	Минералы			
	Пирит	Сфалерит	Халькопирит	Галенит
Au	0,2–9,0	2,4	12	65–240
Ag	7,8–120	53	24	760–1400

галените определены содержания Au и Ag (см. таблицу).

Поскольку по данным оптической и электронной микроскопии включений самородных металлов или Au–Ag-минералов в сульфидах не обнаружено, то это может свидетельствовать об изоморфной форме их нахождения.

Также по данным микрозондового анализа в блеклых рудах обнаружены примеси Ag до 4,08 мас. % [6].

1.2. *Изоморфная примесь во вторичных новообразованных пленках.* Серебро как примесь (до 6,03 мас. %) присутствует в новообразованных пленках плюмбоярозита по пириту (рис. 5, а) и акантита-I (рис. 5, в), а также во вторичной пленке ковеллина с англезитом (рис. 5, б) по галениту с содержанием Ag до 1,35 мас. %.

2. *Минеральная форма* представлена в виде халькогенидов Au и Ag – акантита (Ag_2S) и петровскаита (AuAgS). Акантит встречается как в остаточной форме из первичных руд (рис. 5, з), так и новообразованной (рис. 5, з–д): в виде тонких кайм вокруг галенита (см. рис. 5, з) и скопленных игольчатых кристаллов (см. рис. 5, д). Петровскаит встречается в форме кайм по периферии зерен золота (см. ниже рис. 9, з, е).

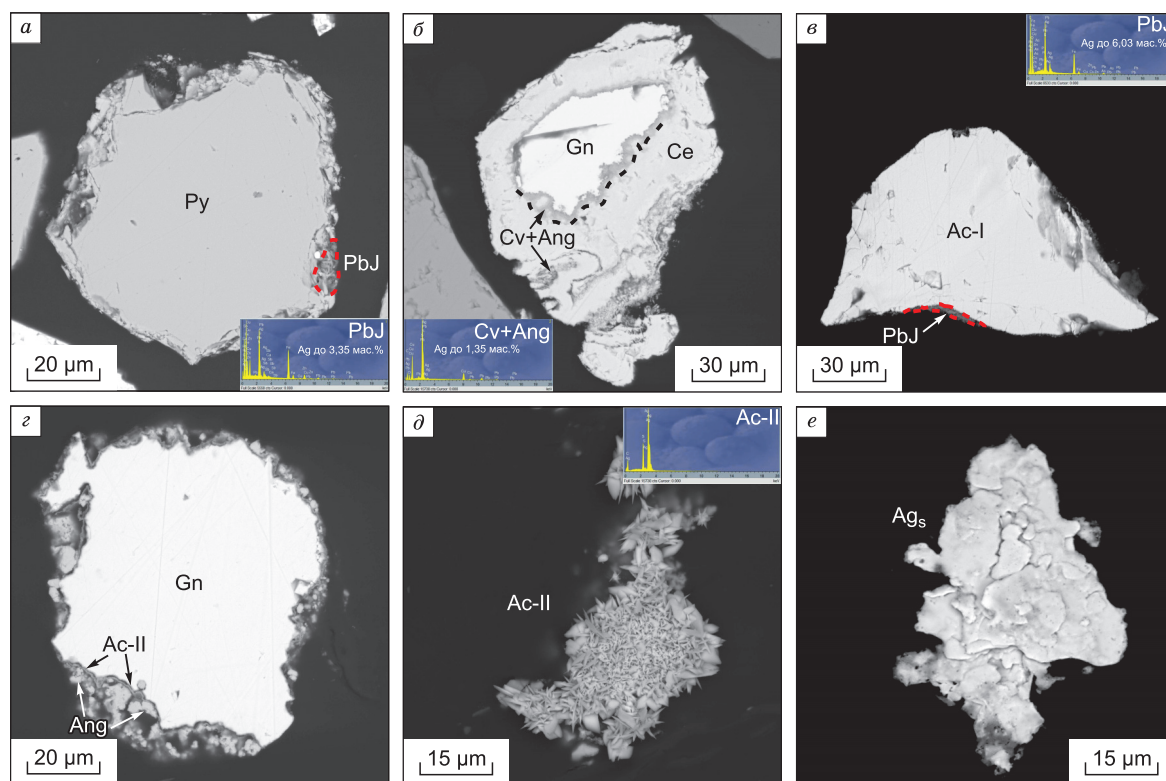


Рис. 5. Распределение и формы нахождения Ag: а – каемка плюмбоярозита (PbJ) на пирите (Py); б – зональное зерно галенита (Gn) с каемками ковеллина с англезитом (Cv+Ang) и церусситом (Ce); в – остаточное зерно акантита-I (Ac-I) с каемкой плюмбоярозита (PbJ); з – зерно галенита (Gn) с каймой акантита (Ac-II) и англезита (Ang); д – игольчатые кристаллы акантита-II (Ac-II); е – новообразованное самородное серебро (Ag_s)

Fig. 5. Distribution and forms of occurrence of Ag: а – plumbjarosite rim (PbJ) on pyrite (Py); б – zoned grain of galena (Gn) with covellite rims with anglesite (Cv+Ang) and cerussite (Ce); в – a residual grain of acanthite-I (Ac-I) with a plumbjarosite rim (PbJ); з – a grain of galena (Gn) with a border of acanthite (Ac-II) and anglesite (Ang); д – needle-like crystals of acanthite-II (Ac-II); е – newly formed native silver (Ag_s)

3. Самородная форма.

3.1. *Самородное серебро* встречается в виде уплощенных пластинчатых частиц (см. рис. 5, е), размером до 30 мкм, напоминающих плоские дендриты, состоящих из частиц размером от 1–2 до 10 мкм.

3.2. *Самородное золото* представлено тонкими и мелкими классами: преобладают частицы размером 250–100 мкм (59 %) и 100–50 мкм (34), также отмечены единичные знаки в классах >250 мкм (2) и <50 мкм (5 %). Цвет варьирует от красноватого (вишневого) до ярко-желтого, золотистого. По морфологии частицы можно разделить на два типа (рис. 6): изометричные кристаллы и их сростки; уплощенные, пластинчатые золотины изометричных и удлиненных форм.

Поверхность самородного золота сильно преобразована, наблюдаются скульптуры как роста, так и растворения (рис. 7). Первые представлены в виде нано- и микронаростов Au вытянутых (червеобразных), неправильных, изометричных форм, часто в форме «нашлепков» на поверхности золотинок (рис. 7, а, б, з, е). Скульптуры растворения выглядят наподобие желобков и ямок (см. рис. 7, б, в). Края частиц неровные, рваные, загнутые; для частиц кристаллического облика – вершины граней притуплены. Также на золоти-

нах наблюдаются отпечатки от вмещающих минералов, борозды и углубления.

В углублениях и неровностях поверхностей частиц золота присутствуют сростки барита и кварца (см. рис. 7, в, е). Золотины частично или полностью покрыты новообразованными пленками гидроксосульфатного, гидроксосульфатно-фосфатного, гидроксофосфатного состава: плюмбоярозита ($\text{PbFe}_3(\text{SO}_4)_4(\text{OH})_{12}$), гиндалита ($\text{PbAl}_3(\text{PO}_4)(\text{SO}_4)(\text{OH})_6$), плюмбогуммита ($\text{PbAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_5 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (см. рис. 3, б), минерал ярозитового ряда с примесью Zn до 17,66 мас. %.

Внутреннее строение золотинок (рис. 8, 9) – однородное, зональности в химическом составе не обнаружено, зерна чаще представлены агрегатами, сростками двух и более частиц (см. рис. 8).

Среди включений обнаружены кварц, барит, пирит, сфалерит, барит, плюмбоярозит. Помимо пленок плюмбоярозита, по краям частиц определены пленки смешанного состава, в которых зафиксированы повышенные примеси, мас. % Au – до 32, Ag – до 4,36, S – до 6,85, O – до 7,63, Pb – 2,98, Zn – до 0,82, Fe – до 4,81. Возможно, это смесь двух фаз – плюмбоярозита и петровскаита (см. рис. 9, в, з).

Рисунок 9 иллюстрирует процесс активного преобразования золота. Частица имеет удлинен-

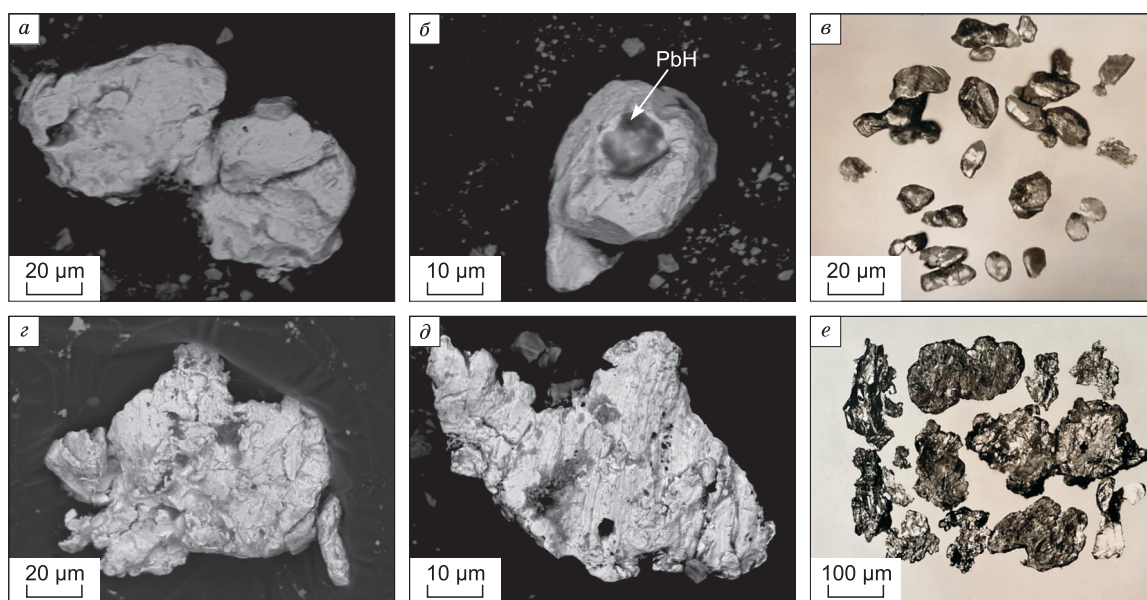


Рис. 6. Морфология самородного золота из переработанных руд: а, б – изометричные частицы кристаллического облика, с пленкой плюмбогуммита (PbH); в – золото из полиметаллических руд Салаирского рудного поля [6]; з, д – уплощенные золотины «агрегатного» строения; е – золото из золотых руд Салаирского рудного поля [6]

Fig. 6. Morphology of native gold from the tailing dump of the processed ores: а, б – isometric particles of crystalline appearance, with plumbogummite (PbH) film; в – gold from polymetallic ores of the Salair ore field [6]; з, д – flattened gold particles of “aggregate” structure; е – gold from the gold ores of the Salair ore field [6]

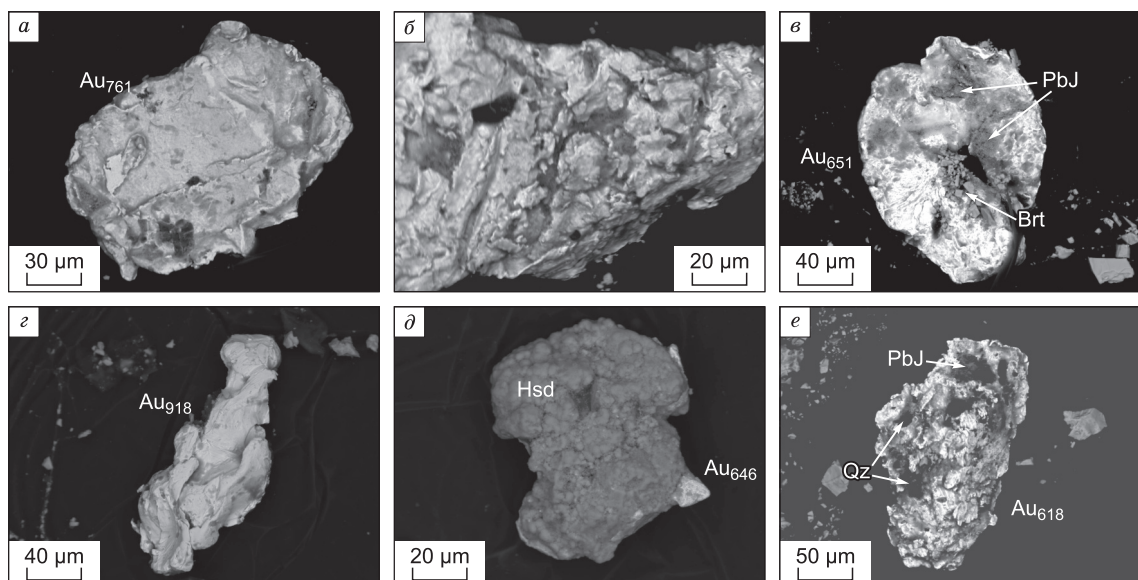


Рис. 7. Скульптуры поверхностей самородного золота из переработанных руд: а, б – скульптуры роста в форме «нашлепок» и наростов золота неправильных, удлинённых форм; в, г – скульптуры растворения, напоминающие форму желобков и выщелоченной (натечной) поверхности, зерна барита (Brt) на поверхности; д – золотина «агрегатного» строения, состоящая из нашлепков золота друг на друга; е – пленка гинсдалита (Hsd) на поверхности золота; ж – пленки плюмбоярозита (PbJ) и зерен кварца (Qz) на поверхности золотин

Fig. 7. Sculptures of the native gold surfaces from the tailing dump of processed ores: а, б – sculptures of growth in the form of “blotches” and outgrowths of irregular, elongated shapes of gold; в, г – sculptures of dissolution, resembling the shape of grooves and leached (leached) surface, grains of barite (Brt) on the surface; д – gold “aggregate” structure, consisting of blotches of gold on top of each other; е – film of ginsdalite (Hsd) on the surface of gold; ж – films of plumbagorite (PbJ) and quartz grains (Qz) on the surface of gold grains

ную форму, в которой присутствуют скульптуры как роста (см. рис. 9, б–г), так и растворения (см. рис. 9, д, е). Внутри зерна находится полость, в которой друг на друге расположены частицы золота микронных размеров вытянутых, уплощенных форм. Причем по химическому составу основная масса золотины имеет пробность чуть выше (до 576 ‰), чем в углублении (490 ‰). Среди включений встречаются кварц и барит, которые могли быть захвачены при образовании золота, в то время как плюмбоярозит мог образоваться как в результате окисления остаточного сульфида, так и при осаждении из поровых растворов на поверхности золота. С другой стороны, возможно, что основная золотина могла быть остаточной, при этом на поверхности за длительное время существования хвостохранилища образовалась полость, в которую совместно осаждались плюмбоярозит и новообразованное золото.

Помимо хемогенного механизма осаждения золота (см. рис. 9, б, в), наблюдается механическое укрупнение – слипание, с последующим срастанием, более мелких частиц (см. рис. 9, г).

Пробность изученного золота варьирует от весьма низкопробного (электрум) до весьма высокопробного (диапазон 427–1000 ‰). На рис. 10 видно, что в отвалах превалирует низкопробное золото (427–590 ‰), которое не характерно для золота из первичных руд, но также присутствуют знаки весьма высокопробного золота (1000 ‰), которые могли образоваться непосредственно в хвостохранилище.

Обсуждение

В хвостохранилище Талмовские Пески сульфиды и минералы благородных металлов (Au, Ag) активно подвергаются процессам растворения, миграции и осаждения. В целом неравномерное распределение по разрезу золота и серебра может быть связано с минеральной зональностью отложений, перерабатываемых в разное время руд. Однако, отмеченный на глубине 0,6–0,8 м железистый горизонт (hardpan) с повышенными содержаниями Au до 5,3 и Ag до 53,7 г/т можно с уверенностью отнести к горизонту вторичного обогащения этими металлами (при средних значениях по двум шурфам Au 1,59 г/т и Ag до

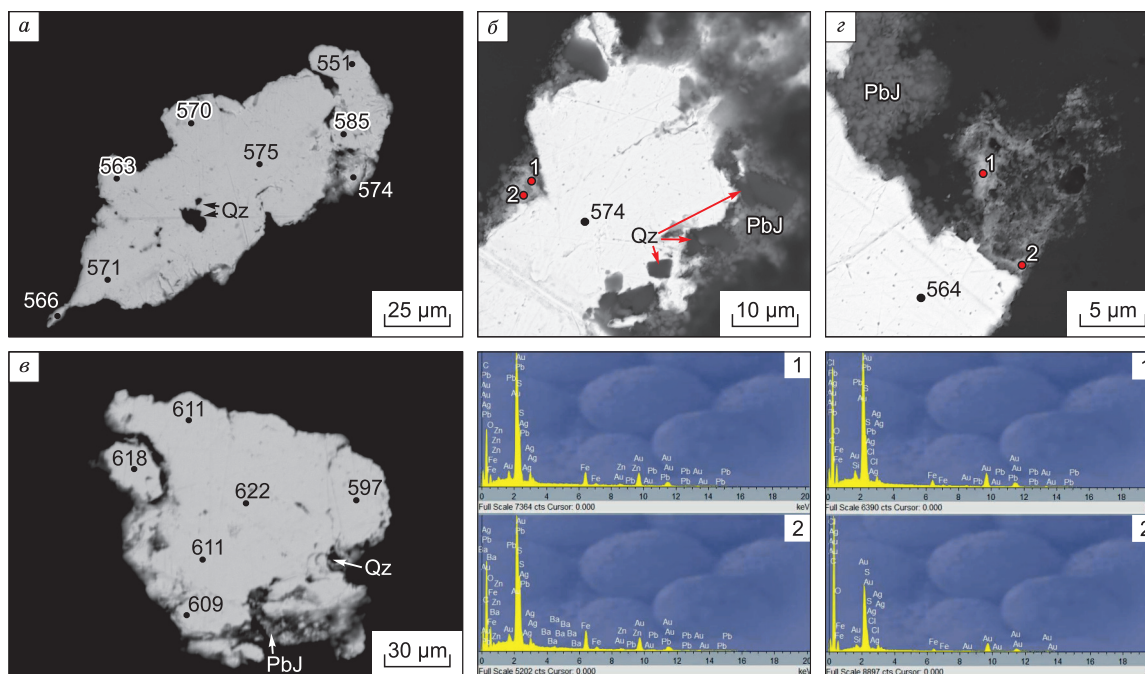


Рис. 8. Внутреннее строение самородного золота: *а, б* – распределение содержаний золота по площади, с включениями кварца (Qz) и плумбоарозита (PbJ); *в, г* – ув. фрагмент золотины с пленками смешанного состава, где для точек 1, 2 указаны спектры химического состава

Fig. 8. Internal structure of native gold: *a, б* – distribution of gold content over the area, with inclusions of quartz (Qz) and plumbrosite (PbJ); *в, г* – an enlarged fragment of gold with films of mixed composition, where the spectra of the chemical composition are indicated for points 1, 2

29,6 г/т). Как видно на рис. 2, увеличению концентраций металлов в твердой фазе предшествует резкое их накопление в водной вытяжке из пробы вещества выше по разрезу. Как указано выше, взаимосвязь между общими содержаниями Au, Ag в твердом веществе и концентрациями образующихся подвижных форм в растворе не обнаружена. Это объясняется тем, что последние определяются не количеством, а растворимостью благородных металлов в определенных Eh–pH-условиях (при сезонных колебаниях температуры).

В хвостохранилище Талмовские Пески преобладает остаточное самородное золото, размером 50–250 мкм, которое активно подверглось преобразованиям. Доказательствами процесса растворения золота являются скульптуры растворения в виде углублений, желобков и ямок на поверхности золотин в сочетании с новообразованными вторичными пленками плумбоарозита, плумбогуммита и гинсдалита, которые придают частицам красноватый оттенок. На рисунках 8, *в, г* и 9, *г, е* видно, что на контакте золота и пленки поверхность становится неровной. Это

происходит вследствие взаимодействия кислых (сульфатных) растворов с поверхностью золота, способствующего образованию новой минеральной формы Au и Ag – петровскита. Результаты термодинамического моделирования подтверждают возможность образования петровскита и высокопробного золота в зоне окисления при растворении и переотложении первичных минералов под воздействием атмосферных и поровых вод [15, 16].

Различия в пробности золота связаны с разнообразием комплексов, в которых Au и Ag мигрируют и осаждаются на геохимических барьерах (например, на поверхности других минералов, на органическом веществе и т. д.). Образование Ag-содержащего (14–20 мас. % Ag) самородного Au является результатом распада смешанных тиосульфатных комплексов типа $(Au, Ag)(S_2O_3)_n^{(1-2n)}$ [17–18]. Осаждение Au в результате дестабилизации золотоносных комплексов происходит:

1) под воздействием бактерий, которые используют их в качестве источника энергии (восстановительная биоминерализация золота) [19–21];

2) в присутствии таких восстановителей, как органическое вещество или ионы Fe^{2+} ;

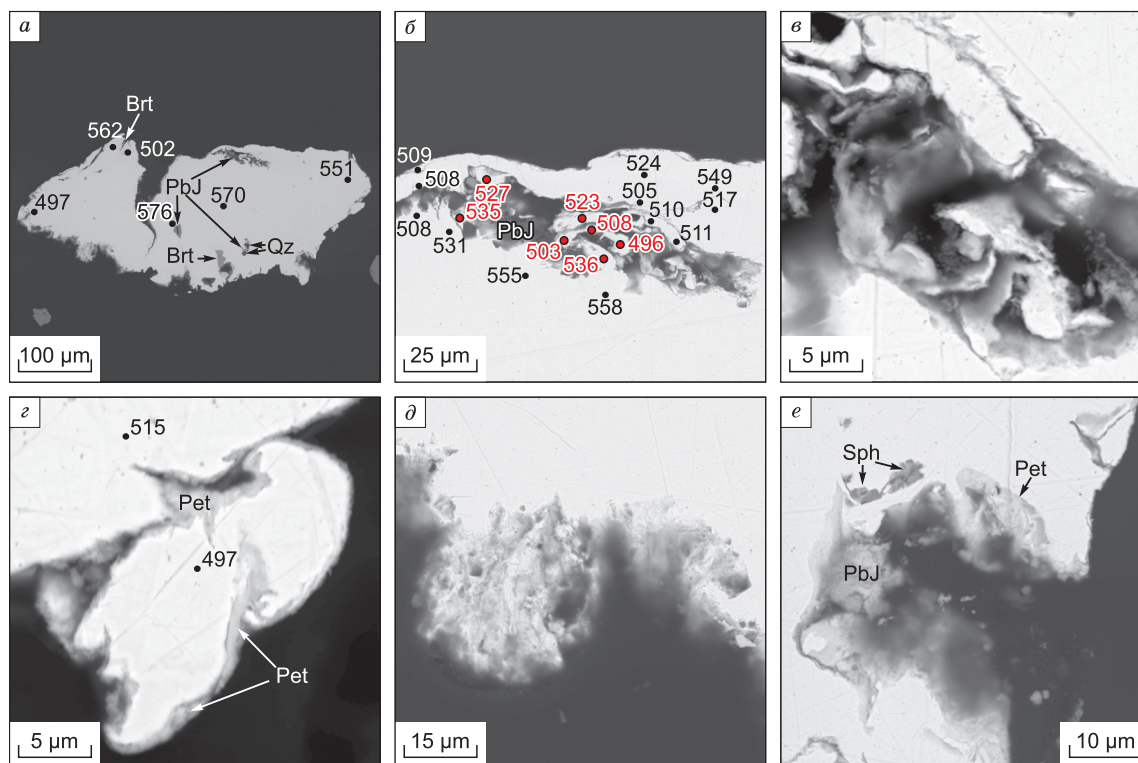


Рис. 9. Внутреннее строение золотины: а – общий вид золотины с включениями плюмбоярозита (PbJ) и барита (Brt), с распределением пробыности Au (%) по точкам по золотины; б, в – увеличенные фрагменты золотины; г – золотины с каемкой петровскита (Pet) по периферии на контакте с массивной золотиной; д – скульптуры растворения в виде натечных форм; е – сростание плюмбоярозита (PbJ) и золота, включение сфалерита (Shp) и каемка петровскита (Pet)

Fig. 9. Internal structure of gold ore: а – general view of gold ore with inclusions of plumbajorosite (PbJ) and barite (Brt), with Au (%) fineness distribution by points over gold ore; б, в – enlarged fragments of gold; г – gold with a petrovskite (Pet) rim along the periphery at contact with massive gold; д – sculptures of dissolution in the form of sintered forms; е – intergrowth of plumbajorosite (PbJ) and gold, inclusion of sphalerite (Shp), and petrovskite rim (Pet)

3) при снижении Eh и повышении pH, когда золото восстанавливается с осаждением на поверхности уже существующих самородных частиц [22, 23].

Другим механизмом преобразования золота и серебра является укрупнение частиц [9, 24, 25] за счет механического слипания частиц (см. рис. 5, д, е, 7, а, б, г, 8, 7, б, 9, в, г).

Кроме того, благородные металлы определены как изоморфная примесь в сульфидах и вторичных новообразованных пленках. Согласно данным ААС и микрозондовым анализам, в рудах Au и Ag присутствуют в пирите, халькопирите, галените и сфалерите (см. таблицу). Обратите внимание, что самые высокие концентрации благородных металлов зафиксированы именно в галените (Au до 240, Ag 440–1500 г/т). При окислении сульфидов и их взаимодействии с кислотами (сульфатными) поровыми растворами образуются вторичные пленки плюмбоярозитового

состава с примесью Ag (до 6,03 мас. %), а также новообразованные акантит и самородное серебро (см. рис. 5).

В работе [26] представлено обобщение литературных данных по вхождению Au в его основные минералы-концентраторы (пирит, арсенопирит, пирротин, халькопирит, борнит, галенит, сфалерит, магнетит). Они касаются гидротермальной области параметров (450–500 °C, 1 кбар), однако представляют некоторый интерес в плане сравнения. Параметры вхождения золота следующие, мкг/г: сфалерит 0,7, высокожелезистый сфалерит 5, магнетит 1, пирит 3, марганцовистый и медистый пирит 10, халькопирит 110, галенит – 240. Экспериментальных работ при низких температурах мало, но этот вопрос, несомненно, представляет интерес для будущих исследований.

На рис. 2 видно, что подвижность серебра значительно выше, чем золота, по всей глубине разреза (120 см). В гипергенных условиях зо-

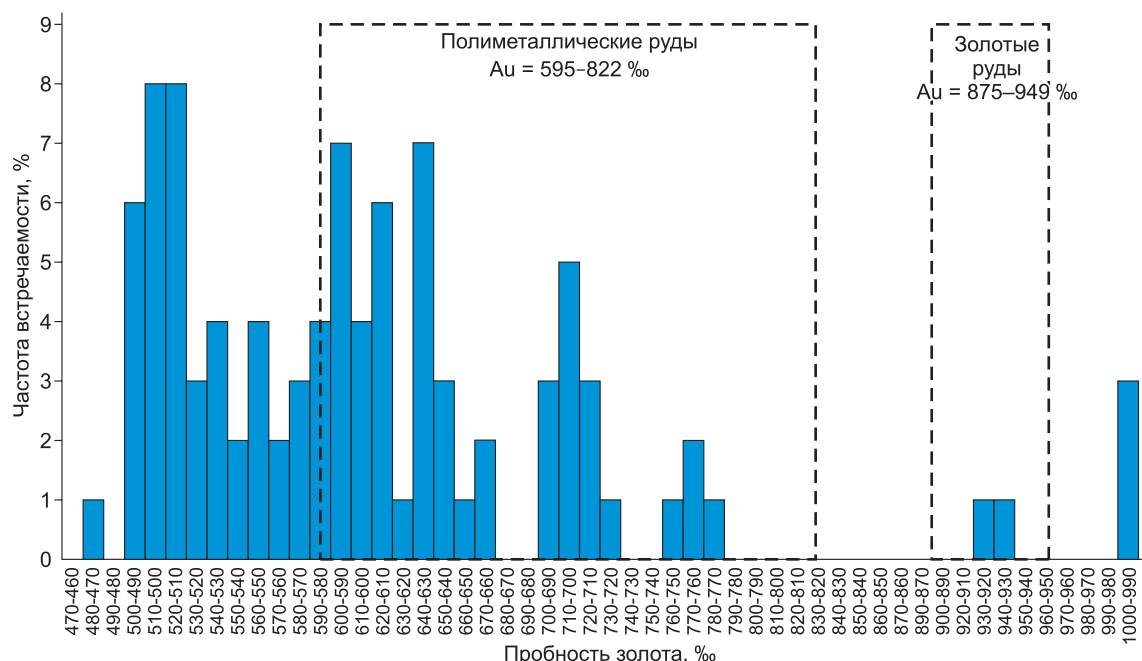


Рис. 10. Гистограмма распределения пробности золота из хвостохранилища ($n = 97$) с полями пробности золота из первичных руд

Fig. 10. Histogram of gold fineness distribution from the tailing dump ($n = 97$) with fields of gold fineness from primary ores

лото образует из прочных комплексов только тиосульфатные, которые быстро разрушаются, поскольку очень неустойчивы к смене pH-условий, поэтому для них необходима высокая активность серы (иначе образуется комплекс AuOH^0) и промежуточная активность кислорода (при снижении его количества будет преобладать AuHS^0). Серебро может переноситься в виде Ag^+ , сульфатных, тиосульфатных, гидроксо-, карбонатных и других комплексов, подобно другим металлам, с которыми оно переосаждается в каемках и в виде собственных минеральных фаз (самородное серебро, акантит).

Заключение

Таким образом, на основе сравнительного анализа морфологических и геохимических особенностей остаточных и новообразованных минералов, а также физико-химического моделирования можно констатировать следующее.

1. В условиях хвостохранилища происходят активное преобразование и окисление первичного вещества, способствующие образованию вторичных минералов сульфатного, гидроксосульфатного, гидроксосульфатно-фосфатного, гидрокси-фосфатного, карбонатного, гидроксидного и оксидного рядов. Широкое разнообразие вторич-

ных минералов подтверждает развитие внутри тела хвостохранилища геохимических барьеров.

2. Неравномерное распределение по разрезу содержаний Au и Ag может быть связано как с минеральной зональностью отложений отрабатываемых в разное время руд, так и с последующими процессами экзогенного преобразования хвостов переработки. Так, можно полагать, что отмеченный на глубине 0,6–0,8 м железистый горизонт (hardpan) с повышенными содержаниями Au до 5,3 и Ag до 53,7 г/т является горизонтом вторичного обогащения (при средних значениях по двум шурфам Au 1,59 г/т и Ag до 29,6 г/т).

3. В хвостохранилище Au и Ag преимущественно локализуются в виде остаточных минеральных форм: самородное золото, акантит, сульфиды. Эти минералы подвергаются механическим и, в большей мере, хемогенным процессам преобразования (растворение, миграция, переосаждение). За длительный период «функционирования» отвалов наблюдается активное вторичное минералообразование, а именно: образование Ag-минералов (акантит, самородное серебро), существенное обогащение серебром вторичных пленок по сульфидным минералам и новообразование Au–Ag-минералов (петровскит).

Список литературы / References

1. Dwivedi A. D., Dubey Sh. Pr., Hokkanen S., Falah R. N., Sillanpää M. Recovery of gold from aqueous solutions by taurine modified cellulose: An adsorptive–reduction pathway. *Chemical Engineering Journal*. 2014; 255:97–106. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.06.017>
2. Imre-Lucaci Á., Nagy M., Imre-Lucaci Fl., Fogarasi Sz. Technical and environmental assessment of gold recovery from secondary streams obtained in the processing of waste printed circuit boards. *Chemical Engineering Journal*. 2017;306:655–662. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.10.045>
3. Demir F., Derun E.M. Modelling and optimization of gold mine tailings based geopolymer by using response surface method and its application in Pb²⁺ removal. *Journal of Cleaner Production*. 2019;237:1177662. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117766>
4. Maluckov B.S. Biorecovery of nanogold and nanogold compounds from gold-containing ores and industrial wastes. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2021;105:3471–3484. <https://doi.org/10.1007/s00253-021-11277-z>
5. Guo X., Qin H., Tian Q., Zhang L. The efficacy of a new iodination roasting technology to recover gold and silver from refractory gold tailing. *Journal of Cleaner Production*. 2020;261:1211472. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121147>
6. Бортникова С.Б. Минералого-геохимические особенности золотого оруденения в полиметаллических рудных полях Северо-Восточного Салаира: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Новосибирск. 1989. 16 с.
[Bortnikova S.B. *Mineralogical and geochemical features of gold mineralization in polymetallic ore fields of Northeastern Salair*: Abstr. ... Diss. Cand.Sci., Novosibirsk. 1989. 16 p. (In Russ.)]
7. Bortnikova S.B., Yurkevich N.V., Gaskova O.L., Devyatova A.Y., Novikova I.I., Volynkin S.S., Mytsik A.V., Podolinnaya V.A. Element transfer by a vapor-gas stream from sulfide mine tailings: from field and laboratory evidence to thermodynamic modeling. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021; 28(12): 14927–14942. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11529-x>
8. Петровская Н.В. Золотые самородки. М.: Наука; 1993. 191 с.
[Petrovskaya N.V. *Native gold*. Moscow: Nauka; 1993. 191 p. (In Russ.)]
9. Николаева Л.А., Гаврилов А.М., Некрасова А.Н., Яблокова С.В., Шатилова Л.В. Самородное золото рудных и россыпных месторождений России: атлас. Москва: ЦНИГРИ; 2015. 200 с.
[Nikolaeva L.A., Gavrilov A.M., Nekrasova A.N., Yablokova S.V., Shatilova L.V. *Native gold in lode and placer deposits of Russia*. Moscow: TSNIGRI; 2015. 200 p. (In Russ.)]
10. Николаева Л.А., Яблокова С.В. Типоморфные особенности самородного золота и их использование при геологоразведочных работах. *Руды и металлы*. 2007;6:41–57.
[Nikolaeva L.A., Yablokova S.V. Typomorphic features of native gold and their use in geological exploration. *Ores and metals*. 2007;6:41–57. (In Russ.)]
11. Осовецкий Б.М. Наноскульптура поверхности золота: монография. Пермь: ПГНИУ; 2012. 232 с.
[Osovetskiy B.M. *Nanosculpture of the gold surface*: monograph. Perm: PSU; 2012. 232 p. (In Russ.)]
12. Осовецкий Б.М. Природное нанозолото: монография. Пермь: ПГНИУ; 2013. 176 с.
[Osovetskiy B.M. *Natural nanozoloto*: monograph. Perm: PSU; 2013. 176 p. (In Russ.)]
13. Blowes D. W., Ptacek C. J. Acid-neutralization mechanisms in inactive mine tailings. *Environmental Geochemistry of Sulfide Mine-Wastes. Mineralogical Association of Canada*. Nepean, 1994;22:271–292.
14. Lindsay M.B.J., Moncur M.C., Bain J.G., Jambor J.L., Ptacek C.J., Blowes D.W. Geochemical and mineralogical aspects of sulfide mine tailings: Review. *Applied Geochemistry*. 2015;57:157–177. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.01.009>
15. Савва Н.Е., Пальянова Г.А., Колова Е.Е. Минералы золота и серебра в зоне вторичного сульфидного обогащения (рудопоявление Крутое, Северо-Восток России). *ВЕСТНИК СВНЦ ДВО РАН*. 2010;1:33–45.
[Savva N.Ye., Palyanova G.A., Kolova Ye.Ye. Gold and silver minerals within sulfide enrichment area (Krutoe Lode, Northeastern Russia). *The Bulletin of the North-East Scientific Center*. 2010;1:33–45. (In Russ.)]
16. Калинин Ю.А., Кужугет Р.В., Хусаинова А.Ш., Гаскова О.Л., Бутанаев Ю.В. Эволюция золота в зоне окисления месторождения Копто (Республика Тыва, Россия). *Геология и геофизика*. 2022;63(7):956–970. <https://doi.org/10.15372/GiG2021162>
[Kalinin Yu.A., Kuzhuget R.V., Khusainova A.Sh., Gaskova O.L., Butanaev Yu.V. Evolution of gold in the oxidation zone of the Kopto deposit (the Republic of Tuva, Russia). *Russian Geology and Geophysics*. 2022;63(7): 956–970. (In Russ.)]
17. Kirillov M.V., Bortnikov S.B., Gaskova O.L., Shevko E.P. Authigenic gold in stale tailings of cyanide leaching of gold-sulfide-quartz ores (Komsomol'skii gold-extracting factory, Kemerovo Region). *Doklady Earth Sciences*. 2018;481(2):1091–1094. <https://doi.org/10.1134/S1028334X18080299>
18. Хусаинова А.Ш., Гаскова О.Л., Калинин Ю.А., Бортникова С.Б. Физико-химическая модель преобразования золота в продуктах переработки колчеданно-полиметаллических месторождений (Салаирский край, Россия). *Геология и геофизика*. 2020; 61(9): 1181–1193. <https://doi.org/10.15372/GiG2020120>
[Khusainova A.Sh., Gaskova O.L., Kalinin Yu.A., Bortnikova S.B. A physicochemical model of gold transformation in the wastes of processed pyrite-polymetallic ores (Salair Ridge, Russia). *Russian Geology and Geophysics*. 2020;61(9):1181–1193. (In Russ.)]
19. Lengke M.F., Southam G. The effect of thiosulfate-oxidizing bacteria on the stability of the gold-thiosulfate complex. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2005;69: 3759–3772. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2005.03.012>

20. Etschmann B., Brugger J., Fairbrother L., Grosse C., Nies D.H., Martinez-Criado G., Reith F. Applying the Midas touch: Differing toxicity of mobile gold and platinum complexes drives biomineralization in the bacterium *Cupriavidus metallidurans*. *Chemical Geology*. 2016;438:103–111. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.05.024>
21. Shuster J., Reith F., Cornelis G., Parsons J.E., Parsons J.M., Southam G. Secondary gold structures: Relics of past biogeochemical transformations and implications for colloidal gold dispersion in subtropical environments. *Chemical Geology*. 2017;450:154–164. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.12.027>
22. Hyland M.M., Bancroft G.M. An XPS study of gold deposition at low temperatures on sulphide minerals: reducing agents. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1989; 53:367–372.
23. Mycroft J.R., Bancroft G.M., McIntyre N.S., Lorimer J.W. Spontaneous deposition of gold on pyrite from solutions containing Au(III) and Au(I) chlorides. 1. A surface study. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1995;59: 3351–3365.
24. Наумов В.А. *Минерагения, техногенез и перспективы комплексного освоения золотоносного аллювия*: Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. Пермь. 2010. 42 с.
[Naumov V.A. *Minerageny, technogenesis and prospects of complex development of gold-bearing alluvium*: Abstr. ... Diss. Dr. Sci., Perm. 2010. 42 p. (In Russ.)]
25. Хусаинова А.Ш., Калинин Ю.А., Гаськова О.Л., Бортникова С.Б. Типоморфная характеристика золота из хвостохранилищ колчеданно-полиметаллических месторождений Сибири. *Георесурсы*. 2021;23(3):149–163. <https://doi.org/10.18599/grs.2021.3.18>
[Khusainova A.Sh., Kalinin Yu.A., Gaskova O.L., Bortnikova S.B. Typomorphic gold characteristic from mine tailings of pyrite-polymetallic deposits of Siberia. *Georesursy=Georesources*. 2021;23(3):149–163. (In Russ.)]
26. Таусон В.Л., Липко С.В. Растворимость золота в основных минералах-концентраторах благородного металла. *Геология и геофизика*. 2020;12:1619–1636. <https://doi.org/10.15372/GiG2020165>
[Tauson V.L., Lipko S.V. Solubility of gold in common gold-concentrating minerals. *Russian Geology and Geophysics*. 2020;12:1619–1636. (In Russ.)]

Об авторах

ХУСАИНОВА Альфия Шамилевна, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-6548-3857>, Author ID: 57209307603, Researcher ID: AAN-7939-2020, e-mail: khusainova@igm.nsc.ru

КАЛИНИН Юрий Александрович, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-5877-666x>, Author ID: 8842124600, Researcher ID: A-6558-2014, e-mail: kalinin@igm.nsc.ru

БОРТНИКОВА Светлана Борисовна, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, <http://orcid.org/0000-0003-2395-7406>, Author ID: 6602329510, Researcher ID: B-7392-2016, e-mail: BortnikovaSB@ipgg.sbras.ru

ГАСЬКОВА Ольга Лукинична, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, <http://orcid.org/0000-0003-3885-5015>, Author ID: 6506231530, Researcher ID: O-3096-2013, e-mail: gaskova@igm.nsc.ru

About the authors

KHUSAINOVA, Alfia Shamilevna, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-6548-3857>, Author ID: 57209307603, Researcher ID: AAN-7939-2020, e-mail: khusainova@igm.nsc.ru

KALININ, Yuri Alexandrovich, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-5877-666x>, Author ID: 8842124600, Researcher ID: A-6558-2014, e-mail: kalinin@igm.nsc.ru

BORTNIKOVA, Svetlana Borisovna, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-2395-7406>, Author ID: 6602329510, Researcher ID: B-7392-2016, e-mail: BortnikovaSB@ipgg.sbras.ru

GAS'KOVA, Olga Lukinichna, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Leading Researcher (Geology and Mineralogy), <https://orcid.org/0000-0003-3885-5015>, Author ID: 6506231530, Researcher ID: O-3096-2013, e-mail: gaskova@igm.nsc.ru

Поступила в редакцию / Submitted 14.09.2022

Поступила после рецензирования / Revised 10.11.2022

Принята к публикации / Accepted 24.01.2023

Оксалаты кальция среди минералов Якутии и в организме человека

Н. В. Заякина[✉], Т. И. Васильева

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

Аннотация

Соли щавелевой кислоты – оксалаты принадлежат к большой группе органических минералов, или биоминералов, которые могут возникать как в окружающей среде, так и внутри живых организмов. Принадлежность одновременно к миру неживой и живой природы привела к тому, что эти объекты представляют как научный, так и практический интерес для представителей самых разных наук: геологии, экологии, медицины. Нами впервые обнаружены оксалаты в нескольких природных образцах из Далдынского кимберлитового поля, бассейна среднего течения р. Марха, берегового обнажения на р. Аллах-Юнь, а также подтверждено их присутствие в образцах камней из почек и желчного пузыря. Основным использованным методом – рентгеновский фазовый анализ. Установлено, что в исследуемых природных образцах присутствуют уэделлит или уэвеллит, в ассоциации с ними зафиксированы кварц, карбонат, полевошпат, слюда и хлорит. Состав камня из почки представляет собой смесь уэвеллита с урицитом, в состав камня из желчного пузыря входят урицит, уэвеллит, урат аммония и брусчатит. Обсуждены возможные причины образования в природе одно- и двухфазной модификации оксалатов кальция. Показано, что эти минералы шире распространены, чем предполагалось ранее.

Ключевые слова: биоминералы, оксалаты кальция, уэделлит, уэвеллит, порошковая рентгенография, Якутия
Финансирование. Работа выполнена в рамках проекта FUEM-2019-0003 «Эколого-геохимическое изучение техногенных массивов на территории Якутской алмазоносной провинции».

Благодарности. Авторы благодарят коллег Я.Б. Легостаеву и М.В. Кудрина за предоставленные образцы и фото.

Для цитирования: Заякина Н.В., Васильева Т.И. Оксалаты кальция среди минералов Якутии и в организме человека. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(1):40–46. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-40-46>

Original article

Calcium oxalates among the minerals of Yakutia and in the human body

N. V. Zayakina[✉], T. I. Vasileva

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

Abstract

Oxalates, which are salts of oxalic acid, belong to a large group of organic minerals or biominerals that can occur both in the natural environment and inside living organisms, which makes them valuable for various sciences. We have discovered, for the first time, oxalates in several natural samples from the Daldynsky kimberlite field, the basin of the middle course of the Markha River, and the coastal outcrop on the Allah Yun River. We also confirmed their presence in kidney and gallbladder stone samples in the human body. X-ray phase analysis allowed us to establish the presence of weddellite or whewellite in association with quartz, dolomite, feldspar, mica, and chlorite in the samples under study. Meanwhile, the composition of the kidney stone in the human body represents a mixture of whewellite with uricite, the composition of the stone from the gallbladder includes uricite, whewellite, ammonium urate and brushite. Possible reasons for the formation of one- and two-in-one modifications of calcium oxalates in nature are also discussed. We conclude that these minerals are more widespread than previously assumed.

Keywords: biominerals, calcium oxalates, weddellite, whewellite, X-ray powder diffraction, Yakutia

Funding. This work was partially supported by the Ministry of Education of the Russian Federation (project number: FUEM-2019-0003), theme “Ecological and geochemical study of technogenic massifs on the territory of the Yakutsk diamond province”.

Acknowledgements. The authors express their gratitude to their colleagues Yana B. Legostaeva and Maxim V. Kudrin for providing samples and photographs.

For citation: Zayakina N.V., Vasileva T.I. Calcium oxalates among minerals of Yakutia and in the human body. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(1):40–46. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-40-46>

Введение

Якутия – огромная часть России, обладающая большими запасами минеральных ресурсов. Алмазы, золото, серебро, сурьма, олово, нефть, газ, уголь добываются в широких масштабах. Однако минеральный мир Якутии гораздо шире. Есть широкоизвестные минералы, есть и малоизвестные – редкие или новые. Сотрудниками Института геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения РАН за период его существования в разные годы открыто 15 новых минеральных видов

Предметом исследования в этой работе являются уже известные, но не очень распространенные и не слишком заметные в природе минералы – оксалаты – соли щавелевой кислоты. Они относятся к большой группе органических минералов, или биоминералов. Биоминералы – минералы, сформированные биоорганизмами или при их участии. Известно более 300 биоминералов: более 50 минеральных видов обнаружено в организмах как человека, так и животных, в том числе и как патологические образования; более 60 – в растениях, более 30 – в простейших организмах [1]. Щавелевая кислота $C_2H_2O_4$ широко распространена в природе, встречается в свободном виде или в виде оксалатов в растениях, таких как щавель, ревень, в некоторых видах кактусов. Лишайники, грибы, бактерии также могут производить щавелевую кислоту, которая при контакте с подстилающими породами или почвой способствует возникновению оксалатов [2]. Оксалаты представляют интерес и являются объектами исследования для ученых, работающих в достаточно далеких друг от друга областях, – минералогов, биологов, ботаников, медиков и специалистов, занимающихся охраной памятников культурного наследия. Эти минералы были обнаружены в иле морского дна, в почвах, в породах, содержащих битумы, в содержащих торф отложениях, на поверхностях гранитов и карбонатных пород, на поверхностях археологических памятников [2–9]. Следует отметить, что соли щавелевой кислоты являются наиболее распространенными патогенными минералами, образующимися в организмах человека и животных. Часто они возникают вместе или наблюдается

преимущественно один из них [4, 10]. Подробно история находок оксалатов кальция и описание уэделлита приведены в [11].

Среди оксалатов наиболее распространены оксалаты кальция, известны следующие минералы: одноводный $Ca(C_2O_4) \cdot H_2O$ – уэвеллит, двухводный $Ca(C_2O_4) \cdot 2H_2O$ – уэделлит, трехводный $Ca(C_2O_4) \cdot 3H_2O$ – каоксит. Все минералы характеризуются индивидуальными кристаллографическими параметрами, в природе чаще встречается моногидрат, дигидрат – уэделлит встречается реже, самый редкий – каоксит, который является нестабильной формой и легко переходит в одноводный уэвеллит [12, 13]. Кристаллические структуры их определены, для уэделлита отмечается наличие цеолитной воды, и формула может немного отличаться от идеальной по количеству молекул воды и соответствовать следующей: $CaC_2O_4 \cdot (2 + x)H_2O$, где $0,13 \leq x \leq 0,37$ формульных единиц [4].

Первые находки оксалатов в Якутии были сделаны в шахтах Тыллахского и Чайтумусского месторождений бурого угля (бассейн р. Лена, Булунский район) более полувека назад: степановит – $NaMgFe^{3+}(C_2O_4)_3 \cdot 8-9H_2O$ (1942 г.), жемчужниковит – $NaMg(Al, Fe^{3+})(C_2O_4)_3 \cdot 8H_2O$ и глушинскит – $Mg(C_2O_4) \cdot 2H_2O$ (1956 г.) [14–16]. Минералы обнаружены в виде тонких прослоев, прожилков в пластах угля в зоне вечной мерзлоты, в ассоциации с ними зафиксированы карбонаты кальцит и доломит, уэвеллит и уэделлит. Новых публикаций о находках таких довольно редких минералов в Якутии мы не нашли.

Материалы и методы исследования

Исследованные нами образцы являются примером новообразованных или сезонных минералов, которые в Якутии не являются редкостью. Новообразованные минералы часто встречаются в виде цветных налетов или белых порошкообразных частиц на поверхности горных пород или почв, детальное исследование их редки, большая часть этих минералов представляют собой разнообразные сульфаты (часто гипс, сульфаты магния) или карбонаты [17]. Удивительно и неожиданно, что светлые порошковые налеты, обнаруженные на почвенно-растительном покрове

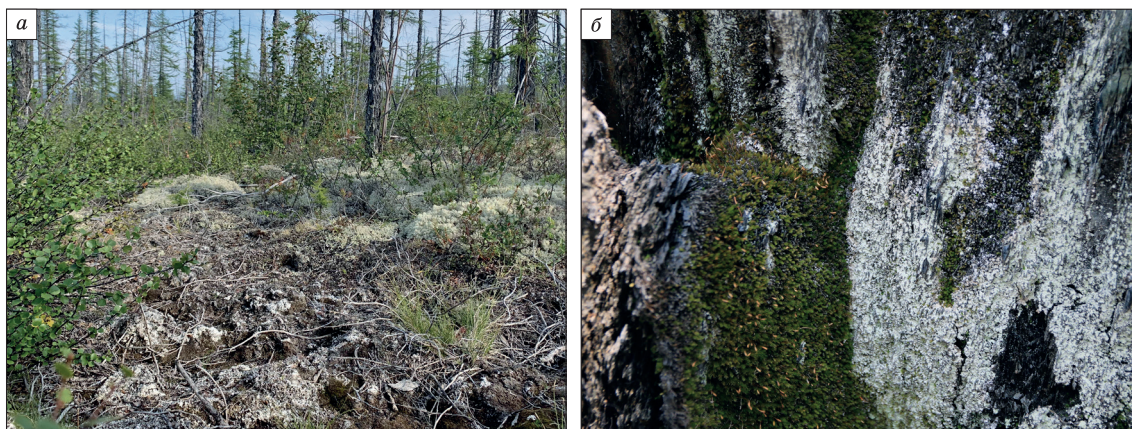


Рис. 1. Природные образцы уэдделлита: *а* – налет на почвенно-растительной толще на территории Далдынского кимберлитового поля, обр. 984. Фото Я.Б. Легостаевой; *б* – налет на береговом обнажении р. Аллах-Юнь, обр. КМ-6-21. Фото М.В. Кудрина

Fig. 1. Samples of weddellite in the environment: *a* – plaque on the vegetation cover on the territory of the Daldynsky kimberlite field, sample 984. Photo by Ya.B. Legostaeva; *b* – a photograph of a plaque on a bank outcrop of the Allah Yun River, sample KM-6-21. Photo by M.V. Kudrin

кимберлитового поля и обнажении на р. Аллах-Юнь, оказались биоминералом, почти чистым оксалатом кальция, также неожиданно проявление оксалатов в почвах, что ранее не было зафиксировано в Якутии.

Оксалаты кальция – уэвеллит и уэдделлит в окружающей среде обнаружены при проведении геоэкологических исследований территории Далдынского кимберлитового поля, где ведутся поисковые, геологоразведочные работы, добыча алмазов и углеводородного сырья (образцы 151 и 984) (рис. 1, *а*). Уэвеллит также был выявлен в ходе геохимического изучения аллювиальных почв бассейна среднего течения р. Марха, левого притока р. Вилюй (обр. 1663). В образце из береговых обнажений р. Аллах-Юнь, отобранном при изучении тектонического строения и вещественного состава золоторудных месторождений Селляхско-Хотунского рудного узла Аллах-Юньской металлогенической зоны (обр. КМ-6-21), зафиксирован уэдделлит (рис. 1, *б*). Образцы представлены в основном в виде мелкокристаллических налетов на поверхности почвенно-растительной толщи или породы.

Кроме природных образцов нами изучен минеральный состав патогенных образований человека – желчного и почечного камней. Камень из желчного пузыря был округлой формы диаметром около 2 см, цвет коричневый, более темный по краям, раздробленный образец представлен на рис. 2, *а*. Камень из мочевого пузыря представлял собой неоднородные по цвету (от

бежевого к желтому, почти оранжевому) обломки разного размера (рис. 2, *б*). Растертый в порошок образец светло-желтый.

Диагностика минерального состава выполнена методом рентгенофазового анализа из порошковых проб. Рентгенограммы получены на дифрактометре D2 PHASER (фирмы Bruker) в ИГАБМ СО РАН. Съемка образцов проводилась на CuK_α -излучении, напряжение 30 кВ, сила тока 10 мА, интервал углов $2\theta^\circ$ от $4,5^\circ$ до 65° , с шагом $0,03^\circ$ и временем экспозиции 1 с. Для интерпретации использовали базу данных порошковых дифракционных стандартов ICDD (PDF-2, 2011). Сомнений в диагностике нет, поскольку каждый из этих минералов характеризуется индивидуальным набором сильных отражений, не перекрывающихся с отражениями других распространенных минералов: для идентификации уэдделлита наиболее сильные линии (d – межплоскостное расстояние, I – интенсивность отражения) $d(I)$: 6,18(100), 4,42(30), 2,775(65), 2,243(25) (карточка № 00-017-0541); для уэвеллита $d(I)$: 5,93(100), 5,79(60), 3,65(100), 2,968(80), 2,405(60), (карточка № 00-014-0789).

Следует отметить простоту и удобство метода рентгенофазового анализа, позволяющего по небольшому количеству превращенного в порошок кристаллического материала определить его минеральный состав, что, несомненно, является ценной информацией при изучении и лечении мочекаменной болезни.

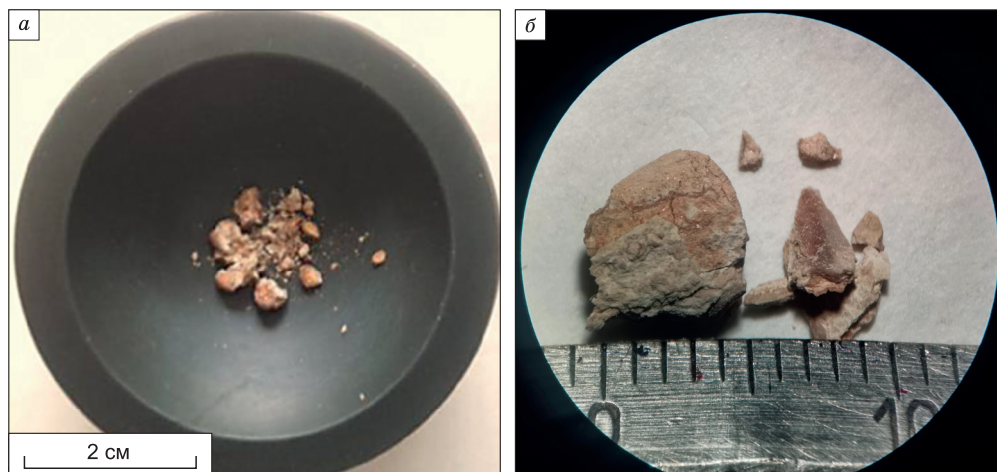


Рис. 2. Исследованные образцы: а – желчный камень, б – почечный камень

Fig. 2. Studied samples: а – gallstone, б – kidney stone

Обсуждение результатов

Уэдделлит $\text{Ca}(\text{C}_2\text{O}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ в обр. 984, отобранном на территории Далдынского кимберлитового поля, был детально изучен ранее методами рентгенофазового анализа, электронной микроскопии, термогравиметрией [18]. На рис. 3 представлены рентгенограммы исследованных образцов и для сравнения образца, исследованного ранее. Оксалат является основной фазой только в обр. 984, поскольку была отобрана монофракция минерала, однако из-за мелкодисперсности препарата на рентгенограмме фиксируются примеси кварца, доломита и полевого шпата. Другие образцы представляют собой уэдделлит или уэвеллит совместно с сопутствующими минералами: кварцем, полевым шпатом, слюдой, карбонатом и хлоритом. Обнаружение в исследованных природных образцах одно- или двухводной модификации оксалатов кальция объясняется различными условиями нахождения образцов от открытых участков (образцы 151 и 1663) до влажных западин (образцы 984 и КМ-6-21). Выделить монофракцию оксалатов для детального исследования не представлялось возможным. Диффузный «горб» на рентгенограмме налета на береговом обнажении р. Вилюй (обр. 1663) объясняется наличием в образце органики.

Оксалаты кальция давно известны как составная часть патогенных образований возникающих в организме человека и животных. В изученных камнях из желчного пузыря и почки присутствует только более устойчивая по сравнению с другими модификациями (двух- и трехводной) одно-

водная модификация – уэвеллит. Помимо оксалатов кальция в их состав могут входить фосфаты кальция, фосфаты магния и аммония, ураты. В исследованных нами образцах из почечного камня зафиксирована смесь уэвеллита с урицитом – $\text{C}_5\text{H}_4\text{N}_4\text{O}_3$ – дигидратом мочевой кислоты, состав камня из желчного пузыря более сложный: главной фазой является урицит, есть уэвеллит, присутствуют урат аммония – $\text{C}_3\text{H}_7\text{N}_5\text{O}_3$ и брушит – $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. На приведенных рентгенограммах (рис. 4) отчетливо проявляется разница по количеству оксалатов в исследованных образцах: интенсивность дифракционных отражений уэвеллита в образце из почки намного выше таковой в образце из желчного камня.

Мочекаменная болезнь довольно распространена в Якутии. Нами приведено только два примера использования рутинных для геологии и минералогии методов анализа. Однако, камни из мочевого и желчного пузыря, из предстательной железы и другие патогенные минеральные образования живых организмов могут быть объектом массового изучения.

Заключение

Находки оксалатов, сделанные в разных районах Якутии, свидетельствуют, что эти минералы распространены шире, чем мы предполагали. Выполненное рентгенографическое исследование дополнило картину минерального мира Якутии. Очевидно, что рядом с нами, а иногда и внутри нас, находятся минералы, в частности оксалаты, не привлекающие особенно внимание

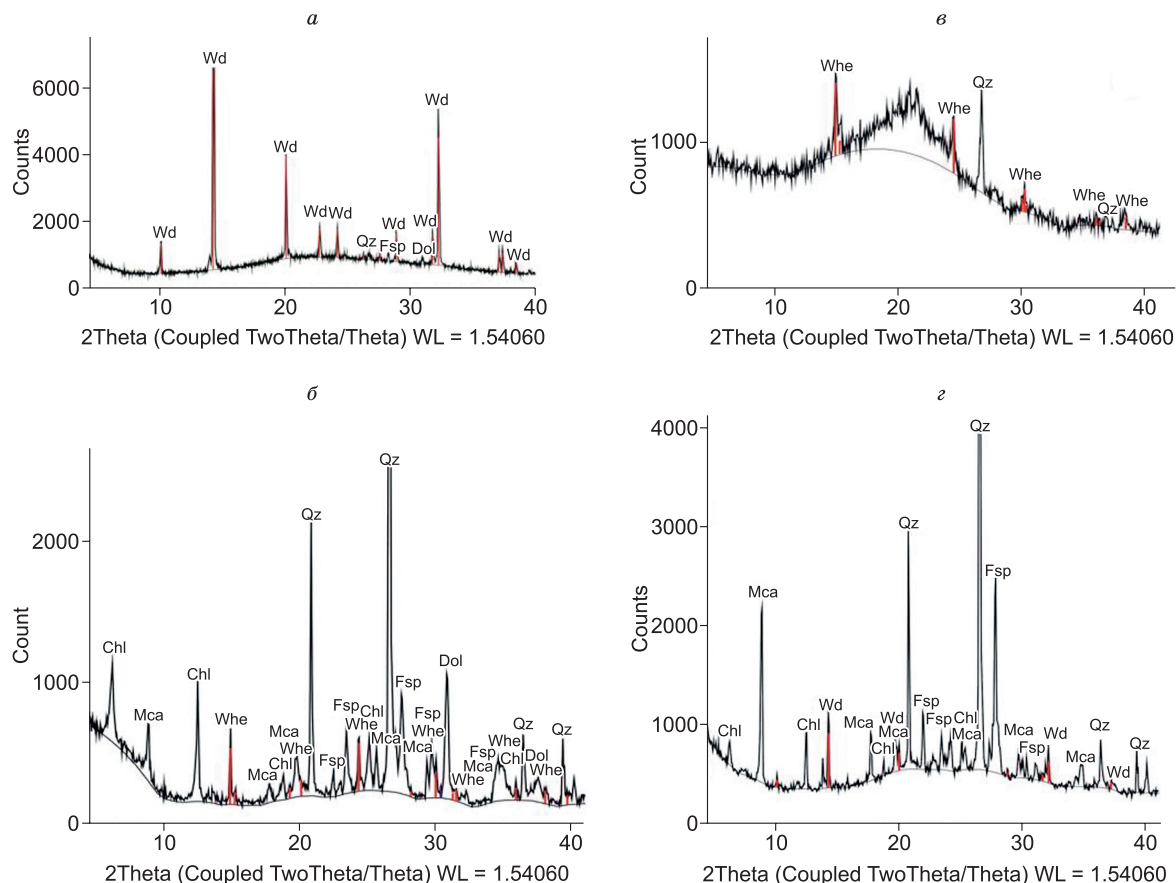


Рис. 3. Рентгенограммы природных образцов, содержащих оксалаты: *а* – образец 984 (Далдынское кимберлитовое поле), *б* – образец 151 (Далдынское кимберлитовое поле), *в* – образец 1663 (нижнее течение р. Марха), *з* – КМ-6-21 (р. Аллах Юнь). Wd – уэдделлит, Whe – уэвеллит, Qz – кварц, Fsp – полевоый шпат, Chl – хлорит, Mca – слюда, Dol – доломит. По оси абсцисс – угол дифракции 2θ , град; по оси ординат – интенсивность рефлексов, имп./с

Fig. 3. X-ray patterns of natural samples containing oxalates: *a* – sample 984 (Daldynskoe kimberlite field), *б* – sample 151 (Daldynskoe kimberlite field), *в* – sample 1663 (lower course of the Markha River), *з* – KM-6-21 (Allah Yun River). Wd – weddellite, Whe – whewellite, Qz – quartz, Fsp – feldspar, Chl – chlorite, Mca – mica, Dol – dolomite. In x-axis – diffraction angle 2θ , degree; in y-axis – intensity, c.p.s.

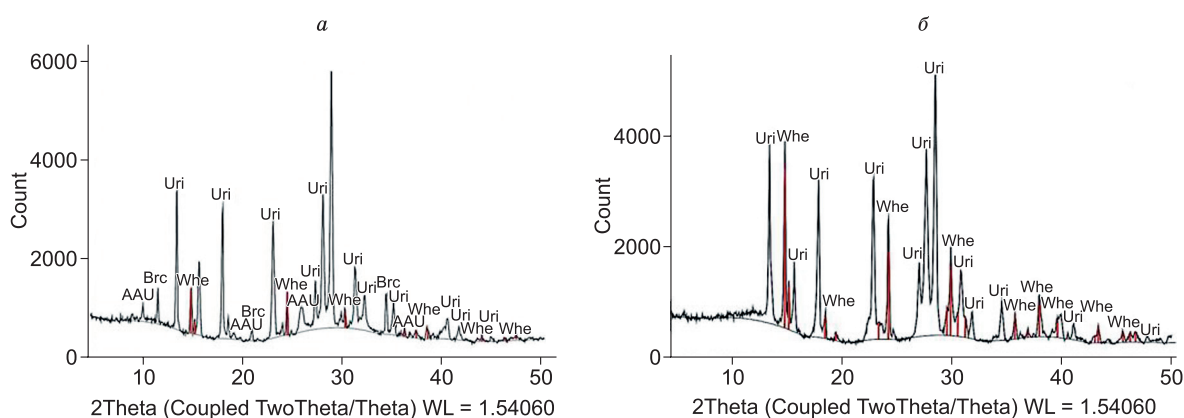


Рис. 4. Рентгенограммы патогенных образцов: *а* – из желчного пузыря, *б* – из почки: Whe – уэвеллит, Uri – урицит, Brc – брушит, AAU – урат аммония. По оси абсцисс – угол дифракции 2θ , град; по оси ординат – интенсивность рефлексов, имп./с

Fig. 4. X-rays of pathogenic samples: *a* – from the gall bladder, *б* – from the kidney: Whe – whewellite, Uri – uricite, Brc – brushite, AAU – ammonium acid urate. In x-axis – diffraction angle 2θ , degree; in y-axis – intensity, c.p.s.

человека, за исключением вредных для человеческого организма патогенных минералов. Возможно, что более тщательное изучение новообразованных и сезонных минералов добавит новых знаний о минералах Якутии.

Список литературы / References

1. Юшкин Н.П. Минеральный мир и биосфера: минеральный организмобиз, биоминеральные взаимодействия, коэволюция. *Минералогия и жизнь: Происхождение биосферы и коэволюция минерального и биологического миров, биоминералогия: материалы IV Международного семинара. г. Сыктывкар, Республика Коми, 22–25 мая 2007. г. Сыктывкар: Институт геологии Коми НЦ УрО РАН; 2007:5–7.*

[Yushkin N.P. Mineral world and biosphere: mineral organismobiosis, biomineral interactions, coevolution. *Mineralogy and life: the origin of biosphere, coevolution of mineral and biological worlds, biomineralogy: Proceedings of the 4th international mineralogical seminar. Syktyvkar, Komi, 22–25 May, 2007. Syktyvkar: Institute of Geology of Komi SC UB RAS, 2007:5–7 (In Russ.)]*

2. Frank-Kamenetskaya O., Rusakov A., Barinova K., Zelenskaya M., Vlasov D. The formation of oxalate patina on the surface of carbonate rocks under the influence of microorganisms. *Proceedings of the 10th international congress for applied mineralogy (ICAM)*. Broekmans, M. (eds) Berlin, Heidelberg: Springer; 2012:213–220. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-27682-8>

3. Palmieri F., Estoppey A., House G.L., Lohberger A., Bindschedler S., Chain P.S.G., Junier P. Chapter Two – Oxalic acid, a molecule at the crossroads of bacterial-fungal interactions. *Advances in Applied Microbiology*. 2019;106:49–77. <https://doi.org/10.1016/bs.aambs.2018.10.001>

4. Изатулина А.Р. *Кристаллогенезис и кристаллохимия оксалатов кальция почечных камней человека*: Дис. ... канд. геол.-минерал. наук. СПб.; 2017. 189 с.

[Izatulina A.R. *Crystallogenesis and crystal chemistry of calcium oxalates of human kidney stones*: Diss. ... Cand. Sci., St. Petersburg; 2017. 189 p. (In Russ.)]

5. Русаков А.В., Франк-Каменецкая О.В., Зеленская М.С., Власов Д.Ю., Гимельбрант Д.Е., Кнауф И.В., Плоткина Ю.В. Оксалаты кальция в биопленках на поверхности археологических памятников из Херсонесского известняка (Крым). *Записки Российского минералогического общества*. 2010;139(5):96–104.

[Rusakov A.V., Frank-Kamenetskaya O.V., Zelenskaya M.S., Vlasov D.Yu., Gimelbrant D.Ye., Knauf I.V., Plotkina Yu.V. Calcium oxalates in bio-films on the surface of the Chersonesus archaeological limestones monuments (Crimea). *Zapiski RMO (Proceedings of the Russian Mineralogical Society)*. 2010;139(5):96–104. (In Russ.)]

6. Echigo T., Kimata M. Crystal chemistry and genesis of organic minerals: a review of oxalate and polycyclic aromatic hydrocarbon minerals. *The Canadian Mineralogist*. 2011;48(6):1329–1358. <https://doi.org/10.3749/canmin.48.5.1329>

7. Франк-Каменецкая О.В., Власов Д.Ю. Вторичное минералообразование при участии микроскопических грибов и бактерий. *Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения – 2018)*: Материалы минералогического семинара с международным участием. ИГ Коми НЦ УрО РАН; 2018:150–151.

[Frank-Kamenetskaya O.V., Vlasov D.Yu. Secondary mineral formation with the participation of microscopic fungi and bacteria. *Modern problems of theoretical, experimental, and applied mineralogy (Yushkin Memorial Seminar – 2018): Proceedings of the Mineralogical seminar with international participation. Syktyvkar. IG Komi SC UB RAS; 2018:150–151. (In Russ.)]*

8. Франк-Каменецкая О.В., Власов Д.Ю. Современное минералообразование при участии литобионтного микробного сообщества. *Геология, геоэкология, эволюционная география: Коллективная монография. Том XVII. Е.М. Нестеров, В.А. Снытко. СПб.: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена; 2018:126–130.*

[Frank-Kamenetskaya O.V., Vlasov D.Yu. Modern mineral formation with participation of the lithobiont microbial community. *Geology, geoecology, evolutionary geography: a collective monograph. Volume 17. Ed. by E.M. Nesterov, V.A. Snytko. St. Petersburg: Herzen University Publishing House; 2018:126–130. (In Russ.)]*

9. Frank-Kamenetskaya O.V., Izatulina A.R., Kuz'mina M.A. Ion substitutions, non-stoichiometry, and formation conditions of oxalate and phosphate minerals of the human body. *Biogenic – abiogenic interactions in natural and anthropogenic systems. Lecture Notes in Earth System Sciences. Springer, Cham. 2016;1:425–442. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24987-2_33*

10. Соколова Т.А. Низкомолекулярные органические кислоты в почвах: источники, состав, содержание, функции в почвах (обзор). *Почвоведение*. 2020;(5):559–575. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20050159>

[Sokolova T.A. Low-molecular-weight organic acids in soils: sources, composition, concentrations, and functions: a review. *Eurasian Soil Science*. 2020;53(5):580–594.] <https://doi.org/10.31857/S0032180X20050159>

11. Mandarino J.A., Witt N.V. Weddellite from Biggs, Oregon, U.S.A. *The Canadian Mineralogist*. 1983;21:503–508.

12. Echigo T. et al. Re-investigation of the crystal structure of whewellite [$\text{Ca}(\text{C}_2\text{O}_4) \cdot \text{H}_2\text{O}$] and the dehydration mechanism of caoxite [$\text{Ca}(\text{C}_2\text{O}_4) \cdot 3\text{H}_2\text{O}$]. *Mineralogical Magazine*. 2005;69:77–88. <https://doi.org/10.1180/0026461056910235>

13. Basso R., Lucchetti G., Zefiro L., Palenzona A. Caoxite $\text{Ca}(\text{H}_2\text{O})_3(\text{C}_2\text{O}_4)$ a new mineral from the Cerchiaro mine, northern Apennines, Italy. *Neues Jahrbuch für Mineralogie*. 1997;2:84–96. <https://doi.org/10.1127/njmm/1997/1997/84>

14. Жемчужников Ю.А., Гинзбург А.И. *Основы петрологии углей*. М.: Изд-во АН СССР:1960.

[Zhemchuzhnikov Yu.A., Ginzburg A.I. *Fundamentals of coal Petrology*. Moscow 1960 (In Russ.)]

15. Книпович Ю.Н., Комков А.И., Неведов Е.И. О степановите и новом минерале жемчужниковите. *Труды ВСЕГЕИ*, 1963;(3):131–135.

[Knipovich Yu.N., Komkov A.I., Nefedov Ye.I. About stepanovite and the new mineral zhemchuzhnikovite. *Trudy VSYeGYeI*. 1963;(3):131–135. (In Russ.)]

16. Wilson M. J., Jones D., Russell L. D. Glushinskite, a naturally occurring magnesium oxalate. *Mineralogical magazine*. 1980;43(331):837–840. <https://doi.org/10.1180/minmag.1980.043.331.02>

17. Васильева Т.И., Заякина Н.В. Современное минералообразование и сезонные минералы Эндыбальского сереборудного узла (Западное Верхоянье, Якутия). *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России. Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции: в 2-х томах, 10–12 апреля 2019 года. Том 1. Якутск: Издательский дом СВФУ*; 2019:18–22.

[Vasileva T.I., Zayakina N.V. Modern mineral formation and seasonal minerals of the Endybal silver ore cluster (Western Verkhoyansk, Yakutia). *Geology and mineral resources of the North-East of Russia: Proceedings of the 9th All-Russian Scientific and Practical Conference: in 2 volumes, April 10–12, 2019. Volume 1. Yakutsk: NEFU Publishing House*; 2019:18–22. (In Russ.)]

18. Васильева Т.И., Заякина Н.В., Легостаева Я.Б., Шадринова О.В. Находка уэдделлита в Западной

Якутии. *Записки Российского минералогического общества*. 2022;151(2):70–78. <https://doi.org/10.31857/S0869605522020095>

[Vasileva T.I., Zayakina N.V., Legostaeva Ya.B., Shadrinova O.V. Find of weddellite in Western Yakutia. *Zapiski RMO (Proceedings of the Russian Mineralogical Society)* 2022;151(2):100–108. (In Russ.)] <https://doi.org/10.31857/S0869605522020095>

19. Изатулина А.Р., Франк-Каменецкая О.В., Гуржий В.В., Кузьмина М.А., Зеленская М.С. Кристаллохимия природных и синтетических оксалатов двухвалентных катионов. *Минералогические музеи - 2019. Минералогия вчера, сегодня, завтра: Материалы конференции, посвященной 200-летию кафедры минералогии Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург, 17–19 сентября 2019 года. СПб.:СПбГУ*; 2019:72–73.

[Izatulina A.R., Frank-Kamenetskaya O.V., Gurzhiy V.V., Kuzmina M.A., Zelenskaya M.S. Crystal chemistry of natural and synthetic oxalates of divalent cations. *Mineralogical Museums - 2019. Mineralogy yesterday, today, tomorrow: Conference proceedings dedicated to the 200th anniversary of the Department of Mineralogy of St. Petersburg State University, St. Petersburg, September 17–19, 2019. Saint Petersburg: Saint Petersburg State University*; 2019:72–73. (In Russ.)]

Об авторах

ЗАЯКИНА Надежда Викторовна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-3201-9796>, e-mail: zayakina@diamond.ysn.ru

ВАСИЛЬЕВА Татьяна Игнатьевна, кандидат биологических наук, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-9203-9193>, e-mail: vasilevatig@gmail.com

About the authors

ZAYAKINA, Nadezhda Viktorovna, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-3201-9796>, e-mail: zayakina@diamond.ysn.ru

VASILEVA, Tatiana Ignatevna, Cand. Sci (Biology), Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-9203-9193>, e-mail: vasilevatig@gmail.com

Поступила в редакцию / Submitted 05.10.2022

Поступила после рецензирования / Revised 11.01.2023

Принята к публикации / Accepted 25.01.2023

Оригинальная статья

Особенности литологического строения пестроцветной свиты нижнего кембрия в районе Ой-Муранского рифового массива (Якутия)

П. Н. Колосов✉

Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация
✉ petrkolosov36@mail.ru

Аннотация

Кембрийским разрезам в Национальном парке «Ленские Столбы» и сопредельных районах юго-востока Сибирской платформы посвящено огромное число палеонтолого-стратиграфических, литологических, фациальных, палеогеографических и структурно-тектонических исследований. В статье они дополняются детальным описанием пестроцветной свиты нижнего кембрия. Описание дано по береговым обнажениям р. Лена выше села Синск: 27 «Бачык» (левобережье), 43 и 44 (правобережье). Отложения, вскрытые в этих обнажениях, относятся к околорифовой мелководной части открытого нормально-соленого осадочного бассейна, примыкавшего к Ой-Муранскому фрагменту (рифовому массиву) грандиозного Западно-Якутского барьерного рифа. Для выяснения особенностей накопления осадков пестроцветной свиты в околорифовой фации возле Ой-Муранского рифового массива выполнено детальное описание характерной части разреза свиты. Установлено тонкое чередование слоев (мощностью от 3–5 до 10–20, реже 30–40 см) известняков светло-серых чистых, розовато-серых без заметных примесей и бордовых глинистых с обильными примесями железистых пигментов. Для отдельных интервалов разреза характерно присутствие слоев бордовых мергелей. Ритмичная смена по разрезу пород разного состава является результатом частых, по геологическим меркам кратковременных, трансгрессий и регрессий. Происхождение некоторых слоев относительно чистых серых и розовато-серых известняков, содержащих обильные остатки цианобактерий и водорослей, связано с породообразующей деятельностью указанных микроорганизмов. Приведенный в статье материал дополняет сведения об околорифовой фации Западно-Якутского барьерного рифа, одного из древнейших на Земле и сыгравшего большую роль в возникновении рифовой биоты.

Ключевые слова: нижний кембрий, литостратиграфия, пестроцветная свита, обнажение «Бачык», Ой-Муранский рифовый массив

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Института геологии алмаза и благородных металлов СО РАН (номер госзадания FUEM-2019-0002).

Благодарности. Автор благодарен к. г.-м. н. Р.В. Кутыгину за помощь в подготовке статьи.

Для цитирования: Колосов П.Н. Особенности литологического строения пестроцветной свиты нижнего кембрия в районе Ой-Муранского рифового массива (Якутия). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(1):47–55. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-47-55>

Original article

Features of the lithological structure of the Lower Cambrian Pestrotsvet Formation near the Oi-Muran reef massif (Yakutia)

P. N. Kolosov✉

Diamond and Precious Metal Geology Institute,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation
✉ petrkolosov36@mail.ru

Abstract

Cambrian sections of the Lena Pillars National Park and adjacent areas in the south-east of the Siberian platform have been the subject of paleontological-stratigraphic, lithological, facies, paleogeographic and structural-tectonic studies. In this article we provide a detailed description of the Lower Cambrian Pestrotsvet Formation in the off-reef facies near

the Oi-Muran reef massif. The description is given by the coastal outcrops of the Lena River above Sinsk village: 27 “Bachyk” (left bank), 43 and 44 (right bank). The exposed sediments in these outcrops belong to the off-reef shallow part of the open normal saline sedimentary basin adjacent to the Oi-Muran fragment (reef array) of the grand West Yakut Barrier Reef. We conducted a detailed description of the typical part of the section to identify the specifics of sediment accumulation in the Pestrotsvet Formation. A thin alternation of limestone laminae (with thickness varying from 3–5 to 10–20, less often 30–40 cm) was established. They are characterized by a light gray clean, pinkish-gray color, without visible impurities, and burgundy clay with abundant admixtures of ferruginous pigments. The individual intervals of the section are characterized by laminae of maroon marlstone. The rhythmic shift in the section of rocks of different compositions is the result of frequent, however, according geological standards, short-term transgressions and regressions. The origin of some laminae of comparatively pure gray and pinkish-gray limestones that contain abundant remains of cyanobacteria and algae is related to the rock-forming activity of these microorganisms. The materials presented in this article contribute to studies on the off-reef facies of the West Yakut Barrier Reef, one of the oldest reefs on Earth, which played a major role in the emergence of reef biota.

Keywords: Lower Cambrian, lithostratigraphy, Pestrotsvet formation, Bachyk outcrop, Oi-Muran reef massif

Funding. This study was conducted within the framework of the state assignment to the Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS.

Acknowledgements. The author is grateful to Ruslan V. Kutygin, Cand. Sci. (Geography) for his assistance in preparing this article.

For citation: Kolosov P.N. Features of the lithological structure of the Lower Cambrian Pestrotsvet Formation near the Oi-Muran reef massif (Yakutia). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(1):47–55. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-47-55>

Введение

В Национальном парке «Ленские Столбы» и сопредельных районах юго-востока Сибирской платформы выполнены детальные палеонтологические, литологические, фациальные, тектонические и палеогеографические исследования. Библиография очень обширная, она приведена во многих книгах и статьях (например, [1–7]). Существуют детальные монографические описания фауны и водорослей с тщательным обоснованием ярусных подразделений нижнего кембрия. Эти результаты изложены в капитальных монографиях [2, 4, 5, 7], а также в последующих статьях [8–10]. Разнообразие организмов на востоке Сибирской платформы было высочайшим для раннего кембрия всего мира, поэтому перечисленные публикации послужили фактологической основой для обоснования Национального парка «Ленские Столбы» в качестве объекта Всемирного наследия, включенного в Список ЮНЕСКО [11–13]. 2 июля 2022 г. исполнилось 10 лет со дня признания парка Наследием всего человечества.

Одним из выдающихся объектов мирового значения в раннем кембрии в среднем течении р. Лена является Ой-Муранский массив (рис. 1) Западно-Якутского грандиозного барьерного рифа. Именно отсюда произошли рифовые сообщества, представленные известковыми водорослями и многоклеточными скелетными животными (рис. 2) [14–16]. Ой-Муранский рифо-

вый массив хорошо представлен в обнажениях Быдьянгая, Негюрчене, Ой-Муран и др., в которых прекрасная сохранность, высокое разнообразие рифовой фауны создают основу для детальных исследований по палеоэкологии и популяционной динамике древнейшей рифовой биоты многоклеточных организмов и низших водных растений. Для раннекембрийского органического мира Западно-Якутский барьерный риф, протягивавшийся вдоль палеоэкватора на 2000 км, имел такое же значение, какое имеет в наши дни Большой Барьерный риф, расположенный у берегов Австралии. Ой-Муранский рифовый массив (риф) как фрагмент самого раннего на Земле рифа является идеальным объектом изучения рифовых и околорифовых фаций, палеоклиматических изменений в начале первой парниковой эпохи в фанерозойской истории Земли. Благодаря этому район Ленских Столбов стал полигоном для многочисленных полевых палеонтологических, стратиграфических, седиментологических и палеоэкологических исследований.

Методы и материалы

Для изучения среды осадконакопления карбонатных пород существенна их окраска на свежем сколе [17]. Красную или бордовую окраску известняки нередко приобретают вследствие наличия в них железистого пигмента, что характерно для накопления карбонатных осадков во внутренних мелководных бассейнах. Светлая



Рис. 1. Фрагмент Ой-Муранского рифового массива

Fig. 1. Fragment of the Oi-Muran reef massif



Рис. 2. Органогенный известняк с остатками рифогенной биоты раннего кембрия в Ой-Муранском рифовом массиве

Fig. 2. An organogenic limestone containing the remains of the Early Cambrian reef biota in the Oi-Muran reef massif

окраска указывает на отсутствие в известняках следов пигментов; такие осадки характерны для более глубоких внутренних бассейнов. Темно-серая и черная окраски известняков свидетель-

ствуют об их образовании в еще более глубоких водных условиях с сохранением в породе органического вещества и сульфидов железа в результате их быстрого захоронения [17].

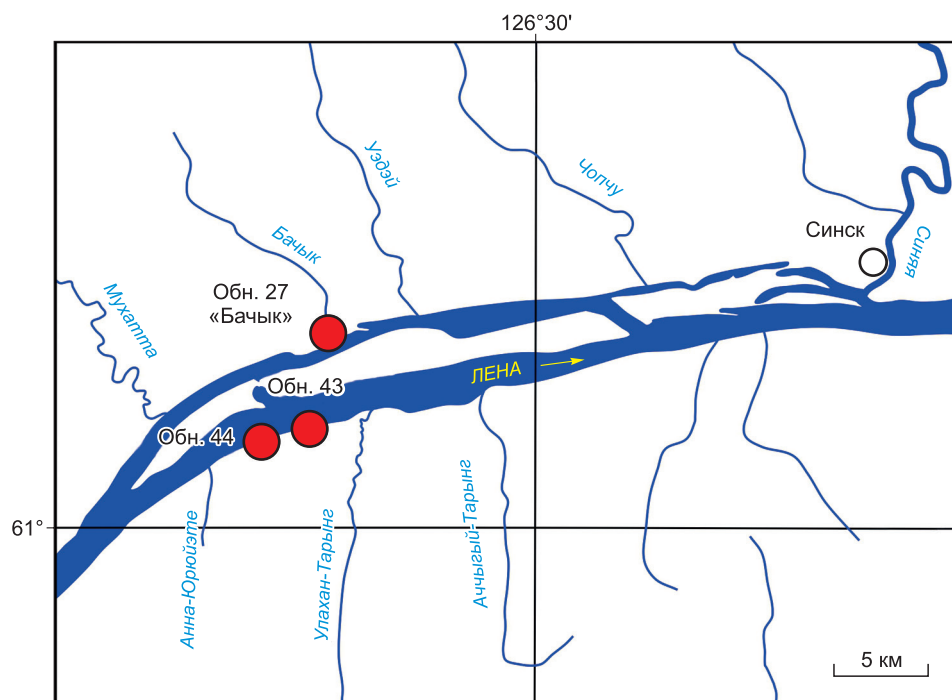


Рис. 3. Местоположение изученных обнажений

Fig. 3. Location of the studied outcrops

Исходным материалом статьи служит детальнейшее (по сантиметрам) полевое послойное описание верхней половины пестроцветной свиты нижнего кембрия в наиболее обнаженных разрезах (рис. 3), приуроченных к мелководному околорифовому участку нормально-соленого бассейна и расположенных в непосредственной близости к Ой-Муранскому фрагменту Западно-Якутского барьерного рифа. Детальное описание отложений всего нижнего кембрия было выполнено автором совместно с А.К. Бобровым и А.К. Вальковым в 1965 г. во время продолжительных полевых работ в районе, ныне относящемся к Национальному парку «Ленские Столбы».

Основная часть

В районе Ленских Столбов в нижнем кембрии К.К. Зеленовым [18] были выделены восточная (преимущественно известняки), переходная (рифогенные известняки) и западная (в основном доломиты) фациальные области, т. е. открытый нормально-соленый, переходный (рифовый) и лагунный засолоненный (засоленный) осадочные бассейны (рис. 4). На северном склоне Алданской антеклизы их существование определялось тектоническим фактором и аридным климатом. На фоне прогибания дна бассейна

осадконакопления [2] имели место трансгрессии и регрессии. В пестроцветное время с ними связано частое переслаивание известняков светло-серых, розовато-серых чистых и известняков бордовых глинистых (рис. 5). Это результат очень частого колебания уровня моря, которое отражается во многих обнажениях, расположенных в западной околорифовой мелководной части нормально-соленого бассейна. Очень частая трансгрессивно-регрессивная цикличность осадконакопления наблюдается в обнажениях 27, 43 и 44 [19].

Обнажение 27 («Бачык») расположено на левом скалистом берегу р. Лена в районе устья руч. Бачык (см. рис. 3); содержит отложения околорифовой фации [5, с. 53, слои 5 и 6; 7, с.110, 114, слои 5 и 6]. Как и в других естественных обнажениях рассматриваемого района (открытого нормально-соленого бассейна), здесь нижняя часть пестроцветной свиты не вскрывается. Обнаженный интервал свиты видимой мощностью 125 м имеет следующее строение (снизу вверх):

1. Переслаивание: а) известняков: светло-серых пелитоморфных, розовато-серых неясно-слоистых и бордовых глинистых, некоторые слои содержат обломки трилобитов; б) мергелей темно-бордовых неясно-слоистых и зеленых слоистых,

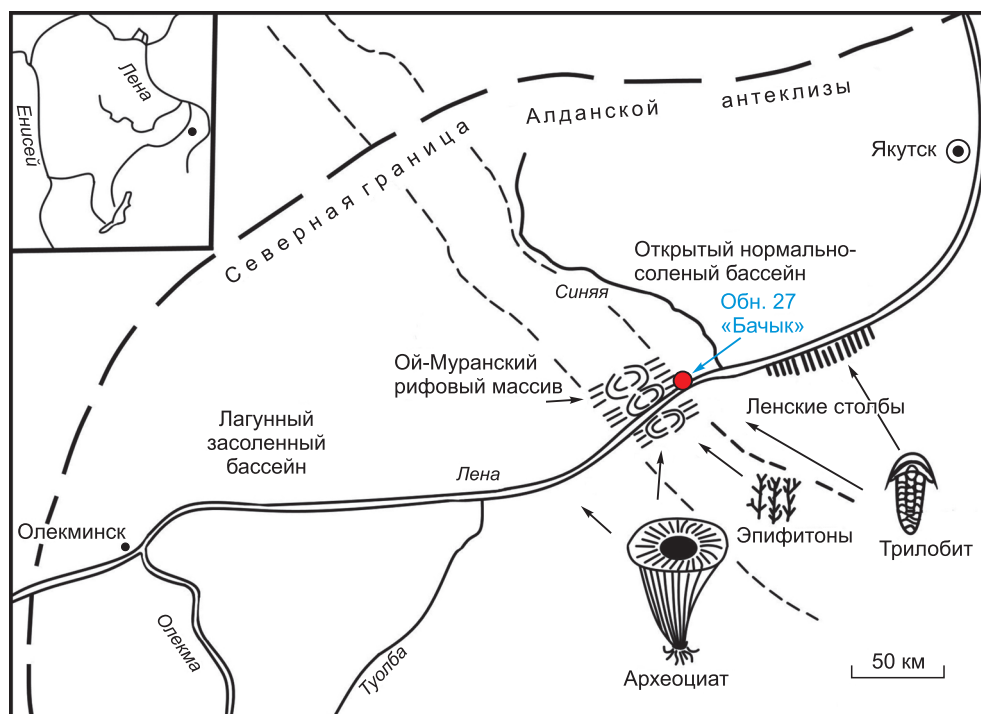


Рис. 4. Кембрийские осадочные бассейны по обе стороны Западно-Якутского барьерного рифа, контуры которого показаны штриховыми линиями

Fig. 4. Cambrian sedimentary basins on both sides of the West Yakut Barrier Reef. The contours of the Reef are shown by the dashed lines

реже трещиноватых (мощности слоев от 0,1 м до 1–2 м); в) чопчунский маркирующий пласт мощностью 2 м, представленный светло-серыми и серыми известняками. В его подошве геодезическим теодолитом установлена абсолютная отметка 126,77 м над уровнем моря; г) тонкое переслаивание известняков розовато-серых, светло-серых и известняков бордовых слабоглинистых.

2. Переслаивание: а) известняков бордовых глинистых неясно-слоистых, с крупно-раковистым изломом и пятнистых розовых, со светлыми пятнами, чистых пелитоморфных слоистых и не-слоистых; б) мергелей бордовых, светло-бордовых (мощности слоев 0,2–1,0, реже 1,5 м); в) саккырырский маркирующий пласт мощностью 2,21 м, подробно рассмотренный ниже.

3. Переслаивание известняков: а) бордовых слабоглинистых тонко- и толсто-плитчатых, реже неясно-слоистых; б) фиолетово-розовых чистых пелитоморфных слоистых и неясно-слоистых, местами пятнистых; в) светло-серых пелитоморфных чистых, с мелкобугристыми плоскостями напластования.

4. Пачка мергелей бордовых неясно-слоистых, с раковистым изломом.

Разрез «Бачык» заканчивается согласно перекрывающей пестроцветную свиту переходной свитой, нижняя часть которой сложена преимущественно доломитами и известняками водорослевыми.

Далее приводится детальнейшее описание верхней половины пестроцветной свиты, показывающее частую трансгрессивно-регрессивную цикличность осадконакопления.

В чопчунском маркирующем пласте (2 м), а также в подстилающих (5,42 м) и перекрывающих (8,6 м) отложениях встречено частое переслаивание известняков чистых (без заметных примесей) и глинистых, а также мергелей бордовых в следующей последовательности (здесь и далее описание разрезов снизу вверх):

1. Известняк светло-серый. Мощность слоя (здесь и далее). 19 см.

2. Мергель бордовый с фиолетовым оттенком. 43 см.

3. Известняк светло-серый и розовый пелитоморфный. 25 см.

4. Известняк или мергель бордовый глинистый. 10 см.

5. Известняк розовый пелитоморфный. 17 см.

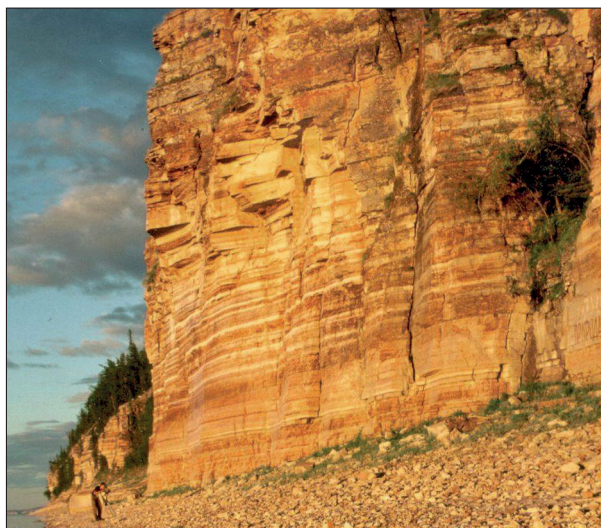


Рис. 5. Тонкое чередование светло-серых и бордовых известняков пестроцветной свиты на правом берегу р. Лена в 3,5 км выше села Синск

Fig. 5. Thin interbedding of light gray and burgundy limestones of the Pestrotsvet Formation on the right bank of the Lena River (3.5 km upstream of Sinsk village)

6. Известняк бордовый глинистый, в кровле пятнисто-полосчатый известняк (15 см). 38 см.
 7. Известняк светло-серый, серый, в кровле слойка желтоватый. 20 см.
 8. Мергель бордовый. 25 см.
 9. Известняк светло-серый пелитоморфный. 24 см.
 10. Известняк розовый слабоглинистый. 27 см.
 11. Известняк светло-серый пелитоморфный. 25 см.
 12. Мергель бордовый. 20 см.
 13. Известняк светло-серый чистый. 32 см.
 14. Мергель бордовый. 11 см.
 15. Известняк светло-серый чистый. 16 см.
 16. Мергель бордовый. 45 см.
 17. Известняк светло-серый пелитоморфный. 32 см.
 18. Мергель бордовый, в кровле прослоек (14 см) известняка фиолетового пятнистого слабоглинистого с трилобитами. 98 м.
- Выше чопчунский маркирующий пласт (2 м), представленный известняками следующих разностей:
19. Розовый чистый в подошве (5 см), а выше зеленовато-серый неслоистый. 34 см.
 20. Розовый и зеленовато-серый. 15 см.
 21. Бордовый слабоглинистый. 19 см.
 22. Розовый со светлыми с фиолетовым оттенком пятнами. 22 см.

23. Розово-фиолетовый чистый с археоциатами. 12 см.
 24. Розовый чистый в подошве (10 см), выше переходящий в бордовый. 25 см.
 25. Светло-серый с розоватым оттенком. 15 см.
 26. Бордово-розовый слабоглинистый. 38 см.
 27. Светло-серый с розовыми пятнами, в кровле розовый. 24 см.
- Выше чопчунского пласта залегает толща, которая состоит в основном из известняков и содержит единичные слои мергеля (№ 34) и доломита известковистого (№ 44)
28. Бордовый глинистый. 21 см.
 29. Светло-серый в подошве прослоя, розовый пятнистый в кровле. 20 см.
 30. Бордовый глинистый. 21 см.
 31. Светло-серый водорослевый пелитоморфный, очень чистый. 20 см.
 32. Бордовый глинистый. 22 см.
 33. Розовый цианобактериальный чистый неслоистый. 20 см.
 34. Мергель бордовый неясно-слоистый. 122 см.
 35. Светло-серый с трилобитами. 45 см.
 36. Бордовый глинистый. 15 см.
 37. Светло-серый водорослевый. 33 см.
 38. Бордовый глинистый. 37 см.
 39. Светло-серый. 26 см.
 40. Темно-бордовый глинистый слоистый. 35 см.
 41. Светло-серый цианобактериальный пелитоморфный чистый неслоистый. 19 см.
 42. Бордовый сильноглинистый неясно-слоистый. 87 см.
 42. Светло-серый с розовыми пятнами, пелитоморфный неслоистый. 8 см.
 44. Доломит известковистый сиреневый со светло-желтыми пятнами и полосками, слоистый чешуйчатый. 41 см.
 45. Светло-серый до белого, водорослевый чистый, в кровле розовый. 30 см.
 46. Бордовый глинистый. 13 см.
 47. Розовый цианобактериальный чистый, изменчивой мощности. 13–17 см.
 48. Светло-серый, изменчивой мощности, с трилобитами. 9–15 см.
 49. Бордовый глинистый и розовый, относительно чистый. 8–10 см.
 50. Светло-серый, розоватый чистый. 15 см.
 51. Бордовый глинистый. 8–11 см.
 52. Розовый водорослевый чистый неслоистый, изменчивой мощности. 10–22 см.
 53. Бордовый глинистый. 11–15 см.
 54. Розовый чистый. 16 см.

55. Бордовый глинистый. 12 см.

56. Розовый слабопятнистый чистый, лишь в верхних 8 см с тонкими прослоечками глины. 38 см.

57. Светло-серый до белого, чистый пелитоморфный неслоистый, сильно трещиноватый, верхние 5 см прослоя розоватые. 22 см.

58. Бордовый сильноглинистый слоистый. 18 см.

59. Розовый пятнистый чистый. 10 см.

60. Светло-серый до белого, чистый пелитоморфный, верхние 5 см розоватые с фиолетовым оттенком. При выветривании порода разрушается в мелкую дресву. 38 см.

Выше по разрезу наблюдается мощная толща переслаивания мергелей бордовых и известняков светло-серых, розовых и пятнистых. Верхняя часть толщи представлена переслаиванием известняков водорослевых и глинистых. На ней залегают доломиты и известняки переходной свиты нижнего кембрия.

Обнажение 43 расположено на правом берегу р. Лена в 3,4 км выше устья руч. Улахан-Тарынг (см. рис. 3). Здесь чопчунский маркирующий пласт (2,47 м) представлен следующими слоями известняков:

1. Светло-серый до почти белого, относительно чистый и розовый, местами почти темно-бордовый глинистый. 10,5 см.

2. Светло-серый, у плоскостей наложения пятнистый, пятна светло-розовые. 14 см.

3. Светло-серый или белый. 16,5 см.

4. Бордовый глинистый. 10 см.

5. Светло-серый, розоватый, в верхней части (5 см) светло-розовый. 24 см.

6. Бордовый. 8 см.

7. Розовато-серый слабопятнистый. 17 см.

8. Бордовый слабоглинистый. 8 см.

9. Розовый, почти чистый известняк, с прослойками более глинистого. 90 см.

10. Бордовый глинистый. 8 см.

11. Светло-серый чистый с розовыми пятнами. 10 см.

12. Желтовато-серый светлый чистый с прослоечком (3 см) у кровли. 17 см.

13. Слаборозовый. 14 см.

Непосредственно выше чопчунского пласта залегают известняки: бордовый глинистый слоистый (11 см); светло-серый, желтоватый чистый (28 см); бордовый глинистый слоистый, с чешуйчатой отдельностью. В 0,2 м от подошвы

слоя прослой (50 см) известняка более чистого, чем в подошве и кровле. 125 см.

Саккырырский маркирующий пласт (2,21 м) по своему строению неоднороден, представлен следующими прослойками известняков:

1. Розовый пятнистый. 32 см.

2. Светло-серый до белого, в кровле прослойка желтоватый и слаборозовый. 10 см.

3. Розовый слабопятнистый, комковатого облика. 42 см.

4. Светло-серый, светло-розовый цианобактериальный. 25 см.

5. Розовато-серый. 18 см.

6. Розовый. 20 см.

7. Светлый желтовато-розовый. 32 см.

8. Розовый до бордового, пятнистый. 42 см.

На охарактеризованном пласте залегает известняк бордовый глинистый, видимой мощностью 0,5 м. Выше осыпь, в которой наблюдаются вначале (20 м) глыбы преимущественно известняков бордовых, а выше по склону (и разрезу) – известняков водорослевых серых и пятнисто-полосчатых.

Обнажение 44 расположено на правом берегу р. Лена в 3,5 км ниже устья ключа Анна-Юрюйэте или в 6,0 км выше устья руч. Улахан-Тарынг (см. рис. 3). Саккырырский маркирующий пласт (2,66 м) здесь примыкает к Ой-Муранскому рифовому массиву. Пласт представлен одним слоем и шестью прослойками известняков:

1. Фиолетово-розовый или розовый пятнистый, с характерной мелкобугристой слоистостью, водорослевый пелитоморфный, очень крепкий. 154 см.

2. Бордовый с зеленовато-серыми пятнами. 27 см.

3. Красно-розовый с пятнами и светло-серый, очень крепкий. 27 см.

4. Бордово-фиолетовый темный неслоистый крепкий. 19 см.

5. Красно-бурый глинистый комковатый, с хиолитами и обломками трилобитов. 18 см.

6. Бурый или темно-бордовый глинистый неслоистый. 17 см.

Саккырырский маркирующий пласт перекрывается слоем (1,3 м) известняка розового или серого с розоватым оттенком. Со стороны лагунного засоленного бассейна (западного борта массива) на этом уровне развиты доломиты серые глинистые, участками водорослевые.

Заключение

В пестроцветное время раннего кембрия территория современного Национального парка «Ленские Столбы» испытала продолжительный период частых незначительных трансгрессий и регрессий, которые в районе Ой-Муранского рифа отражены в относительно тонком ритмичном чередовании слоев (от 3–5 до 10–20, реже 30–40 см) известняков светло-серых, розовато-серых чистых (без заметных примесей пигментов) и бордовых глинистых с примесями железистых пигментов. Некоторые слои относительно чистых серых и розовато-серых известняков имеют изменчивую мощность и содержат остатки цианобактерий и водорослей. Происхождение таких слоев связано с породообразующей деятельностью указанных микроорганизмов. Приведенный фактический материал представляет дополнительную информацию об околорифовой фации Западно-Якутского грандиозного барьерного рифа и геологических особенностях нефтегазонасыщенной территории Якутии.

Список литературы / References

1. Бобров А.К. *Геология Предбайкальского краевого прогиба (северо-восточной его части): строение и перспективы нефтегазонасыщенности*. М.: Наука; 1964. 228 с.
[Bobrov A.K. *Geology of the Pre-Baikal regional trough (north-eastern part): structure and prospects of oil and gas*. Moscow: Nauka; 1964. (In Russ.)]
2. Хоментовский В.В., Репина Л.Н. *Нижний кембрий стратотипического разреза Сибири*. М.: Наука; 1965. 200 с.
[Khomentovskiy V.V., Repina L.N. *The Lower Cambrian of the stratotypic section of Siberia*. Moscow: Nauka; 1965. (In Russ.)]
3. Розанов А.Ю., Миссаржевский В.В. *Биостратиграфия и фауна нижних горизонтов кембрия*. (Тр. ГИН АН СССР; Вып. 148). М.: Наука; 1966. 127 с.
[Rozanov A.Yu., Missarzhevskiy V.V. *Biostratigraphy and fauna of the Lower Cambrian horizons*. (Transactions of Geological Institute, Academy of Sciences of the USSR, vol. 148). Moscow: Nauka; 1966. (In Russ.)]
4. *Ярусное расчленение нижнего кембрия. Стратиграфия*. Отв. ред. А.Ю. Розанов, Б.С. Соколов. М.: Наука; 1984. 184 с.
[Tiered dismemberment of the Lower Cambrian. *Stratigraphy*. A.Yu. Rozanov, B.S. Sokolov (ed.). Moscow: Nauka; 1984. (In Russ.)]
5. *Кембрий Сибири*. Отв. ред. А.Ю. Розанов, Л.Н. Репина, М.К. Аполлонов и др. Новосибирск: Наука; 1992. 135 с.
[Cambrian of Siberia. A.Yu. Rozanov, L.N. Repina, M.K. Appolonov et al. (Ed.). Novosibirsk: Nauka; 1992. (In Russ.)]
6. Колосов П.Н. Библиография по геологии, палеонтологии и стратиграфии кембрийских отложений ПП «Ленские Столбы». *Природный парк «Ленские Столбы»: прошлое, настоящее и будущее = Nature park «Lena Pillars»: past, present and future*. Якутск: ИБПК СО РАН; 2007:276–293.
[Kolosov P.N. Bibliography on geology, paleontology and stratigraphy of the Cambrian deposits of the Lena Pillars. *Nature park Lena Pillars: past, present and future*: Yakutsk: IBPK SB RAS; 2007:276–293. (In Russ.)]
7. Варламов А.И., Розанов А.Ю., Хоментовский В.В. и др. *Кембрий Сибирской платформы. Книга I: Алдано-Ленский регион*. М., Новосибирск: ПИН РАН; 2008. 300 с.
[Varlamov A.I., Rozanov A.Yu., Khomentovskiy V.V. et al. *The Cambrian system of the Siberian platform. Part I: The Aldan-Lena region*. Moscow, Novosibirsk: Paleontological Institute RAS; 2008. (In Russ.)]
8. Розанов А.Ю., Маоян Жу, Пак К.Л., Пархаев П.Ю. 2-й Китайско-Российский симпозиум по расчленению нижнего кембрия. *Палеонтологический журнал*. 2008; (4):102–107.
[Rozanov A.Y., Zhu M., Pak K.L. et al. The 2nd Sino-Russian Symposium on the Lower Cambrian Subdivision. *Paleontol. J.* 2008;42:441–446 <https://doi.org/10.1134/S0031030108040151>]
9. Розанов А.Ю., Пархаев П.Ю., Шабанов Ю.Я. et al. The 13th International conference of the Cambrian Stage Subdivision Working Group. *Episodes*. 2008; 1(4):440–441.
10. Розанов А.Ю., Хоментовский В.В., Шабанов Ю.Я. et al. To the problem of stage subdivision of the Lower Cambrian. *Stratigraphy and Geological Correlation*. 2008;16(1):1–19.
11. Колосов П.Н. О геологических объектах Национального природного парка «Ленские Столбы», имеющих мировое значение. *Национальный природный парк «Ленские Столбы»: геология, почвы, растительность, животный мир, охрана и использование*. Н.Г. Соломонова, А.П. Исаева, Е.И. Иванова (ред.). Якутск: Изд-во Якутского университета; 2001: 20–27.
[Kolosov P.N. About geological objects of the world significance in the National Natural Park “Lena Pillars”. *Lena Pillars National Nature Park: geology, soils, vegetation, wildlife, protection and use*. N.G. Solomonov, A.P. Isaev, E.I. Ivanov (ed.). Yakutsk: Publishing House of the Yakut University; 2001:20–27. (In Russ.)]
12. Колосов П.Н. *Район Ленских Столбов — выдающийся пример начала биоразнообразия на Земле*. Якутск: Бичик; 2008. 64 с.
13. Колосов П.Н. *Выдающиеся универсальные ценности Природного парка «Ленские Столбы»*. Якутск: ОАО «Медиа-холдинг «Якутия»; 2010. 120 с.

[Kolosov P.N. *Outstanding universal values of the Lena Pillars Nature Park*. Yakutsk: JSC "Media Holding "Yakutia"; 2010. (In Russ.)]

14. Асташкин В.А., Савицкий В.Е. Рифовые системы кембрия и перспективы нефтегазоносности Западной Якутии. *Основные проблемы геологии и геофизики Сибири*. (Тр. СНИИГГиМС, вып. 250). Новосибирск; 1977:58–70.

[Astashkin V.A., Savitsky V.E. Cambrian reef systems and prospects of oil and gas potential of Western Yakutia. *The main problems of geology and geophysics of Siberia* (Trudy SNIGGIMS, vol. 250.). Novosibirsk; 1977:58–70. (In Russ.)]

15. Савицкий В.Е., Асташкин В.А. Роль и масштабы рифообразования в кембрийской истории Сибирской платформ. *Геология рифовых систем кембрия Западной Якутии*. (Тр. СНИИГГиМС, вып. 270). Новосибирск: СНИИГГиМС; 1979:5–18.

[Savitsky V.E., Astashkin V.A. The role and scale of reef formation in the Cambrian history of Siberian platforms. *Geology of Cambrian reef systems of Western Yakutia* (Trudy SNIGGIMS, vol. 270). Novosibirsk: SNIGGIMS; 1979:5–18. (In Russ.)]

16. Розанов А.Ю. Центры происхождения кембрийских фаун. *Международный геологический конгресс. 26-я сессия. Доклады сов. геологов. Палеонтология. Стратиграфия*. М.: Наука; 1980:30–34.

[Rozanov A.Yu. Centers of origin of Cambrian faunas. *International geological congress. 26th session. Re-*

ports of the Soviet geologists. Paleontology. Stratigraphy. Moscow: Nauka; 1980:30–34. (In Russ.)]

17. Wilson J.L. *Carbonate Facies in Geologic History*. New York: Springer; 1975. 471 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-6383-8>

18. Зеленов К.К. Литология нижнекембрийских отложений северного склона Алданского массива. (Тр. ГИН АН СССР, вып. 8). М.: Изд-во АН СССР; 1957. 122 с.

[Zelenov K.K. *Lithology of the Lower Cambrian deposits at the northern slope of the Aldan massif*. (Trudy of the Geological Institute, Academy of Sciences of the USSR, vol. 8). Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1957. (In Russ.)]

19. Бобров А.К., Колосов П.Н., Вальков А.К. Составление отложений нижнего кембрия восточной и западной фациальных областей северного склона Алданского щита. *Тектоника, стратиграфия и литология осадочных формаций Якутии. (Доклады на XVII науч. Сессии Якут. филиала Сиб. отд-ния АН СССР)*. Якутск: Якуткнигоиздат; 1968:103–114.

[Bobrov A.K., Kolosov P.N., Valkov A.K. Comparison of Lower Cambrian deposits of the eastern and western facies regions of the northern slope of the Aldan shield. *Tectonics, stratigraphy and lithology of the sedimentary formations of Yakutia* (Reports of the 17th scientific session of the Yakut Branch of the SB, the Academy of Sciences of the USSR). Yakutsk: Yakutkngoizdat; 1968:103–114. (In Russ.)]

Об авторе

КОЛОСОВ Петр Николаевич, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-8690-9308>, e-mail: petrkolosov36@mail.ru

About the author

KOLOSOF, Petr Nikolaevich, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Principal Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-8690-9308>, e-mail: petrkolosov36@mail.ru

Поступила в редакцию / Submitted 05.06.2022

Поступила после рецензирования / Revised 22.11.2022

Принята к публикации / Accepted 15.12.2022

Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

УДК 627.824;550.379

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-56-67>

Оригинальная статья

К оценке устойчивости ограждающей дамбы г. Якутск

Р. В. Чжан[✉], А. А. Якимов, А. А. Чжан, П. С. Заболотник

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

[✉]rvzhang@mpi.ysn.ru

Аннотация

Приведены результаты исследования геокриологических условий участка эксплуатации грунтовой дамбы, построенной на низкой пойме р. Лена в долине г. Якутск. Установлено, что дамба на участке № 3 покоится на талых грунтах, которые представлены разнородными водонасыщенными аллювиальными песками различной плотности. Измеренная температура грунтов на глубине 10 м колеблется от +6 до +6,4 °С. Столь высокая температура обусловлена наличием закрытого пруда-охладителя, в который происходит сброс теплых вод с Якутской ТЭЦ (ЯТЭЦ). Показана эффективность геофизического метода электротомографии (ЭТ) при оконтуривании фильтрационных зон в теле грунтовой дамбы и определении верхней границы многолетнемерзлых пород в основании сооружения. Даны рекомендации по обеспечению статической и фильтрационной устойчивости дамбы на исследуемом участке.

Ключевые слова: криолитозона, дамба, теплообмен, фильтрация, устойчивость гидротехнического сооружения, механическая суффозия, талик, сезонное промерзание

Финансирование. Исследования выполнены при поддержке комплексной программы фундаментальных научных исследований ИМЗ СО РАН (Проект СО РАН АААА-А20-120111690011-9).

Для цитирования: Чжан Р.В., Якимов А.А., Чжан А.А., Заболотник П.С. К оценке устойчивости ограждающей дамбы г. Якутск. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(1):56–67. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-56-67>

Original research

Assessment of flood-control dam stability in Yakutsk (Russia)

R. V. Zhang[✉], A. A. Yakimov, A. A. Zhang, P. S. Zabolotnik

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

[✉]rvzhang@mpi.ysn.ru

Abstract

The article presents the results of an investigation of the permafrost conditions of the embankment dam in Yakutsk, which is located in the low floodplain of the Lena River. Dam site 3 rests on thawed soils represented by multi-grained water-saturated alluvial sands of various densities. The measured soil temperature alters from +6 to +6.4°C at a depth of 10 m. The high temperature was attributable to the discharge of warm water from the Combined heat and power (CHP) plant in Yakutsk into the enclosed cooling pond. Electrical resistivity tomography (ERT) is a highly effective geophysical method for delineating seepage zones in the earthen dam body, and determining the upper permafrost table at the base of construction. We have provided recommendations for the static and filtration stability of the study site.

Keywords: permafrost, dam, heat exchange, seepage, stability of hydraulic structures, mechanical suffusion, talik, seasonal freezing of soils

Funding. This study was supported by the Complex Program of Foundation Scientific Research at the Melnikov Permafrost Institute of SB RAS (project number SB RAS AAAAAA-A20-120111690011-9).

For citation: Zhang R.V., Yakimov A.A., Zhang A.A., Zabolotnik P.S. Assessment of flood-control dam stability in Yakutsk (Russia). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(1):56–67. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-56-67>

Введение

Исследуемый объект расположен в средней части р. Лена, в долине Туймаада, между Кангаласским и Табагинским мысами (г. Якутск). Часть территории города ежегодно затапливалась во время весенних паводков. Для исключения этого негативного явления и обеспечения безопасного функционирования города Департамент по водным отношениям Республики Саха (Якутия)¹ с 2001 г. приступил к реализации проектов защиты города от паводковых вод р. Лена. Обзорная схема расположения дамбы приведена на рис. 1. Условно ограждающая дамба разбита на пять участков. Общая длина напорного фронта составляет 18 568 м. Гидроузел отнесен к II классу капитальности.

Наибольшую озабоченность в настоящее время вызывает устойчивость защитной дамбы участка № 3, расположенной в городской черте от дамбы 202 микрорайона до Речного порта. Протяженность дамбы на этом участке составляет 1330 м.

За период эксплуатации защитная дамба на участке № 3 неоднократно подвергалась разрушению во время прохождения паводков в местах ее примыкания к городской дамбе (202 квартал г. Якутска) и водопропускному сооружению (ПК 7+50). Кроме этого, имели место деформации тела дамбы в результате эрозионных процессов от таяния снега и дождей. Особую опасность представляет то, что в теле и основании сооружения существует круглогодичная фильтрация. Положение основных фильтрационных зон по данным натурных наблюдений схематично представлено на рис. 2. Фотоснимки проявления фильтрационных процессов в различные периоды года приведены на рис. 3. Кроме этого, фильтрует и городская дамба 202 квартала г. Якутск на участке ее примыкания от ул. Чернышевского до участка № 3 (рис. 4).

Все эти годы гидроузел находится практически в предаварийном состоянии. Принятый в 2011 г. проектный вариант – «Усиление крепле-

ния низового откоса (со стороны ЯТЭЦ) и основания дамбы с устройством противофильтрационного зуба», так и не был исполнен в полном объеме. Только в 2020 г. были выполнены рекомендации по устройству наклонной упорной прижимной призмы со стороны нижнего бьефа, но без противофильтрационного зуба. Это мероприятие в основном направлено на повышение статической устойчивости дамбы. Проблема фильтрационной устойчивости так и не была решена. Мониторинг гидроузла показывает, что дамба и ее основание продолжают фильтровать, причем развивается опасный процесс механической суффозии (см. рис. 3). Проведенные расче-

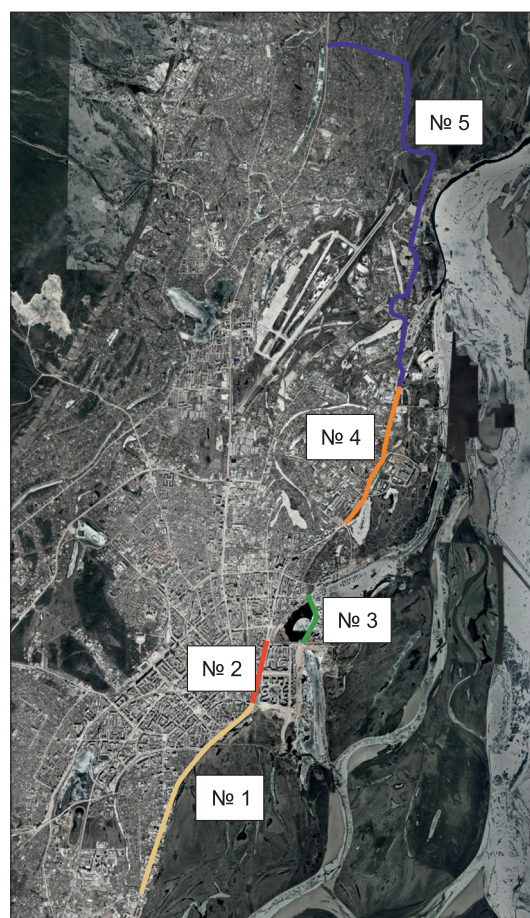


Рис. 1. Обзорная схема расположения дамбы на участке № 3

Fig. 1. A general view of the dam at site No. 3

¹ С 2021 г. Исполнительная дирекция по водному хозяйству и организации восстановительных работ по ликвидации последствий паводков в Республике Саха (Якутия).

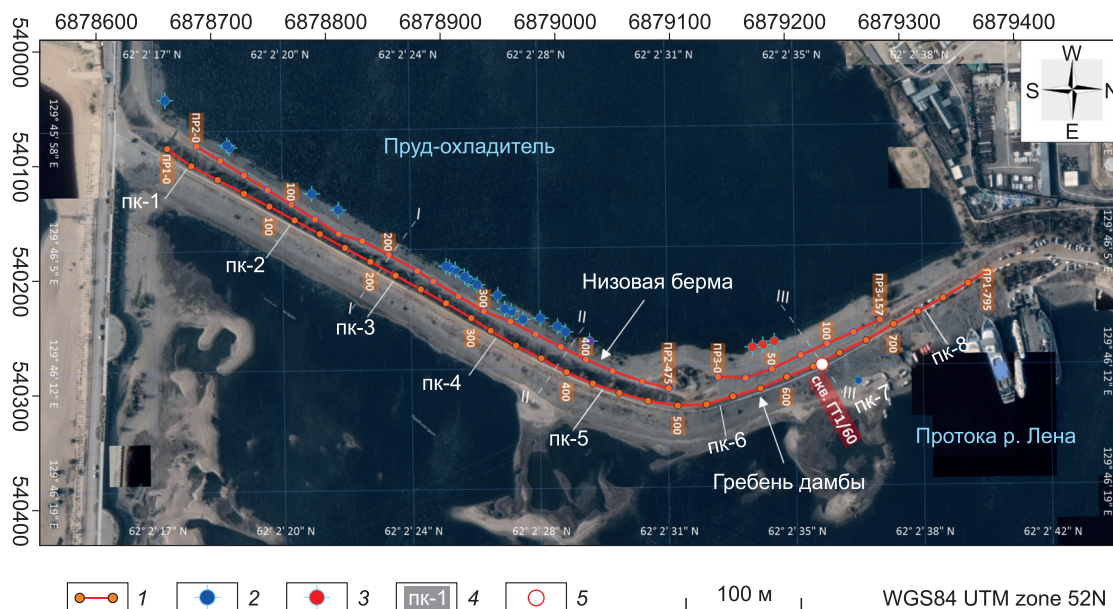


Рис. 2. Карта фактического материала исследований: 1 – профили электротомографии; 2 – участки проявления фильтрационных процессов в теле и основании дамбы; 3 – участки наиболее интенсивной фильтрации; 4 – строительные пикеты; 5 – опорная скважина ГТ1/60

Fig. 2. Map research data: 1 – electrical resistivity tomography profiles; 2 – zones of appearance of seepage in the body and base of the dam; 3 – zones of the most intensive seepage; 4 – construction pickets; 5 – the main borehole GT1/60

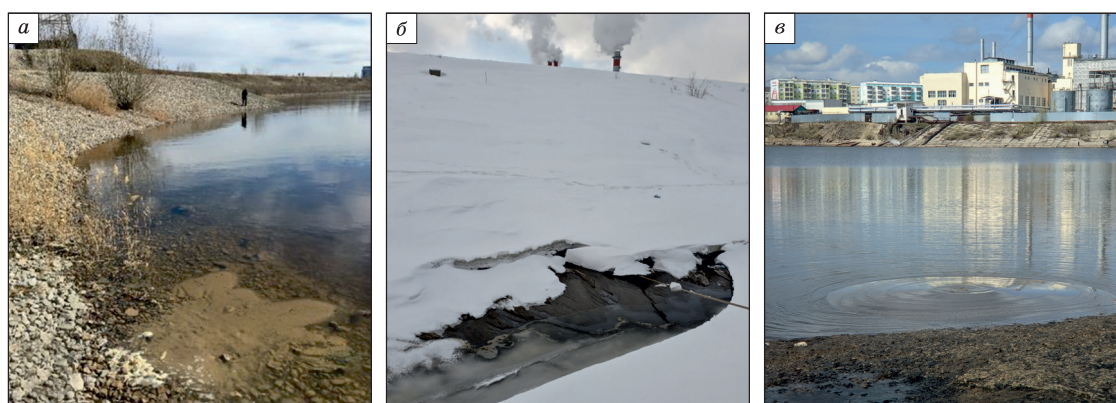


Рис. 3. Выходы воды в основании дамбы: на участке между сифонами и опорой ЛЭП (май 2020 г.) (а); со стороны городской протоки (март 2021 г.) (б); со стороны пруда-охладителя ЯТЭЦ (май 2021 г.) (в)

Fig. 3. Discharge of seepage flows at the base of the dam: (а) between the siphons and the power line (May 2020); (б) from the city channel (March 2021); (в) from the side of the CHP (Yakutsk) cooler pond (May 2021)

ты статической и фильтрационной устойчивости тела и основания дамбы также показывают неудовлетворительное состояние сооружения в плане фильтрационной и статической устойчивости [1].

Однако в целом в критические моменты (периоды паводков) удается обеспечить рабочее состояние дамбы. Это достигается за счет четко

организованных Исполнительной дирекцией ремонтно-восстановительных работ. Однако дамба фильтрует практически по всей длине, но особенно интенсивно в интервале ПК5+00 – ПК 8+00.

Рассматривая дамбу как природно-техническую систему, следует отметить сложность процессов, происходящих в сооружении при взаимодействии ее с окружающей средой. К ним от-

носятся: специфические условия теплообмена гидроузла; сброс горячих вод ЯТЭЦ в пруд-охладитель; гидрогеологический режим работы гидроузла (дамба фильтрует весной в пруд-охладитель со стороны городской протоки р. Лена, а зимой в обратном направлении); сложные геокриологические условия створа.

Таким образом до настоящего периода дамба остается под угрозой потери фильтрационной и статической устойчивости. Существующая ситуация вызывает беспокойство у Исполнительной дирекции, которая поднимает вопрос о более надежном решении проблемы устойчивости дамбы на данном участке.

В 2020–2021 гг. Исполнительная дирекция обратилась в Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук (ИМЗ СО РАН) с просьбой провести дополнительные инженерно-геологические исследования участка № 3 дамбы инженерной защиты г. Якутск с целью уточнения геокриологической обстановки основания и тела дамбы, а также предложить рекомендации по обеспечению статической и фильтрационной устойчивости дамбы.

Краткая инженерно-геологическая характеристика района исследования

Кратко природно-климатические и инженерно-геокриологические условия низкой поймы р. Лена в районе г. Якутск приведены в работах [2–7].

В геолого-геоморфологическом отношении исследуемый участок расположен на низкой пойме р. Лена. Верхняя часть разреза представлена четвертичными аллювиальными и техногенными образованиями. Комплекс аллювиальных отложений залегает на размытой поверхности юрских пород [3].

По геокриологическому районированию территория относится к зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород (ММП), мощность которых меняется в пределах от 100 до 300 м. Целостность мерзлой толщи нарушается большим количеством таликов, развитых под озерами и под руслами рек. Средняя годовая температура пород на глубине 20 м изменяется от -2 до -4 °С.

В результате исследований было установлено, что дамба участка № 3 покоится на талых грунтах, которые представлены разнородными



Рис. 4. Фрагмент фильтрационного выхода воды со стороны 202 квартала (май 2022 г.): 1–4 – фильтрационные выходы

Fig. 4. A fragment of the seepage zone from the side of the 202 district (May 2022): 1–4 – seepage

ми водонасыщенными аллювиальными песками рыхлой и средней плотности. Измеренная температура грунтов на глубине 10 м меняется в пределах от $+6$ до $+6,4$ °С. Столь высокая температура обусловлена наличием закрытого пруда-охладителя, в который происходит сброс теплой воды ЯТЭЦ.

Эксплуатация оградительной дамбы участка № 3 показала, что для разработки мероприятий по обеспечению ее фильтрационной и статической устойчивости необходимо уточнение инженерно-геокриологических условий тела и основания.

Уточнение геокриологической обстановки на объекте проводилось с помощью бурения и геофизических исследований. В конце апреля 2021 г., в правом примыкании дамбы (со стороны Речного порта), была пройдена скважина ГТ-1/60 (рис. 2), глубиной 40,2 м, с инженерно-геокриологическим описанием керна и лабораторными исследованиями вскрытых литологических горизонтов, проведены температурные измерения в пробуренной и существующих других термометрических скважинах. В результате бурения было установлено, что сверху до глубины 11–12 м залегают насыпные талые грунты дамбы, представленные разнородными пылеватыми песками с примесью щебня, гальки. В зимний период грунты промерзают до глубины 3,5–4,0 м [3]. Ниже до глубины 31 м (абс. отм. 64 м) толща представлена талыми разнородными песками, подстилаемыми коренными породами – песчаниками юрского возраста серого цвета. Многолетнемерзлые породы вскрыты на глу-

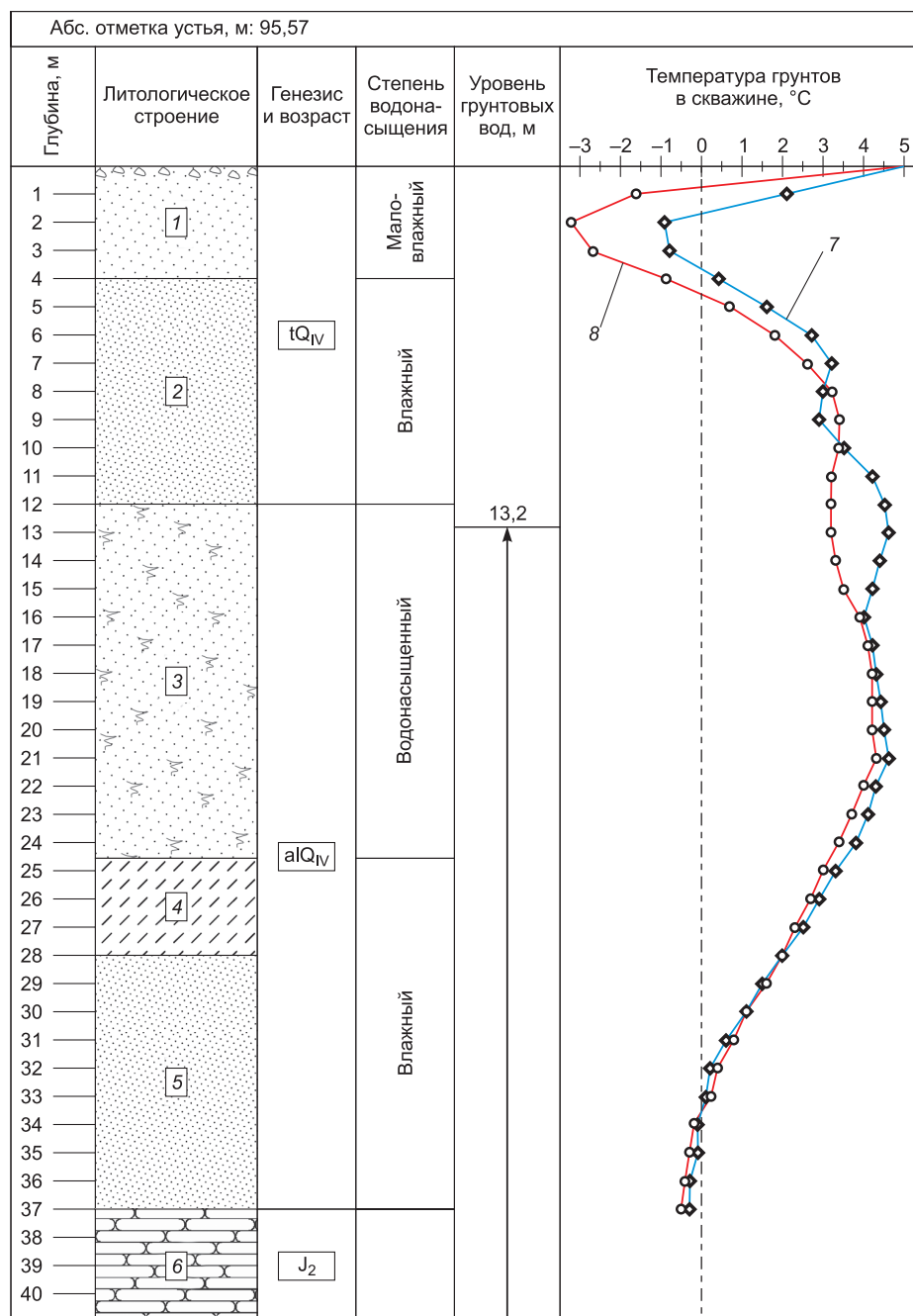


Рис. 5. Геологическая колонка по скважине ГТ-1/60 с данными температурных замеров: 1 – песок средний с щебнем и гравием (до 30 %); 2 – песок мелкий; 3 – песок средний с примесью растительного детрита; 4 – супесь; 5 – песок мелкий; 6 – песчаник; 7 – распределение температуры по глубине на 01.06.2021; 8 – распределение температуры по глубине на 12.05.2022

Fig. 5. Geological column for GT-1/60 borehole with temperature measurements: 1 – medium sand with crushed stone and gravel (up to 30 %); 2 – fine sand; 3 – medium sand with an admixture of vegetable detritus; 4 – sandy clay; 5 – fine sand; 6 – sandstone; 7 – temperature distribution by depth on 01.06.2021; 8 – temperature distribution by depth on 12.05.2022

бине 31,0 м, т. е. глубина залегания мерзлой толщи на участке бурения составила порядка 20 м от подошвы слоя насыпных грунтов дамбы. Температура на забое на момент исследова-

ний составила $-0,5^{\circ}\text{C}$. Геологическая колонка по скважине ГТ-1/60 приведена на рис. 5. Инженерно-геологический разрез по продольному профилю дамбы приведен на рис. 6.



Рис. 6. Инженерно-геокриологический разрез по продольному профилю дамбы

Fig. 6. Geocryological engineering section along the longitudinal profile of the dam

Оценка инженерно-геокриологических условий участка № 3 ограждающей дамбы методом электротомографии

Геофизические исследования на участке были проведены с целью оценки глубины залегания кровли коренных многолетнемерзлых пород в основании дамбы и уточнения характера фильтрационного режима сооружения.

В качестве геофизического метода исследования была использована технология электротомографии (ЭТ), позволяющая получать информацию о пространственном распределении удельного электрического сопротивления (УЭС) в исследуемом массиве горных пород. Указанный метод эффективно применяется при изучении состояния грунтовых плотин гидротехнических сооружений (ГТС), в том числе в условиях криолитозоны [8, 9]. Этому, в общем случае, способствует различие по параметру УЭС насыпных грунтов, рыхлых аллювиальных отложений, коренных пород основания, мерзлых, талых и обводненных участков, что позволяет существенно уточнять строение исследуемого геологического разреза.

Геофизические исследования выполнены в мае 2020 и 2022 гг. в период до наступления весенне-го паводка и во время его прохождения. Профили располагались вдоль гребня и низовой бермы дамбы (рис. 2). В процессе работ применялся комплекс, включающий прямую и встречную трехэлектродную установки Шлюмберже, а также осевую дипольную установку с шагом 5 и 2,5 м, что позволило достичь максимальной эффективной глубины исследования 80 м, детализировать верхнюю часть геоэлектрических разрезов и отбраковывать ложные техногенные аномалии. Съемка производилась электроразведочной станцией СКАЛА-64.

Перед геофизическими исследованиями стояла задача получить информацию о геоэлектрических параметрах разреза в продольном сечении дамбы до глубины залегания кровли ММП. Цветовая шкала распределения УЭС подбиралась с целью подчеркнуть характерные особенности геоэлектрических разрезов с учетом априорной информации и условий проведения съемки.

В процессе решения задачи обнаружения очагов фильтрации в теле дамбы при анализе ре-

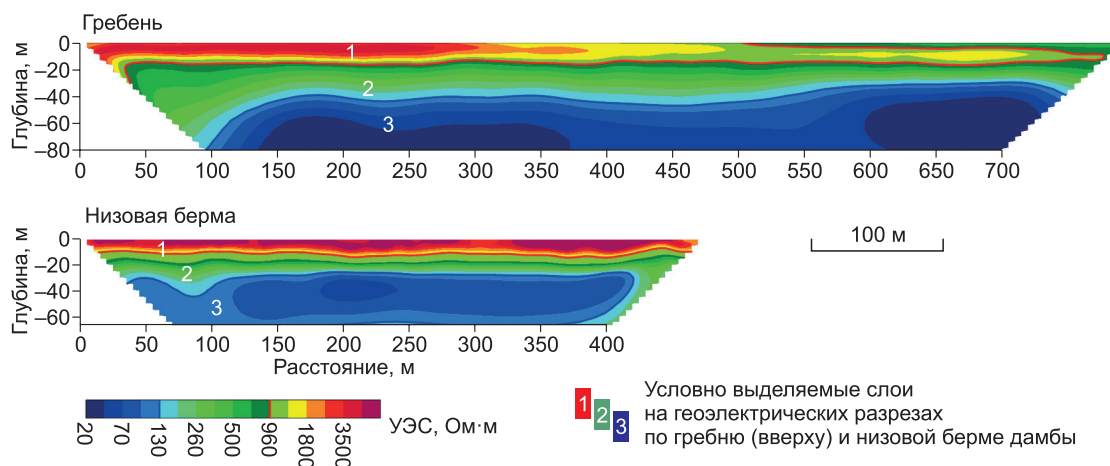


Рис. 7. Характерные геоэлектрические разрезы по гребню (профиль 1) и низовой берме дамбы (профиль 2) до наступления паводка: 1 – слой со значениями УЭС 1200–4000 Ом·м; 2 – слой с значениями УЭС 150–600 Ом·м; 3 – слой с значениями УЭС <150 Ом·м

Fig. 7. Typical geoelectrical sections along the top (profile 1) and the lower berm of the dam (profile 2) before the flood: 1 – layer with electrical resistivity 1200–4000 Ohm·m; 2 – layer with electrical resistivity 150–600 Ohm·m; 3 – layer with electrical resistivity <150 Ohm·m

зультатов подробно рассматривалась верхняя часть геоэлектрических разрезов, полученных в период прохождения паводка, до глубины порядка 15 м от поверхности, что соответствует максимальной высоте сооружения. Данные о распределении УЭС на глубинах, превышающих это значение, интерпретировались преимущественно с точки зрения определения особенностей геокриологического строения аллювиальных отложений и осадочных пород в основании дамбы.

Геоэлектрические разрезы по гребню и низовой берме ГТС (в створе профилей 1 и 2), полученные при исследованиях в период до наступления паводка, схожи по своей структуре и имеют выраженный горизонтально-слоистый характер (рис. 7).

На разрезах контрастно выделяется верхний слой переменной мощности с наиболее высокими значениями УЭС (1200 – 4000 Ом·м), который подстилается относительно низкоомным горизонтом с вариациями УЭС от 150 до 600 Ом·м. Основание разрезов характеризуется наименьшими значениями УЭС, не превышающими 150 Ом·м.

По результатам анализа характера геоэлектрической картины на разрезе электротомографии по гребню дамбы (рис. 7), с учетом материалов инженерно-геологических изысканий [3], верхний слой (1) мощностью от 12 до 15 м сложен талыми (сезонно-мерзлыми) насыпными грунтами тела ГТС и рыхлыми отложениями без признаков обводнения. Значительные вариации

удельного электрического сопротивления в пределах слоя связываются с материалом отсыпки и степенью оттаивания грунтов на момент проведения съемки. Подстилающий слой (2) представлен аллювиальными песчаными отложениями с высокой степенью водонасыщения грунтовыми водами, что проявляется в значительном понижении среднего уровня УЭС по сравнению с вышележащим грунтовым массивом. Аналогичная ситуация наблюдается на геоэлектрическом разрезе в створе профиля вдоль низовой бермы.

Основание полученных геоэлектрических разрезов по логике интерпретации представлено многолетнемерзлыми коренными породами, как правило, обладающими повышенными УЭС по сравнению с таликовыми участками [8]. Однако уровень УЭС в основании разрезов (слой 3), напротив, минимальный (рис. 7), что не является характерным в рамках общепринятой парадигмы. Для объективной трактовки полученной геоэлектрической картины необходимо оперировать факторами, определяющими электрическое сопротивление пород и учитывать особенности регионального строения территории исследования.

Так, величина УЭС нерудных пород ввиду их ионной проводимости в общем случае определяется объемом, фазовым состоянием и характером распределения свободной и связанной воды в порах, а значит, непосредственно пористостью, проницаемостью, уровнем минерализации по-

ровой влаги, температурой, жесткостью скелета и степенью дисперсности породы.

Таким образом, нельзя отрицать, что при сочетании ряда факторов удельное электрическое сопротивление мерзлых коренных пород в районе расположения рассматриваемого ГТС может быть ниже УЭС рыхлых насыпных и аллювиальных отложений, формирующих тело дамбы и ее основание. Такая ситуация возможна при условии содержания значительного объема незамерзшей связанной воды и отсутствия ледяных включений в коренных многолетнемерзлых породах в совокупности со структурными особенностями рыхлых отложений. Следовательно, при геофизических наблюдениях на ГТС область низких сопротивлений, выделенная в коренных породах основания, не всегда соответствует зоне растепления или фильтрации. Справедливо и обратное утверждение: высокое сопротивление не всегда соответствует мерзлым породам.

Согласно данным по региональному строению территории исследования, являющейся частью Центрально-Якутской низменности, коренные многолетнемерзлые породы в районе производства работ относятся к терригенным отложениям среднеюрского возраста, преимущественно залегают на глубинах 12,4–22,7 м (погружаясь до 30–40 м на участках глубоких проток и озерных котловин) и представлены в основном алевролитами и песчаниками [10]. Обращаясь к данным предшествующих геофизических исследований, крайне важно подчеркнуть, что по результатам обобщающей статистической оценки объемного массива данных вертикальных электрических зондирований УЭС мерзлых осадочных пород юрского возраста в пределах долины Туймаада в 84,7 % случаев ниже УЭС рыхлых отложений. Разница варьирует от 2 до 13 раз в абсолютном отношении, что согласуется с полученной геоэлектрической картиной на разрезах электромографии.

Необходимо также учитывать, что геофизические профили проходили по дамбе, с обеих сторон окруженной значительным объемом воды, оказывающей боковое влияние на данные электроразведки и являющейся, по сути, трехмерной продольной неоднородностью низкого электрического сопротивления. В результате следует ожидать дополнительное снижение уровня регистрируемых кажущихся сопротивлений на больших разностях электроразведочных установок, со-

ответствующим глубинам залегания коренных многолетнемерзлых пород.

Анализ приведенных выше данных позволяет предполагать, что низкоомное основание полученных геоэлектрических разрезов действительно представлено толщей коренных ММП, а значит, существует возможность оценки глубины залегания ее кровли.

Для решения этой задачи проведено сопоставление уровня УЭС на геоэлектрическом разрезе по профилю вдоль гребня дамбы, пройденному до наступления паводка, с данными по опорной скважине ГТ-1/60, вскрывшей многолетнемерзлое основание. В результате установлено, что величина электрического сопротивления коренных многолетнемерзлых пород по данным ЭТ не превышает 130 Ом·м, что позволило оконтурить кровлю ММП на всем протяжении профиля исследований (рис. 8). Согласно полученной геофизической информации, коренные многолетнемерзлые породы в створе профиля по гребню ограждающей дамбы залегают на глубинах от 30 до 40 м и более (абс. отм. кровли 55–65 м).

Как указывалось ранее, поднятие уровня воды в протоке р. Лена во время паводка приводит к возникновению фильтрационных окон в теле дамбы, признаком наличия которых на геоэлектрическом разрезе по гребню является понижение значений УЭС в диапазоне глубин 7–15 м от поверхности, т. е. локальное уменьшение мощности верхнего высокоомного горизонта (рис. 9). Процессы фильтрации также проявляются на разрезах в створе бермы ГТС, причем на меньших глубинах и более контрастно – в виде участков резкого снижения значений УЭС в пределах верхней части геоэлектрических разрезов.

Проведенные геофизические исследования позволили уточнить геокриологические условия участка эксплуатации исследуемого гидроузла, в том числе показали свою эффективность при локализации окон фильтрации в насыпных грунтах дамбы. В процессе решения целевой задачи определения глубины залегания многолетнемерзлых пород обосновано предположение, что уровень УЭС коренных многолетнемерзлых пород в пределах изучаемой территории существенно ниже, чем у рыхлых отложений и насыпных техногенных грунтов, в результате чего дана оценка глубине залегания кровли ММП в основании сооружения.

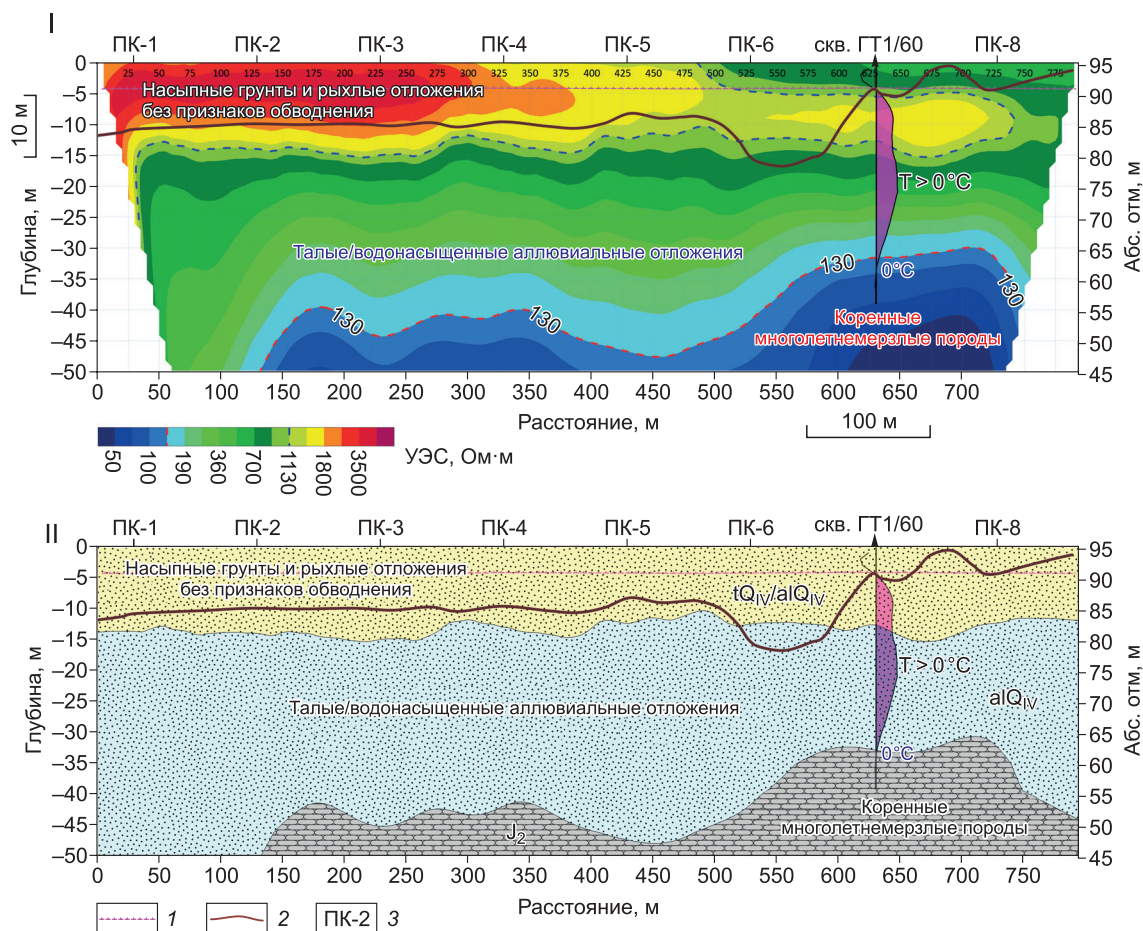


Рис. 8. Геоэлектрический (I) и интерпретационный (II) разрезы по гребню дамбы: 1 – нормативная глубина сезонного промерзания; 2 – проектное положение основания дамбы; 3 – строительные пикеты

Fig. 8. Geoelectrical (I) and interpretative (II) cross-sections along the top of the dam with partial interpretation: 1 – the standard depth of seasonal freezing; 2 – the design position of the dam base; 3 – construction pickets

Закключение

Несмотря на имеющийся опыт строительства и эксплуатации гидроузлов в криолитозоне [11–13] вопрос их устойчивости остается актуальным по сей день. Этот опыт показал, что одним из основных компонентов устойчивости гидротехнических сооружений является максимально точное знание геокриологических условий.

В последнее время в практику гидротехнического строительства все шире внедряются геофизические методы как наиболее мобильные и менее экономически затратные, позволяющие без нарушения среды на больших площадях в пределах и вне гидроузлов оценивать геокриологическую ситуацию [14].

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы и предложить некоторые практические пред-

ложения по обеспечению статической и фильтрационной устойчивости ограждающей дамбы на участке № 3:

- в настоящее время ограждающая дамба г. Якутск на участке № 3 находится в предельном состоянии и требует реконструкции для обеспечения статической и фильтрационной устойчивости;
- проведенные геофизические исследования (метод электротомографии) показали свою эффективность при выявлении локальных фильтрационных зон в теле дамбы и определении верхней границы ММП в основании (30–40 м);
- особое внимание уделить инженерно-геокриологическим, гидрогеологическим условиям створа гидроузла, которые должны быть положены в основу многовариантного проектирования с использованием методов моделирования стати-

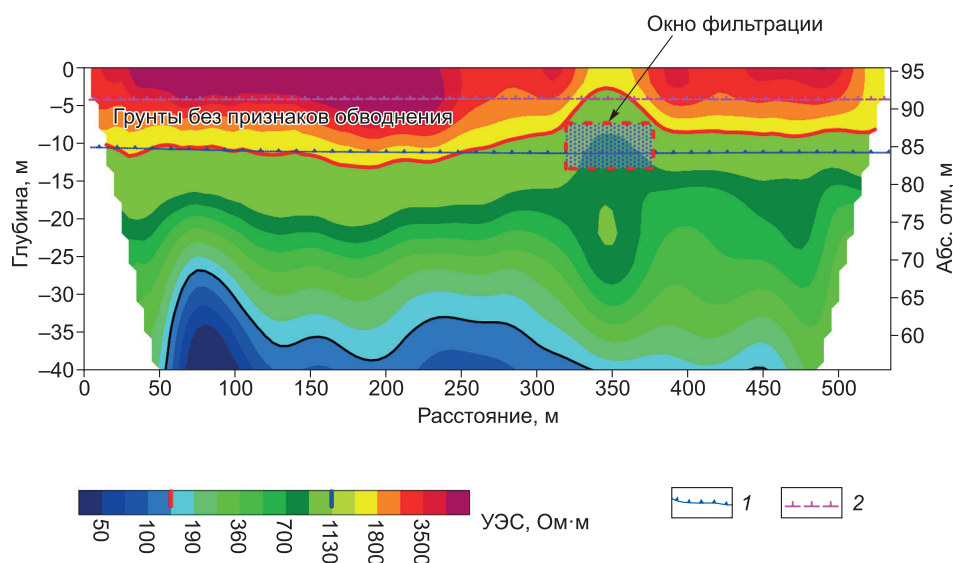


Рис. 9. Признак наличия фильтрационных процессов на геоэлектрическом разрезе по гребню дамбы во время паводка (фрагмент профиля 1): 1 – уровень грунтовых вод по данным бурения (до паводка); 2 – нормативная глубина сезонного промерзания

Fig. 9. The manifestation of seepage processes on the geoelectrical section along the top of the dam during a flood (fragment of profile 1): 1 – a groundwater level according to drilling data (before a flood); 2 – the standard depth of seasonal freezing

ческой и фильтрационной устойчивости гидроузла в целом;

– учитывая сложный характер теплообмена в пруде-охладителе ЯТЭЦ (постоянный сброс горячей воды), окончательное конструктивное решение противofiltrационного устройства принять на основе существующего опыта строительства и эксплуатации и экологической безопасности подобных гидроузлов в криолитозоне, а именно – использовать вяжущие средства на основе гелей, глиноцемента или цемента.

Список литературы / References

1. Горохов Е.Н., Чжан Р.В., Маленов А.А., Сковцов С.Я., Чжан А.А., Заболотник П.С. Анализ фильтрационной прочности и статической устойчивости основания и тела дамбы инженерной защиты селитебной территории в ССКЗ. *Приволжский научный журнал*. 2021;60(4):112–118.

[Gorokhov E.N., Zhang R.V., Malenov A.A., Skvortsov S.Ya., Zhang A.A., Zabolotnik P.S. Analysis of filtration strength and static stability of the base and body of the dam of the residential area engineering protection in the permafrost zone. *The Privolzhsky Scientific Journal*. 2021;60(4):112–118. (In Russ.)]

2. Чжан Р.В., Павлова Н.А., Огонеров В.В., Лобанов А.Л., Данзанова М.В. Инженерное освоение низких пойм рек криолитозоны под гражданское строительство: опыт, проблемы, перспективы. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2020;25(2):87–97. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-2-7>.

[Zhang R.V., Pavlova N.A., Ogonerov V.V., Lobanov A.L., Danzanova M.V. Civil construction on low floodplains in permafrost regions: experience, problems, prospects. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2020;25(2):87–97. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-2-7>]

3. Отчет о работе по х/д 5/21 «Обработка материалов инженерно-геологических исследований на объекте: Участок № 3 гидротехнического сооружения «Инженерная защита от паводковых вод г. Якутска». Научный рук. Р.В. Чжан. Якутск: ИМЗ СО РАН; 2021. 68 с.

[Work Report: “Processing engineering and geological studies materials at the facility: Site No. 3, hydraulic engineering structure “Engineering protection from flood waters in Yakutsk”. Supervisor R.V. Zhang. Yakutsk: IMZ SB RAS; 2021. 68 p. (In Russ.)]

4. Гаврилова М.К. Климат Центральной Якутии. Якутск: Якут. кн. изд-во; 1973. 120 с.

[Gavrilova M.K. *Climate of Central Yakutia*. Yakutsk: Yakutskoe kn. izd-vo; 1973. 120 p. (In Russ.)]

5. Мельников П.И. Вечная мерзлота в районе г. Якутска. *Исследование вечной мерзлоты в ЯАССР*. 1950; 2:53–70.

[Melnikov P.I. Permafrost in Yakutsk. *Permafrost research in the YAASSR*. 1950; 2:53–70. (In Russ.)]

6. Шепелев В.В., Толстихин О.Н., Пигузова В.М. и др. Мерзлотно-гидрогеологические условия Восточной Сибири. Новосибирск: Наука; 1984. 142 с.

[Shepelev V.V., Tolstikhin O.N., Piguzova V.M. et al. *Permafrost and hydrogeological conditions of Eastern Siberia*. 1984. 142 p. (In Russ.)]

7. Роман Л.Т., Цернант А.А., Полещук В.Л., Цеева А.Н., Леванов Н.И. *Строительство на намывных грунтах в криолитозоне*. М.: ИД «Экономика, Строительство, Транспорт»; 2008. 323 с.

[Roman L.T., Tsernant A.A., Poleshchuk V.L., Tseeva A.N., Levantov N.I. *Construction on alluvial soils in the cryolithozone*. Moscow.: ID "Ekonomika, Stroitelstvo, Transport"; 2008. 323 p. (In Russ.)]

8. Великин С.А. Особенности геофизического мониторинга гидротехнических сооружений в криолитозоне. *Наука и образование*. 2012; (4):29–34.

[Velikin S.A. Features of geophysical monitoring of hydrotechnical structures in the cryolithozone. *Nauka i obrazovanie*. 2012;(4):29–34 (In Russ.)]

9. Оленченко В.В., Усманов М.Т., Усманова Л.И., Цыренжапов С.В. Выявление путей миграции техногенных вод из гидротехнических сооружений методом электротомографии (на примере золоотвала Читинской ТЭЦ-1). *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2017;(1-1):101–105.

[Olenchenko V.V., Usmanov M.T., Usmanova L.I., Tsyrenzhapov S.V. Identify ways migration technogenic water hydraulic structures by electron tomography (on the example ash disposal area Chita HPS-1). *International journal of applied and fundamental research*. 2017;(1-1): 101–105. (In Russ.)]

10. Нерадовский Л.Г. Статистика удельного электрического сопротивления мерзлых рыхлых отложений и осадочных пород долины реки Лены «Туймаада». *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2019; 27(2):49–55. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-2-4>

[Neradovskiy L.G. Statistics of the resistivity of frozen loose sediments and sedimentary rocks in the Tyumaada valley of the Lena River. *Arctic and Subarctic natural resources*. 2019;27(2):49–55. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-2-4>]

11. Кроник Я. А. Анализ безопасности гидротехнических сооружений в криолитозоне. *Актуальные проблемы геокриологии: Сборник докладов расширенного заседания Научного совета по криологии Земли РАН. МГУ им. М.В. Ломоносова, 15–16 мая 2018 г. Пленарные доклады*. 2018; 1:19–41.

[Kronik Ya.A. Analysis of the hydraulic structures' safety in the permafrost. *Actual problems of the geocryology: A collection of reports of the expanded meeting of the Scientific Council on Earth Cryology of the Russian Academy of Sciences. Lomonosov Moscow State University (15-16 May, 2018)*. 2018; 1:19–41. (In Russ.)]

12. Holubec I., Hu X., Wonnacott J., Olive R., Delarobil D. Design, construction and performance of dams in continuous permafrost. *The 8th Intern. Conf. on Permafrost (20–25 July, 2003)*. Zurich, Switzerland. 2003: 425–430 p.

13. Чжан Р.В., Великин С.А., Кузнецов Г.И., Крук Н.В. *Грунтовые плотины в криолитозоне России*. Новосибирск: Академическое издательство «Гео»; 2019. 427 с.

[Zhang R.V., Velikin S.A., Kuznetsov G.I., Kruk N.V. *Embankment dams in the Russian permafrost zone*. "Geo"; 2019. 427 p. (In Russ.)]

14. Великин С.А. *Комплексное геофизическое изучение инженерно-геокриологического состояния оснований гидро- и горнотехнических сооружений Якутской алмазоносной провинции*. Дис. на соискание ученой степени д.т.н. Якутск: ИМЗ им. П.И. Мельникова СО РАН; 2020. 288 с.

[Velikin S.A. *Comprehensive geophysical study of the engineering and geocryological conditions of the hydro- and mining structures foundations of the Yakut diamond-bearing province*: Diss. ... Doct. Sci., Yakutsk: Melnikov Permafrost Institute SB RAS. 2020. 288 p. (In Russ.)]

Об авторах

ЧЖАН Рудольф Владимирович, доктор технических наук, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-9038-3360>, e-mail: zhang@mpi.ysn.ru

ЯКИМОВ Артем Андреевич, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-1030-5137>, e-mail: vnims.yakimov@gmail.com

ЧЖАН Андрей Антонович, кандидат технических наук, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-4349-8841>, e-mail: zhang0993@yandex.ru

ЗАБОЛОТНИК Павел Станиславович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-9384-0775>, e-mail: paulza@mail.ru

About the authors

ZHANG, Rudolf Vladimirovich, Dr. Sci. (Engineering), Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-9038-3360>, e-mail: zhang@mpi.ysn.ru

YAKIMOV, Artem Andreevich, Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-1030-5137>, e-mail: vnims.yakimov@gmail.com

ZHANG, Andrey Antonovich, Cand. Sci. (Engineering), Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-4349-8841>, e-mail: zhang0993@yandex.ru

ZABOLOTNIK, Pavel Stanislavovich, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-9384-0775>, e-mail: paulza@mail.ru

Поступила в редакцию / Submitted 07.09.2022

Поступила после рецензирования / Revised 20.12.2022

Принята к публикации / Accepted 18.01.2023

УДК 551.34

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-68-77>

Оригинальная статья

Содержание различных форм углерода в покровных отложениях ледового комплекса Центральной Якутии

А. М. Черепанова✉, А. Г. Шепелев

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

✉alexandra_587@mail.ru

Аннотация

Проанализировано содержание органического, неорганического и общего углерода в Центральной Якутии. В качестве объектов выбраны схожие по климатическим характеристикам местности Диринг-Атах в Чурапчинском районе и Сырдах в Усть-Алданском районе. Показано снижение содержания углерода в зависимости от глубины разреза, что обусловлено его наибольшим накоплением в верхнем органо-аккумулятивном горизонте. Установлено, что содержания различных форм углерода на исследуемых участках существенно различаются. Минимальное (0,22 % $C_{\text{орг}}$) и максимальное (4,81 % $C_{\text{орг}}$) содержания органического углерода прослеживаются в деятельном слое участка Сырдах. При этом в сезонно-талых слоях исследованных ледовых комплексов зарегистрировано сосредоточение как органического, так и неорганического углерода с выраженным равномерным распределением по профилю и пиковым увеличением в многолетнемерзлых породах на участке Сырдах. Полученные результаты свидетельствуют о вариативности содержания углерода, обусловленной климатическими и геокриологическими условиями исследуемого региона. Природные особенности способствуют дезинтеграции углерода в отложениях ледового комплекса при систематическом оттаивании и промерзании последнего, перемещении по профилю растворенных органических соединений и морозном выветривании. Соотношение органического и неорганического углерода в мерзлотных почвах является индикатором для оперативной оценки состояния и потоков органического вещества почв в условиях меняющегося климата.

Ключевые слова: органический углерод, неорганический углерод, общий углерод, многолетняя мерзлота

Финансирование. Работа выполнена в рамках базовых проектов «Криогенные процессы и формирование природных рисков освоения мерзлотных ландшафтов Восточной Сибири» (№ АААА-А20-120111690009-6), «Строение и ключевые этапы эволюции континентальной криолитозоны в неоплейстоцене и голоцене» (№ АААА-А20-120122290035-5) при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ и РНФ (проект № 21-55-75004_БФ).

Для цитирования: Черепанова А.М., Шепелев А.Г. Содержание различных форм углерода в покровных отложениях ледового комплекса Центральной Якутии. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(1):68–77. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-68-77>

Original article

The content of various carbon forms in the cover sediments of the ice complex in Central Yakutia

A. M. Cherepanova✉, A. G. Shepelev

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

✉alexandra_587@mail.ru

Abstract

This study aimed to analyze the organic, inorganic, and total carbon contents in Central Yakutia. We selected two sites with similar climatic features: Diring-Atakh (Churapchinsky region) and Syrdakh (Ust-Aldan region). The analysis showed that the decreasing dynamics of carbon stocks was attributive to their depth. The maximum accumulation of

carbon was observed in the upper humus-accumulation horizon. We found that the minimum organic carbon content (0.22 % OC) and its maximum content (4.81 % OC) were tracked in the active layer at the Syrdakh site. However, the concentrations of both organic and inorganic carbon in the seasonally thawed layers were marked with a uniform distribution down the profile and a peak increase in permafrost at the Syrdakh site. The obtained results indicate variability in the carbon content typical of the region. The climatic and geological characteristics of the region contribute to the disintegration of carbon in the sediments of the ice complex during systematic thawing and freezing, movement along the profile of dissolved organic compounds, and frost weathering. The ratio of organic and inorganic carbon in permafrost soils is an indicator for rapid assessment of the state and flow of soil organic matter in a changing climate.

Keywords: organic carbon, inorganic carbon, total carbon, permafrost

Funding. This study is carried out within the basic project “Structure and key stages of the evolution of continental cryolithozone in the Neopleistocene and Holocene” (number AAAA-A20-120122290035-5), “Cryogenic processes and natural risks formation due to the development of permafrost landscapes in Eastern Siberia” (AAAA-A20-120111690009-6) supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation; and Russian Foundation for Basic Research (project number 21-55-75004_BF).

For citation: Cherepanova A.M., Shepelev A.G. The content of various carbon forms in the cover sediments of the ice complex in Central Yakutia. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(1):68–77. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-68-77>

Введение

Органический углерод почв играет важную роль в биогеохимическом цикле углерода – одном из основных циклов биосферы Земли. С помощью него возможна оценка устойчивости всей экосистемы исследуемого региона, мониторинг динамики климатических изменений в районе многолетней мерзлоты, а также пополнение существующей базы данных по содержанию углерода в криолитозоне [1, 2]. Почвенный углерод – важный экологический показатель устойчивости, который несет в себе информацию о продуктивности экосистемы, ее физиологическом состоянии и степени влияния антропогенной и природной среды. Почвенное органическое вещество является достаточно чувствительным признаком к смене биоклиматической обстановки в регионе [3]. Регулирование и мониторинг процесса накопления и расхода углерода экосистемой в почвах в теоретическом аспекте способствуют разработке рациональных стратегий перехода к адаптивной модели по смягчению нежелательных климатических изменений с помощью всестороннего исследования, включая методы, приведенные в этой статье.

Почвы (педосфера), будучи расположенными в верхнем слое поверхности земли, прямо воздействуют на термический режим грунтов криолитозоны и формирование приземного климата. Состав и строение почвы, содержание в ней органического и неорганического вещества имеют колоссальное значение в гидротермическом режиме как сезонно протаивающей и промерзающей почвы, так и мерзлых грунтов. Изменение углеродного баланса почв в результате антропо-

генного влияния может привести к различным экологическим нарушениям, таким как эмиссионные выбросы углерода из уязвимых источников в природной среде, особенно это проявляется в условиях Арктики и бореальной зоны, значимых в изменении климата на планете [4, 5]. Более того, с повышением средней температуры в Северном полушарии увеличится испарение, произойдут деградация многолетней мерзлоты, нарушение экологического равновесия, сокращение ледяных покровов и смещение лесных зон.

Помимо загрязнения и разрушения почвенного покрова, все большее внимание к себе привлекают вопросы углеродного баланса северных экосистем в связи с угрозой глобального потепления. Отмеченные проблемы указывают на актуальность исследования и ценность оценки почвенного углерода в циркумполярной области, а также также на уровне территории и локального региона [6].

В настоящее время теме глобального потепления климата и его влияния на параметры криолитозоны посвящено большое количество как отечественных, так и зарубежных публикаций [7–10].

Изменения запасов почвенного углерода ледовых комплексов (ЛК) Центральной Якутии в основном происходят в аласных ландшафтах. При этом фиксируется уменьшение запасов углерода в почве в результате использования термокарстовых площадей под пастбища и сенокосы [11]. Здесь значительные потери углерода обусловлены выбросами парниковых газов в атмосферу вследствие разложения органического вещества, законсервированного на заболоченных

(увлажненных) лугах, и таяния мерзлоты под термокарстовыми озерами. Антропогенное вмешательство на уровне биотопа заключается в трансформации леса в пахотные земли, что провоцирует повышение убыли углерода, в первую очередь из-за физических потерь после нарушения почвенного покрова, удаления древесных и растительных остатков.

Цель исследования заключалась в наборе региональных данных как основы для будущего численного анализа углерода ледовых комплексов, распространенных на обширной территории Якутии, в условиях деградации многолетней мерзлоты.

Объекты и методы исследования

Исследования проводились в Центральной Якутии, на правом берегу р. Лена – в местностях Диринг-Атах Чурапчинского и Сырдах Усть-Алданского районов. Регион характеризуется суровыми природно-климатическими условиями. Климат региона резко-континентальный, амплитуда колебания температуры воздуха превышает 100 °С. Среднегодовая температура составляет –9,65 °С, с минимумом –63 °С в январе и максимумом +38,3 °С в июле, теплый период длится с мая по сентябрь. Годовые осадки в среднем составляют около 200–250 мм. Максимальное среднемесячное количество осадков приходится на июль и август, составляет 39 мм в оба месяца. Минимум – в феврале и марте, соответственно 8 и 6 мм.

По почвенно-географическому районированию исследуемая территория относится к таежно-

аласной провинции мерзлотно-палевых почв. Превалирующее распространение в регионе имеют мерзлотные таежные палевые слабо- и среднеосолоделые почвы [12].

Морфологическое описание почв участков приведено в табл. 1 и 2. Почвенный разрез на участке Сырдах обследован под пологом соснового леса в 87 км северо-восточнее г. Якутск. Почва палевая супесчаная.

Второй разрез в местности Диринг-Атах расположен в 149 км восточнее от г. Якутск, характеризуется равнинным и озерно-аласным рельефом с локальными участками лиственнично-березового леса. Почва серопалевая суглинистая. Изученные почвы представлены породами повышенной льдистости до 60 %.

На месте отбора образцов вертикальные стенки разрезов тщательным образом зачищались для удаления выветренного слоя породы во избежание влияния физических ошибок при анализе проб в лабораторных условиях, а также для детального описания генетических горизонтов профиля *in situ*. Обнажения имели мощность 2,0 м – Диринг-Атах и 3,0 м – Сырдах. Образцы грунта с разрезов ледовых комплексов отобраны через каждые 10 см в трех определениях.

По типу растительности исследуемый район принадлежит к светлохвойной лиственничной тайге аласного типа. На сухих почвах развиты бруснично-разнотравные лиственничники, на влажных почвах – бруснично-багульниковые зеленомошные лиственничники. Лес представлен лиственницей Каяндера (*Larix cajanderi* Mayr.), сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), бе-

Таблица 1

Почвенная характеристика горизонтов разреза Сырдах

Table 1

Characteristics of the horizons of the Syrdakh

Горизонт Horizon	Глубина, см Depth, cm	Диагностика Diagnostics
A ₀	0–1	Лесная подстилка из ветоши, листьев и хвои.
A ₁	1–4	Растительные остатки из хвои, ветоши и трав, грубогумусовый, переход ясный, граница ровная.
AB	4–6	Гумус, языки (заплывы) гумуса по трещинам до глубины 18 см, коричневый, переход резкий, граница неровная.
B	6–37	Много включений древесного угля и живых корней, супесчаный, сложение рыхлое, палево-серый, трещиноватый, переход слабозаметный.
C	37–280	По трещинам затеки (разводы) растворенного древесного угля на глубинах 60, 70 и 115 см, супесчаный, сложение рыхлое, палево-темно-серый.
	280	Повторно-жильный лед.

Почвенная характеристика горизонтов разреза Диринг-Атах

Table 2

Characteristics of the horizons of the Diring-Atakh

Горизонт Horizon	Глубина, см Depth, cm	Диагностика Diagnostics
A ₀	0–10	Луговая растительность, сильно (плотно) пронизан живыми корнями, мощность гумуса от 1 до 10 см, темно-коричневый, переход резкий, граница неровная.
A ₁	10–20	Обильно пронизан живыми корнями луговой растительности, неравномерные заплывы гумуса, коричневый, сложение рыхлое, пылеватый суглинок, переход заметный, граница неровная.
B ₁	20–30	Наличие тонких корней, сложение рыхлое, пылеватый суглинок, палево-светло-серый.
C	30–200	Пронизан тонкими корнями до глубины 160 см, сложение от рыхлого до плотного, на глубине от 100 до 120 см по трещинам затеки органики (гумуса), с 180 см мерзлый грунт (мерзлота), пылеватый суглинок, светло-серый.
	200–210	Повторно-жильный лед.

резой плосколистной (*Betula platyphylla* Suk.) и елью сибирской (*Picea obovata* Ledeb.). На безлесных пространствах различают три типа ландшафтов: пойменный, мелкодолинный и аласный.

Таким образом, климатические условия не способствуют высокой продуктивности растительного покрова, а также быстрому темпу разложения органических остатков в течение короткого лета, что и является главным лимитирующим фактором темпа оборота углерода в исследуемом регионе.

Мерзлотные участки территориально расположены в Средней Сибири на Среднесибирском плоскогорье, которое в региональном плане переходит в Центральнаякутскую равнину. Равнина в основном простирается в нижнем течении рек Лена, Вилюй и Алдан, частично захватывая среднее их течение с широкими речными долинами, плоскими водораздельными пространствами и термокарстовыми формами рельефа [13]. Участки Сырдах и Диринг-Атах локально дислоцированы в Лено-Амгинском междуречье. Располагаются на Сибирской платформе, в структуре Алданской антеклизы Якутском поднятии. Четвертичные образования [14] относятся к каргинскому возрасту (MIS 3). Генетический тип связан с озерными, озерно-аллювиальными и криогенно-эоловыми (лессовыми) отложениями. Вещественный состав: суглинки, пески и породы повышенной льдистости. Дочетвертичные образования представлены меловой системой нижнего отдела батылхской свиты, которая

сложена песками, песчаниками, алевролитами, углями и конгломератами.

Территория относится к зоне распространения сплошной криолитозоны северной геокриологической зоны субаэрального типа криогенных толщ, на которой 80 % площади составляют многолетнемерзлые породы (ММП). Здесь толщи мерзлоты прерываются подрусовыми и подозерными таликами. Мощность ММП в основном изменяется от 150 до 400 м [15]. Площадь распространения пород ледового комплекса (суглинки, супеси с мощными полигонально-жильными льдами, залегающими с глубины 1,0–2,5 м) занимает около 60 % территории Центральной Якутии [16]. Мерзлотные толщи преобладают на всех элементах рельефа, включая отдельные острова таликов и редко на водоразделах, развиты обычно на песках и галечниках.

Определение содержания углерода ($C_{\text{орг}}$, $C_{\text{неорг}}$ и $C_{\text{общ}}$) в покровных отложениях ледового комплекса проводилось на сертифицированном многофазном анализаторе углерода LECO RC612 производства фирмы «LECO Corporation» (USA) в твердых образцах по стандарту DIN19539 методом температурного программирования, что позволяет идентифицировать органическую и неорганическую формы углерода. Предельная температура сжигания образцов составляет 1100 °C в окислительной атмосфере. Анализ проводили в трех определениях.

Полученные первичные данные обрабатывались с помощью описательной статистики с применением пакета стандартных программ Excel.

Результаты и обсуждение

Климат, температурные и влажностные условия региона играют большую роль в динамике $C_{орг}$ в почве [3]. Более того, большое количество почвенного органического углерода хранится в мерзлых почвах арктических и субарктических регионов. Исследование влияния климатических условий на изменение запаса $C_{орг}$ и взаимодействие климата и углерода через влияние погодных условий на запасы $C_{орг}$ в наземных экосистемах и в почве было отмечено в ряде работ [14, 20]. Выявлено, что текущие данные свидетельствуют о постепенном и продолжительном выбросе парниковых газов в условиях потепления климата, что может быть определено с помощью исследований динамики $C_{орг}$ в почве, которые были бы сосредоточены на слабой стороне изучаемого аспекта – динамике углерода многолетней мерзлоты.

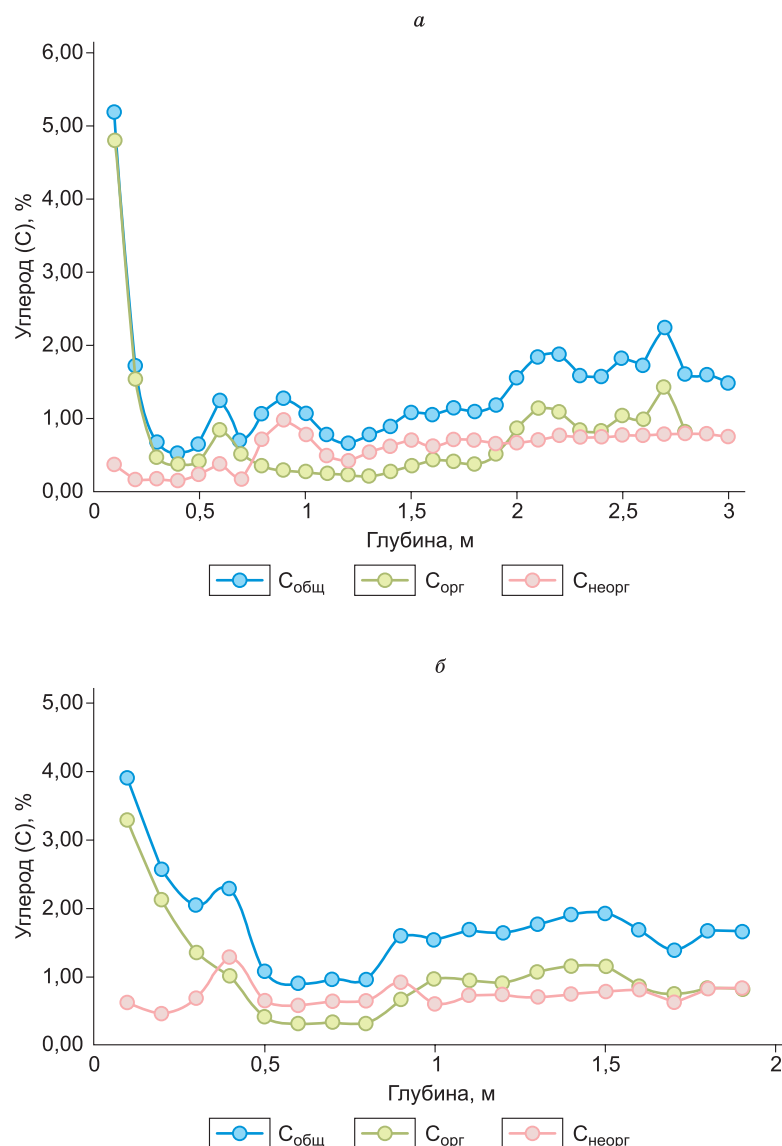
Проведенный статистический анализ свидетельствует о значительной вариабельности содержания органического, неорганического и общего углерода исследованных объектов в выбранных почвенных горизонтах.

По результатам определения содержания различных форм углерода ледовых комплексов обнаружена динамика его уменьшения по мере прохождения вниз по разрезу в Диринг-Атах от деятельного слоя к многолетней мерзлоте (см. рисунок). Это объясняется тем, что наибольшее содержание углерода сосредоточено в верхнем, насыщенном растительными остатками, слое. Напротив, на участке Сырдах наблюдается тенденция постепенного увеличения содержания углерода с глубиной. Связано это с составом самой вмещающей породы ледового комплекса, сушь занимает промежуточное положение между песком и суглинком, т. е. имеет более легкий гранулометрический состав и незначительное содержание глинистых частиц, выступая в роли фильтра, который пропускает через себя насыщенные углеродом соединения, аккумулирующиеся в верхней кровле мерзлоты. Подобная точка зрения согласуется с данными ряда авторов [13] по механике грунтов. При оттаивании мерзлого песка происходит интенсивное движение его частиц вдоль мерзлой поверхности, обеспечивающее более высокую скорость теплового разрушения за счет образования конвективного турбулентного потока. Тогда как суглинки обладают меньшей скоростью оседания в пограничном мерзлом слое и меньшей способно-

стью к продвижению к мерзлому фронту. Вследствие этого создаются условия, инициирующие выделение тепла для оттаивания мерзлой почвы (грунта), в большей части зависящее от объема льда и интенсивности прогрева почвы.

Показатели на рисунке демонстрируют различия в содержании общего углерода. На участке Сырдах среднее значение (табл. 3) составляет 1,39 % $C_{общ}$, а в Диринг-Атах – 1,74 % $C_{общ}$. При этом стоит отметить, что лабильность содержания $C_{общ}$ (см. табл. 3) в горизонте С (Сырдах) значительно выше (от 0,54 до 5,19 % $C_{общ}$ соответственно), чем в горизонте С (Диринг-Атах), где минимальный показатель составил 0,90, а максимальный – 3,89 % $C_{общ}$. Кривая графика общего углерода отражает перемещение органических частиц в разрезе и их нахождение в мерзлых породах ледовых комплексов. Для ЛК характерна высокая концентрация углерода до глубины 0,5 м – начального деятельного слоя. Затем происходит снижение содержания углерода на отрезке 0,5–1,0 м в разрезе Диринг-Атах на 1 %. И, наоборот, в этом интервале в разрезе Сырдах прослеживается увеличение содержания углерода на 0,7 %. При дальнейшем продвижении в низ разреза к глубине 2,0 м содержание общего углерода относительно равномерно. В разрезе Сырдах ниже глубины 2,0 м фиксируются всплески повышения общего углерода в защитном и многолетнемерзлом слоях, что указывает на наличие органического углерода до 1,4 %.

Максимально возможные значения для участков Центральной Якутии органического и общего углерода зарегистрированы на глубине 0,2–0,5 м, это объясняется тем, что высокое содержание углерода сосредоточено в верхнем органо-аккумулятивном горизонте, образованном полуразложившимися и разложившимися растительными остаткам и разнородной сетью корневых систем, еще не успевшими минерализоваться до паров воды и углекислого газа. Глубже показатели содержания углерода уменьшаются, но если для наглядности исключить из оборота органо-аккумулятивный горизонт, то станет понятно, что содержание органического углерода в многолетнемерзлых слоях находится на одном уровне, а порой и выше, чем в деятельном слое. Это несколько не отменяет функциональной значимости углерода глубокого уровня для экосистемы в целом, а также для экстраполяции расчетных оценок запасов углерода в глобальном масштабе. Распределение углерода и углеродсодержащих



Динамика содержания углерода в покровных отложениях ледового комплекса: *a* – Сырдах, *б* – Диринг-Атах
Dynamics of the carbon content in the cover sediments of the ice complex: *a*) Syrdakh, *б*) Diring-Atakh

соединений по профилю многолетнемерзлой толщи ледовых комплексов всегда неравномерное. Связано это с разноплановыми эндогенными и экзогенными процессами, сформировавшими в течение тысячелетий строение рельефа, почвенный покров, состав и сменяемость биогеоценоза.

Развитие многолетней мерзлоты непосредственно связано с эволюцией почвенного покрова в условиях криогенеза. Протекающие процессы дефляции, погребения и криотурбации отложений формировали новые пласты свежего органического материала. Вследствие этого в глубоких

горизонтах мерзлоты прослеживается углерод, соизмеримый по содержанию с более современным деятельным слоем.

Разделение общего углерода на органический и неорганический дает более ясное представление об их истинном соотношении в покровных отложениях ледового комплекса. Несомненно, большое внимание акцентируется на органической форме углерода как основном агенте парниковых газов [17–21]. В зависимости от количества содержащегося органического углерода на определенной территориальной единице циркумполярной области строятся прогнозы (сценарии)

Таблица 3

Содержание углерода в мерзлых породах с показателями описательной статистики

Table 3

Permafrost carbon content with descriptive statistics

Участок Site	Показатель Index	Дифференцированный слой ледового комплекса Differentiated layer of the ice complex	C _{орг} , %	C _{неорг} , %	C _{общ} , %
Сырдах Syrdakh	min	Деятельный слой/Active layer (0,0–2,1 м)	0,22	0,15	0,54
	max		4,81	0,97	5,19
	μ		0,78	0,45	1,23
	σ		1,21	0,26	1,18
	min	Защитный слой/Shielding layer (2,1–2,7 м)	0,37	0,62	1,05
	max		1,13	0,77	1,88
	μ		0,75	0,72	1,46
	σ		0,30	0,04	0,33
	min	Многолетнемерзлые породы/ Permafrost (2,7–3,0 м)	0,76	0,74	1,50
	max		1,43	0,80	2,23
	μ		0,95	0,78	1,74
	σ		0,32	0,03	0,33
Диринг-Атах Diring-Atakh	min	Деятельный слой/Active layer (0,0–1,6 м)	0,31	0,46	0,90
	max		3,28	1,29	3,89
	μ		1,05	0,71	1,76
	σ		0,88	0,21	0,86
	min	Защитный слой/Shielding layer (1,6–1,9 м)	0,75	0,65	1,39
	max		1,16	0,81	1,93
	μ		1,00	0,74	1,73
	σ		0,18	0,06	0,22
	min	Многолетнемерзлые породы/ Permafrost (1,9–2,1 м)	0,81	0,83	1,65
	max		0,83	0,84	1,66
	μ		0,82	0,83	1,65
	σ		0,08	0,04	0,04

Примечание. μ – среднее значение, σ – стандартное отклонение, min – минимальное значение, max – максимальное значение.

Note. μ – mean value, σ – standard deviation, min – minimum value, max – maximum value.

выбросов углекислого газа и метана с учетом повышения глобальной температуры. Наименьшее и наибольшее содержания органического углерода отмечаются на участке Сырдах (см. рисунок) в деятельном слое – 0,22 % и 4,81 % C_{орг} соответственно. Нижележащие слои выбранных профилей содержат достаточное количество органического углерода, резкие колебания практически отсутствуют за исключением глубин 0,6–1,0 и 2,7 м на участке Сырдах и 1,4–1,5 м в Диринг-Атах. Подобный характер динамики обусловлен особенностями трансформации органического вещества

в условиях климата Центральной Якутии: низкая абсолютная влажность почвы и высокие летние температуры замедляют процесс гумификации, в том числе интенсивность основных почвообразующих факторов, биологических и элювиальных процессов, при которых содержание углерода меняется в узком интервале [14].

В разрезах содержание неорганической формы углерода по большей части не превышало 1,0 %. Залегание в дифференцированных слоях ЛК протекало практически равномерно, начиная с глубин от 0,5 до 3,0 м, напоминая ма-

лую кривую, аналогичную кривой общего углерода. Соотношение органического и неорганического углерода в деятельном слое Сырдах находилось в пределах $58 C_{\text{орг}}$ к $42 C_{\text{неорг}}$. В защитном слое – $50 C_{\text{орг}}$ к $50 C_{\text{неорг}}$ и многолетнемерзлом слое – $82 C_{\text{орг}}$ к $18 C_{\text{неорг}}$. В ЛК Диринг-Атах соотношения имели некоторые отличия от предыдущего ЛК Сырдах: деятельный слой – $68 C_{\text{орг}}$ к $32 C_{\text{неорг}}$, защитный слой – $74 C_{\text{орг}}$ к $26 C_{\text{неорг}}$, многолетнемерзлый слой – $50 C_{\text{орг}}$ к $50 C_{\text{неорг}}$. Из этого следует, что в сопредельных территориях исследуемые объекты могут различаться характером распределения углерода в ЛК в зависимости от почвообразующей породы, положения в рельефе и мощности дифференцированного слоя, при этом общее количество углерода не изменяется в широких пределах и нивелируется едиными природными условиями формирования ледового комплекса.

Таким образом, несмотря на отличающиеся геоморфологические признаки, почвенный покров и разновозрастность отложений территории, показатели углерода участка Диринг-Атах (Абалахская терраса) немногим превышают значения участка Сырдах (Тюнгюльонская терраса) для более молодой террасы.

Заключение

Естественным поверхностным источником углерода в деятельном слое выступают надземные и подземные растительные остатки, аккумулирующие валовую долю органического углерода ледового комплекса до 50 см. При этом формирование углерода в глубоких горизонтах гетерогенного состава четвертичных отложений происходит под влиянием совокупности механических процессов смещения и деформации вмещающих мерзлых пород. Схожее содержание неорганического и органического углерода в защитном слое и многолетнемерзлых породах также обусловлено выщелачиванием минералов и проникновением почвенных растворов через морозобойное растрескивание почвы, являющихся транспортом лабильных органических веществ к низкозалегающим отложениям, вне зависимости от типа почвы и подстилающей материнской породы.

Содержания углерода в четвертичных отложениях Абалахской и Тюнгюльонской террас правобережной части Центральной Якутии в равной степени являются оценочными для расчета региональных статей баланса захороненного органического и неорганического углерода в ледо-

вом комплексе при различных геоморфологических условиях. Данным объектам характерно практически равное соотношение органического и неорганического углерода в защитном слое и многолетнемерзлых породах, исключение составляет деятельный слой. Перечисленные формы углерода в деятельном слое участка Сырдах распределены следующим образом: 0,78 % органического и 0,45 % неорганического углерода, Диринг-Атах – 1,05 и 0,21 % соответственно. В защитном слое участка Сырдах находится 0,75 % органического и 0,72 % неорганического углерода, а в Диринг-Атах – 1,00 и 0,74 % соответственно. В многолетнемерзлых породах на участке Сырдах содержится 0,95 % органического и 0,78 % неорганического углерода и 0,82 и 0,83 % соответственно в Диринг-Атах.

Список литературы / References

1. Desyatkin R.V., Desyatkin A.R. Temperature regime of solonchic meadow-chnozemic permafrost-affected soil in a long-term cycle. *Eurasian Soil Science*. 2017;50(11):1344–1354. <https://doi.org/10.1134/S1064229317090022>.
2. Десяткин Р.В., Десяткин А.Р. Влияние увеличения глубины деятельного слоя почвы на изменение водного баланса в криолитозоне. *Почвоведение*. 2019;(11):1393–1402. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19110030>. [Desyatkin R.V., Desyatkin A.R. Influence of increasing the active layer depth of the change of water balance in cryolithozone. *Soil science*. 2019;(11):1393–1402. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19110030>. (In Russ.)]
3. Суховеева О.Э., Золотухин А.Н., Карелин Д.В. Климатообусловленные изменения запасов органического углерода в пахотных черноземах Курской области. *Аридные экосистемы*. 2020;26(2) (83):72–79. <https://doi.org/10.24411/1993-3916-2020-10098> [Sukhoveeva O.E., Zolotukhin A.N., Karelin D.V. Climate-conditioned changes of organic carbon reserves in arable black earth of the Kursk region. *Arid ecosystems*. 2020;26(2)(83):72–79. (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/1993-3916-2020-10098>
4. Десяткин Р.В. Изменение климата и динамика мерзлотных экосистем центра материковой криолитозоны Северного полушария. *Вестник Российской академии наук*. 2018;88(12):1113–1121. <https://doi.org/10.31857/S086958730003190-7> [Desyatkin R.V. Climate change and dynamics of frozen ecosystems of the Northern hemisphere center of continental cryolithozone. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2018;88(12):1113–1121. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S086958730003190-7>
5. Heimann M., Reichstein M. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks. *Nature*. 2008; 451:289–292. <https://doi.org/10.1038/nature06591>

6. Васильев А.А., Никитин К.А., Стрелецкая И.Д., Облогов Г.Е., Задорожная Н.А. Современные тренды эволюции криолитозоны Российской Арктики при климатических изменениях. *Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России*. 2019;(6):16–20. <https://doi.org/10.24411/2687-1092-2019-10603>
- [Vasilyev A.A., Nikitin K.A., Streletskaia I.D., Oblogov G.E., Zadorozhnaya N.A. Modern trends in the evolution of cryolithozone of the Russian Arctic under the climate changes. *Relief and quaternary formations of the Arctic, Subarctic and Northwest of Russia*. 2019;(6):16–20. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/2687-1092-2019-10603>]
7. de Vrese P., Brovkin V. Timescales of the permafrost carbon cycle and legacy effects of temperature overshoot scenarios. *Nat. Commun.* 2021;(12):2688 <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23010-5>
8. Снакин В.В. Глобальные изменения климата: прогнозы и реальность. *Жизнь Земли*. 2019;41(2):148–164.
- [Snakin V.V. Global Climate Change: Forecasts and Reality. *Earth Life*. 2019;41(2):148–164. (In Russ.)]
9. Ding, Yongjian & Mu, Cuicui & Wu, Tonghua & Hu, Guojie & Zou, Defu & Wang, Dong & Li, Wangping & Wu, Xiaodong. Increasing cryospheric hazards in a warming climate. *Earth-Science Reviews*. 2021;(213):200. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103500>
10. Desyatkin A.R., Iwasaki S., Desyatkin R.V., Hatanano R. Changes of soil C stock under establishment and abandonment of arable lands in permafrost area – Central Yakutia. *Atmosphere*. 2018;308(9):2–14.
11. Максимов Т. Х. *Круговорот углерода в листовенных лесах якутского сектора криолитозоны*: Дис. ... докт. биол. наук. Красноярск. 2007. 303 с.
- [Maksimov T. Kh. *Carbon cycle in the larch forests in Yakutia*: Diss. ... Doct. Sci, Krasnoyarsk. 2007. 303 p. (In Russ.)]
12. Десяткин А.Р., Филиппов Н.В., Федоров П.П., Ивасаки Ш. Скорость накопления углерода пахотного горизонта заброшенных пашен в условиях Центральной Якутии. *Успехи современного естествознания*. 2018;(6):26–31.
- [Desyatkin A.R., Filippov N.V., Fedorov P.P., Iwasaki Sh. The rate of carbon storage of the arable horizon in the conditions of Central Yakutia. *Advances in Current Natural Sciences*. 2018;(6):26–31. (In Russ.)]
13. Tarnocai C., Canadell J.G., Schuur E.A.G., Kuhry P., Mazhitova G., Zimov S. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. *Global Biogeochem. Cycles*. 2009;23(2):20–23. <https://doi.org/10.1029/2008GB003327>
14. География Сибири в начале XXI века: Восточная Сибирь. Отв. ред. Корытный Л.М., Тулохонов А.К. Новосибирск: Гео; 2016. Т. 6. 396 с.
- [*Geography of Siberia in the beginning of the 21st century: Eastern Siberia*. Ed. Korytnyi L.M., Tulokhonov A.K. Novosibirsk: Geo; 2016. V. 6. 396 p. (In Russ.)]
15. Shepelev A.G., Kizyakov A., Wetterich S., Cherpanova A., Fedorov A., Syromyatnikov I., Savvinov G. Sub-surface carbon Stocks in northern taiga landscapes exposed in the Batagay Megaslump, Yana Upland, Yakutia. *Land*. 2020;9(9)305:1–16. <https://doi.org/10.3390/land9090305>.
16. Lindgren A., Hugelius G., Kuhry P. Extensive loss of past permafrost carbon but a net accumulation into present-day soils. *Nature*. 2018;560:219–222. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0371-0>.
17. Sayedi S.S., Abbott B.W., Thornton B.F., Frederick J.M., Vonk J.E., Overduin P., Schädel C., Schuur E.A.G., Bourbonnais A., Demidov N., Gavrilov A., He S., Hugelius G., Jakobsson M., Jones M.C., Joung D.J., Kraev G., Macdonald R.W., David McGuire A., Frei R.J. Subsea permafrost carbon stocks and climate change sensitivity estimated by expert assessment. *Environmental Research Letters*. 2020;15(12):124075: 200. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abcc29>
18. Randers J., Goluke U. An earth system model shows self-sustained thawing of permafrost even if all man-made GHG emissions stop in 2020. *Sci. Rep.* 2020;10:18456. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75481-z>
19. Varney R.M., Chadbur S.E., Friedlingstein P. et al. A spatial emergent constraint on the sensitivity of soil carbon turnover to global warming. *Nat. Commun.* 2020;11:5544. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-19208-8>
20. Ozaki K., Reinhard C.T. The future lifespan of Earth's oxygenated atmosphere. *Nat. Geosci.* 2021;14:138–142. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00693-5>.
21. de Vrese P., Brovkin V. Timescales of the permafrost carbon cycle and legacy effects of temperature overshoot scenarios. *Nat. Commun.* 2021;12:2688. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23010-5>

Об авторах

ЧЕРЕПАНОВА Александра Михайловна, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-4638-4770>, e-mail: alexandra_587@mail.ru

ШЕПЕЛЕВ Андрей Геннадиевич, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-8836-2123>, Researcher ID M-7299-2016, e-mail: carbon-shag@yandex.ru

About the authors

CHEREpanova, Alexandra Mikhaylovna, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-4638-4770>, e-mail: alexandra_587@mail.ru

SHEPELEV, Andrei Gennadievich, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-8836-2123>, Researcher ID M-7299-2016, e-mail: carbon-shag@yandex.ru

Поступила в редакцию / Submitted 09.03.2022

Поступила после рецензирования / Revised 16.02.2023

Принята к публикации / Accepted 21.02.2023

ОБЩАЯ БИОЛОГИЯ

Экология

УДК 631.41:574.24-(571.56-17)

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-78-93>

Оригинальная статья

Элементный химический состав почв и растений Северной Якутии, его эколого-биогеохимическая оценка

А. И. Сысо¹, Р. В. Десяткин^{2,✉}, М. Х. Николаева², А. З. Иванова²,
Н. В. Филиппов², А. Р. Десяткин^{2,3}, С. А. Худяев¹

¹Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

²Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

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

✉rvdes@ibpc.ysn.ru

Аннотация

В естественных биогеоценозах тундры и северной тайги приморских низменностей арктической зоны Северной Якутии почвы и растения имеют региональные особенности содержания химических элементов, их агрохимического, биогеохимического и гигиенического статуса. На примере Усть-Янского и Нижнеколымского районов изучены состав и свойства основных типов почв, общее содержание в почвах и ресурсных растениях биологически важных химических элементов (N, P, K, Ca, Mn, Zn, Cu, Co, Mo, B, As, Be, Cd, Cr, Ni, Pb, Hg, V, Sb, Sr), а также концентрация в почвах подвижных в разных экстрагентах форм S, P, K, Fe, Mn, Zn, Cu, Co, Cd, Cr, Ni, Pb. Выявлены различные подвижность химических элементов в почвах и их доступность растениям. Общее количество в почвах Mn, Zn, Cu, Co, Mo, Sr по агрохимическим и биогеохимическим нормативам находится в пределах нормального уровня содержания для жизни растений и животных, а бора превышает его. Гигиенически нормируемое содержание Mn, Zn, Cu, Cd, Ni, Pb, Hg, V, Sb в почвах ниже значений ПДК и ОДК. По сравнению с кларками элементов в растительности суши, агрохимически и биогеохимически нормальным их содержанием, в растениях Северной Якутии низки концентрации K, Ca, Cu, Mo, Pb, Cr, Be и высоки – Fe, Mn, Hg, Cd.

Ключевые слова: Арктика, тундра, северная тайга, почвы, растения, макро- и микроэлементы

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Гранта РФФИ по теме номер 19-29-05151; регистрационный номер АААА-А20-120061190009-9, также под эгидой FWRS-2021-0026; номер гос.регистрации в ЕГИСУ: АААА-А21-121012190036-6; номер гос.регистрации в ЕГИСУ: 1021052103985-7-1.6.23, также под эгидой FWGR-2021-0006.

Для цитирования: Сысо А.И., Десяткин Р.В., Николаева М.Х., Иванова А.З., Десяткин А.Р., Филиппов Н.В., Худяев С.А. Элементный химический состав почв и растений Северной Якутии, его эколого-биогеохимическая оценка. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(1):78–93. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-78-93>

Original article

Elemental chemical composition of soils and plants of Northern Yakutia, its ecological and biogeochemical assessment

A. I. Syso¹, R. V. Desyatkin^{2,✉}, M. Ch. Nikolaeva², A. Z. Ivanova²,
A. R. Desyatkin^{2,3}, N. V. Filippov², S. A. Khudyaev¹

¹Institute of Soil Science and Agrochemistry,

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

²*Institute for Biological Problems of Cryolithozone,*

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

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

✉rvdes@ibpc.ysn.ru

Abstract

This study investigated the composition and properties of the main soil types in the natural biogeocenoses of tundra and taiga in the coastal lowlands of the Arctic zone of Northern Yakutia. We have identified the total content of biologically important chemical elements in the soils and resource plants (N, P, K, Ca, Mn, Zn, Cu, Co, Mo, B, As, Be, Cd, Cr, Ni, Pb, Hg, V, Sb, and Sr), and the concentration of mobile forms of S, P, K, Fe, Mn, Zn, Cu, Co, Cd, Cr, Ni, and Pb in different extractants. We also specified the influence of soil composition and properties on the content of macro- and microelements. Various mobilities of chemical elements in soils and their availability to plants have been revealed. The amounts of chemical elements in the studied soils and plants were estimated according to agrochemical, biogeochemical and hygienic criteria and standards.

Keywords: Arctic, tundra, northern taiga, soils, plants, macro- and microelements

Funding. This study was supported by the RFBR grant theme number 19-29-05151; registration number AAAA-A20-120061190009-9, and state program FWRS-2021-0026; registration number AAAA-A21-121012190036-6; project number 1021052103985-7-1.6.23, and state program FWRS-2021-0006.

For citation: Syso A.I., Desyatkin R.V., Nikolaeva M.Ch., Ivanova A.Z., Desyatkin A.R., Filippov N.V., Khudyaev S.A. Elemental chemical composition of soils and plants of Northern Yakutia, its ecological and biogeochemical assessment. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(1):78–93. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-78-93>

Введение

Арктические экосистемы весьма чувствительны к глобальному изменению климата Земли и промышленному освоению циркумполярных территорий. Эти природные и техногенные факторы существенно влияют на состояние окружающей среды, всех компонентов наземных экосистем, качество жизни и хозяйственной деятельности населения Российской Арктики и Субарктики. Поэтому здесь актуальны изучение и оценка техногенного загрязнения окружающей среды и природной биогеохимической специфики территорий. Особый научный и практический интерес представляет определение количества и статуса биологически важных химических элементов в почвах и ресурсных растениях еще мало изученных наземных экосистем тундры и северной тайги приморских низменностей Северной Якутии.

Элементный химический состав (ЭХС) почв и растений служит индикатором почвенного плодородия и обеспеченности растений элементами-биофилами, наличия загрязнения окружающей среды, а также природных или техногенных геохимических аномалий с очень высокими концентрациями химических элементов в почвах, угрожающими жизни растений, животных и человека. Учитывая происходящие природные и техногенные изменения экосистем Арктики, актуально изучение ЭХС почв и растений в естес-

венных биоеценозах для познания природной биогеохимической специфики разных ее районов, а также определения фоновых значений концентраций химических элементов, позволяющих оценить загрязнение ими окружающей среды и массопоток поллютантов по трофической цепи. Такие исследования ведутся в разных районах Арктики. Однако опубликованных их результатов в мире в целом немного. В России ЭХС почв и растений относительно хорошо изучен в европейской части Арктики, слабее на севере Урала, Западной и Средней Сибири, Якутии. Зона Арктики остается белым мало изученным северным краем карты биогеохимического районирования России [1].

На территории Республики Саха (Якутия) изучение микроэлементов в почвах и растениях в основном проводилось в ее центральной и южной частях. А.Д. Егоровым с его коллегами [2] было выявлено низкое содержание в почвах и лугопастбищных растениях Co и J, высокое – Fe, Mn, Cu, Zn, что позволило объяснить распространенность в республике эндемических заболеваний (беломышечная болезнь, эндемичный зоб), провести биогеохимическое районирование лугопастбищных территорий. Д.Д. Саввинов и Н.Н. Сазонов [3] расширили представления о биогеохимическом статусе J, Fe, Mn, Zn, Ni, Ba, Sr в почвах и растениях естественных и



Рис. 1. Местоположения объектов исследований в Северной Якутии

Fig. 1. Location of study plots in the Northern Yakutia

техногенно нарушенных ландшафтов, специфике биогеохимических районов. Г.А. Андрианова [4] выявила в Центральной Якутии провинцию с повышенным содержанием в почвах и растениях В, Sr, Ba и пониженным содержанием в растениях Co, Cu, Fe, Mn.

Оценка элементного статуса населения в разных медико-географических зонах Якутии показала, что в полярной зоне «элементный портрет» взрослого населения, характеризуемый по ЭХС волос мужчин и женщин, проявляется в гиперэлементозах Cd, Fe, Mn, K, Na, Pb, V, Zn, Hg и гипoeлементозах Ca, Co, I, Zn [5].

Социально-экономическое развитие России нуждается в эколого-биогеохимической оценке ее территорий, в том числе в новых данных о фоновом содержании биологически важных макро- и микроэлементов в почвах и растениях арктической зоны Якутии. В настоящей работе представлены впервые полученные в 2020–2021 гг. результаты определения количества и комплексной оценки статуса 20 химических элементов в основных типах почв и видах ресурсных растений естественных биогеоценозов приморских низменностей Северной Якутии.

Методы и материалы исследования

Полевые исследования в Северной Якутии проводились в августе 2020 и 2021 гг. на территориях Усть-Янского и Нижнеколымского районов. Объектами исследований служили почвы и растения тундровых и северо-таежных биогео-

ценозов, сформировавшихся на разных формах рельефа, распространенные в приморских низменностях, в нижнем течении рек Яны и Колымы, на побережье Северного Ледовитого океана (рис. 1). Генезис, состав и свойства почв этой части Якутии изучаются с середины прошлого века [6–11].

В наших исследованиях диагностику и наименование изученных почв приморских низменностей Северной Якутии выполняли по Классификации почв России [12], а также по WRB 2014 [13].

На западе изученной территории, в Усть-Янском районе, на Яно-Индиго-Ирской низменности, на надпойменных террасах р. Яны были исследованы почвы и растения двух тундровых биогеоценозов (точки 1 и 2 на рис. 1).

Первый участок, с координатами 70°34'0,18" N, 134°57'38,62" E, находился в 600 м от р. Яны в окрестностях п. Северный. Разрез заложен в западине между буграми (былларами) посреди бугристо-западинного криогенного микрорельефа. Почва – криозем грубогумусированный глееватый с признаками криотурбаций (*Turbic Reductaquic Cryosol (Loamic)*). На глубине 77 см залегают мерзлые слабодистые четвертичные легкосуглинистые отложения. Состав и свойства почвы характеризуются пробам из генетических горизонтов разреза У-2-20, имеющего формулу почвенного профиля Оао (0–6(7) см)–СR (6(7)–9(18) см)–СR@ (9(18)–34(45) см)–Сg@L (34(45)–77 см).

Растительный покров представлен ивово-березовым сообществом моховым с багульником и

осокой. ЭХС растений фитоценоза характеризуется растительными пробами листьев карликовой березки (*Betula nana*), ивы красивой (*Salix pulchra*), голубики обыкновенной (*Vaccinium uliginosum*), багульника болотного (*Ledum palustre*), надземной биомассы осоки ситнической (*Carex juncella*).

Второй биогеоценоз, с координатами 70°34'13,65" N, 134°57'00,20" E, находился в 1 км от р. Яна недалеко от п. Северный. Разрез располагался на надпойменной террасе, имеющей небольшой (2–3°) уклон на юг и бугристо-западный микрорельеф. Почва – торфяно-криозем глееватый (*Reductaquic Histic Cryosol (Loamic)*), с глубины 62 см лежащий на мерзлых покровных отложениях. Состав и свойства почвы характеризуются пробами из разреза У-3-20, имеющего формулу почвенного профиля О (0–5 см)–Т (5–10(20) см)–СR (10(20)–35(37) см)–СR_{hi},g (35(37)–45 см)–Сg_L(45–62 см). Растительный покров – листовническое редколесье моховое с пятнами лишайника, березой, ивой, багульником, брусникой. ЭХС растений характеризуется пробами хвои листовницы Каяндера (*Larix cajanderi*), смеси лишайников *Flavocetraria cucullata*, *Cladonia arbuscula*, *Cladonia amaurocraea*, биомассы мха *Sanionia uncinata*.

В Нижнеколымском районе Якутии, на Колымской низменности, исследованы почвы и растения трех биогеоценозов (точки 3–5 на рис. 1). Самый северный из них, с координатами 70°43'45,06" N, 159°27'15,37" E, находился в резервате «Курдигино-Крестовая» на плакорном участке тундры, подверженной термокарсту, в 200 м от побережья Восточно-Сибирского моря Северного Ледовитого океана. Изученный арктикотундровый биогеоценоз располагался в западине между былларами. Он сформировался на мерзлотной серогумусовой глееватой почве с признаками криогенной гомогенизации и тиксотропии (*Reductaquic Cryosol (Loamic, Thixotropic)*), с глубины 54 см лежащей на мерзлых покровных отложениях. Состав и свойства почвы характеризуются пробами из разреза 2-21-21 К-Кр., имеющего формулу почвенного профиля О (0–2 см)–АУ (2–5 см)–С_m,g_L 5–54 см. В растительном покрове преобладали осоки с примесью разнотравья и пушицы. ЭХС растений характеризуется пробой надземной биомассы вейника Хольма (*Calamagrostis holmii*).

Южнее, на границе тундры и северной тайги Колымской низменности, в правобережье р. Ко-

лыма находились редколесные биогеоценозы. На неровном участке (с координатами 68°44'47,92" N, 161°22'18,57" E), имеющем слабый уклон коренного берега к реке и неровный бугристо-западный рельеф, располагался биогеоценоз, растительный покров которого представлял листовническое редколесье кустарничково-моховое. Он сформировался на торфяно-криоземе глееватом (*Reductaquic Histic Cryosol (Loamic)*), с глубины 76 лежащем на мерзлых покровных отложениях. Состав и свойства почвы характеризуются пробами из разреза К-3-21, имеющего формулу почвенного профиля О (0–3(5) см)–Т (3(5)–10(15) см)–СR (10(15)–48 см)–Сg_L (48–76 см). ЭХС растений характеризуется пробами листьев голубики обыкновенной (*Vaccinium uliginosum*) и надземной биомассы осоки ситнической (*Carex juncella*).

На участке с координатами 68°44'48,20" N, 161°22'19,32" E, находящемся на коренном берегу р. Колыма, на вершине небольшого бугра с неровным, трещиноватым, бугристо-западным микрорельефом изучен биогеоценоз, в котором, по сравнению с предыдущим, в листовническом редколесье кустарничково-моховом больше мха и лишайников. Почва – криозем типичный (*Haplic Cryosol (Loamic)*), с глубины 52 см лежащий на мерзлых покровных отложениях. Состав и свойства почвы характеризуются пробами из разреза К-4-21, имеющего формулу почвенного профиля О(ОТ) (0–11(14) см)–СR (11(14)–20(22) см)–СR(C) ⊥ 20(22)–52 см.

ЭХС растений фитоценоза характеризуется пробой листьев березки карликовой (*Betula nana*).

В разрезах почвенные пробы отбирались из: 1) верхних, преимущественно органогенных, горизонтов с подстилкой (О_{ao}, О+Т, О+АУ, О(ОТ)); 2) корнеобитаемых минеральных горизонтов (СR); 3) почвообразующих пород над многолетней мерзлотой (СR@, Сg_L, С_m,g_L, СR(C) ⊥).

Изученные растения относятся к ресурсным. Они служат кормом для диких и домашних оленей Крайнего Севера [14], других травоядных животных, звеном биогеохимической цепи почва–растение–животные–человек, а также источником лекарственного и иного растительного сырья.

Листья кустарников *Betula nana* и *Salix pulchra* – существенный компонент питания копытных животных на пастбищах. В листовническом редколесье кормом служит хвоя *Larix cajanderi*. Листья *Vaccinium vitis-idaea*, *Vaccinium uliginosum*, *Ledum palustre* – источники лекарственно-

го сырья. Травянистые растения (*Carex juncella*, *Calamagrostis holmii*) создают значительные запасы кормовой фитомассы. Лишайники *Flavocetraria cucullata*, *Cladonia arbuscula*, *Cladonia amaurocraea* – важный источник питания оленей и лекарственного сырья.

Выбор изученных макро- и микроэлементов в почвах и растениях обусловлен их ролью в жизни живых организмах и окружающей среде: 1) N, P, K, Ca, Fe, Mn, Zn, Cu, Co, Mo, B – абсолютно незаменимые для живых организмов элементы-биофилы или эссенциальные химические элементы, оцениваемые в почвах и растениях по агрохимическим и биогеохимическим нормативам; 2) Sr – антагонист кальция, оцениваемый в почвах и растениях по биогеохимическим нормативам; 3) As, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb, V, Sb, Zn – приоритетные техногенные загрязнители окружающей среды (поллютанты) высокие концентрации которых опасны для животных организмов, прежде всего человека, оцениваемые в почвах и растительной продукции по биогеохимическим и гигиеническим нормативам.

Почвенные пробы брались снизу вверх по профилю почв. Образцы листьев и побегов формирования кустарников срезались с верхних и боковых частей 10 растений, хвои лиственницы – с боковых частей пяти растений. Пробы травянистых растений срезались на высоте 5 см над уровнем почвы. Пробы лишайников брались после удаления 1–2 см нижней части. Все пробы помещались в полиэтиленовые пакеты.

Подготовка проб к анализам включала их высушивание до состояния воздушно-сухого вещества. Растительные пробы сушили при температуре 60 °C в сушильном шкафу с принудительной вентиляцией, а почвенные пробы при комнатной температуре. Растительные пробы измельчали и помещали в полиэтиленовый пакет. Почвенные пробы для общих анализов размельчались фарфоровым пестиком в фарфоровой ступке и просеивались на ситах: минеральные почвенные пробы – с ячейками 1 мм, а торфянистые – 2 мм.

В водной вытяжке измеряли реакцию среды (рН H₂O) почв потенциометрическим методом, концентрацию водорастворимых солей – кондуктометрическим методом по удельной электрической проводимости (ЕС, мСм/см) и гравиметрическим методом по плотному остатку (П.О.), сульфат-иона (SO₄²⁻) и фосфат-иона (PO₄³⁻) – методом капиллярного электрофореза.

В почвах содержание частиц менее 0,01 мм – физической глины (Ф.Г.) определяли пипеточным методом, а органического вещества (ОВ) – по потере при прокаливании в муфельной печи при температуре 550 °C.

Обеспеченность почв подвижными фосфором и калием оценивали по их количеству, экстрагируемому 0,2N HCl по методу Кирсанова, а при рН более 6,1 дополнительно – 0,5 M (NH₄)₂CO₂ с рН 9,0 по методу Мачигина.

Концентрацию подвижной формы Fe, Mn, Zn, Cd, Co, Cu, Cr, Ni, Pb измеряли методом пламенной атомно-абсорбционной спектроскопии в экстракте из почв 1 M ацетатно-аммонийным буферным раствором (ААБ) с рН 4,8 (1 MCH₃COONH₄) при отношении почвы к раствору 1:10.

Общее содержание в почвах и растениях азота определяли методом Кьельдаля, количество ртути – методом «холодного пара», сурьмы и мышьяка – гидридным методом на атомно-абсорбционном спектрометре.

Для определения общего содержания B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, P, Pb, Sr, V, Zn пробы почв и растений предварительно озольли при температуре 550 °C в течение 2 и 4 ч соответственно, а затем растирали до состояния пыли в агатовой ступке. В отдельной части общей золы (А) растений, после измерения ее количества, определялось содержание золы, не растворимой в 10 % HCl (а).

Измерение общего (валового) содержания химических элементов в пробах выполняли методом оптической атомно-эмиссионной спектроскопии с использованием дугового аргонного двухструйного плазмотрона, спектрометра (PGS-2) и многоканального анализатора эмиссионных спектров. Калибровку и контроль точности измерений химических элементов в пробах вели по аттестованным значениям их массовой доли в стандартных образцах почв и растений. Относительная погрешность измерений была в пределах 10 %.

В пробах измерялось количество гигроскопической влаги гравиметрическим методом после высушивания в сушильном шкафу при 105 °C. Все количественные результаты измерений веществ и химических элементов в пробах рассчитывались на абсолютно-сухое вещество (а.с.в.) проб.

Статистическую обработку экспериментальных данных проводили с помощью пакета программ Microsoft Excel и STATISTICA 10.0. Кор-

реляционный анализ проводили с использованием коэффициента ранговой корреляции Спирмена (r_s) и критического уровня значимости p 0,05.

Результаты исследования и обсуждение

Результаты исследований показали, что в тундре и северной тайге Северной Якутии поверхностные органогенные горизонты (О_{ао}, О+Т, О+АУ, О(ОТ)) арктотундровых, мерзлотных тундровых и мерзлотных таежных почв существенно отличаются по составу и свойствам от нижележащих минеральных корнеобитаемых горизонтов (С_г) и почвообразующих пород под мерзлотой (С_г@, С_г⊥, С_гg⊥, С_г(С) ⊥)(табл. 1 и 2).

Органогенные горизонты имели сильноокислую реакцию среды (pH H_2O <4,5) и большее, чем в минеральных горизонтах, содержание N, P, Hg и Sb. Более кислая реакция среды органогенных горизонтов свойственна тундровым почвам приморских низменностей Северной Якутии [6, 8, 10]. Возможно, она – следствие недостатка в них оснований (K, Na, Ca, Mg) для нейтрализации органических кислот.

В минеральных горизонтах почв реакция среды слабокислая и близкая к нейтральной, гранулометрический состав преимущественно легкосуглинистый, содержание органического вещества малое. По сравнению с органогенными горизонтами, в минеральных выше содержание K, Mo, B, As, Be, Cr, Ni, Pb, V, Sr (см. табл. 1). Большинство зольных химических элементов почвы наследуют от почвообразующих пород, но на распределение P, Ca, Mn, Zn, Cu, Co, Cd в почвенном профиле сильное влияние также оказывают биогенная аккумуляция, закрепление органическими и минеральными компонентами почв, реакция среды их горизонтов.

Корреляционный анализ влияния свойств почв на их ЭХС (для выборки $n = 12$ при $r_s = 0,58$ и $p = 0,05$) выявил достоверные связи между ними. Увеличение значений реакции среды (pH) почв положительно влияло на содержание в них K, B, As, Be, Cr, V, Sr, но отрицательно – на N, P, Hg, Sb. Концентрация последних была выше в более кислых органогенных горизонтах. Наибольшее содержание N и P было обусловлено не столько кислой реакцией среды, сколько высокой биогенной аккумуляцией этих биофильных элементов растениями и закреплением их в органическом веществе почв, с которым выявлены корреляционные связи N $r = 0,99$, P $r = 0,86$. Весьма сильно с органическим веществом связаны Hg

($r = 0,97$), Sb ($r = 0,72$), чья концентрация была наибольшей в органогенных горизонтах. Достоверные отрицательные связи с органическим веществом почв показали K, B, As, Be, Cr, Ni, Sr. Вероятно, их количество в почвах зависело от других факторов, таких как состав породообразующих и акцессорных минералов в почвообразующих породах. Количество частиц физической глины в почвах достоверное влияние оказало на содержание Ca, Mn, Zn, Co, Pb, V. Не выявлено достоверного влияния свойств и состава почв на концентрацию в них Cu, Mo, Cd.

Указанные выше природные факторы почвообразования могли быть причиной изменения содержания B, As, Be, Cr, V сверху вниз профилей почв, а также с юга на север приморских низменностей Якутии (см. табл. 1).

Сопоставление полученных данных об ЭХС тундровых почв Северной Якутии (см. табл. 1) с фоновым ЭХС тундровых почв Западной Сибири [15], Западного Таймыра [16] и Восточно-Центральной Аляски [17] показало близкий уровень содержания в них Be, Co, Mn, Zn, Pb, V, Sr. Однако, в почвах Таймыра выше было содержание Cu, Ni, Sb, что, вероятно, обусловлено наличием здесь природной медно-никелевой геохимической аномалии. В тундровых почвах Якутии выше оказалось содержание As и Cd, что, возможно, также обусловлено природной геохимической спецификой этого региона.

Эколого-биогеохимическая оценка ЭХС тундровых почв Северной Якутии выявила некоторую его специфику. Общее содержание большинства микроэлементов в почвах было близко кларкам их в почвах мира, приведенным А. Кабата-Пендиас [18] (см. табл. 1). Выше кларка оказалось количество As и Be в почвах. В целом схожа оценка количества химических элементов в почвах с их кларками в земной коре [19]. Содержание Be в изученных почвах мало отличалось от кларка. Оценка валового содержания микроэлементов в почвах по агрохимическим и биогеохимическим критериям [1, 20, 21] говорит о том, что количество в них Mn, Zn, Cu, Co, Mo, Sr находится в пределах нормального уровня содержания для жизни растений и животных, только количество бора превышает его. Возможно, последнее связано с наличием в мерзлотных ландшафтах провинции с повышенным содержанием бора в почвах и растениях, выделенной Г.А. Андриановой [4] в Центральной Якутии.

Таблица 1

Реакция среды и содержание физической глины, органического вещества, макро- и микроэлементов в горизонтах почв Северной Якутии и критерии его эколого-биохимической оценки

Table 1

The reaction of the environment and the content of physical clay, organic matter, macro- and microelements in soil horizons of the Northern Yakutia and criteria for its ecological and biogeochemical assessment

Номер разреза, почва	Горизонт	Слой, см	pH H ₂ O	% в а.с.в.										мг/кг а.с.в.										Sr			
				Ф.Г.	ОВ	N	P	K	Ca	Mn	Zn	Cu	Co	Mo	B	As	Be*	Cd	Cr	Ni	Pb	Hg	V		Sb		
Усть-Янский район Якутии, Яно-Индиговская низменность, надпойменные террасы р. Яна																											
У-2-20. Криозем грубогумусированный глееватый	Оао	0-7	4,1	—	47,2	0,69	0,16	1,82	0,45	469	98	27	19	2,8	37	6,7	2,2	1,33	59	31	22	0,16	50	0,12	162		
	CR	7-18	4,4	17,6	9,5	0,25	0,07	2,34	0,58	384	68	31	9	3,1	54	9,4	2,6	0,93	62	31	17	<0,01	70	0,04	185		
	CR@	19-45	6,3	22,5	3,8	0,11	0,06	1,99	0,61	450	61	24	9	2,1	64	11,5	2,5	0,67	57	27	15	<0,01	73	0,05	165		
У-3-20. Торфяно-криозем глееватый	О+Т	0-20	4,0	—	64,3	1,19	0,13	0,87	0,50	539	63	17	12	1,0	31	5,8	1,3	0,16	38	22	12	0,19	58	0,13	106		
	CR	20-35	5,4	20,1	3,2	0,07	0,08	2,25	0,63	564	86	28	11	3,5	62	12,4	3,0	1,49	68	32	17	<0,01	72	0,04	189		
	Cg⊥	45-62	7,2	17,2	2,8	0,06	0,05	1,91	0,53	406	64	16	9	1,3	42	13,7	2,0	0,49	53	23	13	<0,01	62	0,06	131		
Нижнеколымский район Якутии, Колымская низменность, резерват «Курдигино-Крестовая», побережье Восточно-Сибирского моря																											
2-21-21 К-Кр. Мерзлотная серогумусовая глееватая почва	О+АУ	0-5	6,3	29,6	6,7	0,19	0,10	2,47	0,77	719	126	25	14	4,6	65	15,3	3,2	2,44	75	34	20	0,07	78	0,02	268		
	Cm.g⊥	5-54	6,8	30,8	5,1	0,14	0,09	2,08	0,64	633	94	24	10	1,9	67	15,5	3,5	1,04	71	26	17	<0,01	104	0,05	214		
Нижнеколымский район Якутии, Колымская низменность, правый коренной берег р. Колыма																											
К-3-21. Торфяно-криозем глееватый	О+Т	0-15	4,3	—	54,9	1,00	0,15	0,77	0,81	440	135	19	9	1,2	29	6,3	1,5	0,84	40	18	12	0,17	65	0,09	152		
	CR	15-35	6,7	34,8	4,1	0,08	0,05	1,82	0,80	494	85	25	14	1,7	58	13,0	2,5	1,06	62	32	17	<0,01	96	0,02	176		
	Cg⊥	48-76	7,2	27,2	3,9	0,10	0,09	2,02	1,05	609	114	36	14	3,3	67	12,7	3,1	1,66	73	34	18	<0,01	102	0,04	256		
К-4-21. Криозем типичный	О(OT)	0-14	4,1	—	48,3	0,80	0,11	1,04	0,69	543	116	18	9	1,5	41	7,9	1,6	1,63	55	20	18	0,19	87	0,02	139		
	CR	14-22	6,1	29,2	4,4	0,09	0,07	2,02	1,01	505	97	23	13	1,7	60	13,4	2,8	1,17	65	31	19	<0,01	96	0,04	226		
	CR(C)⊥	22-52	7,4	27,2	3,6	0,07	0,09	2,35	0,93	644	114	24	14	3,0	64	15,7	2,9	1,68	80	36	19	<0,01	99	0,02	228		
Критерии оценки значений показателей																											
Кларк в почвах	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	488	70	39	11	1,1	42	6,8	1,3	0,41	60	29	27	0,07	129	0,67	175	
Кларк в земной коре	—	—	—	—	—	0,01	0,07	2,32	2,57	770	75	27	15	1,1	34	5,6	2,3	0,64	92	50	17	0,06	106	0,81	270		
АХ/БГХ низкое	—	—	<5,5	<10	—	—	—	—	—	—	400	30	15	7	0,7	7	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
АХ/БГХ высокое	—	—	>8,5	>70	—	—	—	—	—	—	3000	110	60	30	5,0	50	—	—	—	—	—	—	—	—	600		
ПДК/ОДК	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1500	110-220	65-130	—	—	—	5-10	1,3*	1,0-2,0	—	40-80	66-132	2,10	150	4,50	—	

Таблица 2

Концентрации подвижных в разных экстрагентах форм макро- и микроэлементов в горизонтах почв Северной Якутии и критерии их оценки

Table 2

Concentrations of mobile forms of macro- and microelements in different extractants in soil horizons of the Northern Yakutia and criteria for their evaluation

Номер разреза, почва	Горизонт	Слой, см	Водная вытяжка				0,2NHCl		0,5 M (NH ₄) ₂ CO ₂		1 MCH ₃ COONH ₄ с рН 4,8										
			П.О.	ЕС	S-SO ₄	P-PO ₄	P ₂ o ₅	K ₂ O	P ₂ O ₅	K ₂ O	Fe	Mn	Zn	Cu	Co	Cd	Cr	Ni	Pb		
			%	мСм/см		мг/кг а.с.в.															
			Усть-Янский район Якутии, Яна-Индигирская низменность, надпойменные террасы р. Яна																		
У-2-20. Криозем грубогумусированный глеватый	Oao	0-7	1,92	0,539	152	15,8	55	113	-	-	324	90	9,1	0,8	4,44	0,10	4,31	3,7	2,9		
	CR	7-18	0,336	0,181	60	3,0	156	71	-	-	388	8	0,9	0,9	0,37	0,02	2,74	2,2	1,4		
	CR@	19-45	0,12	0,085	22	1,5	166	47	9	109	69	17	0,4	0,6	<0,15	0,02	<0,15	0,5	0,9		
У-3-20. Торфяно-криозем глеватый	O+T	0-20	2,16	0,429	70	16,6	50	99	-	-	319	297	8,4	0,4	2,04	0,15	2,48	1,9	1,6		
	CR	20-35	0,11	0,062	4	1,6	40	77	-	-	71	42	0,3	0,7	0,16	<0,01	<0,15	0,7	0,8		
	Cg⊥	45-62	0,09	0,052	3	1,1	448	67	10	131	7	46	0,3	0,4	<0,15	<0,01	<0,15	0,2	0,5		
Нижнеколымский район Якутии, Колымская низменность, резерват «Курдигино-Крестовая», побережье Восточно-Сибирского моря																					
2-21-21 К-Кр. Мерзлотная серогумусовая глееватая почва	O+AY	0-5	0,01	0,080	6	<0,7	488	138	3	205	105	48	1,3	0,7	0,20	0,05	0,5	1,0	0,6		
	Cm,g⊥	5-54	0,17	0,065	4	<0,7	476	121	3	188	92	24	0,6	0,8	0,20	0,04	0,7	0,8	0,7		
Нижнеколымский район Якутии, Колымская низменность, правый коренной берег р. Колыма																					
К-3-21. Торфяно-криозем глеватый	O+T	0-15	1,39	0,408	27	14,5	39	84	-	-	297	82	6,7	0,3	1,54	0,67	0,5	1,0	2,4		
	CR	15-35	0,11	0,072	4	<0,7	37	49	7	114	69	22	0,2	0,4	0,30	0,03	0,2	0,2	0,4		
	Cg⊥	48-76	0,06	0,062	4	<0,7	150	92	4	135	20	27	0,4	0,9	0,30	0,06	0,4	0,5	0,6		
К-4-21. Криозем типичный	O(OT)	0-14	1,63	0,427	43	27,5	45	97	-	-	109	102	9,3	0,3	0,76	0,20	1,4	0,7	2,4		
	CR	14-22	0,11	0,065	5	1,7	55	89	-	-	57	24	0,2	0,4	0,30	0,15	0,3	0,4	0,5		
	CR(C)⊥	22-52	0,06	0,045	5	1,6	781	63	1	118	16	16	0,2	0,4	0,20	0,12	0,2	0,2	0,6		
Критерии оценки значений показателей																					
Агрохимические	Низкие.		-	-	<6,0	-	<50 /<300*	<80 /<400*	<15	<200	-	<10,0	<2,0	<0,2	<0,15	-	-	-	-		
	Высокие		>0,20	>0,30	>12,0	-	>150 />601*	>250 />801*	>60	>600	-	>20,0	>5,0	>0,5	>0,30	-	-	-	-		
Гигиенические	ПДК		-	-	-	-	-	-	-	-	100,0	23,0	3,0	5,0	0,5	6,0	4,0	6,0			

* Значения для торфяных почв и горизонтов.

* Values for peat soils and horizons.

В тундровых почвах Северной Якутии общее содержание нормируемых по гигиеническим нормативам [22] химических элементов – Mn, Zn, Cu, Cd, Ni, Pb, Hg, V, Sb было ниже значений их предельно-допустимой концентрации (ПДК) и ориентировочно-допустимой концентрации (ОДК) для почв населенных пунктов и сельскохозяйственных земель. Валовое же содержание As превышало значения его ОДК, а Be – ПДК. Установленный факт мы связываем, во-первых, с природной геохимической спецификой почвообразующих пород Северной Якутии – повышенным содержанием в них As и Be, а во-вторых, с несовершенством российских гигиенических нормативов, не учитывающих наличие региональной геохимической специфики ЭХС почв и даже кларки химических элементов в земной коре и почвах мира.

Концентрации подвижных форм макро- и микроэлементов в органогенных и минеральных горизонтах почв существенно различались. Это сказывалось на подвижности элементов – доле подвижной формы элементов в их валовом содержании. Подобные различия концентраций подвижной формы Zn, Cu, Ni, Fe, Mn в органогенных и нижележащих минеральных горизонтах почв Кольского полуострова отмечались ранее [23]. Выявленные различия в органогенных и минеральных горизонтах тундровых почв Якутии концентраций и подвижности химических

элементов предопределили их неодинаковый агрохимический и гигиенический статус (см. табл. 2). В органогенных горизонтах концентрации водорастворимой формы химических элементов, оцениваемые по П.О., ЕС, S-SO₄, подвижной в ААБ формы – Mn, Zn, Co были высоки и даже избыточны по агрохимическим критериям. В нижележащих минеральных горизонтах (CR) концентрации водорастворимой формы химических элементов были низкими, подвижной формы Mn и Co – в пределах агрохимической нормы, а Zn – ниже ее. Во всех почвах и их горизонтах концентрации подвижной в ААБ формы Mn, Zn, Cu, Co, Cd, Cr, Ni, Pb не превышали значений ПДК.

Расчеты подвижности (в %) Fe, Mn, Zn, Cu, Co, Cd, Cr, Ni, Pb в органогенном (O+T); корнеобитаемом (CR) и надмерзлотном (Cg⊥) горизонтах почв показали существенные различия между ними по большинству химических элементов, за исключением меди. Наибольшую подвижность (более 10 %) имели Mn, Co, Cd, Cr, Ni, Pb в органогенном горизонте (рис. 2). Оценка связи подвижности элементов в почвах с их свойствами и составом выявила достоверное отрицательное влияние повышения значений реакции среды и на концентрацию подвижной формы Fe, Mn, Zn, Co, Cr, Ni, Pb (для выборки $n = 12$ при $r_s = 0,58$ и $p = 0,05$). С органическим веществом в почвенных горизонтах выявлена достоверная положительная связь концентрации в них Fe, Mn, Zn,

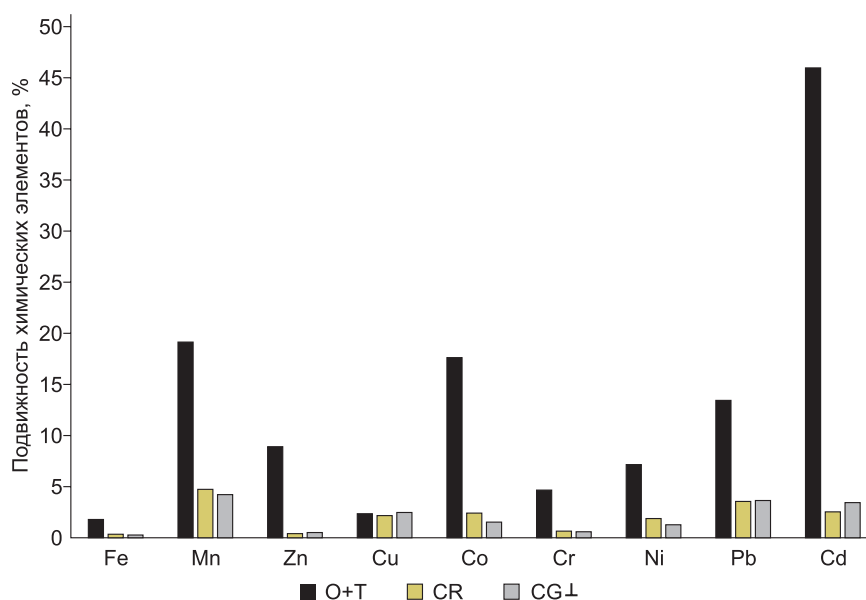


Рис. 2. Средняя подвижность химических элементов в разных горизонтах тундровых почв Якутии

Fig. 2. The average mobility of chemical elements in different horizons of tundra soils in Yakutia

Co, Cd, Cr, Pb. Высокая подвижность металлов могла быть обусловлена процессом образования в органогенных горизонтах и самой верхней минеральной части профиля водорастворимых гумусовых соединений [7].

Особого внимания требует агрохимическая оценка содержания разных форм P, K и S в почвах. Из-за существенного отличия торфяных горизонтов от минеральных по количеству органического вещества и реакции среды, корнеобитаемых минеральных горизонтов от почвообразующих пород по реакции среды, эти горизонты нужно исследовать и оценить разными агрохимическими методами и критериями [20].

В кислых торфяных и минеральных горизонтах почв, как и рекомендуется, подвижные формы фосфора и калия экстрагировали 0,2N HCl. По агрохимическим критериям для торфяных почв [20] обеспеченность ими поверхностных органогенных горизонтов оказалась низкой (см. табл. 2). Схожим был уровень содержания этой формы P_2O_5 и K_2O и в минеральных корнеобитаемых горизонтах (CR) почв. В то же время, в почвообразующих породах (Cg $\perp$, CR(C) $\perp$), имевших близкую к нейтральной реакцию среды (см. табл. 1), возможно, из-за наличия карбонатов, уровень концентрации фосфора подвижного в 0,2 NHCl оказался весьма высоким (см. табл. 2).

Подобное ранее отмечалось С.В. Губиным и А.В. Лупачевым [8, 9]. Они считали этот «феномен» высокого содержания подвижного фосфора при невысоком валовом содержании элемента в почве следствием биогенного его накопления растениями в период существования Берингии и последующей минерализации растительных остатков. Отчасти с этим можно согласиться. Однако метод Кирсанова не предназначен для определения содержания подвижных форм фосфора и калия в карбонатных почвах и породах. При использовании кислотной вытяжки разрушаются карбонаты и высвобождаются связанные ими химические элементы, что приводит к неверной агрохимической оценке почв по обеспеченности растений подвижными формами фосфора и калия, их реальной доступности растениям. Незнание или игнорирование ограничений использования агрохимических методов исследования почв может приводить к неверным суждениям об их плодородии. В данном случае об обеспеченности почв подвижными и доступными растениям формами фосфора и калия.

Для определения подвижного фосфора в карбонатных почвах и породах рекомендуется метод Мачигина (экстрагент 0,5M $(NH_4)_2CO_3$). Его использование позволило установить в надмерзлотных (Cg $\perp$) горизонтах почв низкий уровень концентрации и обеспеченности растений подвижной формой фосфора и калия (см. табл. 2).

Приведенные результаты исследования состава и свойств тундровых почв Северной Якутии показали, что общее содержание в них изученных макро- и микроэлементов близко их уровню в аналогичных почвах Западной Сибири, Таймыра и Аляски. В почвах природный уровень содержания As и Be выше их кларка в почвах мира, ОДК и ПДК. Общий уровень валового содержания в почвах Mn, Zn, Cu, Co, Mo, B не предполагает их недостатка растениям, напротив, возможен некоторый избыток бора. Концентрации в почвах подвижных форм макро- и микроэлементов в почвах указывают на возможный недостаток растениям P, K, Zn, а также на отсутствие почвенных предпосылок загрязнения тяжелыми металлами растительной продукции.

Концентрации и соотношения макро- и микроэлементов в органах и тканях растений критически важны для их жизни и продуктивности. От этого также зависит минеральная полноценность и безопасность растительной продукции для животных и человека. ЭХС разных видов растений, их органов и тканей варьирует в широких пределах. Он зависит от биологических особенностей растений, почвенных и природно-климатических условий их произрастания, воздействия естественных и антропогенных факторов, в том числе загрязнения твердыми частицами различного генезиса. Для агрохимической, биогеохимической, пищевой, лекарственной, гигиенической и иной оценки полноценности и безопасности ЭХС растений и их продукции нами использованы (табл. 3) соответствующие критерии и нормативы [1, 20, 24, 25].

Результаты определения содержания общей (A) и не растворимой в 10%-й соляной кислоте (a) золы, макро- и микроэлементов в пробах растений изученных биогеоценозов Северной Якутии (табл. 3) показали, что количества общей золы и химических элементов в растениях типичны для них, близки кларковым значениям для растений суши по Е.А. Романкевич [26].

Наибольшая зольность обнаружена в осоке (*Carex juncella*), накапливающей кремний, а наи-

Элементный химический состав растений Северной Якутии и критерии его оценки

Table 3

Elemental chemical composition of plants of the Northern Yakutia and criteria for its assessment

Растения, критерии оценки	% в а.с.в.										мг/кг а.с.в.										
	A	a	N	P	K	Ca	Fe	Mn	Zn	Cu	Co	Mo	B	Sr	As	Hg	Cd	Pb	Cr	Ni	Be
Разрез У-2-20, надпойменная терраса реки Яна в Индигирской низменности, Усть-Янский район Якутии																					
<i>Betula pana</i>	4,4	0,6	2,1	0,6	0,4	1,0	377	1703	406	6	2,0	0,1	81	55	0,1	0,07	0,19	5,0	0,4	6,4	0,04
<i>Salix pulchra</i>	5,4	0,4	2,2	0,5	0,7	1,3	303	1652	488	6	8,9	0,3	71	86	0,1	0,04	1,83	1,6	0,7	10,9	0,08
<i>Vaccinium uliginosum</i>	4,4	1,0	1,4	0,2	0,6	1,0	319	1417	44	5	0,6	0,2	91	29	0,1	0,05	0,20	1,5	0,8	2,5	0,05
<i>Ledum palustre</i>	2,5	0,4	1,7	0,1	0,3	0,6	189	690	30	4	0,3	0,1	34	20	0,1	0,04	0,09	0,9	0,7	2,5	0,03
<i>Carex juncella</i>	7,6	4,9	1,1	0,2	0,7	0,9	276	1368	81	3	0,4	0,3	10	27	0,2	0,03	0,03	2,3	0,8	2,4	0,06
Разрез У-3-20, надпойменная терраса реки Яна в Индигирской низменности, Усть-Янский район Якутии																					
<i>Larix sajanteri</i>	3,2	1,2	1,7	0,3	0,2	0,5	326	1366	41	6	0,4	0,2	28	34	0,1	0,06	0,38	1,1	0,5	1,2	0,06
Смесь лишайников <i>Flavocetraria cuscullata</i> , <i>Cladonia arbuscula</i> , <i>Cladonia</i> <i>amaurocraea</i>	2,2	1,4	0,4	0,1	0,1	0,1	444	148	10	1	0,3	0,1	2	6	0,1	0,05	0,06	0,5	1,6	0,9	0,05
<i>Sanionia uncinata</i>	4,7	2,2	0,9	0,2	0,4	0,6	1476	526	93	6	7,1	0,2	9	35	0,1	0,15	0,06	181,0	2,8	14,1	0,12
Разрез 2-21-21 К-Кр., побережье Восточно-Сибирского моря, резерват «Курдигино-Крестовая», Нижнеколымский район Якутии																					
<i>Calamagrostis holmii</i>	4,6	0,7	2,0	0,4	1,3	0,5	302	434	36	6	0,2	0,6	14	29	0,1	0,04	0,31	0,3	0,5	1,3	0,04
Разрез К-3-21, правый коренной берег р. Колыма в Колымской низменности, Нижнеколымский район Якутии																					
<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	3,0	0,4	1,2	0,1	0,4	0,6	273	1304	21	2	0,1	0,4	13	17	0,2	0,01	0,05	0,4	0,4	0,6	0,02
Разрез К-4-21, правый коренной берег р. Колыма в Колымской низменности, Нижнеколымский район Якутии																					
<i>Carex juncella</i>	7,9	4,8	1,6	0,3	1,0	1,1	139	481	19	2	0,2	6,3	6	76	0,1	0,02	0,18	0,3	0,6	1,1	0,06
Критерии оценки																					
Кларк в растениях суши [25]	5,3	–	1,9	0,2	1,1	1,5	200	240	50	10	0,5	0,5	25	40	0,1	0,01	0,04	2,5	1,8	2,0	0,10
Низкое (дефицит) [1, 19]	–	–	<2,0	<0,2	<1,5	<1,0	<10	<10	<20	<5	<0,2	<0,5	<1	–	–	–	–	–	–	–	–
Высокое (избыток) [1, 19]	–	–	>3,5	>0,3	>2,5	>1,5	>100	>100	>60	>20	>1,0	>3,0	>30	–	–	–	–	–	–	–	–
МДК* [24]	–	–	–	–	–	–	500	1000	500	100	20	10	300	–	3,5	–	–	–	–	–	–
МДУ* [1]	–	–	–	–	–	–	100	–	50	30	1,0	2,0	–	–	0,5	0,05	0,3	5,0	1,0	3,0	–
Норматив безопасности [1]	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1,0	0,05	0,3	5,0	–	–	–

* МДК – максимально допустимая концентрация, МДУ – максимально-допустимый уровень.

* МДК – maximum allowable concentration, МДУ – maximum allowable level.

меньшая – в лишайниках, что характерно для этих растений [23, 27]. Лишайникам свойственны низкие концентрации N, P, K, Ca, Zn, Cu, B, Sr и других химических элементов.

Наибольшие концентрации N и P выявлены в вейнике Хольма (*Calamagrostis holmii*) и листьях карликовой березки (*Betula nana*) и ивы красивой (*Salix pulchra*). Это говорит о них как о важных источниках растительного белка и фосфора для животных тундры и тайги Северной Якутии. Практически во всех растительных пробах концентрации калия и кальция оказались ниже их кларка в растениях суши (см. табл. 3). Это косвенно указывает на возможный их недостаток в растениях и далее в трофической цепи, а также подтверждает отмеченное выше низкое содержание подвижного калия в почвах (см. табл. 2).

Все растения имели высокое содержание Fe и Mn. В листьях *Vaccinium vitis-idaea*, *Betula nana*, *Salix pulchra*, хвое *Larix cajanderi* концентрации Mn превышали максимально допустимый биогеохимический уровень (МДУ) его содержания в кормовых растениях (см. табл. 3). Эти данные подтверждают заключение об отсутствии в Северной Якутии биогеохимических предпосылок для дефицита Fe и Mn в пастбищных растительных кормах и трофической цепи в целом [2]. В то же время, избыток Fe и Mn грозит снижением доступности растениям и животным других химических элементов [1], прежде всего P, Cu, Zn.

В большинстве растений концентрации цинка находились в пределах нормального (пониженного – высокого) агрохимического и биогеохимического уровней. Только в лишайниках содержание Zn было очень низким, а в листьях *Betula nana*, *Salix pulchra* напротив, очень высоким, близким к максимально допустимому количеству (МДК) в грубых кормах животных (см. табл. 3). Листьям кустарничков арктической зоны в целом характерны высокие концентрации Fe, Mn, Zn, Co, Ni, Cd [15, 28, 29], что, вероятно, обусловлено биологической потребностью в них растений. Предрасположенность арктических ив к аккумуляции кадмия [28] может быть причиной его накопления в организмах животных и птиц тундры [29].

Во всех видах растений уровень содержания меди был средним, а в лишайниках и *Carex juncella*, *Ledum palustre*, *Vaccinium vitis-idaea* – низким (см. табл. 3). Результаты анализа растений не подтвердили приведенные выше данные почвенной диагностики о высокой обеспеченности растений подвижной формой меди (см. табл. 2).

Из этого следует, что агрохимические критерии оценки концентрации в почвах подвижной формы меди не всегда дают достоверную информацию об обеспеченности ею растений, о возможной транслокации меди из почвы в растения, а далее в другие звенья биогеохимической цепи.

Концентрации кобальта во многих растениях находились в пределах агрохимической и биогеохимической норм, подтверждая данные почвенной диагностики о хорошей обеспеченности растений этим микроэлементом.

Уровень содержания бора в изученных растениях был нормальным и даже высоким, что подтвердило заключение о достаточном количестве бора в трофической цепи Северной Якутии [2, 3]. Обнаруженные избыточные концентрации бора в листьях *Vaccinium uliginosum*, *Betula nana*, *Salix pulchra* доказывают правомерность выделения здесь борной биогеохимической провинции [4].

С позиций зоогигиенической безопасности и минеральной полноценности элементного химического состава растений как грубых кормов для сельскохозяйственных копытных животных (см. табл. 3) изученным растительным кормам характерно отсутствие превышения норм безопасности по As и Pb, наличие избытка Fe, Mn и недостатка Cu, Mo. В изученных растениях концентрации Hg, Cd, Pb варьировали в широких пределах – от безопасных до потенциально опасных, но в целом содержание в них As, Hg, Cd, Pb типично для растительности тундры и, возможно, неопасно для ее животных.

Выявленные существенные различия концентраций Hg, Cd, Pb, а также Fe, Mn, Zn, Co, B, Sr, Cr, Ni в разных видах растений мы объясняем влиянием на них биогенных и абиогенных факторов. К первым относятся биологические особенности растений в потребности, поглощении и аккумуляции химических элементов, ко вторым природная специфика почвенных условий произрастания растений и антропогенное воздействие.

Биологическая специфика растений *Betula nana*, *Salix pulchra*, *Vaccinium uliginosum*, *Carex juncella*, *Ledum palustre*, *Vaccinium vitis-idaea*, *Sanionia uncinata* к накоплению высоких концентраций макро- и микроэлементов отмечена многими учеными [15, 16, 23, 27, 28, 29]. В то же время, причиной высоких концентраций Fe, Mn, Zn, Co, Hg, Pb, Cr, Ni, Be в *Sanionia uncinata* может быть попадание в пробу этого мха минеральных частиц железомарганцевых конкреций, акцессорных минералов или техногенных ве-

ществ, обогащенных этими химическими элементами. На возможное влияние данного абиогенного фактора на ЭХС растений указывает существенная (около 50 %) доля не растворимой в 10%-й соляной кислоте части золы (а) в общей зольности пробы (А) (см. табл. 3). Нерастворимая часть зольных веществ в составе общей золы растительных проб была велика и в *Carex juncella*, но в осоке она не оказала существенно-го влияния на концентрацию Co, Hg, Pb, Cr, Ni и Be. Возможно, это обусловлено тем, что общая зольность и нерастворимая часть золы в *Carex juncella* формируется за счет Si, уровень концентрации которого в осоках на порядок выше, чем в других видах растений.

Заключение

Впервые выполненное изучение и комплексная оценка элементного химического состава почв и растений биогеоценозов приморских низменностей Северной Якутии позволяют сделать следующее заключение.

В естественных биогеоценозах Северной Якутии почвы и растения имеют региональные особенности содержания химических элементов, их агрохимического, биогеохимического и гигиенического статуса.

Природной геохимической спецификой почв приморских низменностей Якутии является высокое валовое содержание As и Be, превышающее их кларки в почвах мира, ОДК и ПДК, возрастающее сверху вниз профилей почв и с юга на север приморских низменностей.

По уровню содержания Mn, Zn, Co, Pb, V, Sr почвы Северной Якутии близки аналогичным почвам Западной Сибири, Таймыра и Аляски.

Общее количество в почвах Mn, Zn, Cu, Co, Mo, Sr по агрохимическим и биогеохимическим нормативам находится в пределах нормального уровня содержания для жизни растений и животных, а бора превышает его. Гигиенически нормируемое содержание Mn, Zn, Cu, Cd, Ni, Pb, Hg, V, Sb в почвах ниже значений ПДК и ОДК.

Генетически обусловленные различия состава и свойств органогенных и минеральных горизонтов почв Северной Якутии предопределили их различие по валовому содержанию и концентрации подвижных форм химических элементов, подвижности и доступности последних растениям.

Поскольку реакция среды и содержание органического вещества в разных генетических горизонтах почв могут существенно различаться,

для определения и оценки содержания подвижных форм фосфора и калия в контрастных по составу и свойствам горизонтах следует использовать соответствующие им агрохимические методы и нормативы. Игнорирование рекомендаций по их использованию может приводить к неверным выводам о подвижности и доступности этих элементов растениям, сделанным на их основе прогнозам.

Во всех горизонтах почв концентрации подвижных в ацетатно-аммонийном буферном растворе с pH 4,8 форм Mn, Zn, Cu, Co, Cd, Cr, Ni, Pb не превышали значений ПДК. По агрохимическим нормативам в органогенных горизонтах почв концентрации этой формы Mn, Zn, Co были высоки, а в минеральных горизонтах концентрации Mn и Co были в пределах нормы, а Zn – ниже ее.

Уровень валового содержания в почвах Mn, Zn, Cu, Co, Mo и В не предполагает их недостатка в растениях, напротив, возможен некоторый избыток бора как в растениях, так и животных, их употребляющих.

Концентрации в почвах Северной Якутии подвижных форм S, P, K, Fe, Mn, Zn, Cu, Co, Cd, Cr, Cr, Ni, Pb указывают на возможный недостаток для растений P, K, Zn, отсутствие почвенных предпосылок загрязнения растительной продукции тяжелыми металлами – Mn, Zn, Cu, Co, Cd, Cr, Cr, Ni, Pb.

По сравнению с кларками элементов в растительности суши, агрохимически и биогеохимически нормального их содержания, в растениях Северной Якутии низки концентрации K, Ca, Cu, Mo, Pb, Cr, Be, и высоки – Fe, Mn, Hg, Cd. Высокое содержание As и Be в почвах не повлияло на их количество в растениях.

Растительности биогеоценозов Северной Якутии характерна высокая концентрация Fe, Mn, B, Hg, Cd, Ni. Аномально высокой концентрацией Mn, Zn, Co, Cd, Ni отличаются листья *Betula nana*, *Salix pulchra*. Они же наиболее богаты N, P. Лишайникам свойственны низкие концентрации всех изученных химических элементов.

Элементный химический состав растительной продукции биогеоценозов приморских низменностей Северной Якутии, служащей кормовой базой живущих на ее территории животных, предполагает природный дефицит в биогеохимической цепи K, Ca, Cu, Mo, а также Zn и P, из-за избытка в ней Fe и Mn. Помимо последних возможен природный избыток бора и повышенный уровень концентрации Cd и Ni.

Список литературы / References

1. Ермаков В.В., Тютиков С.Ф. *Геохимическая экология животных*. М.: Наука; 2008. 315 с.
[Yermakov V.V., Tyutikov S.F. *Geochemical ecology of animals*. M.: Nauka; 2008. 315 p. (In Russ.)]
2. Егоров А.Д., Григорьева Д.В., Курилюк Т.Т., Сазонов Н.Н. *Микроэлементы в почвах и лугопастбищных растениях мерзлотных ландшафтов Якутии*. Якутск; 1970. 288 с.
[Yegorov A.D., Grigoreva D.V., Kurilyuk T.T., Sazonov N.N. *Trace elements in soils and grassland plants of permafrost landscapes of Yakutia*. Yakutsk; 1970. 288 p. (In Russ.)]
3. Саввинов Д.Д., Сазонов Н.Н. *Микроэлементы в северных экосистемах: на примере Республики Саха (Якутия)*. Новосибирск: Наука; 2006. 208 с.
[Savvinov D.D., Sazonov N.N. *Trace elements in northern ecosystems: on the example of the Republic of Sakha (Yakutia)*. Novosibirsk: Nauka; 2006. 208 p. (In Russ.)]
4. Андрианова Г.А. Микроэлементы в почвах и растениях Центральной Якутии. *Геохимия*. 1971; 4: 463–476.
[Andrianova G.A. Trace elements in soils and plants of Central Yakutia. *Geokhimiya*. 1971; 4: 463–476. (In Russ.)]
5. Егорова Г.А. Оценка элементного статуса взрослого населения, проживающего в разных медико-географических зонах Республики Саха (Якутия). *Экология человека*. 2007;1: 55–59.
[Egorova G. A. Evaluation of the elemental status of the adult population living in different medical and geographical zones of the Republic of Sakha (Yakutia). *Ecologia cheloveka*. 2007;1:55-59. (In Russ.)]
6. Еловская Л.Г., Петрова Е.И., Тетерина Л.В. *Почвы Северной Якутии*. Новосибирск: Наука; 1979. 304 с.
[Elovskaya L.G., Petrova E.I., Teterina L.V. *Soils of Northern Yakutia*. Novosibirsk: Nauka; 1979; 304 p. (In Russ.)]
7. Губин С.В., Лупачев А.В. Почвы суглинистых водоразделов приморских тундр Севера Якутии: условия и процессы формирования. *Почвоведение*. 2017; 2:147–157. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17020046>
[Gubin S.V., Lupachev A.V. Soils of loamy watersheds of the coastal tundras of the North of Yakutia: conditions and processes of formation. *Pochvovedenie*. 2017;2:147–157. (In Russ.)] <https://doi.org/10.7868/S0032180X17020046>
8. Губин С.В., Лупачев А.В. Почвы и отложения озерно-аласных котловин тундр Колымской низменности. *Почвоведение*. 2020;7:775–790. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17020046>
[Gubin S.V., Lupachev A.V. Soils and deposits of lacustrine-alas basins in the tundra of the Kolyma Lowland. *Pochvovedenie*. 2020;7:775–790. (In Russ.)] <https://doi.org/10.7868/S0032180X17020046>
9. Губин С.В., Лупачев А.В. Почвообразование в тундровой зоне приморских низменностей северо-востока Сибири. *Почвоведение*. 2020;10: 1182–1191. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20100081>
[Gubin S.V., Lupachev A.V. Soil formation in the tundra zone of the coastal lowlands of northeastern Siberia. *Pochvovedenie*. 2020;10:1182–1191. (In Russ.)] <https://doi.org/10.31857/S0032180X20100081>
10. Десяткин Р.В., Иванова А.З., Оконешникова М.В., Десяткин А.Р., Филиппов Н.В. Почвы криогенных форм микрорельефа тундровой и лесотундровой зон Северо-Восточной Якутии. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;27(1):98–108. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-1-98-108>.
[Desyatkin R.V., Ivanova A.Z., Okoneshnikova M.V., Desyatkin A.R., Filippov N.V. Soils of cryogenic forms of the microrelief of the tundra and forest-tundra zones of North-Eastern Yakutia. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(1):98–108. (In Russ.)] <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-1-98-108>
11. Десяткин Р.В. *Почвообразование в термокарстовых котловинах – аласах криолитозоны*. Новосибирск: Наука; 2008. 324 с.
[Desyatkin R.V. *Soil formation in thermokarst depressions – alases in the permafrost zone*. Novosibirsk: Nauka; 2008. 324 p. (In Russ.)]
12. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена; 2004. 341 с.
[Classification and diagnostics of Russian soils. Smolensk: Oikumena; 2004. 341 p. (In Russ.)]
13. IUSS Working Group WRB. 2015. *World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.
14. Яковлева М.В., Козина Е.А. Растения, используемые в кормлении оленей. *Сборник научных трудов Ставропольского научно-исследовательского института животноводства и кормопроизводства*. 2014;2(7):654–657.
[Yakovleva M.V., Kozina E.A. Plants used in reindeer feeding. *Collection of scientific works of the Stavropol Research Institute of Animal Husbandry and Forage Production*. 2014;2(7):654–657. (In Russ.)]
15. Опекунова М.Г., Опекунов А.Ю., Кукушкин С.Ю., Ганул А.Г. Фоновое содержание химических элементов в почвах и донных осадках Севера Западной Сибири. *Почвоведение*. 2019;4:422–439. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19020114>
[Opekunova M.G., Opekunov A.Yu., Kukushkin S.Yu., Ganul A.G. Background content of chemical elements in soils and bottom sediments of the North of Western Siberia. *Pochvovedenie*. 2019;4:422–439. (In Russ.)] <https://doi.org/10.1134/S0032180X19020114>
16. Сысо А.И., Колпашников Л.А., Ермолов Ю.В., Черевко А.С., Сиromля Т.И. Элементный химический состав почв и растений Западного Таймыра. *Сибирский экологический журнал*. 2014;6:855–862.
[Syso A.I., Kolpashchikov L.A., Ermolov Yu.V., Cherevko A.S., Siromlya T.I. Elemental chemical composition of soils and plants of the Western Taymyr. *Siberian Ecological Journal*. 2014;6:855–862. (In Russ.)]

tion of soils and plants of Western Taimyr. *Siberian Ecological Journal*. 2014;6:855–862. (In Russ.)]

17. Crock J.G., Gough L.P., Wanty R.B., Day W.C., Wang B., Gamble B.M., Henning M., Brown Z.A., Meier A.L. *Regional Geochemical Results from the Analyses of Rock, Water, Soil, Stream Sediments, and Vegetation Samples—Fotymile River Watershed, East-Central, Alaska*. U.S. Geological Survey Open-File Report 99-33. 1999; 83 p. <https://doi.org/10.3133/ofr9933>

18. Kabata-Pendias A. *Trace elements in soils and plants*. 4th edition. Boca-Raton, London, New York: CRC Press, Taylor & Francis Group; 2010; 548 p. <https://doi.org/10.1201/b10158>

19. Касимов Н.С., Власов Д.В. Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии. *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2015;2:7–17.

[Kasimov N.S., Vlasov D.V. Clarks of chemical elements as comparison standards in ecogeochemistry. «*Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seria 5, Geografia*». 2015; 2:7–17. (In Russ.)]

20. *Методические указания по агрохимическому обследованию и картографированию почв на содержание микроэлементов*. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева; 1976. 80 с.

[*Guidelines for agrochemical survey and mapping of soils for the content of trace elements*. М.: Dokuchaev Soil Institute; 1976. (In Russ.)]

21. *Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения*. М.: ФГНУ «Росинформагротех»; 2003. 240 с.

[*Guidelines for the comprehensive monitoring of soil fertility of agricultural land*. М.: FGNU “Rosinformagrotech”; 2003. (In Russ.)]

22. Санитарные правила и нормы СанПиН 1.2.3685-21. *Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания*. Утверждены Постановлением Главного гос. сан. врача РФ № 2 от 28.01.2021. М.: 2021.

[*Sanitary rules and norms SanPiN 1.2.3685-21 Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans*. Approved by the Decree of the Chief State Doctor of the Russian Federation No. 2 dt. 01/28/2021. М.: 2021; (In Russ.)]

23. Опекунова М.Г., Гизетдинова М.Ю. Использование лишайников в качестве биоиндикаторов загрязнения окружающей среды. *Вестник Санкт-Петербур-*

бургского университета. Серия 7. Геология. География. 2014;1:79–94.

[Opekunova M.G., Gizetdinova M.Yu. The use of lichens as bioindicators of environmental pollution. *Vestnik of Saint Petersburg University. Geology. Geography*. 2014;1:79–94. (In Russ.)]

24. Церлинг В.В. *Диагностика питания сельскохозяйственных культур: Справочник*. М.: Агропромиздат; 1990. 235 с.

[Zerling V.V. *Diagnostics of nutrition of agricultural crops: Handbook*. Moscow: Agropromizdat; 1990. (In Russ.)]

25. Narwal R.P., Dahiya R.R., Malik R.S. Pollutant elements in soil-plant-animal system in India and future thrust areas. *Eur. Chem. Bull.* 2013;2(1):38–45.

26. Романкевич Е.А. Живое вещество Земли (биогеохимические аспекты проблемы). *Геохимия*. 1988;2: 292–306.

[Romankevich E.A. Living matter of the Earth (biogeochemical aspects of the problem). *Geochemistry*. 1988;2: 292–306. (In Russ.)]

27. Елькина Г.Я., Денева С.В., Лаптева Е.М. Тяжелые металлы в системе почва-растение в биогеоценозах Большеземельской тундры. *Теоретическая и прикладная экология*. 2019;3:41–47. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2019-3-041-047>

[Elkina G.Ya., Deneva S.V., Lapteva E.M. Heavy metals in the soil-plant system in biogeocenoses of the Bolshezemelskaya tundra. *Theoretical and applied ecology*. 2019;3:41–47. (In Russ.)] <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2019-3-041-047>

28. Gough L.R., Sanzolone R.F., Crock J.G., Foster A.L., Ager C.M., Gent C.A. *Biogeochemical and biochemical pathway investigations of Cadmium in subarctic ecosystems using a Cadmium Accumulator Species (willow) USGS Numbered Series*. Bulletin 2191-4. U.S. Geological Survey; 2010. <https://doi.org/10.3133/b21914>

29. Ермолов Ю.В., Лебедева М.А., Бондарь М.Г., Колпащиков Л.А., Черевко А.С., Смоленцев Н.Б. Особенности аккумуляции химических элементов в биогеохимической пищевой цепи северной части Норильского плато. *Геохимия*. 2020;65(5):499–510. <https://doi.org/10.31857/S0016752520040032>

[Ermolov Yu.V., Lebedeva M.A., Bondar M.G., Kolpashchikov L.A., Cherevko A.S., Smolentsev N.B. Features of the accumulation of chemical elements in the biogeochemical food chain of the northern part of the Norilsk Plateau. *Geochemistry*. 2020;65(5):499–510. (In Russ.)] <https://doi.org/10.31857/S0016752520040032>

Об авторах

СЫСО Александр Иванович, доктор биологических наук, заведующий лабораторией биогеохимии почв, Author ID: 6507085911, Researcher ID: I-4231-2016, <https://orcid.org/0000-0003-4954-4052>, e-mail: sysol@issa-siberia.ru

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

НИКОЛАЕВА Майя Христофоровна, младший научный сотрудник, Author ID: 34875605400, Researcher ID: N-6732-2019, <https://orcid.org/0000-0002-0160-2295>, e-mail: mayan34@yandex.ru

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

ФИЛИППОВ Николай Васильевич, инженер-исследователь, Author ID: 57202088215, Researcher ID: J-6803-2018, <https://orcid.org/0000-0003-0463-3123>, e-mail: finiva88@mail.ru

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

ХУДЯЕВ Сергей Анатольевич, кандидат биологических наук, научный сотрудник, Scopus ID: 55553643800, Researcher ID: S-3872-2017, <https://orcid.org/0000-0002-0431-0757>, e-mail: khudayev@issa-siberia.ru

About the authors

SUSO, Alexander Ivanovych, Dr. Sci. (Biology), Head of the Laboratory, Author ID: 6507085911, Researcher ID: I-4231-2016, <https://orcid.org/0000-0003-4954-4052>, e-mail: sysol@issa-siberia.ru

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

NIKOLAEVA, Maya Christophorovna, Junior Researcher, Author ID: 34875605400, Researcher ID: N-6732-2019, e-mail: mayan34@yandex.ru

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

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

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

KHUDYAEV, Sergey Vasilievich, Cand. Sci. (Biology), Researcher, Author ID: 55553643800, Researcher ID: S-3872-2017, <https://orcid.org/0000-0002-0431-0757>, e-mail: khudayev@issa-siberia.ru

Поступила в редакцию / Submitted 14.11.2022

Поступила после рецензирования / Revised 17.01.2023

Принята к публикации / Accepted 14.02.2023

Оригинальная статья

Почвы островов Крестовский и Четырехстолбовой Государственного природного заповедника «Медвежий остров» (Восточно-Сибирское море)

М. В. Оконешникова, А. З. Иванова✉

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

✉madalexia@mail.ru

Аннотация

Приводятся результаты исследования ранее не изученных почв арктических островов Крестовский и Четырехстолбовой – новой заповедной территории федерального уровня «Медвежий остров» (70°37'–70°60' с.ш., 160°23'–162°33' в.д.). Почвы в основном формируются в условиях близкого залегания многолетнемерзлых пород (около 1 м), глубина сезонного оттаивания составляет 0,3–0,6 см. Территория о. Крестовский представлена совокупностью нескольких ландшафтов, характеризующихся формированием в них различных типов мерзлотных почв. На горных участках вскрываются горные примитивные щебнистые почвы (А–BC(C)). На пологих длинных склонах под кочкарной мохово-травянистой тундрой формируются мерзлотные тундровые слабogleевые почвы (OT–Bg–BCg(C)). В естественных депрессиях на криогенных формах мезорельефа почвенный покров представлен совокупностью мерзлотных арктотундровых глееватых (O–B–Bg(BC)⊥) и перегнойно-глеевых почв (O–AH–AB–BG⊥). Маршевые почвы (Ad–C(AC)–C') распространены по низким затапливаемым пологим берегам острова. Все почвы кислые, зональные типы характеризуются оглеением, что сближает их с почвами материка. Почвенный покров о. Четырехстолбовой на основных типах элементарных ландшафтов с наиболее полноразвитым кустарничково-лишайниково-моховым или разнотравно-моховым покровом довольно однообразный и представлен арктотундровыми глееватыми почвами с однотипным по морфологическим признакам и физико-химическим свойствам профилем (O–Ad–AB(g)–Bg(BCg)). Характерные особенности данного типа почв: маломощность поверхностного органогенного горизонта, хорошая разложимость органического вещества, высокое и среднее содержание гумуса в дерново-гумусовом горизонте, отсутствие поверхностного оглеения или слабая его выраженность из-за иссушения в летний период.

Ключевые слова: заповедник «Медвежий остров», почвенный покров, мерзлотные почвы, морфология, Арктика
Финансирование. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ по теме 19-29-05151; регистрационный номер АААА-А20-120061190009-9.

Благодарности. Авторы выражают благодарность участникам комплексной экспедиции ИБПК СО РАН под руководством д.б.н. Арк.П. Исаева за помощь в сборе полевого материала.

Для цитирования: Оконешникова М.В., Иванова А.З. Почвы островов Крестовский и Четырехстолбовой Государственного природного заповедника «Медвежий остров» (Восточно-Сибирское море). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(1):94–103. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-94-103>

Original article

Soils of the Krestovsky and Chetyryokhstolbovoy islands in the National Nature Reserve “Bear Islands” (East Siberian Sea)

M. V. Okoneshnikova, A. Z. Ivanova✉

Institute for Biological Problems of Cryolithozone, Sciences, Yakutsk, Russian Federation

✉madalexia@mail.ru

Abstract

This paper presents an investigation of previously unstudied soils of the Arctic islands (Krestovsky and Chetyryokhstolbovoy), which gained the status of a new protected area “Bear Islands” (70°37'–70°60' N, 160°23'–162°33' E). Their soils were formed mainly under permafrost conditions (approximately 1 m), with a seasonal thawing depth of 0.3–0.6 cm. The territory of Krestovsky Island is a combination of several landscapes characterized by various types of permafrost soils. Primitive gravelly soils (A–BC(C)) are exposed in mountainous areas. Permafrost tundra low-gley soils (OT–Bg–BCg(C)) are formed on the gentle long slopes under hummocky moss-herbaceous tundra. In natural depressions on cryogenic forms of surface, the soil cover represents a combination of permafrost arctotundra gleyic (O–B–Bg(BC)⊥) and humus-gley soils

(O–AH–AB–BG_L). Marsh soils (Ad–C(AC)–C') occur along the low flooded gently sloping coasts of the island. All soils are acidic. Zonal types are characterized by gleying, which brings them closer to the soils of the mainland. The soil cover of Chetyryokhstolbovoy Island, with the most fully developed shrublichen-moss or forb-moss soils, is rather monotonous. Namely it is represented by arctotundra gleyic soils with a profile of the same type in terms of morphological features and physicochemical properties (O–Ad–AB(g)–Bg(BCg)). The main features of this soil type include the thinness of the surface organogenic horizon, good decomposition of organic matter, high and medium content of humus in the soddy-humus horizon, the absence of surface gleying or its weak severity due to drying out in summer.

Keywords: nature reserve “Bear Islands”, soil cover, permafrost soils, morphology, Arctic

Funding. This study was supported by the RFBR grant (theme number 19-29-05151; registration number AAAA-A20-120061190009-9).

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the participants of the IBPC SB RAS complex expedition, supervised by Dr. Arkady P. Isaev for assistance in collecting the field data.

For citation: Okoneshnikova M.V., Ivanova A.Z. Soils of the Krestovsky and Chetyryokhstolbovoy islands in the National Nature Reserve “Bear Islands” (East Siberian Sea). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(1):94–103. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-94-103>

Введение

Медвежьи острова (шесть островов: Крестовский, Андреева, Пушкарева, Леонтьева, Лысова и Четырехстолбовой) в 2020 г. получили высокий государственный статус заповедной территории федерального уровня с целью защиты и сохранения биологического разнообразия Арктики. Основу государственного задания заповедников составляют научные исследования современного состояния и динамики природных комплексов, в том числе почв и почвенного покрова. Роль почвенного покрова в биосфере исключительно велика, почва является не просто средой обитания наземных организмов и их убежищем, но и мощным аккумулятором и регулятором веществ и энергии, своеобразным экраном, задерживающим поступающие на поверхность вредные для жизни вещества [1–3]. В настоящее время изучены почвы и почвенный покров Национального природного парка «Ленские столбы», государственных природных заповедников «Усть-Ленский» и «Олекминский» [4–8].

В данной работе рассматриваются результаты рекогносцировочных исследований почв и почвенного покрова ранее не изученных островов Крестовский и Четырехстолбовой (как и всей территории нового заповедника «Медвежьи острова»), проведенных в августе 2021 г. в составе комплексной экспедиции сотрудниками Института биологических проблем криолитозоны СО РАН.

Объекты и методы исследования

Остров Крестовский наибольший по площади в архипелаге Медвежьих островов и наиболее приближен к материковому побережью. Рельеф острова низкогорный, с двумя небольшими соп-

ками. Северный и восточный берега – обрывистые, западный и южный – более пологие.

Остров Четырехстолбовой – самый восточный и небольшой по площади, но относительно освещенный в литературе среди всей сети островов архипелага [9–14]. Длина его около 10 км, максимальная ширина около 2,5 км, преобладающие высоты 20–30 м над ур. м., наивысшие точки достигают 80–120 м на вершинах каменных столбов-останцов.

Почвообразующие породы в основном гранитные, но в понижениях могут вскрываться песчаные или, реже, суглинистые осадочные породы [15, 16]. На поверхности много выходов обломочного материала в виде единичных прорывов, россыпей, кос, склоновых осыпей и т. д.

Климат морской, арктический. По обобщенным данным полярной метеостанции «Четырехстолбовой» (действовавшей с 1933 по 1995 г.), среднемесячная температура воздуха в январе колеблется от –37,3 до –22,8 °С, в июле – от +0,6 до +5,4 °С. Наибольшие месячные осадки выпадают летом и максимально достигают 104 мм, тогда как зимой составляют всего 30 мм [17].

Растительный покров довольно однообразный арктотундровый, кустарничково-мохово-лишайниковый или лишайниково-моховый, иногда с участием трав и маков [13, 14].

По почвенно-географическому районированию изученные острова относятся к Евразийской полярной почвенно-биоклиматической области, подзоне распространения мерзлотных арктических почв Арктики [18], в которой формирование и развитие почв происходит в условиях близкого залегания многолетней мерзлоты (около 1 м). В летний период почвы оттаивают на глубину 0,3–0,5 м, лишь на песках этот показатель достигает 0,7–1,0 м.



Рис. 1. Схема заложения разрезов на о. Крестовский (<https://qms.nextgis.com/geoservices/1300/>)

Fig. 1. Location of soil profiles in the study area of Krestovsky (<https://qms.nextgis.com/geoservices/1300/>)

Полевое почвенное обследование проводилось в середине августа 2021 г. традиционным методом маршрутов, разрезы закладывались на основных типах элементарных ландшафтов с наиболее полноразвитым растительным покровом с целью изучения относительно зрелых профилей почв. В ходе исследования на о. Крестовский было заложено пять почвенных разрезов, преимущественно на западном побережье (рис. 1), наглядно характеризующих разнообразие почвенного покрова острова. На о. Четырехстолбовой в северо-восточной его части было описано четыре профиля (рис. 2). Был произведен погоризонтный отбор почвенных образцов. Для изучения состава и свойств почв выполнены стандартные аналитические исследования: гранулометрический состав (пирофосфатный метод в модификации Качинского), pH водный, содержание гумуса по Тюрину с титриметрическим окончанием, обменные катионы, гидролитическая кислотность [19, 20]. Результаты аналитических исследований приведены в табл. 1 и 2.

Диагностика почв и индекса́ция генетических горизонтов проводились в соответствии с Классификацией почв СССР [21] и единым государственным реестром почвенных ресурсов России [22].

Результаты и обсуждение

Почвы о. Крестовский. Несмотря на то что ландшафты острова на первый взгляд кажутся довольно однообразными, с точки зрения почвенной структуры на обследованном нами западном побережье почвенный покров характеризуется некоторым разнообразием.

Между выходами гранитов на высоких участках вскрываются короткопрофильные горные примитивные щебнистые почвы (разрез К-1-21; $70^{\circ}50,53,33'$ с.ш., $160^{\circ}34'15,54''$ в.д.). Морфологический профиль имеет следующее строение: А/АВ (0–3 см)–ВС/С (3–22 см). Это относительно слабо развитые почвы с высоким содержанием щебня. Подстилка практически не сформирована – под накипью лишайников вскрывается небольшой буроватый гумусовый (или переходный к гумусовому) горизонт с признаками дерновости слабого накопления органики. Ниже почва однородная, неоглеенная, суглинистая, светло-серовато-бурая с обильным или средним щебнем, значительным содержанием тонких корней и неустойчиво-зернистой структурой. Мерзлоты в деятельном слое нет. Почва близка по описанию к подбурам.

Почва легкосуглинистая (содержание физ. глины около 22 %), кислая (pH 4,4–4,7). Распреде-



Рис. 2. Схема заложения разрезов на острове Четырехстолбовой (<https://qms.nextgis.com/geoservices/1300/>)

Fig. 2. Location of soil profiles in the study area of Chetyryokhstolbovoy (<https://qms.nextgis.com/geoservices/1300/>)

ние фракций и кислотности можно считать равномерным по профилю, что говорит о слаборазвитости почвы. Содержание гумуса в гумусовом слое составляет почти 4 %, ниже – 2,8 %, что, возможно, говорит о пропитке минеральной толщи бесцветным фульватным гумусом, продуктом разложения лишайников, как иногда встречается в почвах горных территорий [23]. Сумма обменных оснований 4,5 – 6,25 ммоль/100 г, с максимумом в верхней части, т. е. катионов больше в горизонте с большим содержанием гумуса. Степень насыщенности основаниями низкая.

На пологих длинных склонах с затрудненным дренажом, под кочкарной мохово-травянистой тундрой формируются *мерзлотные тундровые слабogleевые почвы* на супесчаных отложениях (разрез К-5-21; 70°60'57,16"с.ш., 160°33'18,17"в.д.). Морфологическое строение профиля: ОТ (0–10 см)–Bg (10–14 см)–BCg/C (14–34 см). Под подушкой живого мха и травянистого войлока есть небольшая торфянистая прослойка из слабо-разложившихся растительных остатков. Ниже расположена мокрая, плотно переплетенная нитевидными корнями минеральная толща светло-серовато-бурой окраски, в верхней части которой выделяется небольшой переходный горизонт.

Почва супесчаная с равномерным преобладанием среднего, мелкого песка и крупной пыли. Реакция почвенной среды кислая (рН 4,5–4,8). В минеральной толще содержание гумуса равномерное и довольно высокое, что, возможно, го-

ворит о пропитке фульватным гумусом, также значительную роль в повышении показателей содержания органического углерода играет обильное содержание внутрипочвенного детрита в виде отмерших корней растений. Содержание обменных кальция и магния такое же, как и в разрезе К-1-21, почва также не насыщена основаниями.

В центральной части западного побережья пологие склоны сопки образуют небольшой водосбор. Ближе к ручью, в условиях переувлажнения наблюдается мерзлотное растрескивание поверхности – формируются крупные полигоны с выраженными трещинами между ними (размеры полигонов колеблются от 3 до 20 м). Поверхность полигона неровная, местами вспученная (мелкие бугры от 1 до 2 м диаметром), с мелкими трещинами. Здесь формируется мерзлотная арктотундровая глееватая почва (разрез К-3-21; 70°52'53,25"с.ш., 160°34'41,91"в.д.). Морфологический профиль имеет следующее строение: О (0–2 см)–В (2–8/12 см)–Bg/BC₁ (8/12–48 см). Гумусового горизонта нет, подстилка выражена слабо. Профиль равномерно окрашен в темно-буроватый цвет, в верхних 6 см он более переплетен корнями и имеет единичные бурые пятна, в нижней части тоже есть пятна, но также появляются признаки небольшого оглеения в виде сизоватых и охристых пятен. Данная почва может быть излившейся.

Гранулометрический состав легкосуглинистый, реакция среды слабокислая (рН 5,2–6,4).

Физико-химические свойства почв

Table 1

Physicochemical properties of soils

Номер разреза	Мощность, см	pH _{водн}	Гумус, % (* – ППП, %)	Обменные катионы, ммоль/100 г		Гидролитическая кислотность, ммоль/100 г	Степень насыщенности, %	Сумма солей, %
				Ca ²⁺	Mg ²⁺			
Profile number	Depth, cm	pH	Humus, %	Exchangeable bases, mmol/100g		Hydrolytic acidity, mmol/100g	Saturation degree, %	Sum of soluble salts, %
о. Крестовский Krestovsky Island								
К-1-21	0–3	4,70	3,98	3,50	2,75	6,38	49,49	Не опр.
	3–22	4,37	2,84	2,50	2,00	5,48	45,09	Не опр.
К-5-21	10–14	4,48	6,22	2,00	2,13	8,28	33,28	Не опр.
	14–34	4,77	6,35	2,13	2,62	5,61	45,85	Не опр.
К-3-21	2–8(12)	5,20	2,36	3,25	4,50	3,71	67,63	Не опр.
	8(12)–48	6,43	2,10	4,63	4,25	0,93	90,52	Не опр.
К-4-21	5(22)–7(24)	5,65	5,50	5,50	5,75	3,96	73,96	Не опр.
	7(24)–48	6,06	1,54	4,50	5,50	1,46	87,26	Не опр.
К-2-21	0–6	4,75	8,98	1,10	1,65	4,42	38,35	Не опр.
	6–20	4,99	0,42	0,23	0,27	0,59	45,87	Не опр.
	20–60	4,98	0,53	0,25	0,38	0,78	44,68	Не опр.
о. Четырехстолбовой Chetyryokhstolbovoy Island								
Ч21-1	0–3	5,17	8,07	5,00	5,75	9,04	54,32	0,053
	3–8(10)	5,19	1,78	2,38	2,62	3,71	57,41	0,027
	8(10)–20	5,12	3,40	3,13	3,50	5,73	53,64	0,030
	20–62	5,61	2,09	2,50	2,88	1,98	73,10	0,034
Ч21-2	1–5	5,67	7,34	8,88	6,75	4,82	76,43	Не опр.
	5–14	5,41	1,27	3,75	3,25	2,35	74,87	Не опр.
	14–56	4,94	2,88	3,25	2,75	4,32	58,14	Не опр.
Ч21-3	0–2	6,04	3,33	5,63	4,25	1,90	83,87	0,023
	2–7	6,12	2,09	6,88	4,62	2,02	85,06	0,023
	7–22	6,46	1,00	5,13	3,62	0,93	90,39	0,022
	22–57	6,77	1,42	4,50	3,25	0,54	93,49	0,037
Ч21-4	0–3	5,68	5,48	7,63	5,75	4,92	73,11	Не опр.
	3–11	5,82	3,88	6,63	5,50	3,71	76,58	Не опр.
	11–34	6,24	2,93	6,50	5,38	2,35	83,49	Не опр.

* Приведено значение потери при прокаливании.

* The value of the loss on ignition.

Содержание гумуса в минеральной толще равномерное и составляет 2,1–2,4 %, сумма обменных катионов достигает 7,8–8,9 ммоль/100 г, что является довольно высоким показателем для района исследования. Гидролитическая кислотность низкая, с максимумом вверху. Почва насы-

щена основаниями в большей части профиля (до 90,5 %).

В трещине почва более гидроморфна. Органический слой здесь представлен фрагментарным перегнойным черным горизонтом АН, плотно переплетенным корнями растений и име-

Таблица 2

Гранулометрический состав почв

Table 2

Granulometric composition of soils

Номер разреза	Мощность, см	Содержание гранулометрических фракций, %, размер частиц, мм						Сумма частиц <0,01 мм
		1–0,25	<0,01 мм	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	<0,001	
Profile number	Depth, cm	Amount of particles, %						Sum of particles <0,01mm, %
о. Крестовский Krestovsky Island								
K-1-21	0–3	0,61	2,60	28,3	27,2	22,4	6,5	9,0
	3–22	0,60	2,61	21,4	34,0	22,1	5,7	8,2
K-5-21	10–14	0,36	2,55	30,5	32,3	23,7	2,0	5,7
	14–34	0,58	2,54	16,3	26,1	39,6	5,3	4,5
K-3-21	2–8(11)	0,63	2,63	6,0	31,9	34,3	3,6	12,3
	8(12)–46	0,44	2,64	3,2	40,0	36,7	2,9	6,9
K-4-21	5(22)–7(24)	0,87	2,56	13,8	38,8	32,6	2,5	4,5
	7(24)–48	0,81	2,65	4,8	29,4	35,1	7,8	3,9
K-2-21	0–6	0,40	2,53	53,6	20,6	18,8	2,0	1,2
	6–20	0,15	2,62	92,9	1,4	1,2	0,8	0,2
	20–60	0,17	2,61	92,6	0,1	2,6	0,8	0,4
о. Четырехстолбовой Chetyryokhstolbovoy Island								
Ч21-1	0–3	9,9	49,3	26,0	4,4	2,4	8,0	14,8
	3–8(10)	5,5	33,3	46,0	4,0	3,2	8,0	15,2
	8(10)–20	4,0	39,2	39,2	3,2	5,2	9,2	17,6
	20–62	14,3	32,5	38,8	4,8	4,0	5,6	14,4
Ч21-2	1–5	9,9	47,5	27,4	4,7	3,5	7,0	15,2
	5–14	5,2	39,2	40,8	2,8	5,2	6,8	14,8
	14–56	11,3	30,7	42,0	4,4	3,6	8,0	16,0
Ч21-3	0–2	0,8	42,4	44,0	4,0	3,2	5,6	12,8
	2–7	0,9	41,1	32,4	6,4	8,4	10,8	25,6
	7–22	0,5	35,9	42,0	6,4	4,8	10,4	21,6
	22–57	0,1	22,7	58,4	4,8	4,8	9,2	18,8
Ч21-4	0–3	2,5	40,0	36,0	6,7	5,5	9,3	21,5
	3–11	0,9	21,9	53,6	8,8	4,8	10,0	23,6
	11–34	1,0	27,8	39,2	10,0	10,8	11,2	32,0

ющим клиновидную форму, который ниже сменяется буровато-серым гумусовым горизонтом. Затем вскрывается оглеенная светло-буровато-серая толща с признаками тиксотропии и оглеения. Тип почвы – *мерзлотная арктотундровая перегнойно-глеевая почва* (разрез К-4-21; 70°52'51,94"с.ш., 160°34'41,21"в.д.). Морфологическое строение профиля следующее: О (0–2 см)–АН (2–5/22 см)–АВ (5/22–7/24 см)–ВГ⊥ (7/24–

48 см). В трещине почва слабокислая, близкая к нейтральной (рН 5,7–6,1), гранулометрический состав легко- и среднесуглинистый. Содержание физической глины увеличивается вниз по профилю. В гумусовом горизонте содержание гумуса достигает 5,5 %, ниже – 1,5 %. Насыщенность основаниями в нижнем горизонте довольно высока.

Вдоль берега моря, почти на уровне водной поверхности, выделяется узкая полоса осадоч-

ных песчаных отложений. Здесь под разреженной мохово-лишайниковой накипью с остатками травянистого войлока и фрагментарным минеральным наносом вскрывается неоглеенная маршевая почва (разрез К-2-21; 70°52,395'с.ш., 160°33,846'в.д.). Морфологическое строение профиля: Ad (0–6 см)–AC/C (6–20 см)–C' (20–60 см). Эти почвы имеют слоистое строение и сложены плохо отмытым песком различной окраски. Зерна песка характеризуются довольно крупным размером, в нижней части профиля можно даже выделить мелкую гальку диаметром до 0,5 мм. Крупных камней нет. В верхней части профиля сформирован небольшой (до 6 см) дерновый горизонт.

Почва приморской затопляемой низины кислая с очень низким содержанием обменного кальция и магния, что связано с легкостью гранулометрического состава почвы. Гидролитическая кислотность также низкая. Содержание гумуса высокое в дерновом горизонте (9 %) и низкое – в нижних слоях (0,4–0,5 %).

Почвы о. Четырехстолбовой. На автономных плакорных участках водораздела и на разных частях склонов водораздельного холма обследованной юго-восточной части территории с кустарничково-травяно-лишайниково-моховым покровом формируются арктотундровые почвы, различающиеся по степени проявления процесса оглеения. Их оглеенность, морфологически обнаруживаемая в нижней половине профиля, а нередко и в верхней его части, связана с чередованием нисходящих и восходящих токов влаги, с сезонными сменами величин окислительно-восстановительного потенциала.

В общих чертах арктотундровые глееватые почвы имеют следующее морфологическое строение профиля: O–Ad–AB(g)–Bg(BCg)L. Под маломощной подстилкой залегает гумусово-дерновый горизонт Ad мощностью 4–7 см, буровато-серый, плотно переплетенный корнями трав, мелкокомковатой структуры, ниже сменяемый переходным горизонтом AB неоднородной буровато-серой окраски (иногда со слабо выраженными признаками оглеения) и минеральным буровато-серым с сизым оттенком и охристыми пятнами оглеенным, мокрым (с незначительными изменениями в плотности) бесструктурным горизонтом Bg (BCg), уходящим в мерзлоту. Максимальная глубина сезонного оттаивания в середине августа составляет 56–57 см.

Разрез Ч21-2 арктотундровой глееватой почвы заложен на склоне холмистой террасы под кустарничково-разнотравной тундрой (70°37'48,60"с.ш., 162°23'45,60"в.д.) и имеет следующее морфологическое строение: Ad (1–5 см)–AB (5–14 см)–BgL (14–56 см). Дерновый горизонт мощностью 4–5 см, бурый, влажный, плотно переплетен мелкими живыми и полуразложившимися корнями, мелкокомковатый, заметно переходит в неоднородный по окраске буровато-серый с бурыми пятнами и примазками переходный горизонт AB. Нижележащий оглеенный горизонт мокрый, буровато-серый с сизоватым оттенком и охристыми пятнами, уплотненный, в нижней части тиксотропный, на дне разреза расплывается и заполняется надмерзлотной верховодкой. Залегает на льдистой мерзлоте.

Гранулометрический состав супесчаный по всему профилю с преобладанием частиц крупной пыли и мелкого песка. Реакция среды колеблется от слабокислой в гумусированной части до кислой в минеральной, соответственно вниз по профилю снижаются содержание обменных катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} и степень насыщенности. Характерно довольно высокое содержание гумуса в верхнем дерново-гумусовом горизонте, в минеральной части очень низкое и низкое с небольшим повышением его над мерзлотой.

Разрез Ч21-3 арктотундровой глееватой почвы, вскрытый в верхней части склона под разнотравно-лишайниковой тундрой (N 70°37'56,20"с.ш., 162°23'35,80"в.д.), морфологически отличается общей слабой сизоватостью и замазанностью всего минерального профиля, отсутствием признаков тиксотропности в надмерзлотной части и состоит из следующих горизонтов: O/Ad (0–2 см)–Ad (2–7 см)–ABg (7–22 см)–B/BCgL (22–57 см). Гранулометрический состав легкосуглинистый в органо-минеральной части и супесчаный в нижележащем горизонте. Реакция среды колеблется от слабокислой до нейтральной, поглощающий комплекс насыщен основаниями. Содержание гумуса низкое и очень низкое по всему профилю. Почва не засолена, общее количество легкорастворимых солей ничтожное.

Профиль разреза Ч21-4 арктотундровой глееватой почвы, развитой под разнотравно-зеленомощной тундрой на вершине водораздела, имеет практически аналогичное строение: O/Ad (0–3 см)–Ad (3–11 см)–B/BCgL (11–34 см). Главное различие заключается в утяжелении гра-

нулометрического состава вниз по профилю от легкосуглинистого до среднесуглинистого. Последнее согласуется с преимущественным формированием на суглинистых отложениях тундровых почв равнинных территорий Якутии [24, 25]. Реакция среды слабокислая, содержание гумуса колеблется от среднего до низкого.

На наиболее повышенных участках пойменной части острова под кустарничково-разнотравно-зеленомошной тундрой с участием ивы чукотской, злаков, дриады и лишайников (70°37'45,20" с.ш., 162°23'54,80" в.д.) вскрыт разрез Ч21-1 мерзлотной пойменной дерновой глееватой почвы с невыраженной слоистостью почвообразующего аллювия и слабо дифференцированным морфологическим профилем: Ad (0–3 см)–ABg (3–8/10 см)–Bg (8/10–20 см)–BCg_L (20–62 см). Глубина сезонного оттаивания максимальная среди изученных почв острова и составляет 62 см. Дерновый горизонт сформирован аналогично вышеописанным арктотундровым почвам и имеет серовато-бурый цвет, плотно переплетен мелкими корнями растений, влажный, супесчаный, Переходный гумусово-минеральный горизонт ABg сизовато-серый с охристыми пятнами ожелезнения, переплетенный мелкими корнями растений меньше, чем в дерновом, влажный, супесчаный заметно переходит в минеральные глееватые горизонты Bg и BCg серовато-бурой окраски, различаются по степени выраженности пятен оглеения и ожелезнения. Гранулометрический состав супесчаный по всему профилю с преобладанием фракций мелкого песка и крупной пыли. Реакция среды кислая в верхних горизонтах и насыщенность основаниями небольшая, в нижележащем горизонте реакция становится слабокислой и степень насыщенности значительно повышается. Содержание гумуса высокое в маломощном дерновом горизонте, затем резко снижается в переходном ABg до очень низкого, далее незначительно повышается до низкого уровня в нижележащих минеральных. Довольно высокое содержание гумуса в верхнем горизонте пойменной дерновой глееватой и арктотундровой глееватой почвы разреза Ч21-2 обусловлено супесчаным гранулометрическим составом и лучшей их прогреваемостью, в них интенсивнее протекают процессы гумификации. Общее количество легкорастворимых солей ничтожно, почва не засолена. В целом, по морфологическому строению и физико-химическим свойствам в данной пойменной дерновой

глееватой почве роль аллювиального процесса невелика, преобладают процессы зонального тундрового почвообразования.

Заключение

Остров Крестовский, самый крупный в архипелаге и близкий к матерiku, имеет относительно разнообразный почвенный покров, обусловленный наличием нескольких типов ландшафтов. На вершинах и пологих склонах сопков под тундрами развиваются горные щебнистые почвы (A–BC(C)) и тундровые слабogleевые почвы (OT–Bg–BCg(C)) на кислом легкосуглинистом и супесчаном элювии и элювиоделювии гранитных пород. Террасы и водосборные склоны на относительно более насыщенных грунтах, испещренные полигонально-трещиноватым нано- и микрорельефом, характеризуются формированием мерзлотных арктотундровых глееватых почв излившихся бугров на поверхности полигона (O–B–Bg(BC)_L) и мерзлотных арктотундровых перегнойно-глеевых почв мерзлотных трещин (O–AH–AB–BG_L). Маршевые песчаные неоглеенные почвы (Ad–C(AC)–C') формируются в пределах узкой затапливаемой полосы по берегу моря. Таким образом, исследования показали, что почвы, сформированные на песчаных и супесчаных отложениях, здесь редко имеют признаки оглеения даже при достаточном увлажнении, в то время как суглинистые почвы на водосборных понижениях имеют признаки оглеения, характеризуются обнаружением многолетней мерзлоты в профиле на небольшой глубине и сильнее подвержены изменениям вследствие криогенной деформации поверхности. Все почвы, за исключением почв полигонально-западинной тундры, кислые с низкой насыщенностью обменными катионами и достаточно высоким содержанием гумуса в минеральной толще (кроме маршевой).

Почвенный покров изученной части о. Четырехстолбовой составляют арктотундровые глееватые почвы с однотипным по морфологическим признакам и физико-химическим свойствам профилем (O–Ad–AB(g)–Bg(BCg)_L). Характерные особенности данного типа почв: маломощность поверхностного органогенного горизонта, хорошая разложенность органического вещества, высокое и среднее содержание гумуса в дерново-гумусовом горизонте, отсутствие поверхностного оглеения или слабая его выраженность из-за иссушения в летний период.

Список литературы / References

1. Ковда В.А. *Основы учения о почвах*. М.: Наука; 1973. 447 с.
[Kovda V.A. *The principles of pedology*. Moscow: Nauka; 1973. 447p. (In Russ.)]
2. Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. *Функции почв в биосфере и экосистемах (экологическое значение)*. М.: Наука; 1990. 261 с.
[Dobrovolskiy G.V., Nikitin E.D. *Soil functions in the biosphere and ecosystems (ecological significance)*. Moscow: Nauka; 1990. 261 p. (In Russ.)]
3. Соколов И.А. *Теоретические проблемы генетического почвоведения*. Новосибирск: Гуманитарные технологии; 2004. 295 с.
[Sokolov I.A. *Theoretical problems of genetic soil science*. Novosibirsk: Gumanitarnye tekhnologii; 2004. 295 p. (In Russ.)]
4. Десяткин Р.В., Еловская Л.Г., Оконешникова М.В. Почвенный покров Национального природного парка «Ленские Столбы». *Национальный природный парк «Ленские Столбы»: геология, почвы, растительность, животный мир, охрана и использование*. Н.Г. Соломонова, А.П. Исаева, Е.И. Иванова (ред.). Якутск: Изд-во Якутского университета; 2001:42–53.
[Desyatkin R.V., Elovskaya L.G., Okoneshnikova M.V. Soil cover of National nature park «Lena Pillars». *Lena Pillars National Nature Park: geology, soils, vegetation, wildlife, protection and use*. N.G. Solomonov, A.P. Isaev, E.I. Ivanov (ed.). Yakutsk: Publishing House of the Yakut University; 2001:42–53 (In Russ.)]
5. Десяткин Р.В., Оконешникова М.В. Почвенный покров примечательных участков природного парка «Ленские Столбы». *Природный парк «Ленские Столбы»: прошлое, настоящее и будущее = Nature park «Lena Pillars»: past, present and future*. Якутск: ИБПК СО РАН; 2007:109–123.
[Desyatkin R.V., Okoneshnikova M.V. Soil cover for notable sites of National nature park «Lena Pillars». *Nature park Lena Pillars: past, present and future*. Yakutsk: IBPK SB RAS; 2007:109–123 (In Russ.)]
6. Десяткин Р.В. Почвы. *Растительный и животный мир дельты реки Лены*. Ред. Лабутиной Ю.В. и др. Якутск: ЯФ СО АН СССР; 1985:15–23.
[Desyatkin R.V. Soils. *Flora and fauna of the Lena River Delta*. Yu.V. Labutin et al. (ed.). Yakutsk: YaF SO AN SSSR; 1985:15–23 (In Russ.)]
7. Добровольский Г.В., Чернова О.В., Снакин В.В. *Почвы заповедников и национальных парков Российской Федерации*. М.: НИА-Природа – Фонд «Инфосфера»; 2012. 478 с.
[Dobrovolskiy G.V., Chernova O.V., Snakin V.V. *Soils of nature reserves and national parks of the Russian Federation*. Moscow: NIA-Priroda – Fond «Inosfera»; 2012. 478 p. (In Russ.)]
8. Кириллов А.Ф., Яшкина И.А., Бурмистров Е.В. Заповедник «Усть-Ленский» в сети особо охраняемых территорий Якутии. *Биота и среда заповедных территорий*. 2019;4:126–136.
[Kirillov A.F., Yakshina I.A., Burmistrov E.V. Ust-Lensky Nature Reserve in the protected areas system of Yakutia. *Biodiversity and Environment of Protected Areas*. 2019;4:126–136. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.25808/26186764.2019.19.4.009>
9. Врангель Ф.П. *Путешествие по северным берегам Сибири и по Ледовитому морю, совершенное в 1820–1824 гг.* М.: Главсевморпуть; 1948. 467 с.
[Vrangel F.P. *Journey along the northern shores of Siberia and the Arctic Sea, made in 1820–1824*. Moscow: Glavsevmorput'; 1948. 467 p. (In Russ.)]
10. Обручев С.В. Геоморфологические курьезы. *Изв. Всесоюзного географического общества*. 1940; 72(6):774–780.
[Obruchev S.V. Geomorphological curiosities. *Izv. Vsesoyuznogo Geograficheskogo Obshchestva*. 1940; 72(6):774–780. (In Russ.)]
11. Воробьев И.А. Остров Четырехстолбовой. *Изв. Всесоюзного географического общества*. 1940; 72(3):342–352.
[Vorob'ev I.A. Chetyryokhstolbovoy Island. *Izv. Vsesoyuznogo Geograficheskogo Obshchestva*. 1940;72(3): 342–352. (In Russ.)]
12. Мурзин Ю.А. Кигиляхи Якутии. *Наука и техника в Якутии*. 2003;1(4):105–108.
[Murzin Yu.A. Kigilyakhs of Yakutia. *Nauka i tekhnika v Yakutii*. 2003;1(4):105–108. (In Russ.)]
13. Заславская Т.М., Плиева Т.В. Флора острова Четырехстолбового (архипелаг Медвежьих островов, Восточно-Сибирское море). *Ботанический журнал*. 1983;68(3):369–376.
[Zaslavskaya T. M., Plieva T. V. Flora of Chetyryokhstolbovoy island (Medvezhy islands archipelago, the East-Siberian sea). *Botanicheskii Zhurnal*. 1983;68(3): 369–376. (In Russ.)]
14. Афонина О.М., Королева Т.М. Мхи острова Четырехстолбового (архипелаг Медвежьих островов, Восточно-Сибирское море). *Новости систематики низших растений*. 2006;40:295–306.
[Afonina O.M., Koroleva T.M. Mosses of the Chetyryokhstolbovoy island (Medvezhy islands archipelago, the East-Siberian sea). *Novosti Sistematiki Nizshikh Rastenii*. 2006;40:295–306. (In Russ.)]
15. Егiazаров Б.Х., Сидоренко А.В., Ткаченко Б.В. *Геология СССР. 26 том. Острова Советской Арктики. Геологическое строение*. М.: Недра; 1970. 548 с.
[Egiazarov B.H., Sidorenko A.V., Tkachenko B.V. *Geology of the USSR. 26 vol. Islands of the Soviet Arctic. Geological structure*. Moscow: Nedra; 1970. 548 p. (In Russ.)]
16. *Национальный атлас Арктики*. М.: Роскартография; 2017. 495 с.
[*National Atlas of the Arctic*. Moscow: Roskartografiya; 2017. 495 p. (In Russ.)]

17. Кононова Н.К. Динамика циркуляции атмосферы и циркуляционные механизмы метеорологических экстремумов в Арктике. *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2007;6: 26–42.

[Kononova N.K. Dynamic of atmosphere circulation and circulation mechanisms of meteorological extremums in Arctic. *Izvestiya RAN (Akad. Nauk SSSR). Seriya Geograficheskaya*. 2007;6:26–42. (In Russ.)]

18. Национальный атлас почв Российской Федерации. Под общ. ред. С. А. Шобы. М.: ООО Астрель; 2011. 631 с.

[National Atlas of soils of the Russian Federation. S. A. Shoba (ed.). Moscow: Astrel; 2011. 631 p. (In Russ.)]

19. Аринушкина Е.В. *Руководство по химическому анализу почв*. М.: Изд-во Московского университета; 1970. 487 с.

[Ariushkina E.V. *Manual on chemical analysis of soils*. Moscow: Publishing House of Moscow University; 1970. 487 p. (In Russ.)]

20. Качинский Н.А. *Механический и микроагрегатный состав почвы, методы его изучения*. М.: Изд-во АН СССР; 1958. 191 с.

[Kachinskii N.A. *Mechanical and microaggregate composition of soil, methods of investigation*. Moscow: Publishing House of AS USSR; 1958. 191 p. (In Russ.)]

21. *Классификация и диагностика почв СССР*. Сост. чл.-кор. ВАСХНИЛ В. В. Егоров, профессора В. М. Фридланд, Е. Н. Иванова и др. М.: Колос; 1977. 223 с.

[Classification and diagnostics of soils in the USSR. V.V. Egorov, V.M. Friedland, E.N. Ivanov et al. Moscow: Kolos; 1977. 223 p. (In Russ.)]

22. *Единый государственный реестр почвенных ресурсов России*. Версия 1.0. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева; 2014. 768 с.

[Unified state register of the soil resources in Russia. Version 1.0. Moscow: Dokuchaev Pochvennyy institut; 2014. 768 p. (In Russ.)]

23. Оконешикова М.В., Десяткин Р.В. Почвы северных отрогов хребта Черского в районе полюса холода: морфология, свойства, классификация. *Почвоведение*. 2017;8:926–935.

[Okoneshnikova M.V., Desyatkin R.V. Soils of northern spurs of the Cherskii Ridge in the area of the northern pole of cold: Morphology, properties, and classification. *Eurasian Soil Sc.* 2017;50(8):898–906]. <https://doi.org/10.1134/S1064229317080099>

24. Еловская Л.Г., Петрова Е.И., Тетерина Л.В. *Почвы Северной Якутии*. Новосибирск: Наука; 1979. 304 с.

[Elovskaya L.G., Petrova E.I., Teterina L.V. *Soils of Northern Yakutia*. Novosibirsk: Nauka; 1979. 304 p. (In Russ.)]

25. Губин С.В., Лупачев А.В. Почвы суглинистых водоразделов приморских тундр Севера Якутии: условия и процессы формирования. *Почвоведение*. 2017; 2:147–157.

[Gubin S.V., Lupachev A.V. Soils of loamy watersheds of coastal tundra in the north of yakutia: pedogenetic conditions and processes. *Eurasian Soil Sc.* 2017;50(2): 133–141]. <https://doi.org/10.1134/S1064229317020041>

Об авторах

ОКОНЕШНИКОВА Матрена Васильевна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-9841-2112>, e-mail: mvok@yandex.ru

ИВАНОВА Александра Зуевна, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-8501-6807>, e-mail: madalexia@mail.ru

About the authors

OKONESHNIKOVA, Matrena Vasilievna, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-9841-2112>, e-mail: mvok@yandex.ru

IVANOVA, Alexandra Zuevna, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-8501-6807>, e-mail: madalexia@mail.ru

Поступила в редакцию / Submitted 14.09.2022

Поступила после рецензирования / Revised 16.11.2022

Принята к публикации / Accepted 25.01.2023

Фосфатное состояние мерзлотных почв Центральной Якутии

А. П. Чевычелов, О. Г. Захарова[✉], М. П. Бурнашева

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация
[✉]olya.choma@mail.ru

Аннотация

Впервые изучено фосфатное состояние шести типов мерзлотных почв Центральной Якутии – лесных подзолистых, палево-бурых и палевых, а также лугово-степных черноземов, лугово-черноземных и черноземно-луговых. Определено общее содержание и внутрипрофильное распределение валового фосфора, а также формы минеральных фосфатов, определяемые по методике Чанга–Джексона и подвижные фосфаты по Гинзбург–Артамоновой. Средневзвешенное содержание валового фосфора в данных типах почв характеризуется как невысокое и изменяется от 174 до 376 мг/кг. При этом наиболее высокое количество валового фосфора отмечается в мерзлотных лугово-черноземных (376 мг/кг), черноземах (358) и палевых (344), несколько меньшее – в черноземно-луговых (302), а минимальное – в палево-бурых (214) и подзолистых (174 мг/кг) почвах. Показано, что в условиях криолитозоны Центральной Якутии, характеризующейся криоаридным климатом и сплошным распространением многолетней мерзлоты, формируются криогенные почвы, которые отличаются низкой биологической активностью и вследствие этого невысоким количеством доступных для растений фосфатов. Содержание подвижных фосфатов в изучаемых мерзлотных почвах в основном составляет 1,3–7,4 мг $P_2O_5/100$ г почвы, характеризуется по Гинзбург–Артамоновой как очень низкое и низкое и не превышает 1–2 % от их валового содержания. Только в верхних горизонтах мерзлотных черноземов – наиболее теплых и плодородных почвах Центральной Якутии количество данных фосфатов составляет 18,3–42,1 мг $P_2O_5/100$ г почвы (8–12 % от валового содержания) и оценивается как среднее и высокое. Отмечено, что в различных генетических горизонтах мерзлотных почв Центральной Якутии общее количество всех форм минеральных фосфатов, определяемых по Чангу–Джексону, варьирует в широких пределах и составляет от 11,4 до 188,0 мг $P_2O_5/100$ г почвы. При этом исследуемые мерзлотные почвы данной территории также отличаются минимальным содержанием наиболее доступных для растений рыхлосвязанных фосфатов (2,7–6,0 мг $P_2O_5/100$ г почвы), что обычно не превышает 10 % от их общего количества. Во фракционном составе минеральных фосфатов мерзлотных лесных почв Центральной Якутии абсолютно преобладают труднодоступные для растений фосфаты полуторных окислов, а среди последних – фосфаты железа, максимальное содержание которых достигает 63,1–92,6 % от общего количества всех фракций. В мерзлотных лугово-степных почвах данного региона также отмечается относительное повышение фосфатов кальция до 56,5–58,0 % от их суммарного содержания.

Ключевые слова: Центральная Якутия, мерзлотные почвы, физико-химические свойства, валовой фосфор, фосфаты

Финансирование. Статья подготовлена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ по проекту №0297-2021-0027, ЕГИСУ НИОКТР №АААА-А21-121012190033-5 с использованием оборудования ЦКП ФИЦ «ЯНЦ СО РАН».

Для цитирования: Чевычелов А.П., Захарова О.Г., Бурнашева М.П. Фосфатное состояние мерзлотных почв Центральной Якутии. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(1):104–116. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-104-116>

Original article

The phosphate status of permafrost soils in Central Yakutia

A. P. Chevychelov, O. G. Zakharova[✉], M. P. Burnasheva

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

Abstract

The phosphate state of six types of frozen soil in Central Yakutia (forest podzolic, pale brown and pale, meadow-steppe chernozems, meadow-chernozem, and chernozem-meadow) was studied for the first time. We estimated the total phosphorus content and intra-profile distribution, and calculated the forms of mineral phosphates using the

Chang-Jackson method and mobile phosphates according to Ginzburg-Artamonova. The weighted average total phosphorus content in these types of soils was low (174–376 mg/kg). The highest amount of total phosphorus was observed in permafrost meadow-chernozem (376 mg/kg), chernozems (358 mg/kg), and pale (344 mg/kg), slightly lower in chernozem-meadow (302 mg/kg), and the lowest was in pale-brown (214 mg/kg) and podzolic soils (174 mg/kg). Under cryolithozone conditions in Central Yakutia, which is characterized by a cryoarid climate and continuous permafrost, cryogenic soils are characterized by low biological activity and, consequently, a low amount of phosphates available to plants. The mobile phosphate content in the studied frozen soils (1,3–7,4 mg P_2O_5 /100 g soil) was low and very low according to Ginzburg-Artamonova (not exceeding 1–2% of the gross content). The upper horizons of frozen chernozems, which are the warmest and most fertile soils in Central Yakutia, have the amount of phosphates (18,3–42,1 mg P_2O_5 /100 g soil), which makes 8–1 % of the gross content and is estimated as medium and high. In various genetic horizons of frozen soils in Central Yakutia, the total amount of all forms of mineral phosphates estimated according to Chang-Jackson varies widely and ranges from 11,4 to 188,0 mg P_2O_5 /100 g soil. The studied frozen soils also differ in the minimum content of the most loosely bound phosphates available to plants, amounting to 2,7–6,0 mg P_2O_5 /100g soil, which usually does not exceed 10 % of the total amount. We conclude that the fractional composition of mineral phosphates in the frozen forest soils of Central Yakutia is dominated by phosphates that are difficult for plants to reach. The maximum content of iron phosphates reaches 63,1–92,6 % of the total amount of all fractions. A relative increase in calcium phosphates to 56,5–58,0 % of the total content is observed in the frozen meadow-steppe soils of this region.

Keywords: Central Yakutia, frozen soils, physical and chemical properties, total phosphorus, phosphates

Funding. This study was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project number 0297-2021-0027), (reg. number AAAA21-121012190033-5). We used the equipment provided by the Core Shared Research Facility (CSRF) of the Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre SB RAS”.

For citation: Chevychelov A.P., Zakharova O.G., Burnasheva M.P. The phosphate status of permafrost soils in Central Yakutia. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(1):104–116. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-104-116>

Введение

Фосфор (P) является облигатным биофилом, играющим огромную роль в жизни растений. В растениях встречается и в виде простых неорганических солей, таких как фосфаты Na, K, Mg и Ca, и в составе сложных органических соединений, к которым относятся нуклеиновые кислоты, нуклеопротеиды, а также аденозинтрифосфорная кислота (АТФ). При недостатке P нарушается обмен энергии и веществ в растениях, при этом подвижность и доступность фосфора в почвах определяется их биологической активностью, т. е. качественным и количественным составом почвенных ферментов и микроорганизмов [1]. В процессе биогеохимического цикла P поступает в почвы в составе продуктов выветривания почвообразующих пород, а затем включается в процессы внутрипочвенной миграции и переходит в состав органических и минеральных фосфатов, при этом последние характеризуются различной растворимостью или подвижностью, а следовательно, и доступностью для растений. Различные формы или фракции минеральных фосфатов представляют основную составляющую фосфатного состояния почв. При этом главным источником P в почве для питания растений являются его минеральные соединения, в частности соли ортофосфорной кислоты. Наиболее растворимы и доступны растениям фос-

фаты щелочных металлов, содержание которых в почве незначительно. Лучшей растворимостью и поэтому большей доступностью для растений обладают фосфаты кальция (Ca-P), степень усвоения которых зависит от основности соли, т. е. отношения $CaO : P_2O_5$, растворимость фосфатов полуторных оксидов (Al-P и Fe-P) также находится в прямой зависимости от их основности [2].

Фосфатное состояние почв немерзлотных регионов европейской территории России (ЕТР) и Сибири в разное время изучалось различными исследователями [3–11], при этом фосфатное состояние мерзлотных почв изучено крайне недостаточно [12–14], а по огромной территории Якутии в этом отношении имеются лишь отдельные работы, опубликованные в последние годы [1, 14]. Поэтому целью данной статьи являлась оценка фосфатного состояния основных типов лесных и лугово-степных почв Центральной Якутии в зависимости от их географо-генетических особенностей, а также от литолого-геохимических и ландшафтно-климатических условий данной территории.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являлись основные типы мерзлотных лесных и лугово-степных почв Центральной Якутии. При этом обозначения почвенных горизонтов выполнены в соот-

ветствии с их индексацией, приведенной в работе [15], а диагностика и классификация почв – в соответствии с подходами и принципами Л.Г. Еловской [16]. Всего было изучено фосфатное состояние шести типов мерзлотных почв Центральной Якутии (табл. 1).

В геоморфологическом отношении исследуемая территория представляет Центрально-Якутскую депрессию, сложенную в основном аллювиальными рыхлыми отложениями преимущественно легкого гранулометрического состава. При

этом если современную пойму р. Лена и низкие надпойменные террасы (I и II) составляют относительно обогащенные в литолого-геохимическом отношении голоценовые аллювиальные отложения, то аллювий более высоких террас и, в особенности, среднего и высокого уровней аллювиальной равнины – древние сильновыветрелые аллювиальные отложения плейстоценового возраста [17].

При выполнении данных работ использовались общепринятые почвенные методы, такие как срав-

Таблица 1

Географические и морфологические характеристики исследуемых мерзлотных почв Центральной Якутии

Table 1

Geographical and morphological characteristics of the studied permafrost soils in Central Yakutia

Почва, номер разреза Soil, Pit number	Географические координаты Geographical coordinates	Место заложения Place of the foundation	Морфологическое строение Morphological structure
Лесные почвы (Forest soils)			
Подзол иллювиально-гумусово-железистый, Р. 1КЭн-09 Podzole ferrous humic illuvial P. 1Ken-09	62°44'48" N, 129°02'0" E, Н – 170 м над ур. м.	Средний уровень древней аллювиальной равнины, смешанный березово-лиственный лес с примесью сосны лишайниково-мохово-кустарничковый	O(0–2)–A1A2(2–6)– A2(6–20)–Bhf(20–38/43)– BCf(38/43–94)– C(94–120 см)
Палево-бурая оподзоленная, Р. 3ЧТ-03 Pale-brown podzolized, P. 3ChT-03	62°05'17,9" N, 129°12'58,3" E, Н-253,9 м	Верхний уровень древней аллювиальной равнины, лиственный лес с сосной лишайниково-кустарничковый	A0A1(0–4)–A1A2(4–9)– A2B(9–21)–B(21–53)– BC(53–86)–C(86–144 см)
Палевая осолодевшая, Р. 6Т-05 Pale-yellow solodic, P. 6T-05	61°48'46,9" N, 129°32'31,9" E, Н – 239 м	Средний уровень аллювиальной равнины, смешанный лиственный-березовый бруснично-разнотравный лес	O(0–2)–A1A2(2–12)– A2(12–38)–Bt(38–52)– BC(52–91)–C(91–130 см)
Лугово-степные почвы (Meadow-steppe soils)			
Чернозем обыкновенный, Р. 2ЧТ-03 Ordinary chernozem, P. 2ChT-03	61°54'22,3" N, 129°33'39,2" E, Н – 102,7 м	Нижний уровень аллювиальной равнины, II надпойменная терраса р. Лена, типчаково-осочковая степь	Av(0–1)–A(1–24)– AB(24–35)–Bca(35–57)– BCa(57–75)– C(75–110 см)
Лугово-черноземная, Р. 6Ой-04 Meadow-chernozem, P. 6Oy-04	61°33'55,8" N, 129°09'07,8" E, Н – 99,1 м	Нижний уровень аллювиальной равнины, II надпойменная терраса р. Лена, остепненный разнотравно-злаковый луг	Av(0–2)–A(2–20)– AB(20–34)–Bca(34–49)– BC(49–87)–C(87–132 см)
Аллювиальная темногомусовая, Р. 5ЧТ-04 Alluvial dark humus, P. 5ChT-04	61°52'57,1" N, 129°37'06,1" E, Н – 93 м	Средняя пойма р. Лена, нормальный разнотравно-злаковый луг	Av(0–2)–A(2–5)– ABca(5–17)–Bca(17–52)– BC(52–102)– C(102–138 см)

нительно-географический, профильно-генетический и сравнительно-аналитический [18, 19]. Содержание общего Р в почвах определялось в процессе изучения их валового состава [20], минеральные формы фосфора по Чангу–Джексону и подвижные фосфаты по Гинзбург–Артамоновой выделялись согласно методикам [21], а затем определялись фотометрическим методом. Полученные данные обрабатывались методами вариационно-статистического анализа [22].

Результаты и их обсуждение

Состав и свойства исследуемых мерзлотных почв Центральной Якутии существенно различаются (табл. 2). Лесные почвы изучаемого региона, как правило, характеризуются кислой и слабокислой реакцией среды верхних почвенных горизонтов, а также нейтральной и слабощелочной нижних, незначительным и резко убывающим профильным содержанием гумуса, насыщенным обменными основаниями почвенно-поглощающим комплексом (ППК) и одновременным присутствием в его составе катионов Na^+ и H^+ , дифференцированным по элювиально-иллювиальному типу профилем по содержанию мелкодисперсных фракций почвенного мелкозема, т. е. частиц глины ($<0,01$ мм) и ила ($<0,001$ мм). В данных почвах также отмечается в основном отсутствие подвижных карбонатов (CaCO_3 и MgCO_3), в связи с формированием в них периодически промывного мерзлотного водного режима. Но в то же время в лесных мерзлотных почвах Центральной Якутии, формирующихся в криоаридных условиях, отмечается меньшая интенсивность проявления элювиальных почвенных процессов (оподзоливание, осолодение, выщелачивание) по сравнению с аналогичными почвами элювиального ряда, развивающимися в условиях гумидного климата Южной Якутии [1, 23]. В отличие от лесных, мерзлотные лугово-степные почвы Центральной Якутии характеризуются слабощелочной реакцией верхних почвенных горизонтов и слабощелочной и щелочной нижних, насыщенностью их ППК поглощенными основаниями Ca^{2+} и Mg^{2+} при существенном содержании катиона Na^+ и отсутствии обменного H^+ . Содержание гумуса в гумусово-аккумулятивных горизонтах данных почв, как правило, среднее и не так резко уменьшается с глубиной. Профильное распределение гумуса, а также частиц глины и ила, как правило, носит аккумулятивный характер, но при этом относительно уменьшается

в гор. А, в связи с проявлением здесь процесса дефляции (табл. 2).

Содержание валового Р в шести исследуемых типах мерзлотных почв Центральной Якутии приведено в табл. 3.

Так как мерзлотные лугово-степные почвы Центральной Якутии формируются в условиях криогенно-выпотного водного режима, в них отмечается накопление подвижных карбонатов щелочных земель, максимально приуроченное к аккумулятивно-карбонатным горизонтам Вса.

Для расчетов статистических параметров содержания и распределения данного элемента в изучаемых почвах, помимо наших собственных данных, была использована вся информация по данному вопросу, содержащаяся в опубликованных научных работах известных якутских и российских почвоведов [24–29]. Средневзвешенные содержания валового Р, характерные для отдельных типов почв исследуемого региона, были определены исходя из таковых средних концентраций, вычисленных для конкретных генетических горизонтов изучаемых почв и их мощности в составе почвенного профиля.

Внутрипрофильное распределение валового Р в подзолистых альфегумусовых и палевых осолоделых почвах исследуемой территории характеризовалось как аккумулятивно-элювиально-иллювиальное, в то время как в палево-бурых, черноземах и черноземовидных почвах (лугово-черноземных и черноземно-луговых) – как аккумулятивное (см. табл. 3). При этом для отдельных педонов лесных почв (Р. 1Кэн-09 и Р. 3ЧТ-03), а также лугово-степных почв (Р. 2ЧТ-03, Р. 7Ой-04 и Р. 6Ой-04) были обнаружены сильные корреляционные связи между содержанием гумуса и валового Р, когда коэффициенты корреляции соответственно составляли 0,929 и 0,823, а также 0,795, 0,918 и 0,662. Внутрипрофильное дифференцированное распределение валового Р в системе элювиальных и иллювиальных горизонтов подзолистых альфегумусовых и палевых осолоделых почв, когда значения коэффициентов дифференциации соответственно составляли 2,0 и 1,2, позволяет рассматривать эти иллювиальные горизонты (Вф и Вса) изучаемых почв как комплексные физико-химические и механические барьеры (см. табл. 2) в процессе вертикальной миграции Р в данных мерзлотных почвах.

При этом внутрипрофильная дифференциация по содержанию валового Р в подзолистых альфегумусовых почвах исследуемой террито-

Таблица 2

Физико-химические свойства мерзлотных почв Центральной Якутии

Table 2

Physico-chemical properties of permafrost soils in Central Yakutia

Горизонт Horizon	Глубина, см Depth, cm	pH _{H₂O}	Гумус, % Humus, %	Обменные катионы, смоль(экв)/кг почвы Exchange cations, cmol(eq)/kg of soil				Сумма фракций, % Sum of fractions, %		CO ₂ карбонатов, % CO ₂ carbonates, %
				Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	H ⁺	<0,001 мм, mm	<0,01 мм, mm	
Подзол иллювиально-гумусово-железистый, Р. 1КЭн-09 Podzole ferrous humic illuvial, P. 1Ken-09										
A2	7–17	4,5	1,0	1,5	1,0	–	0,6	2,4	7,8	–
Bhf	23–33	5,3	2,5	2,7	1,1	–	0,9	4,8	9,5	–
BC	70–80	6,6	1,2	–	–	–	–	9,9	17,8	–
Палево-бурая оподзоленная, Р. 3ЧТ-03 Pale-brown podzolized, P. 3ChT-03										
A1A2	4–9	4,8	6,2	5,0	3,0	0,9	0,8	10,7	18,5	–
B	30–40	4,1	0,7	5,7	3,0	0,6	1,0	18,5	36,0	–
BC	60–70	5,0	0,5	2,1	1,5	0,3	0,1	3,3	5,0	–
Палевая осолоделая, Р. 6Т-05 Pale-yellow solodic, P. 6T-05										
A1A2	2–10	5,9	6,2	14,2	5,0	1,5	0,9	7,7	15,7	Н.о.
B	30–40	6,1	0,6	11,4	7,0	1,3	0,3	22,6	30,8	–/–
BCca	70–80	7,6	0,5	–	–	–	–	17,8	25,6	1,1
Чернозем обыкновенный, Р. 2ЧТ-03 Ordinary chernozem, P. 2ChT-03										
A	1–11	6,3	5,4	15,4	2,4	1,8	–	6,6	14,4	Н.о.
Bca	40–50	7,8	1,4	18,7	11,1	2,3	–	11,5	28,2	3,2
BCca	60–70	8,2	0,6	8,3	6,3	0,7	–	6,6	14,4	2,8
Лугово-черноземная, Р. 6Ой-04 Meadow-chernozem, P. 6Oy-04										
A	0–10	5,7	6,7	13,2	2,6	3,5	–	9,1	20,9	Н.о.
Bca	37–47	8,8	2,1	13,3	5,1	9,7	–	18,0	29,1	17,3
BCca	60–70	8,6	1,3	10,4	4,9	8,7	–	15,2	32,7	6,3
Аллювиальная темногомусовая, Р. 5ЧТ-04 Alluvial dark humus, P. 5ChT-04										
A	2–5	8,3	6,7	29,7	14,3	3,8	–	6,6	16,4	–
Bca	30–40	8,2	1,5	35,2	9,6	2,8	–	9,9	22,9	1,1
BC	70–80	8,0	1,4	14,3	3,3	1,7	–	6,2	16,4	–

Примечание. Прочерк – значение не определено. Н.о. – не обнаружено.

Note. Dash – value undefined, Н.о. – not detected.

рии выражена более отчетливо по сравнению с палевыми осолодевшими почвами (см. табл. 3). В связи с вышеотмеченной тенденцией элювиально-иллювиального распределения валового Р в подзолистых альфегумусовых почвах исследуемого региона необходимо указать, что в ана-

логичных типах подзолистых почв Кольского полуострова ЕТР отмечалось подобное распределение данного элемента, когда фиксировалось минимальное содержание Р в подзолистом горизонте, а максимальное – в иллювиальном [5]. Средневзвешенное содержание валового Р в мерз-

Таблица 3

Содержание валового фосфора в мерзлотных почвах Центральной Якутии, мг/кг

Table 3

The content of total phosphorus in permafrost soils of Central Yakutia, mg/kg

Тип почвы Soils type	Горизонт Horizon	n	lim	$\bar{x} \pm S\bar{x}$	V, %
Подзолистые альфегумусовые Podzolic alfehumic	A0(A0A1)	5	103–286	204±29	32
	A2	5	87–176	122±16	30
	Bf	5	149–352	244±38	35
	BC	5	44–286	162±42	57
	C	5	44–220	144±29	45
	Среднее*			174±34	
Палево-бурые Pale-brown	A0(A0A1)	5	304–510	399±37	20
	A1(A1A2)	5	194–418	272±40	33
	B	5	152–366	259±42	36
	BC	5	87–261	183±33	40
	C	5	65–240	161±35	49
	Среднее*			214±37	
Палевые Pale	A1(A1A2)	7	198–486	374±44	31
	A2	3	264–392	336±25	19
	B	7	154–418	338±38	30
	Bca	7	242–653	401±49	32
	BC	7	131–457	320±42	34
	C	7	88–632	323±63	52
	Среднее*			344±47	
Черноземы обыкновенные Ordinary chernozems	A(Aa)	5	422–520	482±18	8
	AB	5	418–517	471±18	9
	Bca	5	286–460	379±28	16
	BC	5	264–372	320±22	16
	C	5	188–355	273±29	29
	Среднее*			358±24	
Лугово-черноземные Meadow-chernozem	A(Aa)	8	409–638	500±33	19
	AB	8	308–484	392±19	14
	Bca	8	284–396	351±14	11
	BC	8	264–462	358±23	18
	C	8	242–460	335±27	23
	Среднее*			376±24	
Черноземно-луговые Chernozem-meadow	A(Aa)	5	151–770	589±113	43
	AB	5	110–506	405±74	41
	B	5	127–374	285±43	34
	BCg	5	104–264	201±27	30
	C	5	104–220	175±19	25
	Среднее*			302±49	

Примечание. Здесь и далее: n – объем выборки, lim – пределы изменения содержаний, $\bar{x} \pm S\bar{x}$ – среднее и его ошибка, V – коэффициент вариации. *Приведено средневзвешенное содержание для почвенного типа.

Note. Here and further: n – sample size, lim – limits of content change, $\bar{x} \pm S\bar{x}$ – average and its error, V – coefficient of variation. *The weighted average content is given for the soil type.

лотных черноземах Центральной Якутии, равное 358 мг/кг (см. табл. 3), вполне сопоставимо с таковым 376 мг/кг, рассчитанным нами для черноземов мучнисто-карбонатных Западного Забай-

калья, на основе данных, приведенных в работе [30]. Но эти средние количества валового Р оказались в 1,9 раза меньше такового (700 мг/кг), определенного в свое время для черноземов ев-

ропейской части СССР [31]. Аналогичная ситуация выявляется при сравнении средних содержаний валового Р в подзолах ЕТР (380 мг/кг) и Центральной Якутии (174 мг/кг), когда общее количество фосфора в первых почвах в 2,2 раза превышает таковое в последних. Таким образом, можно предварительно утверждать, что длительно-сезонномерзлотные почвы Забайкалья и мерзлотные почвы Центральной Якутии в среднем содержат в 2 раза меньше валового Р, чем сезонномерзлотные почвы ЕТР, в связи с более жесткими гидротермическими условиями почвообразования, складывающимися в данных регионах Восточной Сибири. Помимо этого, также необходимо отметить, что мерзлотные подзолистые альфегумусовые (174 мг/кг) и палеобурые почвы (214 мг/кг) содержат соответственно в 2,5 и 2,2 раза меньше валового Р по сравнению с аналогичными типами почв (429 и 474 мг/кг) Южной Якутии [1].

Это обстоятельство объясняется как минимум двумя причинами. Во-первых, данные типы почв Южной Якутии формируются, как правило, на слабовыветрелых кристаллических горных породах, относительно обогащенных первичными фосфорсодержащими минералами. Во-вторых, мерзлотные почвы Южной Якутии развиваются в более благоприятных условиях почвообразования, т. е. в обстановке прерывистой многолетней мерзлоты и повышенной влажности климата.

В целом мерзлотные лугово-степные почвы содержат в среднем больше валового Р (302–376 мг/кг), чем лесные почвы (174–344 мг/кг) Центральной Якутии. По средневзвешенному содержанию валового Р (мг/кг) данные типы мерзлотных почв образуют следующий ряд: лугово-черноземные (376) > черноземы (358) > палевые (344) > черноземно-луговые (302) > палеобурые (214) > подзолистые альфегумусовые (174). Причем, если в почвах первых трех типов отмечается незначительное снижение общего количества Р, то в последних трех типах – уже существенное, т. е. почти двухкратное. В этом плане необходимо отметить относительную обогащенность валовым Р мерзлотных палевых почв, формирующихся главным образом на лессовидных карбонатных суглинках, по сравнению с другими типами лесных почв данного региона, развивающимися преимущественно на сильновыветрелых легких почвообразующих породах древней аллювиальной равнины плейстоценового возраста. Также необходимо отметить, в связи с анализом

внутрипрофильного распределения общего количества валового Р в исследуемых почвах, минимальная вариабельность среднего содержания данного элемента ($V = 8\text{--}19\%$) отмечается в верхних горизонтах мерзлотных черноземов и лугово-черноземных почв (см. табл. 3).

В мерзлотных и длительно-промерзающих почвах Южной Якутии вследствие их низкой биологической активности отмечается незначительное накопление подвижных фосфатов [1]. Данное положение ранее было подтверждено известными исследованиями А.И. Коровина [32], согласно которым отрицательное последствие низких температур на почвы заключается в замедлении поглощения фосфора. Поэтому растения испытывают фосфорное «голодание» на холодных почвах даже при наличии подвижной фракции данного элемента. Последнее также подтверждается данными по содержанию подвижных фосфатов в верхних горизонтах пяти изучаемых типов мерзлотных почв Центральной Якутии (табл. 4).

Содержание подвижных фосфатов по Гинзбург–Артамоновой [21] в четырех из исследованных пяти типов данных почв оценивается как низкое и очень низкое. И только в мерзлотных черноземах Центральной Якутии обеспеченность подвижными фосфатами диагностируется в гор. А как высокая, а в гор. Вса – как средняя. Данное исключение может быть объяснено, во-первых, тем, что данные почвы изучаемого региона являются наиболее теплообеспеченными, поскольку формируются в основном по мезоповышениям рельефа – гривам или кырдалам. Во-вторых, черноземы – это наиболее высокоплодородные мерзлотные почвы, которые ранее в земледельческих районах Центральной Якутии использовались в условиях орошаемого земледелия и внесения удобрений в основном под пропашные культуры. К сожалению, в настоящее время данные пашни в большей степени заброшены и используются в режиме залежей.

Содержание наиболее доступных для растений рыхлосвязанных фосфатов в изучаемых почвах (табл. 5, 6) изменяется от 2,7 до 8,5 мг $P_2O_5/100$ г почвы и в верхних почвенных горизонтах (А, В), как правило, не превышает 10 % от общей суммы минеральных фосфатов. Лишь в нижних горизонтах мерзлотных лесных почв Центральной Якутии общее относительное количество фосфатов данной фракции увеличивается до 13,6–24,5 %, причем максимальное их

Таблица 4

Содержание подвижных фосфатов в мерзлотных почвах Центральной Якутии, мг $P_2O_5/100$ г почвы

Table 4

The content mobile phosphates in permafrost soils of Central Yakutia, mg $P_2O_5/100$ g of soil

Тип почвы Soils type	Горизонт Horizon	n	lim	$\bar{x} \pm S\bar{x}$	V, %
Подзолистые альфе- гумусовые Podzolic alfehumic	A2	5	1,1–4,3	2,3±0,5	52
	Bf	5	0,8–2,1	1,3±0,2	38
Палевые Pale	A1(A1A2)	5	3,4–9,0	5,3±1,1	45
	B	5	0,9–8,1	5,4±1,3	52
Черноземы обыкновенные Ordinary chernozems	A	5	18,7–71,4	42,1±10,2	54
	Bca	5	10,4–31,6	18,3±3,7	45
Лугово-черноземные Meadow-chernozem	A	5	3,8–9,8	7,4±1,1	53
	Bca	5	1,4–8,8	4,0±1,3	75
Черноземно-луговые Chernozem-meadow	A	5	4,8–9,1	6,9±0,8	25
	B	5	1,7–9,3	5,1±1,2	54

содержание (23,7–24,5 %) отмечается в подзолистых альфегумусовых и палево-бурых оподзоленных почвах (см. табл. 5). Следовательно, в мерзлотных лесных почвах данного региона в условиях периодически промывного водного режима происходят вынос и относительное накопление рыхлосвязанных фосфатов в нижних надмерзлотных почвенных горизонтах. При этом данное явление не обнаруживается в мерзлотных лугово-степных почвах исследуемой территории в связи с формированием в них криогенно-выпотного водного режима.

Общее количество фосфатов полуторных окислов в исследуемых почвах изменяется значительно (см. табл. 5, 6), причем в составе последних почти во всех почвах, за исключением гор. Вса и ВСса аллювиальной темногомусовой почвы, Fe-P относительно преобладали над фосфатами алюминия (см. табл. 6, Р. 5ЧТ-04). Аналогичная тенденция была обнаружена для почв Приморья, где минеральные фосфаты также определялись по методу Чанга–Джексона, когда на Fe-P приходилось около 40 % от общей суммы всех форм фосфатов [33].

В наших исследованиях общее количество Al-P в изучаемых почвах изменялось от 0,5 до 45,5 мг $P_2O_5/100$ г почвы, или относительно – от 1,2 до 26,3 %. При этом сумма фосфатов данной фракции в лесных мерзлотных почвах данного региона, так же как и в лугово-степных, изме-

нялась очень вариабельно, составляя соответственно 0,7–44,6, или 1,0–42,9, и 0,5–45,5 мг $P_2O_5/100$ г почвы, или 1,2–24,1 %. В этом плане также можно утверждать, что с ростом увлажненности лесных почв изучаемого региона по сравнению с лугово-степными в данных мерзлотных почвах также относительно возрастает доля Al-P с 24,1–26,3 до 24,9–42,9 %. При этом максимальное абсолютное содержание Al-P, равное 45,5 мг $P_2O_5/100$ г почвы, отмечается в гумусово-аккумулятивном горизонте мерзлотного чернозема (см. табл. 6, Р. 2ЧТ-03). Во всех типах мерзлотных почв исследуемого региона выявлено высокое абсолютное и относительное очень вариабельное содержание Fe-P: в лесных почвах соответственно 2,5–152,5, или 9,7–92,6, и 2,7–90,0 мг $P_2O_5/100$ г почвы, или 10,4–48,0 % (см. табл. 5, 6). При этом минимальное количество фракции Fe-P (9,8–10,4 %) отмечается в аккумулятивно-карбонатных гор. Вса мерзлотных лугово-степных почв (см. табл. 6, Р. 6Ой-04 и Р. 5ЧТ-04), в которых относительно преобладают Ca-P (29,5–53,8 %), а максимальное (63,1–92,6 %) – соответственно в гор. А2 и Вса лесных подзолистой альфегумусовой и палевой осолоделой почвах (см. табл. 5, Р. 1Кэн-09 и Р. 6Т-05). Последнее также еще раз подтверждает барьерную функцию гор. Вса в распределении минеральных фосфатов в мерзлотных палевых осолоделых почвах Центральной Якутии. В связи с возрастанием от-

**Формы минеральных фосфатов
в мерзлотных лесных почвах Центральной Якутии, мг $P_2O_5/100$ г почвы**

Table 5

Forms of mineral phosphates in permafrost forest soils of Central Yakutia, mg $P_2O_5/100$ g of soil

Горизонт Horizon	Глубина, см Depth, cm	Формы минеральных фосфатов Forms of mineral phosphates						
		Рыхло-связанные Loosely-bound	Al-P	Fe-P	Ca-P	Оккл. Al-P Occluded Al-P	Оккл. Al(Fe)-P Occluded Al(Fe)-P	Сумма Sum
Подзол иллювиально-гумусово-железистый, Р. 1КЭн-09 Podzole ferrous humic illuvial, P. 1Ken-09								
A2	7–17	$\frac{5,8}{8,7}$	$\frac{0,7}{1,0}$	$\frac{42,2}{63,1}$	$\frac{2,7}{4,0}$	–	$\frac{15,5}{23,2}$	$\frac{66,9}{100}$
Bhf	23–33	$\frac{4,4}{3,6}$	$\frac{27,8}{22,7}$	$\frac{37,8}{31,0}$	$\frac{4,1}{3,4}$	–	$\frac{48,0}{39,3}$	$\frac{122,1}{100}$
BC	70–80	$\frac{2,7}{23,7}$	$\frac{2,6}{22,8}$	$\frac{5,8}{50,9}$	$\frac{0,3}{2,6}$	–	–	$\frac{11,4}{100}$
Палево-бурая оподзоленная, Р. 3ЧТ-03 Pale-brown podzolized, P. 3ChT-03								
A1A2	4–9	$\frac{4,8}{4,6}$	$\frac{44,6}{42,9}$	$\frac{48,0}{46,1}$	$\frac{4,1}{3,9}$	$\frac{0,1}{0,1}$	$\frac{2,5}{2,4}$	$\frac{104,1}{100}$
B	30–40	$\frac{3,2}{10,1}$	$\frac{7,9}{24,9}$	$\frac{14,2}{44,8}$	$\frac{1,2}{3,8}$	$\frac{1,2}{3,8}$	$\frac{4,0}{12,6}$	$\frac{31,7}{100}$
BC	60–70	$\frac{3,4}{24,5}$	$\frac{2,5}{18,0}$	$\frac{5,8}{41,8}$	$\frac{0,3}{2,1}$	$\frac{0,1}{0,7}$	$\frac{1,8}{12,9}$	$\frac{13,9}{100}$
Палевая осолодевшая, Р. 6Т-05 Pale-yellow solodic, P. 6T-05								
A1A2	2–10	$\frac{4,5}{5,3}$	$\frac{12,3}{14,4}$	$\frac{43,5}{50,8}$	$\frac{20,5}{23,9}$	$\frac{0,8}{0,9}$	$\frac{4,0}{4,7}$	$\frac{85,6}{100}$
Bca	30–40	$\frac{2,7}{1,6}$	$\frac{3,3}{2,0}$	$\frac{152,5}{92,6}$	$\frac{1,1}{0,7}$	$\frac{2,1}{1,3}$	$\frac{3,0}{1,8}$	$\frac{164,7}{100}$
BCca	70–80	$\frac{3,5}{13,6}$	$\frac{1,5}{5,8}$	$\frac{2,5}{9,7}$	$\frac{12,9}{50,2}$	–	$\frac{5,3}{20,7}$	$\frac{25,7}{100}$

Примечание. Здесь и далее: над чертой – в мг $P_2O_5/100$ г почвы, под чертой – в % от суммы всех фракций.

Note. Here and further: above the line – mg $P_2O_5/100$ g of soil, below the line – in % from the sum of all fractions.

носительной доли Fe-P в гор. A2 исследуемой подзолистой почвы данного региона необходимо подчеркнуть, что подобное количество Fe-P в элювиальных горизонтах подзолистых почв Коми АССР составляло 52,4–57,9 % и относительно возрастало с увеличением их степени оподзоливания с 7,6 до 23,3 мг $P_2O_5/100$ г почвы [3].

При анализе фракционного состава минеральных фосфатов исследуемых почв выявлена особенность мерзлотных черноземов (см. табл. 6, Р. 2ЧТ-03). Это низкое абсолютное и относительное содержание Ca-P, составляющее соответственно 0,6–1,8, или 0,6–0,9, и высокое – Fe-P,

равное 64,5–90,0 мг $P_2O_5/100$ г почвы, или 61,9–48,0 % от их общего количества. Такое распределение фосфатов не типично для черноземов немерзлотных регионов ЕТР и Сибири. В частности, содержание Fe-P в пахотном слое типичного чернозема Курской области составляет 15,2, или 37,4, а Ca-P, которые преобладают в данной почве, – соответственно 17,3 мг $P_2O_5/100$ г почвы, или 42,6 % от суммы фракций.

Кроме того, указывается, что высокое содержание Ca-P в черноземах Хакасии и Западной Сибири является одной из провинциальных особенностей данных почв [9]. Вместе с тем также

**Формы минеральных фосфатов
в мерзлотных лугово-степных почвах Центральной Якутии, мг P_2O_5 /100 г почвы**

Table 6

Forms of mineral phosphates in permafrost meadow-steppe soils of Central Yakutia, mg P_2O_5 /100 g of soil

Горизонт Horizon	Глубина, см Depth, cm	Формы минеральных фосфатов Forms of mineral phosphates						
		Рыхло-связанные Loosely-bound	Al-P	Fe-P	Ca-P	Оккл. Al-P Occluded Al-P	Оккл. Al(Fe)-P Occluded Al(Fe)-P	Сумма Sum
Чернозем обыкновенный, P.2ЧТ-03 Ordinary chernozem, P. 2ChT-03								
A	1–11	$\frac{6,0}{3,2}$	$\frac{45,5}{24,1}$	$\frac{90,0}{48,0}$	$\frac{1,8}{0,9}$	$\frac{1,0}{0,5}$	$\frac{44,0}{23,3}$	$\frac{188,3}{100}$
B _{Ca}	40–50	$\frac{5,7}{9,2}$	$\frac{5,9}{9,5}$	$\frac{18,8}{30,4}$	$\frac{1,5}{2,4}$	$\frac{1,0}{1,6}$	$\frac{29,0}{46,9}$	$\frac{61,9}{100}$
BC _{Ca}	60–70	$\frac{8,5}{8,2}$	$\frac{3,5}{3,4}$	$\frac{64,5}{61,9}$	$\frac{0,6}{0,6}$	–	$\frac{27,0}{25,9}$	$\frac{104,1}{100}$
Лугово-черноземная, P. 6Ой-04 Meadow-chernozem, P. 6Oy-04								
A	0–10	$\frac{3,6}{5,7}$	$\frac{15,5}{24,6}$	$\frac{28,0}{44,3}$	$\frac{11,3}{18,0}$	$\frac{0,1}{0,1}$	$\frac{4,6}{7,3}$	$\frac{63,1}{100}$
B _{Ca}	37–47	$\frac{3,8}{14,6}$	$\frac{0,9}{3,5}$	$\frac{2,7}{10,4}$	$\frac{14,0}{53,8}$	$\frac{0,5}{1,9}$	$\frac{4,1}{15,8}$	$\frac{26,0}{100}$
BC	60–70	$\frac{3,3}{9,0}$	–	$\frac{7,1}{19,3}$	$\frac{20,8}{56,5}$	–	$\frac{5,6}{15,2}$	$\frac{36,8}{100}$
Аллювиальная темногомусовая, P. 5ЧТ-04 Alluvial dark humus, P. 5ChT-04								
A	5–15	$\frac{2,9}{7,1}$	$\frac{0,5}{1,2}$	$\frac{8,3}{20,4}$	$\frac{23,6}{58,0}$	$\frac{1,2}{2,9}$	$\frac{4,2}{10,4}$	$\frac{40,7}{100}$
B _{Ca}	30–40	$\frac{3,4}{6,1}$	$\frac{8,5}{15,1}$	$\frac{5,5}{9,8}$	$\frac{16,5}{29,5}$	–	$\frac{22,1}{39,5}$	$\frac{56,0}{100}$
BC	70–80	$\frac{4,0}{6,1}$	$\frac{17,3}{26,3}$	$\frac{13,4}{20,3}$	$\frac{22,6}{34,3}$	–	$\frac{8,6}{13,0}$	$\frac{65,9}{100}$

отмечается, что в африканских черноземах Анголы, развитых на ферралитных корках выветривания, в составе минеральных фосфатов преобладали Fe-P и содержание подвижных форм фосфатов в данных почвах убывало с глубиной [34].

Максимальное количество Ca-P наблюдалось в мерзлотных лугово-степных, т. е. в лугово-черноземной и аллювиальной темногомусовой почвах Центральной Якутии, соответственно составляя 14,0–20,8, или 53,8–56,5, и 22,6–23,6 мг P_2O_5 /100 г почвы, или 34,3–58,0 % от суммы минеральных фосфатов. При этом минимальное содержание Ca-P в изучаемых почвах было выявлено в лесных почвах данного региона, т. е. в подзолистой альфегумусовой и палево-бурой оподзоленной и составляло соответственно 0,3–2,7, или 2,6–4,0, и 0,3–1,2 мг P_2O_5 /100 г почвы,

или 2,6–3,8 %. В этом отношении необходимо констатировать, что в лесной палевой осолодевшей почве, сформированной на аллювиальных карбонатных суглинках Центральной Якутии, отмечается относительно высокое количество Ca-P, которое составляет 12,9–20,5 мг P_2O_5 /100 г почвы, или 23,9–50,2 % от суммы фракций. Таким образом, мерзлотные палевые почвы обособленно выделяются среди лесных почв Центральной Якутии как по общему содержанию, так и фракционному составу отдельных групп минеральных фосфатов.

Содержание окклюдируемых Al-P в данных почвах незначительно и даже в отдельных горизонтах почв или почвах (см. табл. 5, P. 1КЭн-09, табл. 6, P. 5ЧТ-04) вообще не обнаружено. В противовес этому окклюдируемые Al(Fe)-P,

которые в почвах представляют прочно закрепленные полуторными оксидами Fe и Al соединения, не доступные для растений, были обнаружены [4]. Минимальное относительное содержание данной фракции (2,4–4,7 %) фосфатов фиксируется в гор. А1А2 лесных почв исследуемого региона, т. е. в палево-бурой оподзоленной и палевой осолоделой (см. табл. 5, Р. 3ЧТ-03 и Р. 6Т-05), а максимальное (39,5–46,9 %) – в аккумулятивно-карбонатных гор. Вса лугово-степных почв, а именно черноземе и аллювиальной темно-гумусовой (табл. 6, Р. 2ЧТ-03 и Р. 5ЧТ-04).

Общая сумма всех фракций минеральных фосфатов в исследованных мерзлотных почвах также изменяется значительно, составляя для лесных почв 11,4–164,0, а для лугово-степных – 26,0–188,3 мг $P_2O_5/100$ г почвы. При этом минимальное содержание данных минеральных фосфатов выявлено в гор. ВС лесных почв, а максимальное – в гумусово-аккумулятивном гор. А чернозема (см. табл. 5, 6).

Выводы

1. Мерзлотные лесные (подзолистые, палево-бурые, палевые) и лугово-степные (черноземы, лугово-черноземные, аллювиальные темногумусовые) почвы Центральной Якутии формируются в условиях резко-континентального криоаридного климата и сплошного распространения многолетней мерзлоты. Последнее определяет специфику их свойств и состава, а также особенности фосфатного состояния данных почв, т. е. содержания и распределения в них валового Р, а также общее количество и соотношение различных фракций и доступных форм минеральных фосфатов.

2. Внутрипрофильное распределение валового Р в подзолистых альфегумусовых и палевых осолоделых почвах исследуемого региона характеризуется как аккумулятивно-элювиально-иллювиальное, в то время как в палево-бурых, черноземах, лугово-черноземных и черноземно-луговых – как преимущественно аккумулятивное. Средневзвешенное содержание валового Р в изучаемых типах почв изменялось от 174 до 376 мг/кг. При этом изучаемые почвы по общему количеству (мг/кг) данного элемента образуют следующий ряд: лугово-черноземные (376) > черноземы (358) > палевые (344) > черноземно-луговые (302) > палево-бурые (214) > подзолистые альфегумусовые (174).

3. Среднее содержание валового Р в мерзлотных подзолах (174 мг/кг) и черноземах (358 мг/кг)

Центральной Якутии почти в 2 раза ниже средних концентраций такового, характерных для подзолов (380 мг/кг) и черноземов (700 мг/кг) немерзлотных регионов ЕТР. Помимо этого, подзолистые альфегумусовые и палево-бурые почвы исследуемого региона в среднем содержат соответственно в 2,5 и 2,2 раза меньше валового Р по сравнению с аналогичными типами почв (429 и 474 мг/кг) Южной Якутии в связи с существенной разницей вещественного состава их почвообразующих пород.

4. Содержание подвижных фосфатов, определяемых по Гинзбург–Артамоновой, в верхних горизонтах (гор. А и В) четырех из исследованных пяти типов мерзлотных почв оценивается как низкое и очень низкое. И только в черноземах Центральной Якутии обеспеченность подвижными фосфатами диагностируется в гор. А как высокая, а в гор. Вса – как средняя. Данное исключение обусловлено тем, что мерзлотные черноземы являются наиболее теплообеспеченными и плодородными типами почв Центральной Якутии.

5. Общее количество всех групп минеральных фосфатов, определяемых по Чангу–Джексону, в мерзлотных почвах Центральной Якутии изменяется значительно. При этом их минимальное содержание выявлено в гор. ВС лесных почв (11,4–13,9 мг $P_2O_5/100$ г почвы), а максимальное (188,3 мг $P_2O_5/100$ г почвы) – в гумусово-аккумулятивном гор. А чернозема. Во фракционном составе фосфатов изучаемых лесных почв, как правило, абсолютно преобладают фосфаты полуторных окислов Al и Fe, максимально составляя 63,1–92,6 % от суммы всех фракций. В лугово-степных почвах исследуемого региона максимальная доля Fe-Р уменьшается до 48,0–61,9 % в черноземе, а относительное содержание Са-Р возрастает максимально до 56,5–58,0 % в лугово-черноземной и аллювиальной темногумусовой почвах. Во всех типах мерзлотных почв Центральной Якутии количество рыхлосвязанных фосфатов, наиболее доступных для растений, минимально (2,7–6,0 мг $P_2O_5/100$ г почвы) и обычно не превышает 10 % от суммы всех фракций минеральных фосфатов.

Список литературы/ References

1. Чевычелов А.П., Захарова О.Г. К оценке фосфатного состояния мерзлотных почв Южной Якутии. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2020; 25(1):51–59. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-1-5>

- [Chevychelov A.P., Zaharova O.G. To the assessment of the phosphate status of permafrost soils of Southern Yakutia. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2020; 25(1):51–59. (In Russ.)] <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-1-5>
2. Попович Л.П. Фосфатное состояние почв. *Почвоведение*. 1992; 11:24–35.
 - [Popovich L.P. The phosphate status of soils. *Eurasian Soil Science*. 1992; 11:24–35. (In Russ.)]
 3. Гиль А.Ф. Групповой состав доступных фосфатов некоторых почв Коми АССР. *Агрохимия*. 1972; 2:34–38.
 - [Gil A.F. Group composition of available phosphates of some soils Komi ASSR. *Agrochimija*. 1972; 2:34–38. (In Russ.)]
 4. Гинзбург К.Е. *Фосфор основных типов почв СССР*. М.: Наука; 1981. 241 с.
 - [Ginzburg K.E. *Fosfor osnovnyh tipov pochv SSSR*. Moscow: Nauka; 1981. 241 p. (In Russ.)]
 5. Переверзев В.Н., Кошлева Е.А. Фосфор в подзолистых почвах Кольского полуострова. *Почвоведение*. 1997; 11:1349–1357.
 - [Pereverzev V.N., Koshleva E.A. Phosphorus in podzolic soils Kola Peninsula. *Eurasian Soil Science*. 1997; 11:1349–1357. (In Russ.)]
 6. Богданов Н.И. Валовой и органический фосфор в сибирских черноземах. *Почвоведение*. 1954; 5:25–37.
 - [Bogdanov N.I. Gross and organic phosphorus in Siberian chernozem. *Eurasian Soil Science*. 1954; 5:25–37. (In Russ.)]
 7. Поставская С.М., Гамзиков Г.П. О минеральных фосфатах черноземов Западной Сибири. *Почвоведение*. 1975; 1:93–101.
 - [Postavskaja S.M., Gamzikov G.P. About Mineral Phosphates chernozems of Western Siberia. *Eurasian Soil Science*. 1975; 1:93–101. (In Russ.)]
 8. Антипина Л.П. *Фосфор в почвах Сибири*: Автореф. дис. ... докт. сель.-хоз. наук. Омск. 1991. 36 с.
 - [Antipina L.P. *The phosphorus in the soils of Siberia*: Abstr. ... Diss. Doct. Sci., Omsk. 1991. 36 p. (In Russ.)]
 9. Танзыбаев М.Г., Спирина В.З. Фосфор в обыкновенных черноземах Хакасии. *Вопросы географии Сибири*. 1999; 181–187.
 - [Tanzybaev M.G., Spirina V.Z. The phosphorus in ordinary chernozems Khakassia. *Voprosy geografii Sibiri*. 1999; 181–187. (In Russ.)]
 10. Мангатаев Ц.Д. Фосфатный фонд автоморфных почв Западного Забайкалья. *Вестник СВНЦ ДВО РАН*. 2006; 4:79–83.
 - [Mangataev C.D. The phosphate fund of automorphic soils of the West Transbaikalia. *Vestnik SVNC DVO RAN*. 2006; 4:79–83. (In Russ.)]
 11. Аверкина С.С. Структура фосфатного фонда Сибири по качественному составу. *Инновации и продовольственная безопасность*. 2018; 2(20):81–86.] <https://doi.org/10.31677/2311-0651-2018-0-2-80-86>
 - [Averkina S.S. The structure of the phosphate of the foundation soils of Siberia in the qualitative composition. *Innovations and Food Safety*. 2018; 2(20):80–86. (In Russ.)] <https://doi.org/10.31677/2311-0651-2018-0-2-80-86>
 12. Абашеева Н.Е. и др. Фосфатный режим лугово-черноземных мерзлотных почв Еравнинской котловины (Бурятская АССР). *Агрохимия*. 1981; 4:31–36.
 - [Abasheeva N.E. et al. Phosphate regime of meadow-chernozem permafrost soils of the Yervninskaya basin (Buryat ASSR). *Agrochimija*. 1981; 4:31–36. (In Russ.)]
 13. Пигарева Н.И. Особенности фосфатного фонда почв криолитозоны Забайкалья. *Агрохимия*. 2010; 6:3–12.
 - [Pigareva N.I. Features of Soil Phosphate Pool in the Cryolithozone of Transbaikalia. *Agrochimija*. 2010; 6:3–12. (In Russ.)]
 14. Чевычелов А.П., Захарова О.Г. Фосфатное состояние и плодородие мерзлотных почв Южной Якутии. *Плодородие*. 2018; 4:43–45.
 - [Chevychelov A.P., Zaharova O.G. Phosphate status and fertility of cryogenic soils of South Yakutia. *Plodородие*. 2018; 4:43–45. (In Russ.)]
 15. Алябина И.О. и др. *Единый государственный реестр почвенных ресурсов. Версия 1.0. Коллективная монография*. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии; 2014. 768 с.
 - [Alyabina I.O. et al. *Unified State Register of Soil Resources. Version 1.0. Monograph*. Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Institute of the Russian Agricultural Academy; 2014. 768 p. (In Russ.)]
 16. Еловская Л.Г. *Классификация и диагностика мерзлотных почв Якутии*. Якутск: ЯФ СО АН СССР; 1987. 172 с.
 - [Yelovskaja L.G. *Classification and diagnostics of permafrost soils in Yakutia*. Yakutsk: YaF SO AN SSSR; 1987. 172 p. (In Russ.)]
 17. Зольников В.Г. Рельеф и почвообразующие породы восточной половины Центральной Якутии. *Материалы о природных условиях и сельском хозяйстве Центральной Якутии*. 1954; 7–54.
 - [Zolnikov V.G. Relief and soil-forming rocks of the eastern half of Central Yakutia. *Materialy o prirodnih usloviyakh i sel'skom hozjajstve Central'noj Yakutii*. 1954; 7–54. (In Russ.)]
 18. Роде А.А. *Система методов исследования в почвоведении*. Новосибирск: Наука; 1971. 92 с.
 - [Rode A.A. *Sistema metodov issledovaniya v pochvovedenii*. Novosibirsk: Nauka; 1971. 92 p. (In Russ.)]
 19. Розанов Б.Г. *Морфология почв*. М.: Изд-во МГУ; 1983. 320 с.
 - [Rozanov B.G. *Morfologija pochv*. Moscow: Izd-vo MGU; 1983. 320 p. (In Russ.)]
 20. Воробьева Л.А. *Химический анализ почв*. М.: Изд-во МГУ; 1998. 272 с.
 - [Vorob'eva L.A. *Chimicheskij analiz pochv*. Moscow: Izd-vo MGU; 1998. 272 p. (In Russ.)]
 21. *Агрохимические методы исследования почв*. М.: Наука; 1975. 656 с.
 - [*Agrochimicheskie metody issledovaniya pochv*. Moscow: Nauka; 1975. 656 p. (In Russ.)]

22. Дмитриев Е.А. *Математическая статистика в почвоведении*. М.: ЛИБРОКОМ; 2009. 328 с.
[Dmitriev E.A. *Matematicheskaja statistika v pochvovedenii*. Moscow: LIBROKOM; 2009. 328 p. (In Russ.)].
23. Чевычелов А.П. и др. Географо-генетические особенности формирования свойств и состава мерзлотных почв Центральной Якутии. *Почвоведение*. 2009; 6:648–657.
[Chevychelov A.P. et al. Geographic and genetic specificity of permafrost-affected soils in Central Yakutia. *Eurasian Soil Science*. 2009; 6:648–657. (In Russ.)]
24. Зольников В.Г. Почвы восточной половины Центральной Якутии и их использование. *Материалы о природных условиях и сельском хозяйстве Центральной Якутии*. 1954; 55–221.
[Zolnikov V.G. Soils of the eastern half of Central Yakutia and their use. *Materialy o prirodnyh usloviyah i sel'skom hozjajstve Central'noj Yakutii*. 1954; 55–221. (In Russ.)]
25. Еловская Л.Г. и др. Мерзлотные засоленные почвы Центральной Якутии. М.: Наука; 1966. 274 с.
[Yelovskaja L.G. et al. *Merzlotnye zasolennye pochvy Central'noj Yakutii*. Moscow: Nauka; 1966. 274 p. (In Russ.)]
26. Еловская Л.Г. и др. К вопросу о классификации и систематике почв Якутии. *Мерзлота и почва*. Вып. III. Генезис, география и классификация мерзлотных почв. 1974; 29–78.
[Yelovskaja L.G. et al. On the classification and systematics of the soils of Yakutia. *Permafrost and soil*. Vol. III. *Genesis, geography and classification of frozen soils*. 1974; 29–78. (In Russ.)]
27. Петрова Е.И. Мерзлотные палевые и палево-осолоделые почвы на элювиях алевролитов. *Генезис и мелiorация почв Якутии*. 1991; 42–54.
[Petrova E.I. Permafrost fawn and fawn salted soils on eluvia of siltstones. *Genезis i melioracija pochv Yakutii*. 1991; 42–54. (In Russ.)]
28. Десяткин Р.В. *Почвообразование в термокарстовых котловинах – алаазах криолитозоны*. Новосибирск: Наука; 2008. 301 с.
[Desyatkin R.V. *Pochvoobrazovanie v termokarstovyh kotlovinah – alaasah kriolitozony*. Novosibirsk: Nauka; 2008. 301 p. (In Russ.)]
29. Саввинов Д.Д. *Физика мерзлотных почв*. Новосибирск: Наука; 2013. 504 с.
[Savvinov D.D. *Fizika merzlotnyh pochv*. Novosibirsk: Nauka; 2013. 504 p. (In Russ.)]
30. Рузавин Ю.Н. и др. Содержание фосфатов в целинных и пахотных почвах Западного Забайкалья. *Почвы степных и лесостепных экосистем Внутренней Азии и проблемы их рационального использования*. 2015; 108–111.
[Ruzavin Ju.N. et al. Phosphates virgin and arable soil the western Transbaikalia. *Pochvy stepnyh i lesostepnyh ekosistem Vnutrennej Azii i problemy ih racional'nogo ispol'zovanija*. 2015; 108–111. (In Russ.)]
31. Кудрин С.А. Средний химический состав основных типов почв Европейской части СССР по валовым анализам. *Почвоведение*. 1963; 5:21–25.
[Kudrin S.A. Average chemical composition of the main types of soils of the European part of the USSR according to gross analyzes. *Eurasian Soil Science*. 1963; 5:21–25. (In Russ.)]
32. Коровин А.И. *Роль температуры в минеральном питании растений*. Л.: Гидрометеиздат; 1972. 282 с.
[Korovin A.I. *Rol' temperatury v mineral'nom pitanii rastenij*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1972. 282 p. (In Russ.)]
33. Григорьева Л.Г. Фосфатное состояние почв Приморья. *Агрохимический вестник*. 2007; 3:10–12.
[Grigor'eva L.G. Phosphate state of primorye soils. *Agrochimicheskij vestnik*. 2007; 3:10–12. (In Russ.)]
34. Жоаким Т. и др. Особенности фосфатного состояния почв разной степени ферралитизации и гумусированности. *Плодородие*. 2014; 1:33–34.
[Zhoakim T. *Phosphate state of soils of with different degrees of ferrallitization and humification*. *Plodorodie*. 2014; 1:33–34. (In Russ.)]

Об авторах

ЧЕВЫЧЕЛОВ Александр Павлович, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-2668-9745>, e-mail: chev.soil@list.ru

ЗАХАРОВА Ольга Гаврильевна, кандидат биологических наук, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-4053-4977>, e-mail: olya.choma@mail.ru

БУРНАШЕВА Марианна Павловна, лаборант

About the authors

CHEVYCHELOV, Aleksandr Pavlovich, Dr. Sci. (Biology), Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-2668-9745>, e-mail: chev.soil@list.ru

ZAKHAROVA, Olga Gavril'evna, Cand. Sci. (Biology), Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-4053-4977>, e-mail: olya.choma@mail.ru

BURNASHEVA, Marianna Pavlovna, assistant

Поступила в редакцию / Submitted 19.05.2022

Поступила после рецензирования / Revised 26.10.2022

Принята к публикации / Accepted 25.01.2023

Млекопитающие Якутии: изменения представлений о составе териофауны за последние 50 лет и аннотированный список

Ч. 2. Хищные, Китообразные, Парнокопытные

Я. Л. Вольперт[✉], Е. Г. Шадрина[✉], И. М. Охлопков

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация
[✉]ylv52@mail.ru, e-shadrina@yandex.ru

Аннотация

На современном уровне изученности фаунистический список рассмотренных в данной статье отрядов включает в совокупности 28 видов: Хищные (5 семейств, 12 родов, 17 видов), Китообразные (2 семейства, 3 рода, 3 вида) и Парнокопытные (3 семейства, 8 родов, 8 видов). Рост видового богатства данных таксонов за последние 50 лет произошел за счет интродукции одного вида хищных и двух видов копытных, из них только для овцебыка мероприятие можно признать успешным. Для четырех видов млекопитающих, не входящих в фауну Якутии, отмечены единичные заходы, но возможно, что сивуч и гренландский кит могут освоить акваторию, а азиатский барсук – территорию Якутии, если тенденции изменения климата сохранятся. Тигр вряд ли сможет выжить в условиях Якутии, не только из-за низких температур, но и из-за низкой плотности населения копытных, составляющих основу его кормовой базы. В настоящее время полный список видов, обитающих на территории и в акватории Якутии, включает 70 представителей класса Mammalia. Основу териофауны региона составляютaborигенные виды, тогда как доля чужеродных составляет всего 10 %. Изменения состава териофауны за последние 50 лет связаны с повышением изученности, интродукционными мероприятиями и изменениями таксономического статуса видов и подвидов. Новые для фауны Якутии виды найдены для отрядов Рукокрылые (два вида), Насекомоядные и Грызуны (по одному виду). Уточнен таксономический статус видов, относящихся к родам *Ochotona*, *Urocitellus*, *Alexandromys* (*Microtus*). Применение генетических методов позволит уточнить таксономический статус еще ряда видов. Дальнейшее расширение и уточнение фаунистического списка и ареалов видов возможно за счет восполнения пробелов в территориальном охвате и повышения изученности слабо исследованных таксонов, в частности отряда Рукокрылые и фауны морских млекопитающих.

Ключевые слова: млекопитающие, териофауна, Якутия, хищные, китообразные, парнокопытные

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания ФИЦ ЯНЦ СО РАН 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» (номер темы: FWRS-2021-0044; номер гос. регистрации в ЕГИСУ: 121020500194-9).

Для цитирования: Вольперт Я.Л., Шадрина Е.Г., Охлопков И.М. Млекопитающие Якутии: изменения представлений о составе териофауны за последние 50 лет и аннотированный список. Ч. 2. Хищные, Китообразные, Парнокопытные. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(1):117–127. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-117-127>

Review article

Mammals of Yakutia: Changes in the understanding of the composition of the mammal fauna over the past 50 years and an Annotated List

Part 2. Carnivorous, Cetaceans, and Artiodactyls

Ya. L. Volpert[✉], E. G. Shadrina[✉], I. M. Okhlopov

Institute for Biological Problems of Cryolithozone,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation
[✉]ylv52@mail.ru, e-shadrina@yandex.ru

Abstract

This study presents data on the mammal fauna including Carnivora (5 families, 12 genera, and 17 species), Cetacea (2 families, 3 genera, and 3 species), and Artiodactyla (3 families, 8 genera, and 3 species). A total number of 28 species

demonstrated an increase in the richness of these taxa over the past 50 years due to the introduction of one carnivorous species and two ungulate species. Among the latter, only the introduction of musk ox can be considered successful. In addition, sporadic occurrences of four species that were not part of the original fauna in Yakutia have been registered. The northern sea lion and bowhead whale can colonize marine regions of Yakutia, whereas the Asian badger can colonize its terrestrial regions if the current climate trend stays unchanged. The tiger is unlikely to survive the Yakutian conditions, due to both low temperatures and low density of the ungulates, which constitute the major part of its food supply. At present, the complete list of species that inhabit the terrestrial and marine areas of Yakutia includes 70 representatives of the Mammalia class. The major part of the mammalian fauna of the region consists of indigenous species, whereas the share of non-native species was only approximately 10%. The changes in the composition of the mammalian fauna over the last 50 years are connected with a better current knowledge of the regional fauna, introduction, and changes in the taxonomic rank of species and subspecies. Moreover, four new species were identified: Chiroptera (2), Insectivora (1), and Rodentia (1). Some clarifications have been made to the taxonomic rank of species and subspecies belonging to the genera *Ochotona*, *Urocitellus*, and *Alexandromys* (*Microtus*). The use of genetic approach can clarify the taxonomic rank of a number of species. More complete and precise data on the composition of the faunistic list, geographic ranges of these species can be obtained by covering the territorial gaps in the previous studies and additional research on understudied taxa, in particular chiropterans and marine mammals.

Keywords: mammals, mammalian fauna, Yakutia, Carnivora, Cetacea, Artiodactyla

Funding. This study was carried out within the framework of the state assignment to the FRC YaSC SB RAS on the project “Populations and communities of animals of aquatic and terrestrial ecosystems of the cryolithozone of the eastern sector of the Russian Arctic and Subarctic: diversity, structure and stability under natural and anthropogenic impacts” (theme number: FWRS-2021-0044; registration number: 121020500194-9).

For citation: Volpert Ya.L., Shadrina E.G., Okhlopkov I.M. Mammals of Yakutia: Changes in the understanding of the composition of the mammal fauna over the past 50 years and an Annotated list. Part 2. Carnivorous, Cetaceans, and Artiodactyls. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(1):117–127. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-117-127>

Введение

Первый полный список фауны млекопитающих Якутии был опубликован в 1934 г. [1], в нем отр. Хищные, в старом представлении этого таксона, представлен 14 видами, в том числе такими, как тигр и солонгой, и если для первого вида авторы совершенно справедливо указывают, что это заход из Приморья, то солонгой якобы был добыт на Алдане геологами. Как известно, в дальнейшем обитание этого вида в Южной Якутии подтверждения не нашло [2, 3]. Копытные представлены шестью видами, что соответствует современным представлениям [2, 4], за исключением овцебыка и лесного бизона, которые были интродуцированы на территории Якутии значительно позже. Состав китообразных по представлениям того времени ограничивается четырьмя, а ластоногих – тремя видами.

Тем не менее, необходимо отметить, что работа [1] имеет большое научное значение. Следующая версия териофауны региона появилась только в 1971 г. [2], в ней список хищников включает 13 видов. Изменение числа видов в данном списке произошло за счет добавления американской норки, которая была интродуцирована в Якутию в 1961 г., и исключения солонгоя и тигра. Указанная монография является зна-

чительным этапом в изучении териофауны Якутии и получила высокую оценку среди зоологов СССР [5]. Состав Китообразных в этой версии списка включает всего два вида, не включен гренландский кит, который фигурирует в ранее изданной сводке [1], а состав ластоногих не изменился. Позже был издан «Определитель млекопитающих Якутии» [6], в котором список видов включал 63 вида, но состав отрядов, рассматриваемых в данной статье, не претерпел изменений.

Позднее появились несколько работ, где приводятся сведения о населении млекопитающих отдельных регионов: Южной Якутии [3], Предверхоянья [7], Западной Якутии [8], а также монографические исследования по отдельным видам [9–11]. Изменения фауны, произошедшие за последние 50 лет, диктуют настоятельную необходимость обновления фаунистического списка региона. В настоящее время число видов млекопитающих на территории Якутии, как минимум, 70, в том числе 28 видов относятся к отрядам Хищные, Китообразные, Парнокопытные. В представленном ниже списке названия и систематическая принадлежность приведены по сводке «Млекопитающие России: систематико-географический справочник» [12].

Фауна млекопитающих Якутии

Язык: Русский/ Английский / Латинский
Language, Russian / English / Latin

Отряд ХИЩНЫЕ / CARNIVORES / CARNIVORA Bowdich, 1821

Подотряд ПСООБРАЗНЫЕ / CANIFORMS / SUBORDER CANIFORMIA Kretzoi, 1938

Семейство Псовые / Canids / CANIDAE Fischer, 1817

Род Волки / Wolves; Jackals; Dogs / *Canis* Linnaeus, 1758

1. **Волк** / Wolf / *Canis lupus* Linnaeus, 1758

Волк широко распространен по всей территории Якутии, вплоть до Новосибирских островов. В последние годы намечается рост численности вида [13].

Род Лисицы / Foxes / *Vulpes* Frisch, 1775

2. **Песец** / Arctic Fox / *Vulpes (Alopex) lagopus* Linnaeus, 1758

Типичный обитатель тундры. Считается, что границей норения является южная граница тундровой зоны. В период зимних миграций способен проникать далеко на север и на юг от зоны норения, по р. Лена достигает устья р. Алдан и даже дальше [2].

3. **Лисица обыкновенная** / Red Fox / *Vulpes (Vulpes) vulpes* Linnaeus, 1758

Распространена по всей таежной зоне, северная граница обычного распространения вида совпадает с границей лесной растительности, но способна проникать в тундровую зону по облесенным и закустаренным долинам [2].

Инфраотряд / Infraorder ARCTOIDEA Flower, 1869

Включает три монофилетические группы равного ранга: Ursoidea, Musteloidea и Phocoidea (= Pinnipedia).

Надсемейство МЕДВЕДЕОБРАЗНЫЕ / URSOIDS / URSOIDEA Fischer, 1814

Семейство Медвежьи / Ursids / URSIDAE Fischer, 1814

Род Медведи / Bears / *Ursus* Linnaeus, 1758

4. **Бурый медведь** / Brown Bear / *Ursus (Ursus) arctos* Linnaeus 1758

Заселяет все таежную зону, по долинам рек способен проникать в тундру, но, как правило, там не задерживается [2, 8]. В последние десятилетия численность вида увеличивается, с этим связаны более частые выходы его к населенным пунктам, а также бурый медведь стал чаще проникать и осваивать не характерную для него ра-

нее зону тундры [14]. Нами следы жизнедеятельности молодого бурого медведя наблюдались в дельте р. Лена, напротив о. Тит-Ары. По данным зам. директора заповедника «Медвежий острова» В.Ю. Габышева, в начале лета 2022 г. один бурый медведь (предположительно, взрослый самец) был встречен в приморской тундре долины р. Колыма, на территории заповедника «Медвежий острова».

5. **Белый медведь** / Polar Bear / *Ursus (Ursus) maritimus* Phipps, 1774

Вид встречается по всему побережью материковой части, а также на полярных островах, где и размножается [15]. В последние годы в связи с изменением ледовой обстановки медведи задерживаются на берегу, в связи с этим участились случаи проникновения зверей в глубь материка. Самый южный случай проникновения отмечен зимой 2021–2022 г., молодая самка белого медведя была отловлена около п. Хандыга Томпонского района РС (Я), расположенного на р. Алдан (62° с.ш.) [16]. Вид включен в Красную книгу МСОП, Красные книги РФ и РС (Я) [15, 17].

Надсемейство ЛАСТОНОГИЕ / Superfamily PINNIPEDS / PHOCOIDEA Gray, 1821

Семейство Моржиные / Walruses / ODOBENIDAE Allen, 1880

Род Моржи / Walruses / *Odobenus* Brisson, 1762

6. **Морж** / Walrus / *Odobenus rosmarus* Linnaeus 1758

В пределах арктической зоны Якутии обитает лаптевский подви́д моржа, который является эндемиком и обитает только в море Лаптевых и западной части Восточно-Сибирского моря в районе Новосибирского архипелага [18]. Регулярно появляющиеся на Колымском побережье звери уже относятся к тихоокеанской форме [19]. Лежбища лаптевского моржа известны на островах Преображения, Бегичева, Кууба, Песчаный, Дунай и на островах Новосибирского архипелага: Бельковский, Котельный, Жохова, Вилькицкого, Беннетта [15, 20]. Внесен в Красные книги МСОП и Российской Федерации. Вид включен в приложение 2 Конвенции о Международной торговле видами дикой фауны и флоры СИТЕС.

Семейство Настоящие тюлени / True (Earless) Seals / Phocidae Gray, 1821

Род Морские зайцы / Bearded Seals / *Erignathus* Gill, 1866

7. **Морской заяц (лактак)** / Bearded Seal / *Erignathus barbatus* Erxleben, 1777

На севере Якутии обитает повсеместно вдоль берегов материка, около островов и на морских льдах вплоть до высоких широт (до 74° с.ш.), заходит в устья рек [15, 18]. Занесен в Красную книгу РС (Я) [15].

Род нерпы / Northern True Seals / *Pusa Scopoli*, 1777

8. Кольчатая нерпа / Ringed Seal / *Pusa hispida* Schreber, 1775

Вид широко распространен в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском, крупных скоплений не образует, распространение носит диффузный характер [2].

Надсемейство КУНИЦЕОБРАЗНЫЕ / Superfamily Musteloids / MUSTELOIDEA s. lato

Семейство Куны / Mustelids / MUSTELIDAE Fischer, 1817

Род Куницы / Martens / *Martes Pinel*, 1792

9. Соболь / Sable / *Martes (Martes) zibellina* Linnaeus, 1758

Вид представлен на территории РС (Я) местными и реинтродуцированными популяциями [2]. В результате активной реинтродукционной деятельности в настоящее время соболь в Якутии расселился по всей таежной зоне включая лесотундру [21].

Род Росомахи / Wolverines / *Gulo Pallas*, 1780

10. Росомеха / Wolverine / *Gulo gulo* Linnaeus, 1758

Заселяет всю лесопокрытую территорию Якутии, проникает в тундру и даже временами выселяется на полярные острова [2, 22].

Род Горностаи; Ласки; Хори / Stoats; Weasels; Ferrets / *Mustela* Linnaeus, 1758

11. Ласка / Least Weasel / *Mustela nivalis* Linnaeus, 1766

Распространена по всей материковой части Якутии, известна находка на Новосибирских островах [2].

12. Горноста́й / Ermine (Stoat) / *Mustela (Mustela) erminea* Linnaeus, 1758

Заселяет всю территорию Якутии, включая Новосибирские острова [2].

13. Колонок / Siberian Weasel / *Mustela sibirica* Pallas, 1773

В Якутии встречается только западнее осевого Верхоянского хребта, считается, что на север далее Полярного круга проникает очень редко [2].

14. Степной (светлый) хорь / Steppe Polecat / *Mustela (Putorius) eversmanii* Lesson, 1827

В Якутию в 1980–1983 гг. было завезено три партии зверьков из Калмыкии, в общей сложно-

сти 580 гол. За 30 лет зверьки расселились от места выпуска в радиусе не более 100 км, причем мозаично и с очень низкой численностью, менее 0,1 следа на 10 км маршрута [23]. В настоящее время имеются не подтвержденные специальными исследованиями опросные сведения, что иногда вид встречается в местах выпуска. С точки зрения основания успешной саморасселяющейся популяции попытку интродукции этого вида необходимо признать неудачной [24].

Род Американские норки / American Minks / *Neovison Baryshnikov et Abramov*, 1997

15. Американская норка / American Mink / *Neovison vison* Schreber, 1777

В Якутию американская норка впервые была завезена в 1961 г., в течение последующих 4 лет на 14 участках было выпущено 686 зверьков, в последующем происходило естественное расселение вида в северном и восточном направлениях [2]. Сейчас следы пребывания американской норки зарегистрированы в девяти административных районах РС (Я): Алданском, Нерюнгринском, Усть-Майском, Олекминском, Ленском, Амгинском, Таттинском, Томпонском и Хангаласском. В настоящее время естественное расселение американской норки наблюдается по долинам средних рек Амга, Алдан и Буотама, а самые северные единичные заходы наблюдались в бассейне р. Виллой (р. Улахан-Ботубуя) и в восточных предгорьях Верхоянского хребта [24, 25].

Род Выдры / Otters / *Lutra Brisson*, 1762

16. Речная выдра / European Otter / *Lutra lutra* Linnaeus, 1758

Выдра на территории Якутии чрезвычайно редка, но распространена достаточно широко, постоянно отмечается в долинах многих рек Южной и Юго-Западной Якутии [2, 8, 26], а также в притоках р. Колыма; имеются сведения об отлове этого вида в верховьях р. Аллаиха (бассейн нижнего течения р. Индигирка) [2].

Семейство Кошачьи / Felids / FELIDAE G. Fischer, 1817

Род Рыси / Lynxes / *Lynx Kerr*, 1792

17. Рысь обыкновенная / Eurasian Lynx / *Lynx lynx* Linnaeus, 1758

Встречается на всей облесенной территории, иногда заходя в тундру [2]. Посвюду малочисленна, причем прослеживается зависимость численности вида от численности зайца-беляка [27].

Отряд КИТООБРАЗНЫЕ / CETACEANS / CETACEA Linnaeus, 1758

Подотряд ЗУБАТЫЕ КИТЫ / ODONTOCETS / ODONTOCETI Flower, 1867

Семейство Нарваловые / Narwals; Belugas / Monodontidae Gray, 1821

Род Белуха (Белуга) / Belugas / *Delphinapterus* Lacerpede, 1804

18. **Белуха** / Beluga / *Delphinapterus leucas* Pallas, 1776

Белуха широко расселена в акватории северных морей Лаптевых и Восточно-Сибирском. Постоянно встречается у юго-западного побережья моря Лаптевых и западных берегов островов Ляховский и Котельный. Летом регулярно перемещается к южному и западному побережьям моря Лаптевых, появляясь периодически и в приустьевых участках рек Анабар, Оленек и в дельте р. Лена. Известны случаи захода в реки Индигирку и Колыму [15].

Род Нарвалы (Единороги) / Narwhals / *Monodon* Linnaeus, 1758

19. **Нарвал** / Narwhal / *Monodon monoceros* Linnaeus, 1758

Данные по этому виду чрезвычайно ограничены. В летний период отмечены встречи в 2–3 км севернее о. Кууба в дельте р. Лена, восточнее Новосибирских островов, около м. Северный о. Бельковский и в районе устья Колымы [15]. В середине лета фиксировали одиночного нарвала в 2–3 км севернее о. Кууба. В конце лета 1979 г. наблюдали стадо нарвалов 10 особей восточнее Новосибирских островов, двух нарвалов около м. Северный о. Бельковский. В районе устья Колымы нарвалы появляются весьма редко [15].

Подотряд УСАТЫЕ КИТЫ / BALEEN WHALES / MYSTICETI Flower, 1864

Семейство Серые киты / Gray Whales / ESCHRICHTHIIDAE Ellerman et Morrison-Scott, 1951 (1904)

Род Серые киты / Gray Whales / *Eschrichthius* Gray, 1864

20. **Серый кит** / Gray Whale / *Eschrichthius gibbosus* (Erxleben, 1777)

В водах Якутии отмечены редкие встречи серых китов, которые проникают в летнее время из Чукотского моря. В малоледные годы отдельные особи отмечались вблизи устья р. Колыма. С 80-х гг. XX в. около Новосибирских островов часто регистрируют отдельных особей, в 2011 г. двух серых китов отметили западнее о. Котельный, в 2012 г. были зарегистрированы три встречи серых китов (всего четыре особи) – к югу от о. Беннетта и между островами Жохова и Вилькицкого. Между островами Анжу и де Лонга за-

фиксированы три встречи с серыми китами, две из них – южнее о. Беннетта (3 кита) и одного кита – между островами Жохова и Вилькицкого, в 7,5 милях к северу от о. Вилькицкого. Трупы молодых китов в 2013 г. находили вблизи устья р. Коньковая на расстоянии 15 км друг от друга [15, 28, 29].

Отряд ПАРНОКОПЫТНЫЕ / EVEN-HOOVED UNGULATES / ARTIODACTYLA Owen, 1848

Семейство Олени / Deer / CERVIDAE Goldfuss, 1820

Род Настоящие олени / Red Deer / *Cervus* Linnaeus, 1758

21. **Изюбрь** / Siberian Red Deer; Wapiti / *Cervus (elaphus) canadensis* Erxleben, 1777

Заселяет южную и юго-восточную часть Центральной Якутии, за последние 50 лет его ареал значительно продвинулся в северо-восточном направлении по долинам рек Амга и Ботома [11].

Род Косули / Roe Deer / *Capreolus* Gray, 1821

22. **Сибирская косуля** / Siberian Roe Deer / *Capreolus (capreolus) pygargus* Pallas, 1771

Ареал косули в Якутии в последние два столетия подвергается существенным изменениям. В настоящее время он включает бассейн рек Олекма, Алдан и Вилюй, Лено-Амгинское и Лено-Вилюйское междуречья с отдельными заходами на более северные территории [30].

Род Лоси / Elk; Moose / *Alces* Gray, 1821

23. **Американский лось** / Moose / *Alces (alces) americanus* Clinton, 1822

Заселяет всю лесопокрытую территорию Якутии, в летний период проникает в отдельных случаях довольно далеко в тундру, но к зиме возвращается в лесную зону [2,31].

Род Северные олени / Rein Deer; Caribou / *Rangifer* H. Smith, 1827

24. **Северный олень** / Rein Deer; Caribou / *Rangifer tarandus* (Linnaeus 1758)

Таежные популяции северного оленя заселяют практически все таежную зону, но отсутствуют в долинах рек Лена и Вилюй [2]. Крупная тундровая популяция северного оленя в настоящее время имеется только в Северо-Западной Якутии, а на северо-востоке скопления практически отсутствуют, олени отмечаются небольшими табунками [10].

Семейство Кабарговые (Кабарожьи) / Musk Deer / MOSCHIDAE Gray, 1821

Род Кабарги / Musk Deer / *Moschus* Linnaeus, 1758

25. **Кабарга** / Siberian Musk Deer / *Moschus moschiferus* Linnaeus, 1758

Распространена в Якутии в основном в горнотаежных районах, в Южной Якутии, в верхнем течении рек Яна и Индигирка и даже на равнинах, где выражен увалистый рельеф и где имеются места для отстоев, приуроченные, как правило, к берегам рек [2], в настоящее время вид заселил таежно-аласную зону Центральной Якутии, где ранее не встречался [32].

Семейство Половогие / Hollow-horned Ruminants / Bovidae Gray, 1821

Род Бизон / Buffalo, bison, ox / *Bison* H. Smits, 1827

26. **Лесной бизон** / Wood bison / *Bison bison athabasca* Bhoads, 1897

Реализация проекта по интродукции лесных бизонов в Якутии начата в 2006 г. В 2017 и 2018 гг. в бассейне среднего течения р. Синяя впервые выпущено на волю две группы бизонов по 30 голов. В зимний период в Центральной Якутии бизоны практически полностью существуют за счет питания искусственными кормами, животные почти не уходят от мест прикормки [33]. В настоящее время общая численность лесных бизонов канадского и местного происхождения в Якутии достигла 250 особей. [34]. Надо отметить, что, несмотря на раннее созревание самок, темпы пополнения очень низкие [32]. Можно предположить, что лесной бизон навсегда останется для Якутии чужеродным вселенцем, существование которого всецело зависит от человека [23].

Род Овцебыки / Muskoxen / *Ovibos* Blainville, 1816

27. **Овцебык** / Muskox / *Ovibos moschatus* Zimmerman, 1780

Первая партия овцебыков в Якутии была выпущена на северной оконечности Приморского кряжа в 1996 г., в последующие годы было произведено расселение на территории Аллаиховского, Анабарского, Нижнеколымского районов РС (Я). Всего произведено 11 выпусков животных общей численностью 190 особей. В процессе интродукции в пределах тундровой зоны Якутии образовались четыре популяции овцебыков, их общая численность к 2016 г. составляла около 1500 голов [35], а в 2020 г. – около 4000 особей [23]. В целом темпы роста группировок свидетельствуют об успешной адаптации вида.

Род Бараны / Sheep / *Ovis* Linnaeus, 1758

28. **Снежный баран** / Snow Sheep / *Ovis nivicola* Eschscholtz, 1829

В Якутии ареал снежного барана ограничен тремя областями и охватывает горные системы Верхоянского хребта, Алданского нагорья, включая северные склоны Станового хребта [2, 36]. Популяция вида в Верхоянье достаточно многочисленна [9], в то время как южная популяция этого вида малочисленна и места обитания баранов разорваны на отдельные участки [37]. Из-за низкой численности и сильного антропогенного пресса популяция барана, обитающего в Южной Якутии, внесена в Красную Книгу РС (Я) [15].

Помимо вышеперечисленных видов, имеется три вида отряда Хищные Carnivora и один вид отряда Китообразные Cetacea, заходы которых на территорию Якутии достоверно известны, но постоянно на территории и в акватории Якутии не обитающих.

Отряд ХИЩНЫЕ / CARNIVORES / CARNIVORA Bowdich, 1821

Семейство Ушастые тюлени / Eared Seals / OTARIIDAE Gray, 1825

Род Сивучи / Steller's Sea Lions / *Eumetopias* Gill, 1866

1. **Сивуч** / Steller's Sea Lion / *Eumetopias jubatus* Schreber, 1776

Начиная с середины 80-х гг. XX в. сивучей стали неоднократно фиксировать в районе устья Колымы. В 2007 г. одиночные сивучи были обнаружены в дельте Колымы в протоках Чукочьей и Каменная Колыма, в низовьях рек Коньковая, Большая Чукочьа. Но наиболее интересной является находка летом 2001 г. трупа молодого сивуча в 5 км выше устья рек Большой и Малый Анюи, впадающих в р. Колыма. Это место находится в 160 км от устья р. Колыма. По всей видимости, мы имеем дело с началом проникновения данного вида в моря, омывающие территорию Якутии, пока еще в виде молодых одиночных особей, на фоне потепления климата в арктической зоне [38].

Семейство Куны / Mustelids / MUSTELIDAE Fischer, 1817

Род Барсуки / Badgers / *Meles* Brisson, 1762

2. **Азиатский барсук** / Asian Badger / *Meles leucurus* Hodgson, 1847

Известна находка барсука в районе устья р. Витим осенью 1953 г. [2]. После этого заходы барсука на территории Якутии длительное вре-

мя не регистрировались. В 2008 г. на правом берегу р. Лена напротив устья р. Нюя был добыт в октябре один экземпляр [39], третий случай захода отмечен в 2014 г., на этот раз на левобережье р. Лена, в долине р. Нюя, на правом берегу ее притока р. Малый Мурбай. Зверь был добыт охотниками-промысловиками [40].

Семейство Кошачьи / Felids / FELIDAE G. Fischer, 1817

Род Пантеры / Big Cats / *Panthera* Oken, 1816

3. Тигр / Tiger / *Panthera (Tigris) tigris* Linnaeus, 1758

Известны заходы вида на территорию Якутии, так в 1905 г. по р. Адлан ниже устья р. Мая был добыт самец тигра, зимой 1942 г., был найден труп в бассейне той же реки на границе с Амурской обл., имеются сведения о добыче тигра около г. Якутск в XIX в. [2]. Последняя фиксация захода тигра на территорию Якутии сделана 09.11.2021 г., свежие следы зверя были обнаружены в устье р. Болохтох (правый приток р. Учур, правого притока р. Алдан) [41].

Отряд КИТООБРАЗНЫЕ / CETACEANS / CETACEA Linnaeus, 1758

Семейство Гладкие киты / Right Whales / BALAENIDAE Gray, 1821

Род Гренландские киты / Right Whales / *Balaena* Linnaeus, 1758

4. Гренландский кит / Bowhead / *Balaena (Balaena) mysticetus* Linnaeus 1758

В Якутии зафиксированы следующие находки трупов этих китов: в 1928 г. на о. Новая Сибирь, в 1943 г. в 50–70 км западнее устья р. Большая Чукочья, недалеко от этого места в 1989 г. также был обнаружен труп молодого кита. В середине 90-х гг. XX в. в устье р. Большая Куропаточья был найден труп предположительного молодого гренландского кита [15].

Таким образом, видовое разнообразие отрядов Хищные, Китообразные, Парнокопытные по современным представлениям представлено 28 видами. Изменение таксономического статуса затронуло отряд Хищные, который в настоящее время включает в себя в качестве надсемейства Ластоногих Phocoidea, которые ранее были выделены в отдельный отряд. Изменения фаунистического состава рассмотренных в данной статье отрядов связаны, прежде всего, с направленными интродукционными работами. Для наземных хищников и парнокопытных Якутии в настоящее время 4 из 22 видов, – американская норка, степной хорь, овцебык и американский

бизон – являются интродуцентами, что составляет 18,2 %, тогда как в целом для териофауны Якутии доля чужеродных видов составляет 10 %. При этом надо признать успешной интродукцию американской норки и овцебыка, сомнительны результаты вселения степного хоря, а для лесного бизона перспективы интродукции пока неясны.

В целом в настоящее время на территории Якутии точно установлено обитание 70 видов млекопитающих. В состав териофауны входят представители 7 отрядов: Насекомоядные (2 семейства, 3 рода, 10 видов), Рукокрылые (1 семейство, 3 рода, 5 видов), Зайцеобразные (2 семейства, 2 рода, 3 вида), Грызуны (3 семейства, 19 родов, 24 вида), Хищные (5 семейств, 12 родов, 17 видов), Китообразные (2 семейства, 3 рода, 3 вида) и Парнокопытные (3 семейства, 8 родов, 8 видов). Увеличение числа видов млекопитающих относительно представления о составе териофауны в 70-х гг. XX в. [2, 6] произошло, в первую очередь, из-за повышения изученности (4 вида) [42], в частности, проведения териологических исследований на территории Юго-Западной Якутии, которая в середине XX в. была крайне слабо изучена в этом отношении. Уточнение таксономического статуса было проведено для 3 пар видов родов *Alticola*, *Urocitellus*, *Alexandromys* [42].

Дальнейшее расширение и уточнение фаунистических списков и ареала видов возможно по нескольким направлениям.

1. За счет повышения изученности слабо изученных таксонов. Одной из наиболее слабо изученных групп является отряд Рукокрылые, для которых возможны новые находки при проведении направленных исследований. Кроме того, крайне слабо изучена фауна морских млекопитающих. Планы интенсификации промышленного развития Российской Арктики, с одной стороны, могут позволить повысить изученность этой группы, с другой стороны – представляют угрозу для популяций редких и особо охраняемых видов.

2. Другим направлением повышения изученности териофауны является восполнение пробелов в территориальном охвате. В частности, слабо изучены в териологическом отношении крайний юг и юго-восток Якутии, для которых возможны находки новых для региона видов мышевидных грызунов, насекомоядных, рукокрылых.

3. Необходимо отметить, что млекопитающие Якутии до настоящего времени практически не изучались с применением современных генетических методов, имеются небольшое число работ, в том числе и по видам, имеющим спорное таксономическое положение, вполне возможно, что широкомасштабное изучение приведет к изменению современных представлений о таксономическом статусе и распространении видов.

4. Еще одним фактором, влияющим на состав териофауны, является глобальное изменение климата, благодаря которому возможно проникновение новых видов. На настоящее время четыре вида совершают заходы на территорию и в акваторию Якутии – амурский тигр, азиатский барсук, сивуч и гренландский кит. Тигр вряд ли сможет выжить в условиях Якутии, не только из-за низких температур, но и из-за низкой плотности населения копытных, составляющих основу кормовой базы этого зверя. Для трех других видов (сивуч, гренландский кит и барсук), если тенденции изменения климата сохранятся, перспективы расширения ареала вполне реальны.

Список литературы / References

1. Тугаринов А.Я., Смирнов Н.А., Иванов А.И. *Птицы и млекопитающие Якутии. К десятилетию ЯАССР. Тр. СОИГ. Л.: Изд-во АН СССР. Ленингр. отд-ние; 1934. 134 с.*
1. Tugarinov A.Ya., Smirnov N.A., Ivanov A.I. *Birds and mammals of Yakutia. To the 10th anniversary of the Yakut ASSR. Tr. SONS. Leningrad: Izd-vo AN SSSR. Leningr. Otd-nie; 1934. (In Russ.)*
2. Тавровский В.А., Егоров О.В., Кривошеев В.Г., Попов М.В., Лабутинов Ю.В. *Млекопитающие Якутии*. Отв. ред. В.А. Тавровский. М.: Наука; 1971. 660 с.
2. Tavrovskiy V.A., Egorov O.V., Krivosheev V.G., Popov M.V., Labutin Yu.V. *Mammals of Yakutia*. Tavrovskiy (ed.). Moscow: Nauka; 1971. (In Russ.)
3. Ревин Ю.В. *Млекопитающие Южной Якутии*. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние; 1989. 321 с.
3. Revin Yu.V. *Mammals of Southern Yakutia*. Novosibirsk: Nauka. Sib.otd-nie; 1989. (In Russ.)
4. Егоров О.В. *Дикие копытные Якутии*. М.: Наука; 1965. 259 с.
4. Egorov O.V. *Wild ungulates of Yakutia*. Moscow: Nauka; 1965. (In Russ.)
5. Юдин Б.С., Швецов Ю.Г. «Млекопитающие Якутии», рецензия. *Известия СО АН СССР. Серия биол.* 1972;3:145–146.
5. Yudin B.S., Shvetsov Yu.G. “Mammals of Yakutia”, review. *Izvestiya SB AS USSR. Ser. Biol.* 1972;3:145–146. (In Russ.)
6. Попов М.В. *Определитель млекопитающих Якутии*. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние; 1977. 424 с.
6. Popov M.V. *The identification guide of the mammals of Yakutia*. Novosibirsk: Nauka. Sib. Otd-nie; 1977. (In Russ.)
7. Ревин Ю.В., Сафронов В.М., Вольперт Я.Л., Попов А.Л. *Экология и динамика численности млекопитающих Предверхоянья*. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние; 1988. 200 с.
7. Revin Yu.V., Safronov V.M., Volpert Ya.L., Popov A.L. *Ecology and dynamics of the mammals of Predverkhoyane region*. Novosibirsk: Nauka. Sib.otd-nie; 1988. (In Russ.)
8. Мордосов И.И. *Млекопитающие таежной части Западной Якутии*. Якутск: ГУП «Полиграфист» ЯНЦ СО РАН; 1997. 235 с.
8. Mordosov I.I. *Mammals of the taiga of Western Yakutia*. Yakutsk: GUP “Poligrafist” YaSC SB RAS; 1997. (In Russ.)
9. Кривошапкин А.А., Яковлев Ф.Г. *Снежный баран Верхоянья*. Якутск: НИПК «Сахаполиграфиздат»; 1999. 135 с.
9. Krivoshapkin A.A., Yakovlev F.G. *The snow sheep of Verkhoyanye mountains*. Yakutsk: NIPK “Sakhapoligrafizdat”; 1999. (In Russ.)
10. Сафронов В.М. *Экология и использование дикого северного оленя в Якутии*. Якутск: ЯФ ГУ Изд-во СО РАН; 2005. 177 с.
10. Safronov V.M. *Ecology and use of wild reindeer in Yakutia*. Yakutsk: YAF GU Publishing House SB RAS; 2005. (In Russ.)
11. Степанова В.В., Охлопков И.М. *Экология благородного оленя Якутии*. Новосибирск: Наука; 2009. 136 с.
11. Stepanova V.V., Okhlopov I.M. *Ecology of the red deer of Yakutia*. Novosibirsk: Nauka; 2009. (In Russ.)
12. Павлинов И.Я., Лисовский А.А. (ред.). *Млекопитающие России: систематико-географический справочник*. М.: Т-во научн. изданий КМК; 2012. 604 с.
12. Pavlinov I.Ya., Lisovsky A.A. (Eds.). *The Mammals of Russia: A taxonomic and geographic reference*. Moscow: KMK Sci. Press; 2012. (In Russ.)
13. Степанова В.В., Охлопков И.М. Современное состояние численности и плотности населения волка (*Canis lupus* Linnaeus, 1758) в Якутии. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2020;4(25):121–133. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-4-10>.
13. Stepanova V.V., Okhlopov I.M. Current state of the wolf (*Canis lupus* Linnaeus, 1758) population size and density in Yakutia. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2020;25(4):121–133. (In Russ.). <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-4-10>
14. Мамаев Н.В., Степанова В.В., Охлопков И.М. Повышение численности бурого медведя *Ursus arctos* в Якутии. *Оценка состояния биоразнообразия: исследование стабильности развития. Сб. материалов Всерос. научн. конф. с междунар. участием*. Москва; Тула, 29–31 мая 2019 г. Якутск: Изд-во НБ РС (Я); 2019. 167–170.
14. Mamaev N.V., Stepanova V.V., Okhlopov I.M. Increase in the number of brown bear *Ursus arctos* in Ya-

Yakutia. *Assessment of the state of biodiversity: a study of developmental stability*. Materials of the All-Russian conference with international participation. Moscow, Tula, May 29–31, 2019. Yakutsk: Izd-vo Nacional'noy biblioteki RS (YA); 2019:167–170 (In Russ.)]

15. Красная книга РС (Я) т. 2. Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения животные. Ред. Н.Н. Винокуров. М.: Наука; 2019. 271 с.

[*Red Book of the Republic Sakha (Yakutia)*. 2. Rare and endangered animals. N.N. Vinokurov (ed.). Moscow: Nauka; 2019. (In Russ.)]

16. Polar bear that walked unprecedented 1,000 km south from Arctic habitat is caught in Yakutia. *The Siberian Times*. [Internet Resource] Publication date 12.05.2021. <https://www.siberiantimes.com/other/others/news/polar-bear-that-walked-unprecedented-1000-km-south-from-arctic-habitat-is-caught-in-yakutia/> (Accessed: 09.04.2022).

17. Красная книга Российской Федерации. Животные. 2-е издание. М.: ФГБУ «ВНИИ Экология»; 2021. 1128 с.

[*The Red Book of the Russian Federation. Animals*. 2nd edition. Moscow: FSBI “VNIИ Ekologiya”; 2021. (In Russ.)]

18. Соколов В.Е., Вишневская Т.Ю., Бычков В.И. Экология лаптевского моржа. *Морж: образ вида*. М.: Наука; 2001:91–117.

[Sokolov V.E., Vishnevskaya T.Yu., Bychkov V.I. Ecology of the Laptev walrus. *Walrus: the image of the species*. Moscow: Nauka; 2001:91–117. (In Russ.)]

19. Боескоров Г.Г., Давыдов С.П. Ластоногие Восточно-Сибирского моря. *Биол. пробл. криолитозоны: Мат-лы Всерос. конф., посвящ. 60-летию со дня образования ИБПК СО РАН* (Якутск, 30 июля–05 августа 2012 г.). Якутск: Сфера; 2012:24–25.

[Boeskorov G.G., Davydov S.P. Pinnipeds of the East Siberian Sea]. *Biological problems of cryolithozone*: Materials of the All-Russian Conf., dedicated to the 60th anniversary of the establishment of IBPC SB RAS (Yakutsk, July 30–August 05, 2012). Yakutsk: Sfera, 2012: 24–25. (In Russ.)]

20. Колодезников В.Е. Фауна птиц и млекопитающих Новосибирских островов. *Вестник СВФУ*. 2013; 10(5):43–49.

[Kolodeznikov V.E. Fauna of birds and mammals of the Novosibirsk Islands. *Vestnik SVFU*. 2013;10(5):43–49. (In Russ.)]

21. Сафронов В.М., Величенко В.В., Охлопков И.М. Популяционные особенности и промысел соболя в Якутии. *Вестник охотоведения*. 2020;17(2):81–88.

[Safronov V.M., Velichenko V.V., Okhlopkov I.M. Population features and sable hunting in Yakutia. *Vestnik ohotovedeniya*. 2020;17(2):81–88. (In Russ.)]

22. Охлопков И.М., Степанова В.В., Кириллин Е.В. Плотность населения росомхи в Якутии. *Вестник охотоведения*. 2007;4(2):141–147.

[Okhlopkov I.M., Stepanova V.V., Kirillin E.V. Population density of wolverines in Yakutia. *Vestnik ohotovedeniya*. 2007;4(2):141–147. (In Russ.)]

23. Седалищев В.Т., Ануфриев А.И. К экологии степного хорька (*Mustela eversmani* Lesson, 1827) Центральной Якутии. *Вестник охотоведения*. 2015;12(1): 10–14.

[Sedalishchev V.T., Anufriev A.I. To the ecology of the steppe polecat (*Mustela eversmani* Lesson, 1827) of Central Yakutia. *Vestnik ohotovedeniya*. 2015;12(1):10–14. (In Russ.)]

24. 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., Okhlopkov I.M. Introduction of Mammals in Yakutia: Analysis of Effectiveness, Prospects, and Negative Impacts. *Russian Journal of Biological Invasions*. 2022;13(1):105–122. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S2075111722010131>]

25. Степанова В.В., Охлопков И.М. Динамика численности и добыча американской норки в Якутии. *Современные проблемы природопользования, охотоведения и звероводства: Материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 95-летию ВНИИОЗ* (22–25 мая 2017 г.). Киров; 2017:626–629.

[Stepanova V.V., Okhlopkov I.M. Population dynamics and production of American mink in Yakutia. *Modern problems of nature management, hunting and animal husbandry*: Materials of the International Scientific and Practical Conference, dedicated to the 95th anniversary of VNIIOZ (May 22–25, 2017). Kirov, 2017:626–629. (In Russ.)]

26. Шадрина Е.Г., Величенко В.В., Данилов В.А. Промысловые млекопитающие юго-западной Якутии. *Почвы, растительный и животный мир юго-западной Якутии*. Новосибирск: Наука; 2006:188–201.

[Shadrina E.G., Velichenko V.V., Danilov V.A. Commercial mammals of Southwestern Yakutia. *Soils, flora and fauna of southwestern Yakutia*. Novosibirsk: Nauka, 2006:188–201. (In Russ.)]

27. Седалищев В.Т., Однокурцев В.А., Охлопков И.И. Материалы по экологии рыси (*Lynx lynx* L., 1758) Якутии. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2014;16(1):175–182.

[Sedalishchev V.T., Odnokurtsev V.A., Ohlopkov I.M. The Materials on Ecology of the Lynx (*Lynx lynx* L., 1758) in Yakutia. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2014;16(1):175–182. (In Russ.)]

28. Боескоров Г.Г., Давыдов С.П. Заходы усатых китов в западную часть Восточно-Сибирского моря и на восточную окраину моря Лаптевых. *Вестник СВНЦ ДВО РАН*. 2015;2:69–74.

[Boeskorov G.G., Davydov S.P. Visits of baleen whales to the western part of the East Siberian Sea and to the eastern margin of the Laptev Sea. *Bulletin of the North-East Science Center*. 2015;2:69–74. (In Russ.)]

29. Stein R., Fahl K., Gierz P., et al. Arctic Ocean sea ice cover during the penultimate glacial and the last interglacial. *Nat. Commun.* 2017;(8):373. (In Russ.). <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00552-1>
30. Аргунов А.В., Кривошапкин А.А., Боескоров Г.Г. *Косуля Центральной Якутии*. Новосибирск: Изд-во СО РАН; 2015. 123.
- [Argunov A.V., Krivoschapkin A.A., Boeskorov G.G. *Roe Deer of Central Yakutia*. Novosibirsk: Publishing House of SB RAS; 2015. (In Russ.)]
31. Вольперт Я.Л. Влияние антропогенного фактора на распределение лося *Alces alces* L., 1758 (Artiodactyla, Cervidae) в Якутии. *Сибирский экологический журнал*. 2001;1:83–86.
- [Volpert Ya.L. The influence of anthropogenic factor on the distribution of elk *Alces alces* L., 1758 (Artiodactyla, Cervidae) in Yakutia. *Siberian Journal of Ecology*. 2001;1:83–86. (In Russ.)]
32. Аргунов А.В., Степанова В.В., Охлопков И.М. Динамика численности и использование ресурсов диких копытных в таежной части Якутии. *Аграрный вестник Урала*. 2017;07(161):4–11.
- [Argunov A.V., Stepanova V.V., Okhlopov I.M. Dynamics of the number and use of resources of wild ungulates in the taiga part of Yakutia. *Scientific Agrarian Journal*. 2017;07(161):4–11. (In Russ.)]
33. Сафронов В.М., Сметанин Р.Н., Степанова В.В. Интродукция лесного бизона (*Bison bison athabasca* Rhoads, 1897) в Центральной Якутии. *Российский журнал биологических инвазий*. 2011;4:50–71.
- [Safronov V.M., Smetanin R.N., Stepanova V.V. Introduction Of The Wood Bison (*Bison Bison Athabasca* Rhoads, 1897) In Central Yakutia. *Russian Journal Of Biological Invasions*. 2012;3(1):34–41. (In Russ.)]
34. В Якутию из Канады завезли более 100 лесных бизонов для восстановления их популяции. ТАСС. [Электронный ресурс]. Дата публикации 23.07.2020. 10:06. URL: <https://tass.ru/obschestvo/9032009?ysclid=l6119i9yx871645812>. (Дата обращения 15.04.2022)
- [More than 100 forest bison were brought to Yakutia from Canada to restore their population. TASS. Internet Resource. Date of publication 23.07.2020. 10:06. URL: <https://tass.ru/obschestvo/9032009?ysclid=l6119i9yx871645812>. (Accessed 15.04.2022). (In Russ.)]
35. Кириллин Е. В. *Экология овцебыка (Ovibos moschatus, Zimmerman, 1780)*. Автореф. дис. ... канд биол.наук. Якутск; 2016. 19 с.
- [Kirillin, E.V. *The ecology of muskox (Ovibos moschatus, Zimmerman, 1780)*. Abstr. ... Diss. Cand. Sci. Yakutsk; 2016. 19 p.(In Russ.)]
36. Ревин Ю.В., Сопин Л.В., Железнов Н.К. *Снежный баран*. Новосибирск: Наука; 1988. 191 с.
- [Revin Yu.V., Sopin L.V., Zheleznov N.K. *Snow sheep*. Novosibirsk: Nauka; 1988. (In Russ.)]
37. Чевычелов А.П., Кузнецова Л.В., Исаев Ал.И., Винокуров Н.Н., Исаев Ар.П., Вольперт Я.Л. и др. *Биоразнообразие ландшафтов Токинской котловины и хребта Токинский становик*. Новосибирск: Изд-во СО РАН; 2010. 284 с.
- [Chevychelov A.P., Kuznetsova L.V., Isaev A.L.I., Vinokurov N.N., Isaev A.R.P., Volpert Ya.L. et al. *Biodiversity of landscapes of the Tokinskay mountain basin and Tokinsky stanovik mountain range*. Novosibirsk: Publishing House of SB RAS; 2010. (In Russ.)]
38. Боескоров Г.Г., Давыдов С.П., Кочнев А.А., Ланг Э.М. Проникновение сивуча (*Eumetopias jubatus*) в акватории Чукотского и Восточно-Сибирского морей. *Зоол. ж.* 2011;90(1):123–128.
- [Boeskorov G.G., Davydov S.P., Kochnev A.A., Lang E.M. Penetration Of The Steller's Sea Lion (*Eumetopias Jubatus*) Into Waters Of The Chukchi And East-Siberian Seas. *Zoologicheskyy journal*. 2011;90(1):123–128. (In Russ.)]
39. 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 the badger *Meles meles* L. (1758) on the territory of southwestern Yakutia. *Vestnik YaGU*. 2009;6(2):136–138. (In Russ.)]
40. Шадрина Е.Г. Заходы азиатского барсука *Meles leucurus* на территорию Якутии. *Млекопитающие России: фаунистика и вопросы териогеографии*. Ростов-на-Дону 17–19 апреля 2019 г. М.: Изд-во Т-во научн. изданий КМК; 2019:318–320.
- [Shadrina E.G. Penetrations of the Asian badger *Meles leucurus* to the territory of Yakutia. *Mammals of Russia: faunistics and theriogeography*. Rostov-on-Don, April 17-19, 2019. Moscow: Izd-vo T-vo nauchn.izdaniy KMK; 2019:318–320. (In Russ.)]
41. *Амурский тигр в Якутии. Подробности*. Центр «Амурский тигр». Электронный ресурс. Дата публикации 25.11.2021. URL: http://amur-tiger.ru/ru/press_center/news/1656/ (Дата обращения: 09.04.2022)
- [*Amur tiger in Yakutia. Details*. Amur Tiger Center. Internet resource. Date of publication 25.11.2021. URL: http://amur-tiger.ru/ru/press_center/news/1656/ / (Accessed: 09.04.2022). (In Russ.)]
42. Вольперт Я.Л., Шадрина Е.Г., Охлопков И.М. Млекопитающие Якутии: изменения представлений о составе териофауны за последние 50 лет и аннотированный список. Ч. 1. Насекомоядные, Рукокрылые, Грызуны, Зайцеобразные. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;27(3). <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-393-404>
- [Volpert Ya. L., Shadrina E. G., Okhlopov I. M. Mammals of Yakutia: Changes in the Understanding of the Composition of the Mammal Fauna over the Past 50 Years and an Annotated List. Part 1. Insectivores, Chiropterans, Lagomorphs, Rodents. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(3). <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-393-404>. (In Russ.)]

Об авторах

ВОЛЬПЕРТ Яков Лейзерович, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-1385-8052>, e-mail: ylv52@mail.ru

ШАДРИНА Елена Георгиевна, доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-9660-0072>, e-mail: e-shadrina@yandex.ru

ОХЛОПКОВ Иннокентий Михайлович, кандидат биологических наук, директор, <https://orcid.org/0000-0002-6227-5216>, e-mail: imokhlopkov@yandex.ru

About the authors

VOLPERT, Yakov Leizerovich, Dr. Sci. (Biology), Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-1385-8052>, e-mail: ylv52@mail.ru

SHADRINA, Elena Georgievna, Dr. Sci. (Biology), Professor, Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-9660-0072>, e-mail: e-shadrina@yandex.ru

OKHLOPKOV, Innokenty Mikhailovich, Cand. Sci. (Biology), <https://orcid.org/0000-0002-6227-5216>, e-mail: imokhlopkov@yandex.ru

Поступила в редакцию / Submitted 07.09.2022

Поступила после рецензирования / Revised 14.12.2022

Принята к публикации / Accepted 17.01.2023

Биологические ресурсы

УДК 581.9:727.65(061.62:57)(571.56)

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-128-141>

Оригинальная статья

Типовые образцы растений Гербария Института биологических проблем криолитозоны СО РАН (SASY)

Е. И. Иванова[✉], Н. К. Сосина, Л. В. Кузнецова, Е. Г. Николин, Е. В. Софронова,
А. П. Ефимова, В. Г. Исакова, А. П. Слепцова

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

[✉]bryo.ivanova@yandex.ru

Аннотация

Приведен аннотированный список типовых образцов растений, хранящихся в Гербарии Института биологических проблем криолитозоны СО РАН (SASY), являющемся одним из крупнейших на Северо-Востоке России. Фонд Гербария представлен пятью отделами (сосудистые растения, мохообразные, лишайники, афиллофоровые грибы, водоросли), где хранится около 95 тысяч гербарных образцов без проб водорослей. Помимо основного фонда по Якутии в Гербарии имеется коллекция из районов Западной и Восточной Сибири, Дальнего Востока и некоторых центральных регионов России. Обменный фонд содержит более 3000 видов растений. Особую ценность Гербариев представляют хранящиеся в них типовые образцы. Всего из основной коллекции Гербария SASY выделено 14 видов и 2 подвида, относящихся к печеночникам, мхам и сосудистым растениям из 11 семейств, которые представлены 14 типами, 16 изотипами, 14 паратипами, 5 эптитипами. Растения, типы которых хранятся в SASY, представляют аборигенную флору Якутии и встречаются на этой территории довольно редко, 8 видов из них внесены в Красную книгу Республики Саха (Якутия), 11 видов относятся к эндемикам. Гербарный материал отсканирован на 3D-принтере. Для каждого образца указана цитата оригинальной этикетки, даны краткая экология, распространение, категория редкости. Оригинальность публикации каждого типового образца придает наличие изображения оцифрованных гербарных листов и их этикеток.

Ключевые слова: Гербарий, типовые образцы растений, мхи, печеночники, сосудистые растения, редкие виды растений, эндемики

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» (№ гос. регистрации ЕГИСЦ: АААА-А21-121012190038-0) с применением оборудования ЦКП ФИЦ «ЯНЦ СО РАН» (грант № 13. ЦКП.21.0016).

Для цитирования: Иванова Е.И., Сосина Н.К., Кузнецова Л.В., Николин Е.Г., Софронова Е.В., Ефимова А.П., Исакова В.Г., Слепцова А.П. Типовые образцы растений Гербария Института биологических проблем криолитозоны СО РАН (SASY). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(1):128–141. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-128-141>

Original article

Herbarium of the Institute for Biological Problems of Cryolithozone (SASY): Plant type specimens

Е. И. Ivanova[✉], N. K. Sosina, L. V. Kuznetsova, E. G. Nikolin, E. V. Sofronova,
A. P. Efimova, V. G. Isakova, A. P. Sleptsova

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

[✉]bryo.ivanova@yandex.ru

Abstract

This article presents an annotated list of plant type specimens stored in the Herbarium of the IBPC SB RAS (SASY), which is one of the largest in northeast Russia. The Herbarium fund is represented by five departments (vascular plants, mosses, lichens, aphylophore fungi, and algae), where about 95000 herbarium samples are stored excluding algae tests. The Her-

barium has a collection of plants from Western and Eastern Siberia, the Far East, and some central regions of Russia. The exchange fund contains more than 3000 species of plants. Typical samples stored in Herbaria are of a particular value. In total, 14 species and 2 subspecies of liverworts, mosses, and vascular plants from 11 families were isolated from the main collection of the SASY Herbarium, which are represented by 14 types, 16 isotypes, 14 paratypes, and 5 epitypes (*Frullania ignatovii* Sofronova, Mamontov et Potemkin, *Barbula jacutica* Ignatova, *Grimmia jacutica* Ignatova, *Bednarek-Ochyra*, Afonina, J. Muñoz, *Aconogonon amgense* (V. Mich. et V. Perf.) Tzvel., *Androsace gorodkovii* Ovcz. et Karav., *Anoplocaryum elenae* Volot., *Artemisia karavajevii* Leonova, *Astragalus zhiganicus* L. Kuzn., and *Castilleja galactionovae* E.G. Nikolin, *Castilleja rubra* (Drob.) Rebr. var. *multicaulis* E.G. Nikolin, *Castilleja tenella* Rebr., *Oxytropis scheludjakovae* Karav. et Jurtzev, *Rosa acicularis* Lindl. subsp. *melanocarpa* L. Kuzn., *Sorbotoneaster pozdnjakovii* Pojark. var. *cotoneaster* L. Kuzn. et Volot., *S. pozdnjakovii* Pojark. var. *sorbus* L. Kuzn. et Volot., *Salix x zhataica* Efimova, Shurduk & Ahti). Plants, the types of which are stored in SASY, represent the indigenous flora of Yakutia and are found quite rarely in this territory; eight of these species are listed in the Red Book of the Republic of Sakha (Yakutia), and 11 species are endemic. For each sample, a quote of the original label is indicated, and a brief ecology, distribution, and rarity category is given. The originality of the publication of each standard sample is indicated by the images of digitized herbarium sheets and their labels.

Keywords: Herbarium, plant type specimens, mosses, liverworts, vascular plants, rare plant species, endemics

Funding. This study was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Higher Education and Science of the Russian Federation on the project “Vegetation cover of the cryolithozone of taiga Yakutia: biodiversity, environmental functions, protection and rational use” (state registration number: AAAA-A21-121012190038-0) with the use of the equipment provided by Shared core facilities (SCF) of the Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre” (grant number 13. SCF.21.0016).

For citation: E. I. Ivanova, N. K. Sosina, L. V. Kuznetsova, E. G. Nikolin, E. V. Sofronova, A. P. Efimova, V. G. Isakova, A. P. Herbarium of the Institute for Biological Problems of Cryolithozone (SASY): Plant type specimens. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(1):128–141. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-128-141>

Введение

При изучении биоразнообразия трудно переоценить значение научного Гербария, в котором хранятся типовые образцы растений, послужившие основой для описания новых таксонов. Историческое значение имеет весь первичный материал, включая полевую гербарную этикетку, отдельно хранящиеся фрагменты растения, номер гербарного сбора и т. д. Одним из способов сохранения информации может служить оцифровка (сканирование) типовых гербарных образцов, создание электронных гербарных коллекций.

Гербарий ИБПК СО РАН (SASY) является одним из крупнейших Гербариев на Северо-Востоке России. Он был создан в 1949 г. по инициативе известных ботаников В.А. Шелудяковой и М.Н. Караваева с целью изучения видового состава растений на территории Якутии, выявления кормовых, лекарственных, ядовитых и декоративных видов, их распространения и рационального использования.

Фонд Гербария представлен пятью отделами, где хранится около 95 тысяч гербарных образцов (без проб водорослей): сосудистые растения, мохообразные, лишайники, афиллофоровые грибы, водоросли. Помимо основного фонда, здесь также хранятся коллекции географического гербария из районов Западной и Восточной Сибири, Дальнего Востока и некоторых центральных регионов России. Интересны коллекции дореволюционных сборов, среди которых собрано немало редких видов (основные коллекторы сосудистых

растений Ю.И. Штубендорф – 1849 г., Т.О. Юринский – 1904 г., Н.В. Докуко – 1905–1937 гг., П.В. Оленин и М.И. Губельман (Е.М. Ярославский) – 1904–1910 гг. и образцы мхов Г. Нильсона-Эле – 1896 г.). Кроме того, в Гербарии хранится большой обменный фонд (более 3000 видов растений).

На основе имеющегося Гербарного фонда опубликованы многочисленные монографии и статьи, дано современное флористическое и геоботаническое районирование Якутии. Гербарные образцы являются основой региональных конспектов и определителей растений. Их используют для флористических сводок, центральные российские ботанические центры – БИН РАН, ЦСБС СО РАН, МГУ, ГБС РАН и др. Без коллекции Гербария невозможно представить составление списка наиболее редких и полезных растений нашего региона и данные достоверного местонахождения видов. Гербарий необходим для проведения детальной инвентаризации флоры охраняемых территорий республики.

В 2021 г. ИБПК СО РАН по гранту ЦКП ФИЦ «ЯНИЦ СО РАН» приобретен 3D-сканер Microtek ObjectScan 1600S для изучения биоразнообразия и проведения таксономических исследований, создания баз данных оцифрованных копий гербарных листов, где типовые образцы имеют приоритетное значение. В данное время с помощью этого сканера проводится системная работа по оцифровке гербария, которая пока находится на начальном этапе.

Материалы и методы

Всего в основной коллекции Гербария SASY из типовых образцов хранится 14 видов и 2 подвида, относящихся к печеночникам, мхам и сосудистым растениям из 11 семейств, которые представлены 14 типами, 16 изотипами, 14 паратипами, 5 эптитипами.

В соответствии с международными рекомендациями по оцифровке гербарных образцов, разработанными Королевским ботаническим садом Кью (Royal Botanic Gardens, Kew, Великобритания) [1], а также докладом Н.К. Ковтонюк [2] каждый гербарный лист должен содержать штрихкод (баркод CODE39), соответствующий инвентарному номеру, с акронимом коллекции SASY (Herbarium Code), зарегистрированной в Index Herbariorum. При сканировании на каждом гербарном листе размещаются масштабная линейка и цветовая шкала. Специальные конверты с растениями и их частями сканируются в открытом виде, а гербарные этикетки не должны закрывать растения (если этикетка закрывает часть растения и его невозможно перемонтировать, гербарный лист сканируется дважды, при этом этикетка отгибается). Все сканированные рисунки одного гербарного листа сохраняются под одним штрихкодом, но с разными литерами. Сканирование производится в зависимости от размера сканируемой поверхности. Для гербарного листа сосудистых растений при оптическом разрешении в 600 dpi (с расширением TIFF в среднем 180–200 Мб), а для более мелких растений, например из числа споровых, – 800 dpi.

Для каждого образца указана цитата оригинальной этикетки, даны краткая экология, распространение, категория редкости, места хранения в гербариях других научных учреждений. Для каждого вида также приводятся фотографии сканированных образцов. Наименования растений приведены в алфавитном порядке согласно систематике.

Аннотированный список типовых образцов растений, хранящихся в Гербарии ИБПК СО РАН (SASY):

Мохообразные

Печеночные мхи

Frullania ignatovii Sofronova, Mamontov et Potemkin (сем. *Frullaniaceae*) (рис. 1) 2013 в Новости сист. низш. раст., 47:335. **Holotype:** «Russia, Republic of Buryatia, Kurumkanskiy District, Dzherginskiy State Reserve, Yuzhno-Mujsky Range, Upper Barguzin River (55°07' N, 111°53' E), 1618 m alt., on rocks over the stream, 01.08.2013, coll. Yu. S. Mamontov» (YuSM-384-8) (holotype – LE, isotypes – KPABG, SASY, МНА, JE, TNS, HSNU). Редкий вид, 3д категория: редкий вид, имеющий ограниченный ареал, часть которого находится на территории Якутии, эндемик России. Произрастает на обнажениях основных пород в тундровом поясе. **Распространение в Якутии:** система хребтов Сетте-Дабан, Скалистый, Сунтар-Хаята: басс. р. Восточная Хандыга; отроги горы Мус-Хая. **Вне Якутии** отмечен в Забайкальском крае, Республике Бурятия, Хабаровском крае, Магаданской области [3].

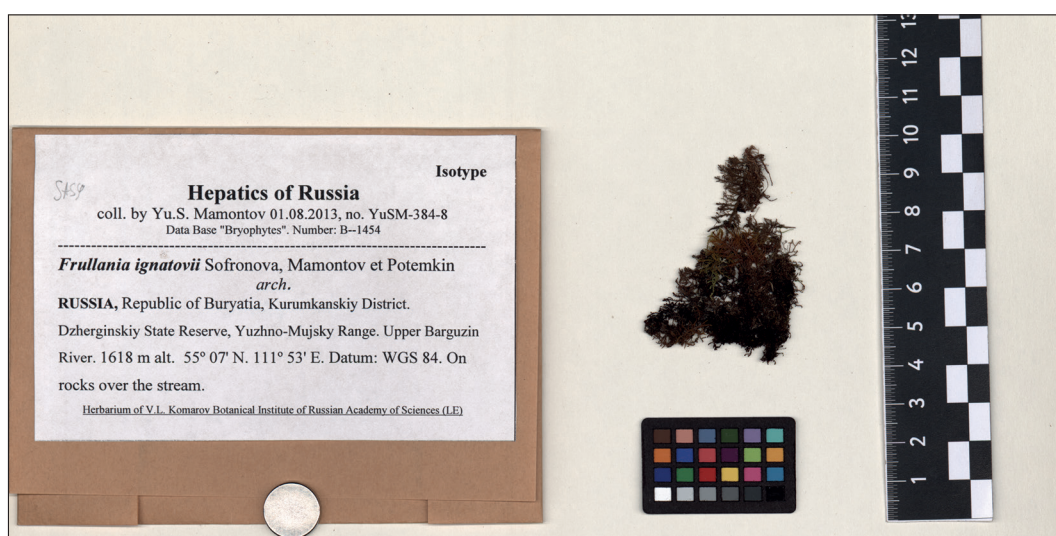


Рис.1/Fig. 1. *Frullania ignatovii* Sofronova, Mamontov et Potemkin

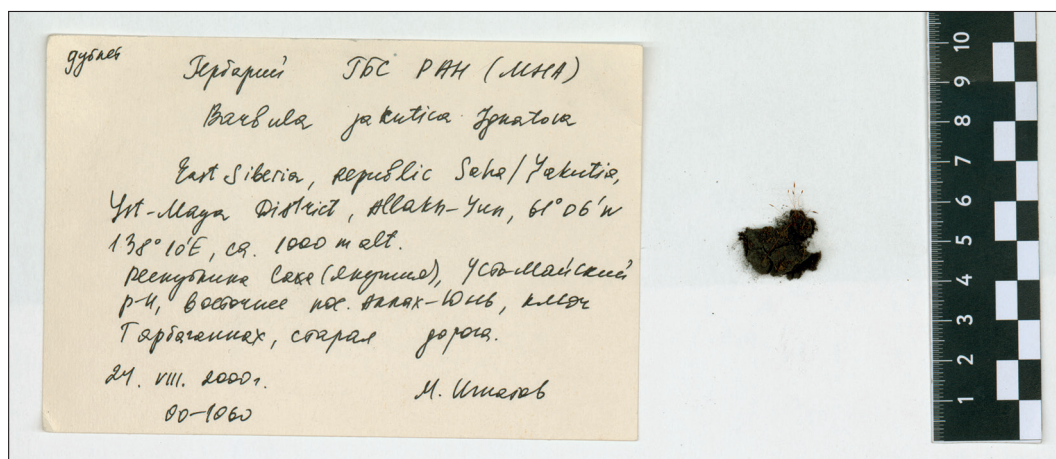


Рис.2/Fig. 2. *Barbula jacutica* Ignatova



Рис. 3/Fig. 3. *Grimmia jacutica* Ignatova, Bednarek-Ochyra, Afonina, J. Muñoz

Листостебельные мхи

***Barbula jacutica* Ignatova** (сем. *Pottiaceae*) (рис. 2) 2001 в Arctoa, 10:161-164. **Holotype:** «Якутия, Усть-Майский р-н, восточнее п. Аллах-Юнь, ключ Тарбаганнах, старая дорога (61°06' N, 138°10' E), 1000 м над ур. м., 24.08.2000, колл. М.С. Игнатов» (№ 00-1060) (holotype – МНА, isotypes – SASY, MW, LE, BUFF, H). Редкий вид, За категория: редкий вид, узкоареальный эндемик. **Распространение в Якутии:** отмечен только в Усть-Майском р-не (басс. р. Алдан, восточнее пос. Аллах-Юнь, ключ Тарбаганнах). **Вне Якутии:** север Красноярского края, в долинах рек Котуй и Попигаи [4].

***Grimmia jacutica* Ignatova, Bednarek-Ochyra, Afonina, J. Muñoz** (сем. *Grimmiaceae*) (рис. 3)

2003 в Arctoa, 12: 1-7. **Holotype:** «Якутия, Томпонский р-н, верх. р. Тукулан, близ устья р. Темирдээх, распадок, северный склон, эпилитно-лишайниковое сообщество, курумник, 1009 м над ур. м., 06.09.1990, колл. Акимов Е.В.» (№ 2771) (holotype – MW, isotypes – SASY, МНА, LE, KRAM, MA, NY). **Распространение в Якутии:** Арктический, Яно-Индигирский, Алданский, Верхнеленский, Оленекский флористический районы. Произрастает в разных высотных поясах, до 1700 м над ур. м., в арктических тундрах и в горах, в лесном поясе и в горной тундре, б.ч. на каменных россыпях, на камнях и в нишах между ними. Широко распространен в восточной части азиатской России, от Таймыра и бассейна Енисея до Чукотки и Приморья, а также найдена на Аляске и в Монголии [5,6].

Сосудистые растения

***Aconogonon amgense* (V. Mich. et V. Perf.) Tzvel.** (сем. *Polygonaceae*) (рис. 4) 1987 в Новостях сист. высш. раст., 24:77. – *Polygonum amgaensis* V. Mich. et V. Perf. 1968 в Новостях сист. высш. раст., 99. **Со-Турп:** «Якутия, правобережье верхнего течения р. Амги, в 4-х км выше устья у левого притока Большой Кюнью, пойменный разнотравно-злаковый луг у подножья известняковых скал, 25.07.1962, колл. В.М. Михалева» (SASY0017033 – 0017035) – дубликат хранится в LE. Редкий вид, 3а категория: эндемик Алданского плато, реликт флористического комплекса нижнепалеозойских известняков; на территории РФ – 3а категория: узкоареальный эндемик России (Алданское нагорье), приуроченный к выходам карбонатных пород. Произрастает в лиственничных и сосновых лесах, изредка на приречных известняковых скалах и примыкающих к ним пойменных лугах. *Распространение в Якутии:* верховье р. Амга, басс. рек Учур, Олёкма (Алданский и Верхне-Ленский флористические районы).

Вне Якутии: Хабаровский край, р. Мая [7, 8, 9].

***Androsace gorodkovii* Ovcz. et Karav.** (сем. *Primulaceae*) (рис. 5) 1957 в Бот. мат. (Ленинград), 18:9. **Со-Турп:** «Якутия, Томпонский р-н, Верхоянские горы, правобережье р. Томпо. Долина левого притока р. Санар в верхнем течении, под перевалом (бассейн р. Хунхады). Пологий участок у подошвы каменистого гребня. Высокогорные разнотравно-мятликово-костровые луговины, 13.08.1954, №121/1, о.71, колл. В. Иванова» (SASY0042178) – дубликат хранится в LE [10]. Редкий вид, 3д категория: эндемик Восточной Сибири и Дальнего Востока. Охраняется на территории Государственного природного заповедника «Усть-Ленский». Произрастает в горных и арктических щебнисто-лишайниковых тундрах, на снежниках. *Распространение в Якутии:* sporadически по всему Верхоянскому хребту до побережья моря Лаптевых; Янское плоскогорье, Оймяконское нагорье (Яно-Индигирский и Арктический флористические районы) [9]. *Вне Якутии:*



Рис. 4/Fig. 4. *Aconogonon amgense* (V. Mich. et V. Perf.) Tzvel

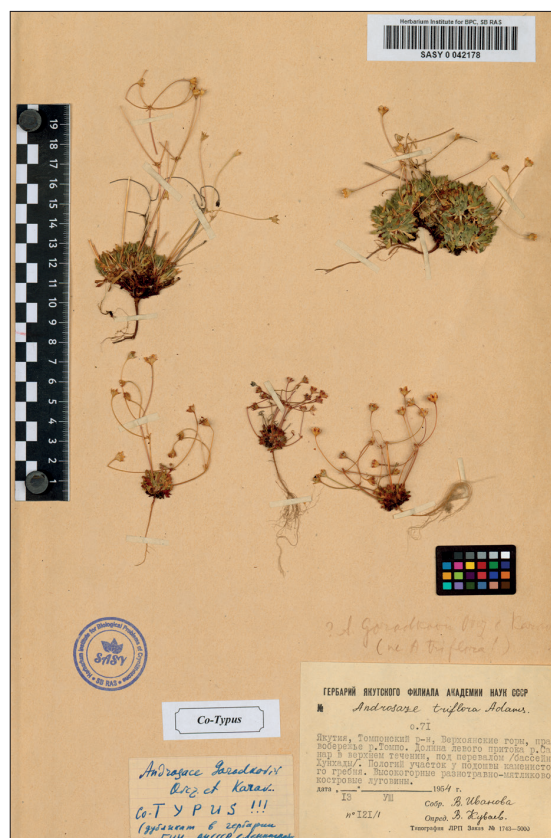


Рис. 5/Fig. 5. *Androsace gorodkovii* Ovcz. et Karav.

тии [11]: Магаданская область (Колымский и Охотский флористические районы).

Anoplocaryum helenae Volot. (сем. *Boraginaceae*) (рис. 6) 1996 в Новости сист. высш. раст., 30:144. **Isotypus**: «Южная Якутия, Алданский р-н, р. Большой Ыллымах (бассейн р. Алдан), устье р. Холодный (Агды), в тенистых сырых расщелинах скал, 420 м над ур. м., 24.08.1988, колл. К.А. Волотовский» (SASY0043627) – тип хранится в ЛЕ. Редкий вид, 3а категория: реликт плейстоцена, узколокальный эндемик бассейна р. Алдан (Алданский флористический район). Произрастает по тенистым, сырым расщелинам скал в таежном поясе гор, в местах скопления мелкозема. *Распространение в Якутии*: верховье р. Алдан, басс. р. Тимптон, Учур, Олекма [9, 12].

Artemisia karavajevii Leonova (сем. *Asteraceae*) (рис. 7) 1971 в Новости сист. высш. раст., 8:231. **Isotypus**: «Якутия, Вилуйский р-н, левый берег Тюнга вблизи устья Джиды, 25.08.1957, №85/У, колл. Л.А. Добрецова» (SASY0049617) –

тип хранится в ЛЕ. Редкий вид, 3а категория: эндемик басс. р. Вилуй. Произрастает на эоловых песчаных отложениях (тукуланах). *Распространение в Якутии*: басс. р. Вилуй, близ оз. Ниджили и на его левом притоке р. Тюнг (Центрально-Якутский флористический район) [9, 13].

Astragalus zhiganicus L. Kuzn. (сем. *Fabaceae*) (рис. 8), 2012 в Ботан. журн., 97(6):102. **Holotypus**: «Республика Саха (Якутия), Жиганский улус, устье р. Кыстатыам, на одном из островов группы Аллах в нижнем течении р. Лена, среди разреженного разнотравья на песчаном аллювии высокой поймы, 02.VII.2004 г., колл. Л.В. Кузнецова» (SASY0055475)». **Isotypus**: там же (ЛЕ, SASY0055476-55477) [14]. Редкий вид, 3а категория: узколокальный эндемик нижнего течения р. Лена [15]. А.К. Сытин данный вид рассматривает как форму *A. alpinus* L. (*A. zhiganicus* L. Kuzn.). По мнению специалистов ИБПК, помимо дважды-трижды непарноперистых листьев, *A. zhiganicus* идентифицируется рядом дополнитель-



Рис. 6/ Fig. 6. *Anoplocaryum helenae* Volot.

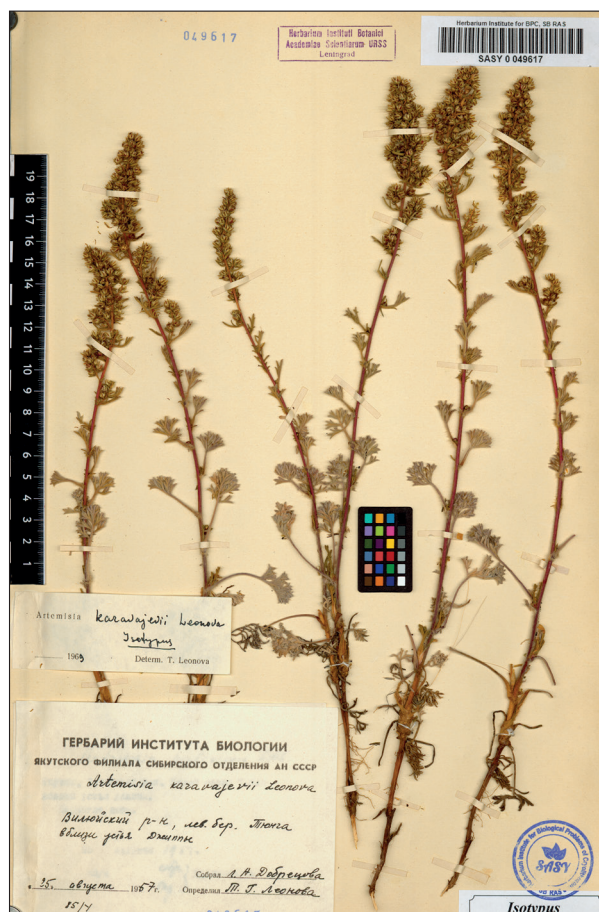


Рис. 7/ Fig. 7. *Artemisia karavajevii* Leonova

ных признаков (строением прицветников, чашечки и др.), что в совокупности позволяет идентифицировать его в статусе вида. С 2004 г. успешно культивируется в ЯБС, в культуре устойчив, ежегодно активно цветет и плодоносит. *Распространение в Якутии*: низовье р. Лена, острова Аллах в устье р. Кыстатыам (Оленекский флористический район) [9].

***Castilleja galactionovae* E.G. Nikolin** (сем. *Scrophulariaceae*) (рис. 9) 2017 в Раст. мир Аз. России, 4(28):34. **Holotypus**: «Якутия, Томпонский р-н, Магаданский тракт, близ пос. Теплый Ключ, пойма р. Восточная Хандыга, у водозабора. Тополевый лес. 10.07.2012, № образца 8, колл. Е.Г. Николин» (SASY0055275). **Isotypus**: SASY0055272, NSK000783, **Epitypus**: SASY0055273, SASY0055274, SASY0055276 - SASY0055278. **Paratypus**: «Якутия, Горный р-н, колхоз им. В.И. Ленина. Опушка лиственничного леса, алас Теледах, 09.07.1953, колл. Е. Рубцова» (SASY0044989); «Якутия, Якутский р-н, разнотравно-люцерново-овсяницевый луг в пойме р. Лены, в 4.5 км от пос. Хатассы вверх по

течению, 22.07.1959, №63/1, колл. В.М. Усанова, Е.Р. Труфанова» (SASY0044986); «Якутия, левобережье р. Лены, протока Сухая, участок Джарбас, разнотравно-злаковый луг с ивой, 19.07.1962, №85/4, колл. Е.Р. Труфанова» (SASY0044999); «Якутия, Средне-Ленский р-н, правый берег Лены, в 2 км выше участка колхоза им. Фрунзе. Заросли ив на прибрежном валу, остепненный луг, 20.07.1963, №134/4, колл. Е.Р. Труфанова» (SASY0044985); «Якутия, Кобяйский р-н, р. Лена, в 65 км ниже устья р. Вилюя, остров Джугра напротив устья р. Лямпущка. Заросли тальника (ив), 11.07.1976, колл. Е.Р. Труфанова, Т.А. Богорадникова» (SASY0044991); «Якутия, Кобяйский р-н, р. Келе, устье р. Кюнкюнюр, шверинойово-чозениевый лес, молодняк, 27.07.1987, №7/6, колл. Е.Г. Николин» (SASY0045003-45004); «Якутия, Жиганский р-н, в 10 км от ее устья р. Дянышка (правый приток р. Лены). Склон коренного берега речки, отдельные кусты ив, деревьев и травы, 18.07.1976, № 30/3, колл. Е.Р. Труфанова, Т.А. Богорадникова» (SASY0044925); «Якутия, Томпонский р-н,



Рис. 8/Fig. 8. *Astragalus zhiganicus* L. Kuzn.



Рис. 9/Fig. 9. *Castilleja galactionovae* E.G. Nikolin

надпойменная терраса долины р. Восточная Хандыга, в 3 км восток от пос. Теплый Ключ, галечник, 10.07.1969, колл. Т.Ф. Галактионова» (SASY0045014-45015). «Якутия, 49 км по Магаданскому тракту от пос. Хандыга, в сторону пос. Теплый Ключ, пойма р. Восточная Хандыга, в 20 м от дороги, 62°47'10.7" с.ш., 136°35'56.2" в.д., 220 м над ур. м. Тополевый лес (молодняк). Образцы 2, 3. 22.06.2012, колл. Е.Г. Николин». Эндемик Якутии. Произрастает в тополево-чозениевых лесах, лиственничных редколесьях, ивняках, на лугах и галечниках, преимущественно в долинах рек. *Распространение в Якутии*: среднее и нижнее течение рек Лена и Алдан (включая их правобережные притоки), верхнее и среднее течение рек Яна и Индигирка, среднее течение р. Колыма (все флористические районы Якутии, кроме Арктического) [9, 16].

***Castilleja rubra* (Drob.) Rebr. var. *multicaulis* E.G. Nikolin** (сем. *Scrophulariaceae*) (рис. 10) 2017 в Раст. мир Аз. России, 4(28):32. **Holotypus**: «Якутия, Чурапчинский р-н, в 20 км от п. Мындыгая, по Амгинскому тракту около р. Дангы, 16.07.1948, колл. М.Н. Караваев» (SASY0044978). **Paratypus**: «Якутия, Чурапчинский р-н, Чаран, сухой луг в аласе, 1948, №401, колл. М.Н. Караваев» (SASY0044980); «Якутия, Мегино-Кангаласский р-н, участок автомобильной дороги М-56 («Колыма»), между мостом через р. Суола и пос. Тунгюлю (3,8 км на прямую, от моста). Степной пояс аласа Чонтохой (62°06'06" с.ш., 130°13'15" в.д.). Остепненный разнотравно-злаковый луг, 03.07.2005, колл. Е.Г. Николин, Н.Б. Ермаков, Е.И. Троева» (SASY0055173); «Якутия, Булунский р-н, хребет Туора-Сис, южный склон, 05.08.1958, Овчинников», (SASY0044969); «Якутия, Томпонский р-н, Верхоянские горы, р. Томпо, в р-не устья р. Тиньрган. Каменистый склон горы, 21.07.1956, №60/3, колл. И.Д. Кильдюшевский» (SASY0045022). Еще один паратип хранится в NSK. Эндемик Якутии. Произрастает на лугах, речном аллювии, тундровых луговинах, каменистых горных склонах, в зарослях кустарников и лиственничных лесах. *Распространение в Якутии*: Верхне-Ленский, Центрально-Якутский, Яно-Индигирский, Арктический флористические районы [9, 16].

***Castilleja tenella* Rebr.** (сем. *Scrophulariaceae*) (рис. 11) 1964 в Новости сист. высш. раст., 303. **Typus**: «Якутия, Томпонский р-н, горы Восточного Верхоянья, окрестности селения Тополи-

ное, хвощево-вейниковый топольник на острове по р. Джуганджа, в 1 км от ее впадения в р. Томпо, 16.07.1954. №12/1, колл. В. Куваев, В. Самарин» (SASY0045046) – дубликат хранится в LE. Эндемик Северо-Восточной Якутии и нижней Лены. Произрастает на лугах горных рек, в тополево-чозениевых и травяных лиственничных лесах, ивняках, на галечниках и отвалах горных пород. *Распространение в Якутии*: грядовая область Восточного Верхоянья (р. Томпо), плосковершинная область Центрального Верхоянья, Янское плоскогорье (реки Сартанг, Дулгалах, Адыча), горная часть р. Индигирка и басс. ее крупных притоков (реки Эльга, Нера, Мома) в пределах Оймяконского нагорья, хребтов Черского, Момского и Тас-Кыстабыт, а также, возможно, по рекам Верхоянского хребта до низовьев р. Лена в пределах лесной зоны (Яно-Индигирский и Арктический флористические районы) [9, 17]. *Вне Якутии*: Красноярский край, п-ов Таймыр [18].



Рис. 10/ Fig. 10. *Castilleja rubra* (Drob.) Rebr. var. *multicaulis* E.G. Nikolin

***Oxytropis scheludjakovae* Karav. et Jurtzev** (сем. *Fabaceae*) (рис. 12) 1961 в Бюл. МОИП. Отд. биол., 66(4):35. **Co-Типус:** «Якутия, Оймяконский р-н, Оймяконское нагорье. 1 км не доезжая 10-го Индигирского прорабства по тракту Хандыга-Магадан. Разнотравно-злаковая остепненная группировка на склоне западной экспозиции, 1.08.1958, №65/4, колл. В. Иванова» (SASY0026298, SASY0053421) – дубликат хранится в LE [19]. Редкий вид, За категория: реликт и эндемик Восточной Сибири и севера Дальнего Востока. Произрастает на южных склонах коренных берегов рек, прилежащих горных массивов в пределах лесного пояса, на злаково-разнотравных степях, остепненных щебнистых осыпях, опушках сухих лиственничных лесов, в осинниках. Встречается в районах с реликтовой степной растительностью. *Распространение в Якутии:* басс. среднего течения р. Лена, включая рр. Амга и Алдан, верховье р. Яна, верхнее и среднее течение р. Индигирки (Центрально-Якут-

ский и Яно-Индигирский флористический район) [9]. *Вне Якутии:* Магаданская область [11].

***Rosa acicularis* Lindl. subsp. *melanocarpa* L. Kuzn.** (сем. *Rosaceae*) (рис. 13), 2020 в Опр. высш. раст. Якутии: 555. **Holotypus:** «Республика Саха (Якутия), Усть-Майский улус, на левом берегу р. Алдан в 40 км вверх по течению от п. Петропавловск, на второй надпойменной террасе в окнах среди берез (*Betula pendula* Roth.) и зарослей шиповника иглистого (*Rosa acicularis* Lindl.), 29. VIII. 03 г. колл. Л.В. Кузнецова (SASY0055472)». **Isotypus:** там же (SASY0055473); «Республика Саха (Якутия), Усть-Майский улус, левый берег р. Алдан, в 40 км вверх по теч. от п. Петропавловск, на второй надпойменной террасе в окнах среди берез (*Betula pendula* Roth.) и зарослей шиповника иглистого (*Rosa acicularis* Lindl.), 03.09.01 г., колл. В.И. Захарова (SASY0055469-55471)». Эндемик. *Распространение в Якутии:* среднее течение р. Алдан [9].

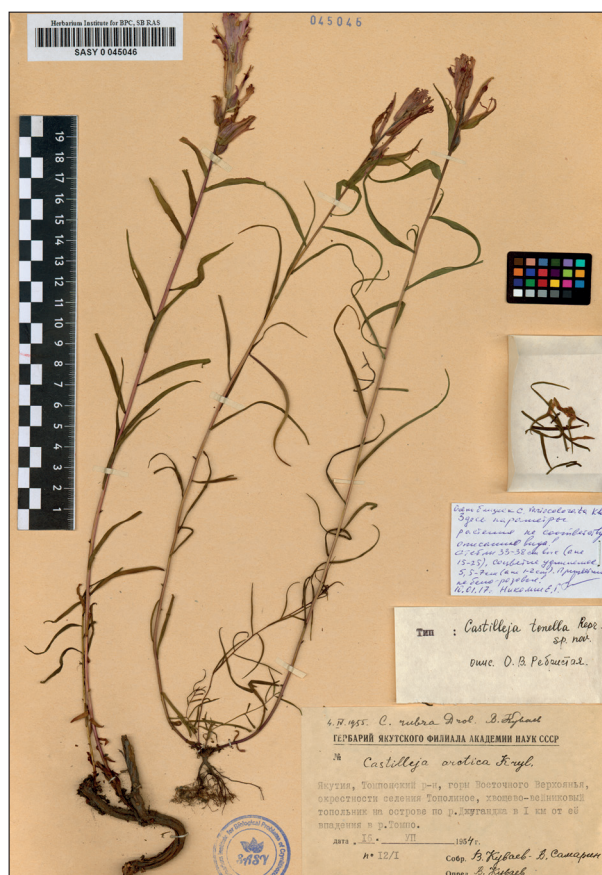


Рис. 11/ Fig. 11. *Castilleja tenella* Rebr.

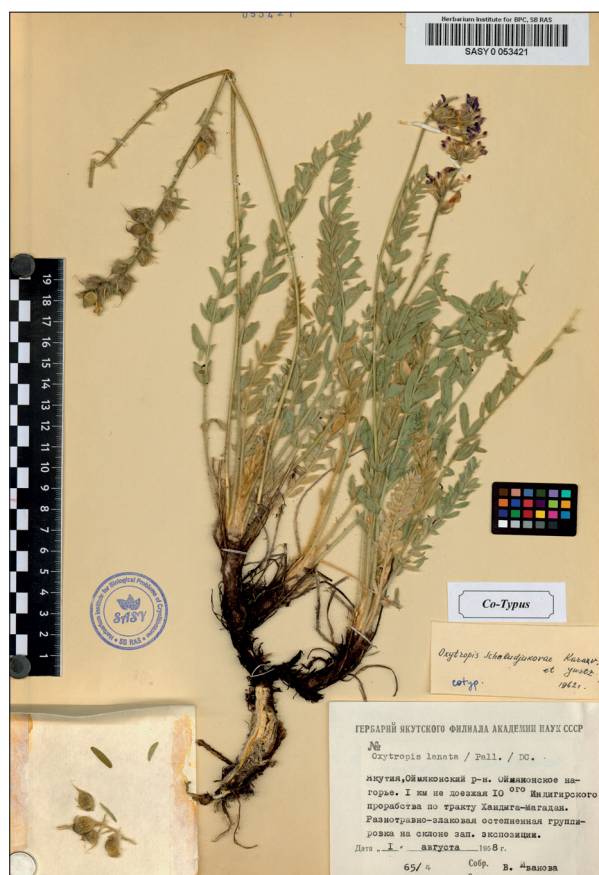


Рис. 12/ Fig. 12. *Oxytropis scheludjakovae* Karav. et Jurtzev

***Sorbocotoneaster pozdnjakovii* Pojark.** (сем. *Rosaceae*) (рис. 14), 1953 в Бот. мат. (Ленинград), 15:93. [20]. Спонтанный межродовой гибрид между *Sorbus sibirica* Hedl. и *Cotoneaster melanocarpa* Lodd. [21]. Редкий вид, 1 категория: узколокальный эндемик среднего течения р. Алдан, Алданский флористический район [22]. Многолетнее изучение этого уникального гибрида в естественных условиях позволило выделить три его основные морфологические формы [9, 23, 24].
a) *Sorbocotoneaster pozdnjakovii* Pojark. var. *cotoneaster* L. Kuzn. et Volot., 2020 в Опр. высш. раст. Якутии: 523. **Holotypus:** «Республика Саха (Якутия), Алданский улус, левый коренной берег р. Алдан, 2,5 км выше устья р. Улахан-Магымдаан (близ вершины Бурый), южный склон, 560 м над ур. м., уклон 20°. Сосняк разнотравно-толокнянковый на известняках. 22.08.1995 г., колл. К.А. Волотовский, Л.В. Кузнецова» (SASY0034973). **Isotypus:** там же (SASY0034972); «Республика Саха (Якутия), Алданский улус, правый коренной берег р. Алдан, 3 км выше р. Джеминды (в 6 км

ниже р. Улахан-Бюктэлэх), сосняк разнотравно-бруснично-арктоусово-толокнянковый, юго-восточный склон 15–20°, 350–370 м над ур. м., известняки» (SASY0034975). Встречается спорадически в разреженных, сухих сосновых лесах и, реже, на открытых петрофитных, преимущественно склонах световых экспозиций. Предпочитает карбонатные породы [12, 19]. **Распространение в Якутии:** среднее течение р. Алдан.
б) *Sorbocotoneaster pozdnjakovii* Pojark. var. *medium* L. Kuzn. et Volot., 2020 в Опр. высш. раст. Якутии: 524. **Holotypus:** Якутская АССР, долина р. Алдан, в 104 км ниже г. Томмот, каменисто-щебнистый южный склон с редкой сосной и *Dryas viscosa* Juz., на левом берегу р. Алдан. 31.VIII.1951 г., колл. Л.К. Поздняков, гербарные образцы хранятся в г. Санкт-Петербург (LE) [9]. К этой форме в большей степени относится описание, сделанное А.И. Поярковой [20]. Это самая распространенная форма рябинокизильника, встречается в сухих или средневлажных сосновых и сосново-лиственничных лесах. Пред-



Рис. 13/ Fig. 13. *Rosa acicularis* Lindl. subsp. *melanocarpa* L. Kuzn



Рис. 14/ Fig. 14. *Sorbocotoneaster pozdnjakovii* Pojark



Рис. 15/ Fig. 15. *Sorbocotoneaster pozdnjakovii* Pojark. var. *sorbus* L. Kuzn. et Volot

почитает карбонатные породы. *Распространение в Якутии*: среднее течение р. Алдан.

c) *Sorbocotoneaster pozdnjakovii* Pojark. var. *sorbus* L. Kuzn. et Volot. (рис. 15), 2020 в Опр. высш. раст. Якутии: 524. **Holotypus**: «Республика Саха (Якутия), Алданский улус, правый берег р. Алдан, в 5 км вниз по теч. от устья р. Тимптон, западный макросклон, высота 499 м над ур. м., уклон 5–10°. Смешанный кедровостланниковый кустарничковый зеленомошный лес. 22.08.09 г. колл. Л.В. Кузнецова (SASY0055478)». **Isotypus**: «Республика Саха (Якутия), Алданский улус, правый берег р. Алдан, в 5 км вниз по теч. от устья р. Тимптон, западный макросклон, высота 499 м над ур. м., уклон 5–10°. Смешанный кедровостланниковый кустарничковый зеленомошный лес, 22.08.09 г., колл. Л.В. Кузнецова (SASY0055479-55480)». Рябиновая форма встречается значительно реже вышеописанных, предпочитает высокосомкнутые, средневлажные сосновые или смешанные зеленомошные, реже, лишайниковые леса. Отмечена на надпоймен-



Рис. 16/ Fig. 16. *Salix x zhataica* Efimova, Shurduk & Ahti

ных террасах р. Алдан [9, 24]. *Распространение в Якутии*: среднее течение р. Алдан.

***Salix x zhataica* Efimova, Shurduk & Ahti** (сем. *Salicaceae*) (рис. 16) 2009 в Ботан. журн., 94(1):83. Внутривидовой спонтанный гибрид. **Holotypus**: «Республика Саха (Якутия), г. Якутск, западное п. Жатай, I надпойменная терраса, лесостепь, старичная депрессия, придатковоосоково-топянохвощовое, иволгностебное-грушанколистно-ивово-березовое сообщество, 23.06.2005, №101, колл. А.П. Ефимова, И.Ф. Шурдук» (SASY0023759) [25]. Изотипы в LE, Н. Встречается по периферии заболоченных кочкарников, депрессий, ерников в долинном и водораздельном ландшафте, на шлейфе надпойменных террас, где произрастают родительские виды — *S. brachypoda* (Trautv. et C.A. Mey.) Kom. и *S. pyrolifolia* Ledeb. *Распространение в Якутии*: среднее течение рек Лена и Вилюй, низовья р. Мая (Алданский и Центрально-Якутский флористические районы) [9].

Заключение

Гербарий ИБПК СО РАН, благодаря огромному труду многочисленных коллекторов, считается одним из крупнейших региональных центров ботанической науки России. Материалами пользуются специалисты разных областей науки, ведется разносторонняя научная и практическая работа. В настоящее время проводится оцифровка не только типовых образцов и исторических коллекций, но и последовательно всего коллекционного фонда, сохраняя его для последующих поколений и специалистов.

Всего в статье были приведены данные о 49 типовых образцах мохообразных и сосудистых растений, собранных в разные годы, относящихся к 14 видам и 2 подвидам, большинство которых представляют аборигенную флору Якутии и встречаются на этой территории довольно редко.

Список литературы /References

1. Durant J. From poppies to pixels. *Data and digital resources: Explore our data and resources for a wide range of plant and fungal information*. Royal Botanic Gardens, Kew; 2018. Available: <https://www.kew.org> (accessed 14.12.2021).
2. Ковтонюк Н.К. *Международные стандарты и правила оцифровки гербария* [сайт]. Центр мобилизации данных о биоразнообразии Северо-Западной Сибири; 2021. Доступно: <https://nwsbios.org> (обновлено 1.04.2021; процитировано 14.12.2021).
3. Kovtonyuk N.K. *International standards and rules of herbarium digitization* [website]. Center for the Mobilization of Data on the Biodiversity of North-West Siberia; 2021. Available: <https://nwsbios.org> (updated 1.04.2021; quoted 12/14/2021).
4. Софронова Е.В., Мамонтов Ю.С., Потемкин А.Д. *Frullania ignatovii* (Porellales, Marchantiophyta) – новый вид из Сибири. *Новости систематики низших растений*. 2013;(47):334–343.
5. [Sofronova E.V., Mamontov YU.S., Potemkin A.D. *Frullania ignatovii* (Porellales, Marchantiophyta) – a new species from Siberia. *Novosti Sistematiki Nizshikh Rastenii*. 2013;(47):334–343. (In Russ.)]
6. Ignatova E.A. A new species of *Barbula* (Pottiaceae, Musci) from Siberia. *Arctoa*. 2001;(10):161–164.
7. Ignatova E., Bednarek-Ochyra H., Afonina O., Muñoz J. A new species of *Grimmia* (Grimmiaceae, Musci) from North-East Asia and Alaska. *Arctoa*. 2003;(12):1–8.
8. Игнатов М.С., Игнатова Е.А., Федосов В.Э. и др. *Флора мхов России. Т. 2. Oedipodiales–Grimmiales*. М.: КМК, 2017. 560 с.
9. [Ignatov M.S., Ignatova Ye.A., Fedosov V.E. et al. *Flora mkhov Rossii. V. 2. Oedipodiales–Grimmiales*. Moscow: KMK, 2017 (In Russ.)]
10. Цвелев Н.Н. Заметки о Polygonaceae во флоре Дальнего Востока. *Новости систематики высших растений*. 1987;(24):72–79.
11. [Cvelev N.N. Notes on Polygonaceae in the flora of the Far East. *Novosti Sistematiki Vysshikh Rastenii*. 1987;(24):72–79. (In Russ.)]
12. Михалева В.М., Перфильева В.И. О новом виде рода *Polygonum* L. из Якутии. *Новости систематики высших растений*. 1968;99–103.
13. [Mihaleva V.M., Perfil'eva V.I. About a new species of the genus *Polygonum* L. from Yakutia. *Novosti Sistematiki Vysshikh Rastenii*. 1968;99–103. (In Russ.)]
14. Афанасьева Е.А., Байков К.С., Бобров А.А. и др. *Определитель высших растений Якутии*. Издание второе, переработанное и дополненное. М.: Товарищество научных изданий КМК. Новосибирск: Наука; 2020. 896 с.
15. [Afanas'yeva Ye.A., Baykov K.S., Bobrov A.A. i dr. *Opredelitel vysshikh rasteniy Yakutii*. Izdaniye vtoroye, pererabotannoye i dopolnennoye. Moscow: Tovarichestvo nauchnykh izdaniy KMK. Novosibirsk: Nauka; 2020. (In Russ.)]
16. Караваев М.Н. Новые виды якутской флоры. *Ботанические материалы Гербария Ботанического института имени В. Л. Комарова Академии наук СССР*. 1957;(18):7–12.
17. [Karavaev M.N. New species of the Yakutian flora. *Botanicheskie materialy Gerbariya Botanicheskogo instituta imeni V. L. Komarova Akademii nauk SSSR*. 1957;(18):7–12. (In Russ.)]
18. Беркутенко А.Н., Лысенко Д.С., Хорева М.Г. *Флора и растительность Магаданской области (конспект сосудистых растений и очерк растительности)*. Магадан: ИБПС ДВО РАН, 2010. 364 с.
19. [Berkutenko A.N., Lysenko D.S., Khoreva M.G. *Flora i rastitelnost Magadanskoy oblasti (konspekt sosudistykh rasteniy i ocherk rastitelnosti)*. Magadan: IBPS DVO RAN, 2010. (In Russ.)]
20. Волотовский К.А. Новый вид рода *Anoplocaryum* Ledeb. (Boraginaceae) из южной Якутии. *Новости систематики высших растений*. 1996;(30):144–147.
21. [Volotovskij K.A. A new species of the genus *Anoplocaryum* Ledeb. (Boraginaceae) from southern Yakutia. *Novosti Sistematiki Vysshikh Rastenii*. 1996;(30):144–147. (In Russ.)]
22. Леонова Т.Г. Новые для флоры Якутской АССР виды полыни (*Artemisia* L.). *Новости систематики высших растений*. 1971;(8): 231–240.
23. [Leonova T.G. New species of *Artemisia* for the flora of the Yakut ASSR. *Novosti Sistematiki Vysshikh Rastenii*. 1971. T.8. S. 231–240. (In Russ.)]
24. Кузнецова Л.В. Новый вид рода *Astragalus* L. (Fabaceae) из Северо-Восточной Азии. *Ботанический журнал*. 2012;97(6):102–106.
25. [Kuznecova L.V. A new species of the genus *Astragalus* L. (Fabaceae) from Northeast Asia. *Botanicheskii zhurnal*. 2012;97(6):102–106. (In Russ.)]

15. Данилова Н.С. (отв. ред.) *Красная книга Республики Саха (Якутия). Т. 1. Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды растений и грибов*. М.: ООО «Реарт», 2017. 412 с.
- [Danilova N.S. (otv. red.) *Krasnaya kniga Respubliki Sakha (Yakutiya). V. 1. Redkiye i nakhodyashchiyesya pod ugrozoy ischeznoeniya vidy rasteniy i gribov*. M.: ООО «Reart», 2017 (In Russ.)]
16. Николин Е.Г. Заметки о роде *Castilleja* (Scrophulariaceae) в Республике Саха (Якутия). *Растительный мир Азиатской России*. 2017;28(4):30–41.
- [Nikolin E.G. Notes on the genus *Castilleja* (Scrophulariaceae) in the Republic of Sakha (Yakutia). *Rastitelny mir Aziatskoi Rossii*. 2017;28(4):30–41. (In Russ.)]
17. Ребристая О.В. Род *Castilleja* Mutis в Евразии. *Новости систематики высших растений*. 1964;83–311.
- [Rebristaya O.V. The genus *Castilleja* Mutis in Evrazia. *Novosti Sistematiki Vysshikh Rastenii*. 1964;83–311. (In Russ.)]
18. Поспелова Е.Б., Поспелов И.Н. *Флора сосудистых растений Таймыра и сопредельных территорий. Часть 1. Аннотированный список флоры и ее обихий анализ*. М.: Товарищество научных изданий КМК. 2007. 457 с.
- [Pospelova Ye.B., Pospelov I.N. *Flora sosudistykh rasteniy Taymyra i sopredelnykh territoriy. Chast' 1. Annotirovannyi spisok flory i yeye obshchiy analiz*. M.: Tovarichestvo nauchnykh izdaniy KMK. 2007. (In Russ.)]
19. Юрцев Б.А., Караваев М.Н. Новый остролодочник из секции *Baicalia* Bge в горных степях Северо-Восточной Якутии. *Бюллетень МОИП. Отд. Биологии*. 1961; LXVI(4):34–41.
- [Yurcev B.A., Karavaev M.N. A new species *Oxytropis* from the *Baicalia* Bge section in the mountain steppes of Northeastern Yakutia. *Byulleten' MOIP. Otdel Biologii*. 1961; LXVI(4):34–41. (In Russ.)]
20. Пояркова А.И. *Sorbocotoneaster pozdnjakovii* Pojark. – новый естественный межродовой гибрид. *Ботанические материалы Гербария БИН АН СССР*. 1953;(15):92–108.
- [Poyarkova A.I. A new natural intergenerational hybrid. – *Sorbocotoneaster pozdnjakovii* Pojark. *Botanicheskie materialy Gerbariya BIN AN SSSR*. 1953;(15):92–108. (In Russ.)]
21. Поздняков Л.К. Межродовой гибрид из семейства розоцветных. *Доклады АН СССР*. 1952;85(5):1161–1164.
- [Pozdnyakov L.K. An intergenerational hybrid from the Rosaceae. *Doklady AN SSSR*. 1952;85(5):1161–1164. (In Russ.)]
22. Исаев А.П. (отв. ред.) *Красная книга Республики Саха (Якутия). Т.1.: Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды растений и грибов*. Якутск: НИПК «Сахаполиграфиздат», 2000. 256 с.
- [Isayev A.P. (ed.) *Krasnaya kniga Respubliki Sakha (Yakutiya). T.1.: Redkiye i nakhodyashchiyesya pod ugrozoy ischeznoeniya vidy rasteniy i gribov*. Yakutsk: NIPK «Sakhapoligrafizdat», 2000. (In Russ.)]
23. Волотовский К.А., Кузнецова Л.В. Новые данные о естественном гибриде *Sorbocotoneaster pozdnjakovii* Pojark. (Rosaceae). *Ботанический журнал*. 1998; 83(1):94–103.
- [Volotovskij K.A., Kuznecova L.V. New data on the natural hybrid *Sorbocotoneaster pozdnjakovii* Pojark. (Rosaceae). *Botanicheskii zhurnal*. 1998;83(1):94–103. (In Russ.)]
24. Кузнецова Л.В. Фитоценотическая характеристика местопроизрастаний *Sorbocotoneaster pozdnjakovii* Pojark. (Rosaceae). *Вестник СВФУ им. М.К. Аммосова*. 2016;53(3):8–20.
- [Kuznecova L.V. Phytocenotic characteristics of the growth sites of *Sorbocotoneaster pozdnjakovii* Pojark. (Rosaceae). *Herald of the North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov*. 2016;53(3): 8–20. (In Russ.)]
25. Ефимова А.П., Шурдук И.Ф., Ахти Т. Новый межвидовой гибрид рода *Salix* (Salicaceae) из Якутии. *Ботанический журнал* 2009;94(1):83–89.
- [Efimova A.P., Shurduk I.F., T. Ahti. A new interspecific hybrid of the genus *Salix* (Salicaceae) from Yakutia. *Botanicheskii zhurnal*. 2009;94(1):83–89. (In Russ.)]

Об авторах

ИВАНОВА Елена Ильинична, кандидат биологических наук, зав. отделом, <https://orcid.org/0000-0002-0387-9810>, e-mail: bryo.ivanova@yandex.ru

СОСИНА Надежда Константиновна, зав. гербария, инженер-исследователь, <https://orcid.org/0000-0002-5875-939X>; Researcher ID T-1877-2018, e-mail: n.k.sosina@yandex.ru

КУЗНЕЦОВА Людмила Васильевна, инженер-исследователь, <https://orcid.org/0000-0003-3101-036X>, Kuznetsova90@mail.ru

НИКОЛИН Евгений Георгиевич, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-0053-6713>; Researcher ID: L-6587-2017, e-mail: enicolin@yandex.ru

СОФРОНОВА Е.В., кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-5132-8247>, e-mail: soflena@mail.ru

ЕФИМОВА Айталипа Павловна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-3684-3432>, e-mail: aytaef@yandex.ru

ИСАКОВА Вера Гаврильевна, кандидат биологических наук, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-6514-4951>, e-mail: vera.mosses.isakova@mail.ru

СЛЕПЦОВА Анастасия Петровна, аспирант, лаборант-исследователь, <https://orcid.org/0000-0002-8546-7077>, e-mail: ana.pet98@mail.ru

About the authors

IVANOVA, Elena Ilyinichna, Cand. Sci (Biology), Head of the Department of Botanical Research, <https://orcid.org/0000-0002-0387-9810>, e-mail: bryo.ivanova@yandex.ru

SOSINA, Nadezhda Konstantinovna, Research Engineer, Head of the Herbarium, <https://orcid.org/0000-0002-5875-939X>; Researcher ID: T-1877-2018, e-mail: n.k.sosina@yandex.ru

KUZNETSOVA, Lyudmila Vasilievna, Research Engineer, <https://orcid.org/0000-0003-3101-036X>, e-mail: Kuznetsova90@mail.ru

NIKOLIN, Evgeny Georgievich, Dr. Sci. (Biology), Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-0053-6713>; Researcher ID: L-6587-2017, e-mail: enicolin@yandex.ru

SOFRONOVA, Elena Vasilievna, Cand. Sci (Biology), Senior Researcher <https://orcid.org/0000-0002-5132-8247>, e-mail: soflena@mail.ru

EFIMOVA, Aitalina Pavlovna, Cand. Sci (Biology), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-3684-3432>, e-mail: aytaef@yandex.ru

ISAKOVA, Vera Gavrilvna, Cand. Sci (Biology), Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-6514-4951>, e-mail: vera.mosses.isakova@mail.ru

SLEPTSOVA, Anastasia Petrovna, post-graduate student, <https://orcid.org/0000-0002-8546-7077>, e-mail: ana.pet98@mail.ru

Поступила в редакцию / Submitted 28.12.2022

Поступила после рецензирования / Revised 24.01.2023

Принята к публикации / Accepted 03.02.2023

УДК 636.3 (571.56)

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-142-155>

Оригинальная статья

Опыт гибридизации и перспективы его применения в овцеводстве

Л. Н. Владимиров, Г. Н. Мачахтыров, В. А. Мачахтырова✉,
Я. Л. Шадрина, М. В. Андреева

Якутский научно-исследовательский институт сельского хозяйства
им. М.Г. Сафронова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация
✉varvara-an@mail.ru

Аннотация

Приведены результаты уникального проекта гибридизации домашней овцы с диким снежным бараном якутской популяции (*Ovis nivicola lydekkeri*), реализуемого в экстремальных условиях Якутии. Гибридизация проводится с целью получения новых форм, сочетающих высокие продуктивные показатели со специфическими качествами приспособления к суровым условиям разведения. При искусственном осеменении домашних овец замороженно-оттаянным эпидидимальным семенем снежного барана, методом лапаротомии были получены жизнеспособные гибриды обоих полов. Полученные гибриды изучены в сравнении со своими сверстниками – домашними ягнятами. При рождении гибриды имели живую массу, на 29 % меньшую показателя домашних ягнят. Разница в живой массе отмечена до возраста 20–24 мес., но к 36 мес. гибридные самцы превосходили домашних баранов-сверстников. В ранний постнатальный период гибриды быстрее и чаще удовлетворяются материнским молоком, дневной сон у них короткий неглубокий, проявляют высокую степень любознательности, прыгучести, осторожности, установлено четкое подражание поведению матерей. По росту и развитию также отмечено, что гибриды высоконогие, узкотелые, кроме того отмечены различия в питании. Гибридное потомство отличалось хромосомным набором от родительских форм – имело диплоидный набор, набор равный $2n = 53$, тогда как у материнской формы $2n = 54$, отцовской – $2n = 52$. В целом полученные гибриды фертильны, отличаются от сверстников динамикой развития, питания, этологии, имеют схожие фенотипические особенности с отцовской формой и как новая усовершенствованная форма генотипа могут стать основой для селекционной работы овцеводстве.

Ключевые слова: гибридизация, овцеводство, снежный баран, генофонд, генетический ресурс, репродуктивные технологии

Финансирование. Работа выполнена в рамках госбюджетной программы НИР № FWRS-2021-0005 и на оборудовании ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН (грант №13.ЦКП.21.0016).

Для цитирования: Владимиров Л.Н., Мачахтыров Г.Н., Мачахтырова В.А., Шадрина Я.Л., Андреева М.В. Опыт гибридизации и перспективы его применения в овцеводстве. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(1):142–155. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-142-155>

Original article

Experience of hybridization and prospects for its application in sheep breeding

L. N. Vladimirov, G. N. Machakhtyrov, V. A. Machakhtyrova✉,
Ya. L. Shadrina, M. V. Andreeva

Safronov Yakut Scientific Research Institute of Agriculture,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation
✉varvara-an@mail.ru

Abstract

A unique project on the hybridization of domestic sheep with wild bighorn sheep of the Yakut subspecies (*Ovis nivicola lydekkeri*) was implemented under extreme conditions in Yakutia. Hybridization was performed to obtain new forms that combine productive indicators with specific adaptation qualities to harsh breeding conditions. Viable hy-

brids of both sexes were obtained via laparotomy during the artificial insemination of domestic sheep with frozen-thawed epididymal male bighorn sheep. We compared the hybrids with domestic lambs. At birth, the hybrids had a live weight of 2.65 ± 0.19 kg, which is 29 % less than that of domestic lambs. A difference in live weight was noted before reaching the age of 20–24 months; however, by 36 months, hybrid males outnumbered domestic rams of the same age. We found that in the early postnatal period, hybrids were satisfied with their mothers' milk faster and more often, and their daytime sleep was short and shallow. The hybrids also showed a high degree of curiosity, jumping ability, caution, and clear imitation of the mothers' behavior. In terms of growth and development, the hybrids were tall and narrow-bodied because of their high mobile activity, as well as differences in nutrition. The hybrid offspring differed in chromosome set from the parental forms, having a diploid set equal to $2n = 53$, whereas the maternal form of the sheep had $2n = 54$, and the paternal form had $2n = 52$. The resulting hybrids are fertile, and differ from their peers in the dynamics of development, nutrition, and ethology. They have phenotypic features similar to those of the paternal form, and a new improved form of the genotype is the basis for selection in sheep breeding.

Keywords: hybridization, sheep breeding, bighorn sheep, gene pool, genetic resource, reproductive technologies

Funding. This study was carried out within the framework of the state budgeted research programme (number FWRS-2021-0005) using the equipment of the Core Shared Research Facility (CSRF) of the Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre SB RAS” (grant number 13. CSRF.21.0016).

For citation: Vladimirov L.N., Machakhtyrov G.N., Machakhtyrova V.A., Shadrina Ya.L., Andreeva M.V. Experience of hybridization and prospects for its application in sheep breeding. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(1):142–155. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-142-155>

Введение

Межвидовая гибридизация в животноводстве применяется при создании новых селекционных форм животных, сочетающих в себе наиболее ценные свойства исходных родительских пар, в том числе отличные приспособительные качества к определенным условиям разведения. Метод основан на практических результатах скрещивания разных видов животных, применяемого с древних времен. При этом гибридизация по сравнению с традиционным размножением животных характеризуется целым рядом особенностей самой разнообразной природы.

Анализ истории гибридизации показывает, что в некоторых случаях развитие гибридов может сопровождаться разными аномалиями и даже вообще не начаться или остановиться и, наоборот, гибриды могут показывать высокую степень развития (гетерозис), также у гибридов может наблюдаться бесплодие с разной степенью этиологии, а разный набор хромосом может привести к особенностям передачи признаков по наследству. При гибридизации некоторых близкородственных видов гибридное потомство может быть фертильным и с чрезвычайно разнообразными фенотипическими признаками, в том числе превосходить родительские формы по многим хозяйственно полезным признакам. В отдельных случаях, во втором и третьем поколениях у гибридного поголовья может быть определенная доля животных с различными патологиями раз-

вития или вообще нежизнеспособных особей даже при нормальных по жизнеспособности гибридах первого поколения. И, наконец, гибридное потомство может обладать совершенно неожиданными свойствами, не встречающимися у исходных родительских форм. Несмотря на обозначенные сложности, гибридизация успешно применялась в скотоводстве при совершенствовании существующих (например, при скрещивании скота с представителями пород зебу были получены массивы скота с высокой резистентностью к пироплазмозу) и выведении новых пород скота в основном мясного направления (санта-гертруда, брангус, бифмастер, браман и т. д.), в птицеводстве (муларды, мясные бройлерные породы и т. д.), а также в звероводстве и в рыбоводстве [21]. Установлено, что положительные результаты при применении данного метода разведения можно получить при скрещивании животных, которые имеют общих предков или близко расположены в систематике видов. При этом гибридное потомство является жизнеспособным и фертильным. Использование отдаленной гибридизации сопровождается полной или частичной стерильностью гибридов [8, 9].

Идея применения межвидовой гибридизации разводимых пород овец с целью обогащения с дикими формами баранов (архарами, муффонами, аргали т. д.) с целью обогащения генофонда высказывалась и успешно применялась многими исследователями в разные годы [8, 10, 11, 14, 19,

18, 21]. В разное время в овцеводстве были выведены породы шерстного направления – горный меринос и архаромеринос с использованием диких представителей баранов. При этом наиболее ценными признаками диких баранов, которые привлекали селекционеров, являются крупные размеры тела, качество мяса, неприхотливость и выносливость к определенным условиям обитания. Известно, что снежный баран не является предком домашних пород овец. Однако идея что именно генофонд дикого снежного барана может стать резервом для усовершенствования имеющихся типов или создания новой породы овец, способной сочетать продуктивные качества с приспособленностью к суровым северным условиям, неоднократно высказывалась исследователями [1, 2, 8, 9, 12, 16, 19].

Об успешном применении гибридизации со снежным бараном (*Ovis canadensis*) известно с конца позапрошлого века. Одним из результативных проектов с применением гибридизации является работа Шайдуллина И.Н. на Камчатке, где в качестве исходной отцовской формы был использован дикий камчатский снежный баран (*Ovis nivicola nivicola*). В сложных условиях северного края были получены гибридные животные разной кровности. При этом автор отмечает, что гибриды обоих полов, полученные от камчатского снежного барана и овец забайкало-бурятской породы, были плодовитыми. Имеется информация, что работа была продолжена и получены гибриды 3-го поколения [18, 19].

Впервые получение гибридов от скрещивания домашней овцы со снежным бараном якутской популяции (*Ovis nivicola lydekkeri*) приводится в работах С.А. Лесина [11], Ш.Н. Насибова в соавторстве [14], Багирова В.А. и др. [3]. Так, используя замороженно-оттаянное эпидимальное семя дикого барана, от овец романовской породы были получены гибридные ягнята.

Следует отметить, что в ранее проведенных работах по гибридизации домашних овец и коз с дикими животными основное внимание уделялось только получению и закреплению у гибридов хороших приспособительных качеств наряду с высокими показателями качества шерсти. Однако, практически у всех гибридных животных было отмечено снижение технологических свойств шерсти, что ограничивало возможность использования только вводным скрещиванием, или «прилитием крови». Кроме того, дикие животные при скрещивании с домашними могут

передать такие признаки, как позднеспелость, низкие качества шерсти, дикость, пугливость и агрессивность [18, 19]. Отмечено, что гибриды, как правило, отличаются высокой подвижностью, неумимостью, недоверчивостью к человеку и пугливостью, чрезмерной реакцией на малейшие раздражения и агрессивностью.

За последние десятилетия в отечественном овцеводстве существенно сократилось количество разводимых, особенно локальных пород, в том числе мясошерстного направления продуктивности, несущих в себе ценный объем уникальной генетической информации и отличающихся неприхотливостью и выносливостью к сложным условиям разведения. К такому положению дел привело то, что в советский период предпочтение отдавалось развитию тонкорунного овцеводства, в результате чего в качестве улучшателей грубошерстных пород применялись тонкорунные и полутонкорунные породы [21].

Положительные результаты ранее проведенных работ по гибридизации в овцеводстве наряду с применением современных методов репродуктивной биотехнологии делают доступным вовлечение генетического потенциала диких видов животных, в частности снежных баранов, обитающих в разных климатических и географических зонах России и являющихся уникальным и перспективным биоресурсом, в обогащение генофонда отечественных пород овец. Таким образом, гибридизация в овцеводстве применяется в целях закрепления таких хозяйственно полезных признаков, как приспособительные качества к определенным условиям разведения, высокая резистентность организма, неприхотливость, выносливость на фоне повышения мясной продуктивности.

Методы и материалы

Проведены описание и характеристика исходных родительских форм по литературным данным: материнская сторона – домашняя овца грубошерстной породы по Билтуеву С.И. [5], отцовская сторона – дикий снежный баран (*Ovis nivicola lydekkeri*) по Кривошапкину А.А. и др. [10], сравнение их биологических показателей.

Для получения гибридного потомства оценку и отбор маток грубошерстной породы проводили общепринятыми зоотехническими методами, с учетом возраста, показателей функции репродуктивных органов, этологии. Течку овец определяли бараном-пробником. Для проведения искусст-

венного осеменения применяли хирургический метод лапаротомии с использованием криоконсервированного эпидидимального семени снежного барана (по Багирову В.А. [1]), полученного постмортально по усовершенствованному нами методу Шишовой Н.В. [20]. Замороженно-оттаянное семя вводили в 1/3 часть яйцепровода овцы после визуальной оценки стадии фолликулогенеза в яичниках. На 35 день после проведения лапаротомии проводили УЗИ-диагностику овец на суягность.

Особенности роста и развития гибридов и домашних ягнят определяли общепринятыми зоотехническими методами путем взятия промеров и расчета индексов телосложения по Борисенко Е.Я. и взвешивания живой массы.

При цитогенетическом исследовании культивирование периферических лимфоцитов, получение и обработку препаратов хромосом проводили по общепринятой методике [6].

Этологическое поведение животных изучено методом регистрации отдельных поведенческих проявлений [15]. Постнатальный период формирования этологических реакций условно разбили на несколько периодов: ранний постнатальный – от рождения до 4,5 мес. (молочный период); послеотъемный период – от 4,5 до 6; полового созревания – от 6 до 8, далее до 18 мес. Следующий период исследований – от 12 до 30 мес. уже в половозрелом возрасте гибридов. Описание окраски мехового покрова гибридов провели по аналогии с Железновым-Чукотским Н.К. [7].

Для изучения особенностей питания гибридного потомства по принципу пар-аналогов были сформированы две опытные группы разной кровности (по 5 голов): контрольная группа (I) – чистопородные овцы грубошерстной породы; опытная группа (II) – гибриды первого поколения (1/2 по овцам, 1/2 по снежному барану). Опытных животных обеих групп содержали в одинаковых условиях, в вольерах с площадью 20 м². Животным скормливали принятый в овцеводстве рацион, состоящий из сена разнотравного, овса и минеральной подкормки. Всем животным дополнительно давали веточный корм из расчета 1 кг на 1 голову и ягель – по 0,5 кг на голову. Научно-производственный опыт проводился в течение 30 дней в марте. Поедаемость кормов определяли по взвешиванию остатков кормов с последующим вычислением показателей в %.

Оценка воспроизводительной способности гибридов проведена на основе изучения биологических показателей спермы (ГОСТ 32200-2013) [22]. Взятие спермы гибридных самцов проведено с применением искусственной вагины для баранов с использованием маток-овец в состоянии половой охоты. С целью проверки фертильности гибридных самцов их случали при групповом подборе с матками бурятской грубошерстной породы. Для выяснения и подтверждения наступления суягности проводили диагностику с применением УЗИ-сканирования. Половая охота овец определялась методом использования барана-пробника с подвязанным фартуком.

Результаты и обсуждение

С целью обоснования выбора в качестве исходной родительской формы для получения новых селекционных форм в овцеводстве приводятся описание видов снежных баранов (*Ovis nivicola*) и характеристика биологических особенностей якутского снежного барана (*Ovis nivicola lydekkeri*).

Снежный баран (*Ovis nivicola*)

Снежный баран, чубуку или толсторог (лат. *Ovis nivicola* — «баран, обитающий в снегу»), обладает крупным ростом, мощным телосложением и относительно короткими ногами. Голова животного большая, с совершенно прямым носом и укороченной мордой. Самцы имеют рога относительно крупных размеров, толстые и круто кольцеобразно закрученные. Длина туловища 170 см, высота до 100 см. Вес взрослой особи достигает 120–130 кг, самки весят намного меньше – до 55 кг. Снежный баран занимает экологическую нишу, сходную с горными козлами, и считается животным горных ландшафтов. От всех других азиатских и средиземноморских баранов снежный баран отличается очень густым, длинным и плотным волосным покровом. Благодаря хорошей терморегуляции и особому строению шерстного покрова эти животные свободно переносят семидесятиградусные морозы. Это указывает на исключительную приспособленность к суровым условиям, также необходимо подчеркнуть выносливость и неприхотливость к корму [10, 16].

Известны следующие подвидовые формы снежного барана: камчатский (*Ovis nivicola nivicola*) распространен на Камчатке, пугторанский (*Ovis nivicola borealis*) – водятся в горах северной ча-



Рис. 1. Самцы снежного барана-чубуку верховянской популяции (*Ovis nivicola lydekkeri*) (фото Кривошапкина А.А.)

Fig. 1. Males of the Verkhoyansk bighorn sheep-chubuku (*Ovis nivicola lydekkeri*) (photo by A.A. Krivoshapkin)

сти Сибири, охотский (*Ovis nivicola alleni*) – в Восточной Сибири, чукотский снежный баран (*Ovis nivicola tschukschorum*) – на территории Чукотки до Берингова пролива, корякский (*Ovis nivicola koriakorum*) – на Корякском нагорье, якутский (*Ovis nivicola lydekkeri*) широко распространен на севере Якутии [7,10].

Якутский снежный баран верховянской популяции обитает в более сглаженных горах, при сезонной смене местообитания он вынужден совершать довольно протяженные миграции (до 80–120 км), а в случае опасности весьма неохотно идет на скалы, как правило, ищет спасения в быстром и продолжительном беге по каменистым склонам. Эти черты наложили отпечаток на его морфологию. По типу телосложения верховянский снежный баран близок к архару – отличному бегуну по открытым горным склонам, а по строению костей конечностей: относительной ширине и толщине метаподий, отношению длины сегментов конечностей к сумме трех отделов, занимает промежуточное положение между центрально-азиатскими баранами (муфлоны, уриалы, архары), с одной стороны, и корякским снежным бараном и горными козлами, с другой [10].

Окраска волосяного покрова якутских снежных баранов отличается от других подвидов большей контрастностью. Например, в отличие от камчатского подвида у якутских баранов больше развито белое пятно на лбу, на переносье выражена темная поперечная полоса, светлая окраска брюха отделена от более темной спины разграничительной полосой, идущей от лопаток к задней

ноге. В пределах Верховянского хребта прослеживается тенденция посветления общей окраски меха с юга на север. В отличие от камчатских баранов якутские толстороги имеют достоверно меньшие костные стержни рогов, укороченную и более низкую морду, удлиненные носовые кости.

Длина тела самцов верховянских снежных баранов от 131 до 161 см, масса тела 56–81 кг, осенью вес тела отдельных крупных самцов достигает от 100 до 105 кг. Самки гораздо меньше самцов, длина тела 128–156 см, масса тела от 42 до 50 кг [10, 16].

У якутских баранов половая зрелость наступает в довольно раннем возрасте. По данным некоторых авторов, самки в полугодовалом возрасте уже приступают к размножению, у самца в этом возрасте в придатках семенников обнаруживается зрелая сперма. По наблюдениям А.А. Кривошапкина [10], гон начинается в середине ноября и продолжается до конца декабря. Беременность у снежных баранов в среднем длится около 190 дней, что намного больше, чем у других видов горных баранов. Рождаются ягнята с конца мая до конца июня [10].

Якутский подвид снежного барана населяет горные хребты Верховья – от Хараулахских гор на севере до хребтов Сетте-Дабан, Скалистый, Улахан-Бом, Сунтар-Хаята на юге, горную систему хребта Черского – от Полоусного хребта на севере до хребтов Улахан-Чистай, Тас-Кыстабыт и Оймяконского нагорья на юге. Населяет весь Момский хребет, также обитает в юго-восточной части Алданского нагорья. На юге Якутии, на Становом хребте, обитает снежный баран охотского подвида. На крайнем северо-востоке, в районе устья Колымы, на территорию Якутии (район речки Сухарная и горы Высокая) заходят чукотские бараны. По последним данным учета, численность снежного барана составляет около 45 тыс. особей [10].

Краткое обоснование выбора бурятской грубошерстной породы овец (буубэй) (по данным Билтуева С.И. [5])

В 1987–1989 гг. на базе Московской ветеринарной академии совместно с профессором Цырендондоковым Н.Д. проведены исследования генетического сходства снежного барана (чубуку) с породами овец, где было установлено, что наиболее генетически близким ему является бурятская грубошерстная порода овец (буубэй).

Таблица 1

Показатели основных промеров
взрослых баранов и маток бурятской породы (см)

Table 1

Indicators of the main measurements
of adult rams and females of the Buryat breed (cm)

Промер	Матки	Бараны
Высота в холке	66,7	71,5
Высота в крестце	68,8	73,6
Косая длина туловища	65,6	73,1
Обхват груди	88,8	104,7
Глубина груди	30,2	32,7
Ширина груди	20,7	25,2
Ширина в маклоках	18,4	22,9
Обхват пясти	8,3	8,9

В настоящее время выбранный тип овец представлен довольно крупными животными, крепкой конституции, пропорционально сложены, являются компактными и подвижными, с живым темпераментом и хорошо выраженными мясо-сальными формами телосложения. Голова средней величины, сухая, слегка горбоносая. Шея хорошо развита, средней длины. Грудь широкая и глубокая. Холка, спина и поясница широкие и ровные. Ноги средней длины, крепкие, с правильной постановкой. Хвост короткий и жирный в виде подушки, суживающийся к скакательному суставу. Основная окраска руна белая, кроющий волос на ногах, на ушах и морде белой и светло-серой окраски. Оброслость головы рунной шерстью – до затылочного гребня. Бараны и матки комолые. Овцы скороспелые. Система содержания овец – круглогодовая пастбищная, обусловленная малоснежной зимой и большими просторами естественных кормовых угодий Республики Бурятия. Гроушерстные овцы характеризуются достаточно хорошим развитием широтных и объемных промеров, свойственным животным мясо-сального направления продуктивности (табл. 1).

Показатели живой массы животных разного пола и возраста составляют, кг: бараны 76,7, матки 53,2, баранчики 55, ярки 43,9. Яркие к полуторалетному возрасту достигают 83,7–91,1 % от живой массы взрослых маток. Индексы телосложения по сбитости и массивности у взрослого поголовья достаточно высокие (табл. 2).

Основной кормовой базой полугроушерстных и гроушерстных овец служат природные

Таблица 2

Индексы телосложения
взрослых баранов и маток бурятской породы

Table 2

Body indexes of adult rams and females
of the Buryat breed

Индекс	Матки	Бараны
длинноногости	54,7	54,3
растянутости	98,4	102,2
сбитости	135,4	143,2
массивности	133,1	146,4
грудной	68,5	77,1
тазо-грудной	112,5	110,0
костистости	12,4	12,4
перерослости	103,1	102,9

пастбища, иногда в качестве зимних выпасов используются сенокосные угодья. Сено в кормлении у полугроушерстных овец используется в виде подкормки молодняку в зимнюю стужу, а маткам – в период случки и ягнения. Для содержания полугроушерстных овец нет надобности в капитальных помещениях.

Основу рациона бурятских полугроушерстных овец составляет пастбищный корм. В течение зимы в расчете на 1 голову расходуется 0,7 ц сена, заготовленного обычно на естественных сенокосах. Он скармливается молодняку в зимнюю стужу по 0,3–0,4 кг в день на голову, а маткам – перед ягнением и в начале лактации. Такая технология малозатратна, в наибольшей степени отвечает биологическим особенностям полугроушерстных и гроушерстных овец. Производство экологически чистой баранины на дешевых пастбищных кормах более полно отвечает требованиям рынка.

Важными адаптивными признаками полугроушерстных овец являются жировые отложения на хвосте в виде одной округлой или клинообразной подушки – энергетический запас, который используется при скудных кормовых условиях в зимний период. Крепкие ноги и прочные копыта позволяют добывать корм из-под снега.

Сравнительный анализ биологических и физиологических аспектов гроушерстной породы овец и якутского подвида снежного барана (*Ovis nivicola lydekkeri*)

Проведен сравнительный анализ биологических и физиологических аспектов выбранных

Таблица 3

**Сравнительный анализ биологических и физиологических аспектов
грубошерстной породы овец и якутского снежного барана (*Ovis nivicola lydekkeri*)**

Table 3

**Comparative analysis of the biological and physiological aspects
of the coarse-wooled breed of sheep and the Yakut bighorn sheep (*Ovis nivicola lydekkeri*)**

Показатель	Грубошерстная порода	Якутский снежный баран (<i>Ovis nivicola lydekkeri</i>)
Живая масса, кг:		
самца	76,7	100–130
самки	53,2	42–50
Высота в холке, см:		
самца	71,5	131–161
самки	66,7	60–70
Сроки гона	Ноябрь–январь	
Беременность, дней	150	В среднем 190
Сроки ягнения	Май–июнь	
Возраст половозрелости, лет	1,5	2,5

исходных родительских форм – грубошерстной породы домашних овец и якутского подвида дикого снежного барана (табл. 3). Живая масса у самок обоих видов составляет в среднем 50–53 кг, но имеются существенные различия по живой массе самцов. Так, если домашний баран грубошерстной породы весит в среднем 76,7 кг, то самец снежного барана-чубуку весит больше примерно на 50–60 кг. По телосложению дикий снежный баран более массивен, чем домашний баран грубошерстной породы.

Суягность у снежных баранов в среднем длится около 190 дней, что намного дольше, чем у других видов горных баранов и культурных домашних овец. У домашних овец суягность длится в среднем 150 дней. По времени гона имеется более выраженная сезонность, гон начинается в ноябре и продолжается до конца декабря–начала января. Грубошерстная домашняя овца достигает половозрелости к 18 мес. У молодняка якутских снежных баранов половая зрелость наступает в довольно позднем возрасте.

Сравнительный анализ биологических и физиологических аспектов выбранных исходных родительских форм – грубошерстной породы домашних овец и якутского подвида дикого снежного барана показал существенное сходство по некоторым показателям, что позволит применить метод гибридизации.

Опыт гибридизации в овцеводстве в условиях Якутии

В суровых природно-климатических условиях Республики Саха (Якутия) проводится уникальный опыт по гибридизации домашней овцы грубошерстной породы с диким снежным бараном якутской популяции (*Ovis nivicola lydekkeri*) с целью получения новых селекционных форм. В 2013 г. были получены два жизнеспособных гибрида – самка и самец, которых назвали овчубук (ОВца × ЧУБУКу). В настоящее время получены гибриды F1 (1/2 овца × 1/2 снежный баран) и F2 (3/4 домашняя овца × 1/4 дикий снежный баран) [15]. При этом второе поколение получено от гибридных самцов первого поколения, которые в возрасте 1,5 лет были использованы в случной кампании. В данной работе мы приводим некоторый обобщенный материал по результатам изучения гибридного потомства первого поколения, имеющим научный и практический интерес.

Рост и развитие гибридов

Средняя живая масса гибридов при рождении составила $2,65 \pm 0,19$ кг, тогда как у их сверстников «домашних» ягнят масса при рождении была выше на 29 % и составила $3,42 \pm 0,24$. Вариации показателя у гибридов составили от 2,23 до 3,24 кг, тогда как «домашние» ягнята были по массе были выровнены, колебания живой массы

Таблица 4

Динамика показателей с возрастом, кг

Table 4

Dynamics of parameters with age, kg

Показатель	Возраст, мес							
	при рождении		6		24		36	
	домашние ягнята (n = 6)	гибриды- овчубуки (n = 6)	домашние ягнята (n = 6)	гибриды- овчубуки (n = 6)	домашние ягнята (n = 6)	гибриды- овчубуки (n = 6)	домашние ягнята (самцы) (n = 6)	гибриды- овчубуки (самцы) (n = 6)
Высота в холке, см	35,2±0,97	37±0,71	65±0,71	62±0,71	81,3±2,57	69,75±1,5	86±2,78	74,3±2,13
Косая длина туловища, см	28,2±0,73	30±1,08	66,75±1,6	66,25±0,9	88,7±1,89	81,5±0,65	91,2±2,29*	75,1±1,78*
Обхват груди, см	31,4±0,51	34,25±1,2	74,25±3,0	77,25±0,5	100±1,32	93±1,29	103,0±2,8	104,7±2,3
Глубина груди, см	11,4±0,51	13±0,01	25,5±0,29	26,25±0,5	34,3±0,76	32,5±0,65	36,0±0,50	32,7±1,23
Ширина груди, см	6,8±0,20	7,25±0,25	15,75±0,5	17,5±0,29	22,0±0,99	22,0±0,41	21,7±1,04	24,9±0,78
Ширина в маклоках, см	7,8±0,37	7,5±0,29	16±0,58	16,5±0,29	21,66±1,4	20,7±0,82	22,8±0,58	21,9±1,63
Обхват пясти, см	4,9±0,1	5,12±0,13	7,5±0,01	7,5±0,29	9±0,01	8,4±0,24	11,0±0,1	8,8±0,72
Живая масса, кг	3,42±0,1	2,65±0,19	31,5±1,32	28,9±2,74	63±2,6	60±0,7	76,3±1,80*	81,0±1,72*

* $P < 0,05$.

составили 0,4 кг. Схожие данные приводятся в работе Шайдуллина И.Н. [19]. Маленькую живую массу гибридного потомства можно объяснить проявлением признака дикого предка, который отличается от домашних овец более подвижным образом жизни. При этом гибридное потомство за все время наблюдений также отличалось большей подвижностью, что приводит к более высоким расходам энергии, тогда как домашние овцы в ранний постнатальный период достаточно быстро набирают живую массу и являются скороспелыми. Только к 36 мес. гибриды достоверно превосходили по массе домашних овец и их можно отнести к позднеспелым (табл. 4).

По индексам телосложения гибриды достоверно превосходили домашних ягнят по длинноногости во все рассматриваемые периоды, а по индексу растянутости туловища, наоборот, уступали. Это указывает на сравнительно короткое туловище и относительную высоконогость у гибридов первого поколения, т. е. формат тела схож с экстерьером дикого снежного барана. Кроме того, у гибридов ушные раковины намного подвижнее, с хорошей пространственной локацией, а у самцов рога морфологически повторяют форму таковых дикого предка.

Генетические исследования гибридов первого и второго поколения

Род *Ovis* включает несколько видов, различающихся между собой по диплоидному числу хромосом: у снежного барана канадского муфлона и домашней овцы – $2n = 54$, у горного барана архара (аргали) – $2n = 56$, у уриала – $2n = 58$, у камчатского снежного барана – $2n = 52$, половые хромосомы идентичны половым хромосомам домашней овцы [3, 14]. У якутского снежного барана $2n = 52$ [10].

Кариотип домашней овцы содержит 27 пар хромосом. Из них 3 пары аутосом метацентрические, а 23 пары акроцентрики. Y-хромосома – метацентрик, X-хромосома – крупный акроцентрик [14].

Проведенные цитогенетические исследования показывают, что у гибридного потомства первого поколения (1/2 овца × 1/2 снежный баран) хромосомный набор состоял из 24 аутосом и 2 половых хромосом, диплоидное число у исследованных гибридов было равно $2n = 53$ (рис. 3).

У гибридов второго поколения (3/4 домашняя овца × 1/4 дикий снежный баран), полученных при спаривании домашних овец ($2n = 54$) с гибридными самцами первого поколения ($2n = 53$), наблюдаются различия по числу хромосом: у по-

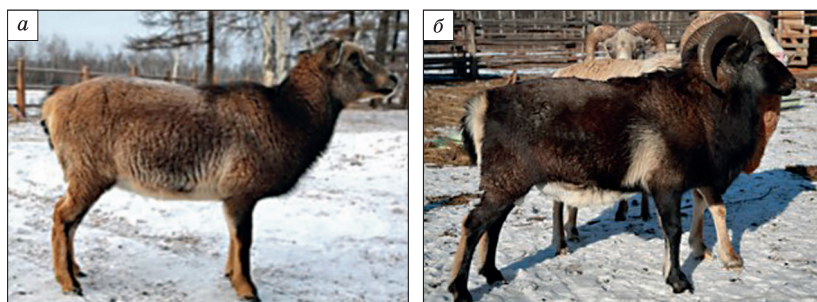


Рис. 2. Гибриды F1 (1/2 овца × 1/2 снежный баран): *a* – самка, 54 кг, 2 года; *б* – самец, 63 кг в 2 года

Fig. 2. F1 hybrids (1/2 sheep × 1/2 bighorn sheep): *a* – female, 54 kg, 2 years old; *б* – male, 63 kg 2 years old

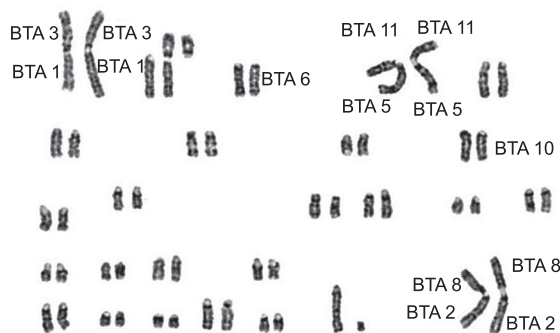


Рис. 3. Кариотип гибридного самца F1 (1/2 овца × 1/2 снежный баран).

Fig. 3. F1 hybrid male karyotype (1/2 sheep × 1/2 bighorn sheep).

ловины гибридного поголовья второго поколения кариотип состоит из 25 аутосом и 2 половых хромосом ($2n = 54$), у другой половины – 24 аутосом и 2 половых хромосом ($2n = 53$). Полученные результаты свидетельствуют о существенных отличиях в хромосомном наборе гибридов первого и второго поколения от исходных форм, требующих дополнительных исследований.

Этологическое поведение и некоторые особенности гибридных животных

Формирование этологических реакций идет под влиянием как внешних, так и внутренних факторов. Этологические наблюдения проведены с учетом влияния различных абиотических факторов, в том числе выстраивание отношения с человеком во взаимосвязи с приручением, подражание поведению матери, иерархические связи со сверстниками. Для создания оптимальных условий выращивания гибридов был построен специальный небольшой вольер с площадью 25×25 м, где содержались все изучаемые жи-

вотные – гибридные и домашние ягнята со своими матерями.

В молочный период характерным отличием поведения гибридных ягнят была частота и краткость сосательного процесса, который длился всего по 15–17 с через каждые 10–15 мин, тогда как у их сверстников ягнят процесс сосания длился около 1,5–2 минут, с промежутками в 45–60 минут. У домашних ягнят дневной сон между кормлениями был более крепкий и глубокий, при этом человек мог незаметно для спящего ягненка спокойно подойти, у гибридов же сон был «поверхностный», как бы «полудрема», и при малейшем приближении или шорохе ягненок незамедлительно вставал. Скорее всего, это может быть связано с инстинктом самосохранения, характерным для диких животных, в любое время при появлении опасности готовых к бегству. Баскин Л.М. установил, что на формирование поведения копытных в значительной мере влияет подражание поведению родителей [4]. В наших наблюдениях в раннем постнатальном периоде гибриды и ягнята, держась рядом со своими матерями, активно следили за ними и повторяли их поведение. Если овцематка не боясь подходит к человеку, то ее ягненок также смело подходит к человеку, не чувствуя опасности, если же овцематка пуглива и все время отбегает при приближении персонала, то и ее детеныш сразу же следует за ней, получая сигнал тревоженности. Таким образом мать как бы передавала свой опыт и отношение к источнику опасности своему детенышу. Очевидно было, что чем меньше территория содержания гибридов, тем выше вероятность их приручения. Кроме того, проявления агрессивности, пугливости, дикости, присущие гибридам, полученным при ранее проведенных работах, у гибридного по-



Рис. 4. Ягнята в недельном возрасте: *а* – гибрид – овчубук; *б* – домашние ягнята

Fig. 4. Lambs at a week of age: *a* – hybrid – ovchubuk; *б* – domestic lambs

томства, полученных в этом проекте, не зафиксировано. Мы считаем, что приручение гибридов к человеку было эффективным за счет подражания поведению матери-овцы, заблаговременно прирученной к человеку.

Подмечен интересный факт, когда гибриды-овчубуки в первые часы сразу после рождения и в последующем для сна забирались на спину своей матери, при этом вначале ответная реакция овцематки была скорее отрицательной, но со временем она и вовсе не реагировала на такое поведение своего гибридного потомства.

При совместном содержании потомства обеих групп на общей территории гибриды чаще всего держались отдельной группой. Гибриды-овчубуки за все время наблюдений отличались повышенной подвижностью, активностью в общении, любопытством к окружающему, обладали отличной ориентацией в пространстве, пристально наблюдали за незнакомыми объектами (собака, человек, штатив с фотоаппаратом, любые новые предметы, появляющиеся в поле их зрения), при сохранении элементов осторожности смело могли подойти, чего не наблюдали у сверстников ягнят. При этом следует отметить у гибридов высокую прыгучесть и способность менять траекторию при прыжке с полным разворотом. Подчеркнута особая «молчаливость» ги-

бридов при проведении любых манипуляций, связанных со взвешиванием, взятием промеров, сбором биоматериала, при проведении которых гибриды, даже если их брали на руки, не издавали никаких звуков, чего нельзя сказать об их сверстниках.

Фенотипическая схожесть гибридов со снежным бараном якутской популяции также проявлялась в выраженности их окраски. Так, все гибриды, рожденные от овцематок бурятской грубошерстной породы, имели сложную контрастность окраса туловища: верхняя часть, грудь и конечности спереди имеют темный оттенок, брюшинная часть, задняя сторона конечностей светлая, у всех отмечено околехвостовое светлое зеркало. Окрас туловища у некоторых был светло-охристый, у некоторых темно-бурый. Присущие снежному барану темный «ремень» на спине и белые пятна на голове отмечены в раннем возрасте. Окраска туловища и головы меняет тональность к осветлению в зимний период, при формировании зимнего меха увеличивается количество белых волос в шерсти. Одна из отличительных особенностей гибридов – их свойство линять. Ежегодно в конце мая гибриды сбрасывали зимнюю шерсть, заменяя его на короткий кроющий волос, тогда как их сверстники подвергались ежегодной стрижке в начале летнего периода.

Особенности питания гибридов

Если вопросы технологии кормления в овцеводстве изучены более широко, то для выяснения особенностей питания дикого снежного барана якутской популяции, являвшегося одной из родительских исходных форм при получении гибридного потомства, был проведен анализ литературных источников. Полный список кормовых растений, поедаемых снежным бараном, состоит из 200 видов, включает злаковые, осоковые и бобовые травянистые растения, также значительна роль древесных форм, особенно хвойных и лиственных кустарников и деревьев. Кроме того, рацион дикого барана включает и низшие растения, такие как мхи, ягель и грибы. Особую роль в осенне-зимне-весеннее время в питании дикого снежного барана играет ягель. Авторы считают приспособленность снежного барана к питанию в зимний период ягелем своеобразным феноменом, возникшим, по-видимому, в процессе ос-

воения предками животного каменистых ландшафтов, где лишайниковые ассоциации занимали основное место [10]. Таким образом, вопросы специфики питания гибридных животных в плане наследования и закрепления некоторых особенностей питания дикого предка представляют особый интерес.

Основной дневной рацион животных содержал 0,87 ЭКЕ, сухого вещества 0,99 кг, переваримого протеина 87 г и сырой клетчатки 243 г, согласно установленным в овцеводстве нормам кормления. Во время опыта гибридам и домашним овцам, содержащимся вместе, дополнительно давали нетрадиционные для овец корма в виде ягеля и березовых веток. Поедаемость кормов оценивали по их остаткам.

Гибридные животные помимо основного рациона, полностью съедали дополнительные нетрадиционные корма, тогда как домашние овцы поедали только веточный корм, ягель оставался нетронутым. За счет поедания дополнительных нетрадиционных кормов гибридные животные получали больше питательных веществ, особенно по обменной энергии, по сырой клетчатке и минеральным веществам.

В структуре рациона ягель у гибридных животных занимал 9,6 %, что указывает на схожесть с особенностями питания их предка – дикого снежного барана. Такое разнообразие в питании объясняется наследственной обусловленностью, большей подвижностью гибридных животных и интенсивным ростом в постнатальный период. Следует отметить, что с 15 месяцев гибридов содержали в открытом вольере в течение всего зимнего периода, при свободном доступе к кормам (сену, веточному корму, ягелю).

Качество спермы и фертильность гибридов

Одной из самых основных проблем гибридизации является возможная стерильность или пониженная фертильность гибридов. В связи с этим в течение нескольких лет проводили оценку качества спермопродукции от гибридов первого поколения.

По морфологическим свойствам сперма гибридов от спермы домашних баранов отличалась объемами эякулята – в у гибридов в среднем 1,9, у домашних – 0,6 см³ и по концентрации – у гибридов 0,8 млрд/см³ у гибридов против 1,8 млрд/см³ у домашних. По другим показателям существенных различий не выявлено: у животных обеих групп сперма внешне

Таблица 5

**Рацион подопытных животных
в зимний период с учетом
нетрадиционных кормов**

Table 5

**Nutritional value of the diet
of experimental animals in the winter period,
taking into account non-traditional feeds**

Корм	Группа	
	Контрольная (домашние бараны)	Опытная (гибриды)
Сено, кг	1,2	1
Овес, кг	0,2	0,2
Минеральная подкормка, г	Вволю	Вволю
Веточный корм, кг	0,7	1
Ягель, кг	—	0,3
В рационе содержится:		
ЭКЕ	0,84	0,90
Обменной энергии, мДж	13,33	15,80
Сухое вещество, г	1810,2	2151,0
Переваримый протеин, г	81,5	87,2
Сырая клетчатка, г	547,1	664,4
Сахар, г	31,2	35,1
Кальций, г	7,73	9,56
Фосфор, г	7,56	8,22



Рис. 5. Гибриды-овчубуки F1 (1/2 овца × 1/2 снежный баран) в зимний период Якутии

Fig. 5. Ovchubuk hybrids F1 (1/2 sheep × 1/2 bighorn sheep) in the winter period in Yakutia

была однородной, нормальной для эякулята вязкости, без примеси крови и гноя, светло-матового цвета с желтоватым оттенком.

В целом, несмотря на незначительную разницу, сперма гибридных самцов-овчубуков по своим биологическим показателям является полноценной и имеет хорошие качественные показатели, что указывает на фертильность гибридных животных.

С целью выявления фертильности полученных при гибридизации самцов-овчубуков первого поколения в возрасте 1,5 лет с октября до конца ноября использовали в случной кампании. Всего было составлено три группы маток, которых закрепили за тремя гибридными самцами. Овцематки в половой охоте выявлялись ежедневно бараном-пробником. Через 35 дней проводили УЗИ-диагностику, при которой суягность по трем группам достоверно установлена у 87 % поголовья.

Заключение

В последнее время приоритетное значение приобретает рациональное использование имеющихся генетических ресурсов овцеводства и получение на их основе новых отечественных селекционных форм для восстановления пород

овец мясошерстного направления, в том числе пригодных для разведения на малоиспользуемых территориях страны со сложными условиями. Для выполнения поставленных задач в ускоренные сроки необходимо применение генофонда оригинальных отечественных пород, а также, с использованием современных репродуктивных технологий, генофонда диких животных, в частности снежных баранов. Так, при скрещивании овец грубошерстной породы с диким снежным бараном (чубуку) якутской популяции (*Ovis nivicola lydekkeri*) получены жизнеспособные фертильные гибриды обоих полов, отличающиеся биологическими свойствами и желательными признаками и являющиеся абсолютно новой селекционной формой в овцеводстве, приспособленной к экстремальным условиям Якутии.

Список литературы / References

1. Багиров В.А. Биотехнологические аспекты сохранения генетических ресурсов животных: Автореф. дис. ... докт. биол. н. Дубровицы. 2004. 44 с.
[Bagirov V.A. Biotechnological aspects of conservation of animal genetic resources. Abstract of the dissertation. ... Doctor of Biological Sciences. Dubrovitsy. 2004. 44 p. (In Russ.)]
2. Багиров В.А. и др. Сохранение биоразнообразия животного мира и использование отдаленной ги-

бридизации в животноводстве. *Достижения науки и техники АПК*. 2009. (7):54–56.

[Bagirov V.A. et al. Conservation of the biodiversity of the animal world and the use of remote hybridization in animal husbandry. *Achievements of science and technology of the agro-industrial complex*. 2009. (7):54–56. (In Russ.)]

3. Багиров В.А., Охлопков И.М., Зиновьева Н.А. *Снежный баран Якутии: генетическое разнообразие и пути сохранения генофонда*. Дубровицы: ВИЖ им. Л.К. Эрнста; 2016. 272 с.

[Bagirov V.A., Okhlopkov I.M., Zinovieva N.A. *Snow sheep of Yakutia: genetic diversity and ways to preserve the gene pool*. Dubrovitsy. Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst; 2016. (In Russ.)]

4. Баскин Л.М. *Поведение копытных животных*. М.: Наука; 1976. 296 с.

[Baskin L.M. *The behavior of ungulates*. Moscow: Nauka; 1976. (In Russ.)]

5. Билтуев С.И. *Создание типа и породы овец в специфических экологических условиях Западной Сибири и Республики Бурятия*. Улан-Удэ: Изд-во БГСХА им. В.Р. Филиппова; 2010. 240 с.

[Biltuev S.I. *Creation of the type and breed of sheep in the specific environmental conditions of Western Siberia and the Republic of Buryatia*. Ulan-Ude: Publishing house of Buryat State Academy of Agriculture named after V.R. Filippov; 2010. (In Russ.)]

6. Графодатский А.С. *Хромосомы сельскохозяйственных и лабораторных млекопитающих: Атлас*. Новосибирск: Наука; 1988. 127 с.

[Grafodatsky A.S. *Chromosomes of agricultural and laboratory mammals: Atlas*. Novosibirsk: Nauka; 1988. 127 p. (In Russ.)]

7. Железнов-Чукотский Н.К. *Экология снежных баранов Северной Азии*. М.: Наука; 1994. 256 с.

[Zheleznov-Chukotsky N.K. *Ecology of snow sheep in North Asia*. Moscow: Nauka; 1994. (In Russ.)]

8. Иванов И.И. *Избранные труды*. М.: Колос; 1970. 319 с.

[Ivanov I.I. *Selected works*. Moscow: Kolos; 1970. 319 p. (In Russ.)]

9. Иванова Н.В., Максимов А.Г. *Гибридизация в животноводстве*: Донской ГАУ; 2019. 134 с.

[Ivanova N.V., Maksimov A.G. *Hybridization in animal husbandry*. Don State Agrarian University; 2019. 134 p. (In Russ.)]

10. Кривошапкин А.А., Яковлев Ф.Г. *Снежный баран Верхоянья*. Якутск: Сахаполиграфиздат; 1999. 136 с.

[Krivoshapkin A.A., Yakovlev F.G. *Snow sheep of Verkhoyansk*. Yakutsk: Sakhapoligraphizdat; 1999. 136 p. (In Russ.)]

11. Лесин С. А. *Криоконсервация семени для сохранения и рационального использования биоразнообразия овец*: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. п. Дубровицы; 2010. 17 с.

[Lesin S.A. *Cryopreservation of the seed for the conservation and rational use of sheep biodiversity*. Abstract of the dissertation ... Candidate of Biological Sciences. Dubrovitsy; 2010. 17 p. (In Russ.)]

12. Мантейфель П.А. *Создадим новую породу северной овцы. Каракулеводство и звероводство*. 1957; (2):43–45.

[Manteifel P.A. To create a new breed of northern sheep. *Karakul breeding and fur farming*. 1957; (2): 43–45 p. (In Russ.)]

13. Мачахтыров Г.Н., Владимиров Л.Н., Мачахтырова В.А., Смирнов П.Н., Корякина А.Е. Особенности поведенческих реакций гибридов-овчубуков первого поколения в условиях центральной зоны Якутии. *Вестник НГАУ*. 2015. (1): 181–183.

[Machakhtyrov G.N., Vladimirov L.N., Machakhtyrova V.A., Smirnov P.N., Koryakina A.E. Peculiarities of behavioral responses of first generation ovchubuk hybrids in the conditions of the Central Zone of Yakutia. *Vestnik NGAU*. 2015. (1): 181–183 p. (In Russ.)]

14. Насибов Ш. Н. и др. Сохранение и рациональное использование генофонда снежного барана. *Достижения науки и техники АПК*. 2010; (12):63–64.

[Nasibov Sh.N. et al. Preservation and rational use of the bighorn sheep gene pool. *Achievements of science and technology of the agro-industrial complex*. 2010; (12):63–64. (In Russ.)]

15. Попов С.В., Ильченко О.Г. *Методические рекомендации по этологическим наблюдениям за млекопитающими в неволе*. М.: Московский зоопарк; 1990. 76 с.

[Popov S.V., Ilchenko O.G. *Guidelines for ethological observations of mammals in captivity*. Moscow: Moscow Zoo; 1990. (In Russ.)]

16. Ревин Ю.В., Сопин Л.В., Железнов Н.К. *Снежный баран*. Новосибирск: Наука; 1988. 193 с.

[Revin Yu.V., Sopin L.V., Zheleznov N.K. *Snow sheep*. Novosibirsk: Nauka, Siberian branch; 1988. (In Russ.)]

17. Серебровский А.С. *Гибридизация в животноводстве*. М.; Л.; 1935. 289 с.

[Serebrovsky A.S. *Hybridization in animal husbandry*. Moscow; Leningrad; 1935. (In Russ.)]

18. Шайдуллин И.Н. Гибриды плодовицы. *Овцеводство*. 1992. (3):18–21.

[Shaidullin I.N. *Hybrids are fertile*. Sheep breeding. 1992. (3):18–21 p. (In Russ.)]

19. Шайдуллин И.Н. *Биологические особенности акклиматизации овец и гибридизации со снежным бараном Ovis nivicola nivicola в условиях Камчатки*: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. Дубровицы; 1994. 44 с.

[Shaidullin I.N. *Biological features of acclimatization of sheep and hybridization with the bighorn sheep Ovis nivicola nivicola in the conditions of Kamchatka*. Abstract of the dissertation ... Doctor of Biological Sciences. Dubrovitsy; 1994. 44 p. (In Russ.)]

20. Шишова Н.В. *Криоконсервация эпидидимального семени млекопитающих с разным сезонным ритмом репродукции в целях сохранения биоразнообразия*: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Дубровицы; 2006. 22 с.

[Shishova N.V. *Cryopreservation of the epididymal semen of mammals with different seasonal rhythms of reproduction in order to preserve biodiversity*. Abstract of the dissertation ... Candidate of Biological Sciences. Dubrovitsy; 2006. 22 p. (In Russ.)]

21. Эрнст Л.К., Зиновьева Н.А. *Биологические проблемы животноводства в XXI веке*. М.: РАСХН; 2008. 508 с.

[Ernst L.K., Zinovieva N.A. *Biological problems of animal husbandry in the 21st century*. Moscow: RAAS; 2008. 508 p. (In Russ.)]

22. ГОСТ 32200-2013. Межгосударственный стандарт. Средства воспроизводства. Сперма баранов.

[GOST 32200-2013. Interstate standard. Means of reproduction. Sheep sperm. (In Russ.)]

Об авторах

ВЛАДИМИРОВ Леонид Николаевич, чл.-к. РАН, доктор биологических наук, Author ID: 57004575000, <https://orcid.org/0000-0001-6026-3679>, e-mail: vladimirovln@mail.ru

МАЧАХТЫРОВ Григорий Николаевич, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Researcher ID: ABA-4349-2021, <https://orcid.org/0000-0002-8328-4744>, e-mail: aylga@mail.ru

МАЧАХТЫРОВА Варвара Анатольевна, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Researcher ID: ABA-4356-2021, <https://orcid.org/0000-0002-0988-0943>, e-mail: varvara-an@mail.ru

ШАДРИНА Яна Лаврентьевна, кандидат ветеринарных наук, научный сотрудник, Researcher ID: J-6517-2018, <https://orcid.org/0000-0002-4477-6332>, e-mail: yanalina_12@mail.ru

АНДРЕЕВА Марина Витальевна, кандидат ветеринарных наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0009-0004-1291-9126>, e-mail: amv-65@mail.ru

About the authors

VLADIMIROV, Leonid Nikolaevich, Dr. Sci. (Biology), Correspondent Member of RAS, Author ID: 57004575000, <https://orcid.org/0000-0001-6026-3679>, e-mail: vladimirovln@mail.ru

МАЧАХТЫРОВ, Grigory Nikolaevich, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, Researcher ID: ABA-4349-2021, <https://orcid.org/0000-0002-8328-4744>, e-mail: aylga@mail.ru

МАЧАХТЫРОВА, Varvara Anatolyevna, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, Researcher ID: ABA-4356-2021, <https://orcid.org/0000-0002-0988-0943>, e-mail: varvara-an@mail.ru

SHADRINA, Yana Lavrentievna, Cand. Sci. (Veterinary), Researcher, Researcher ID: J-6517-2018, <https://orcid.org/0000-0002-4477-6332>, e-mail: yanalina_12@mail.ru

ANDREEVA, Marina Vitalievna, Cand. Sci. (Veterinary), Leading Researcher, <https://orcid.org/0009-0004-1291-9126>, e-mail: amv-65@mail.ru

Поступила в редакцию / Submitted 24.01.2023

Поступила после рецензирования / Revised 14.02.2023

Принята к публикации / Accepted 24.02.2023

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 539.3; 539.42

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-156-171>

Оригинальная статья

Многоуровневый подход к моделированию процессов разрушения материалов с субмикроструктурой, применимых в условиях Арктики и Субарктики

В. В. Лепов^{✉,1}, С. М. Бисонг², Р. Н. Голых^{3,4}

¹Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН,
г. Якутск, Российская Федерация

²Университет Дчанга, Университет Дуаля, Камерун

³Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, Российская Федерация

⁴Бийский технологический институт (филиал), г. Бийск, Российская Федерация

✉ wisecold@mail.ru

Аннотация

Представлен краткий обзор исследований в области многомасштабного моделирования процессов разрушения материалов с микроструктурой, применимых в условиях Арктики и Субарктики. Ряд модельных задач рассматривается с точки зрения макроскопической прочности и роста магистральной трещины путем накопления микроскопических дефектов, реализации иерархических процессов разрушения по механизму образования, роста и слияния микротрещин и микропор. Так, для процесса разрушения образцов из пористого бетона, модифицированного органическими волокнами для повышения его потребительских качеств, проведено моделирование роста трещин, которое показало снижение трещиностойкости материала с ростом содержания фибры. Для оценки изгибных прочности и модуля упругости использовались испытания на трехточечный изгиб, также определены прочность и модуль упругости на сжатие. Увеличение концентрации волокон приводит к уменьшению предела прочности и модуля упругости на сжатие. Анализ поверхности изломов позволил выявить механизм распространения трещин путем коалесценции микропор на волокнах. Основой моделирования являлся экспериментально обоснованный критерий концентрационного разрушения при образовании трещин, основанный на теории перколяции. Также осуществлено многоуровневое моделирование – макроскопическое конечно-элементное и стохастическое на микро- и мезомасштабе - разрушения при изгибе балки из дерева. Особенностью деревянных конструкций является анизотропия поведения материала к направлению нагрузки. Учитывалась микроструктура дерева Bilinga, для древесины которой построена иерархия пространственных и временных масштабов процесса. Определены скорости роста трещины на различных масштабах, которые сопоставлены с макроскопическим расчетом. Еще одна задача – определение зависимости скорости трещины в плотном грунте при воздействии ультразвукового ударника при отсутствии влаги. С помощью стохастического моделирования роста трещины в массиве микропор выявлена зависимость скорости разрушения от параметров ультразвукового воздействия и амплитуды импульсов.

Ключевые слова: прочность, многоуровневое моделирование, изгиб, разрушение, трещина, КЭ-моделирование, стохастическое моделирование, модифицированный бетон, пористость, прочность древесины, разрушение грунта, ультразвуковое бурение

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук (проект FWRS-2021-0039) и Российского фонда фундаментальных исследований и Государственного фонда естественных наук Китая (проект 21-52-53036) в части моделирования процесса разрушения грунта, с использованием оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН, проект №13.ЦКП.21.0016.

Для цитирования: Лепов В.В., Бисонг С.М., Голых Р.Н. Многоуровневый подход к моделированию процессов разрушения материалов с субмикроструктурой, применимых в условиях Арктики и Субарктики. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(1):156–171. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-156-171>

Foundation of multilevel approach to fracture modeling for materials with submicrostructure applicable for Arctic and Subarctic environment

V. V. Lepov^{✉,1}, S. M. Bisong^{2,4}, R. N. Golykh^{3,4}

¹Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

²LMSP University of Dschang, ENSET Douala, Cameroon

³Polzunov I.I. Altai State Technical University, Barnaul, Russian Federation

⁴Biysk Technological Institute (branch), Biysk, Russian Federation

✉wisecold@mail.ru

Abstract

A short review of research on multiscale modeling of the fracture processes of heterogeneous materials with submicrostructures applicable to Arctic and Subarctic environments is presented. The results of solving a number of model problems, both in terms of macroscopic strength and main crack growth, and describing the accumulation of microscopic defects and hierarchical fracture processes by the mechanisms of formation, growth, and fusion of secondary and microcracks, and microscopic pores are provided. Thus, for the fracture process of samples of porous concrete modified with oil palm fruit fibers to improve its consumer qualities, a simulation of crack growth was conducted, which showed a decrease in the crack resistance of the material with increasing fiber content. A three-point bend test was used to evaluate the bending strength and modulus of elasticity, and the compressive strength and modulus of elasticity were determined. An increase in the fiber content led to a decrease in the compressive strength and modulus of elasticity. The fracture surface analysis revealed the mechanism of crack propagation through the coalescence of micropores. The basis of the modeling was an experimentally substantiated criterion for concentrated fractures during crack formation based on percolation theory. Macroscopic finite-element and stochastic modeling of fractures during the bending of a beam made of wood have also been carried out. For wooden structures, the peculiarity is the anisotropic behavior of the material in the loading direction. The structure of the Bilinga tree timber at the mesoscopic and microscale levels was considered, and a hierarchy of the spatial and temporal scales of the fracture process was constructed. The crack growth rates at different scales were determined and compared with macroscopic FE simulations. Another task was to determine the dependence of the crack growth rate in the soil, such as regolith, under the influence of an ultrasonic impactor. Stochastic modeling of the crack growth in the array of micropores revealed the crack growth rate dependence on the ultrasonic transmitter beater parameters and pulse amplitude.

Keywords: strength, multilevel modeling, bending, fracture, crack, finite element modeling, stochastic modeling, modified concrete, porosity, wood strength, ground disintegration, ultrasonic drilling

Funding. This study was supported by the Program of Fundamental Scientific Research of the State Academies of Sciences (project number FWRS-2021-0039) and the Russian Foundation for Basic Research and the State Fund of Natural Sciences of China (project number 21-52-53036) in terms of modeling the process of soil destruction using the equipment of the Core Shared Research Facility (CSRF) of the FRC YaSc SB RAS (project number 13.CSRF.21.0016).

For citation: Lepov V.V., Bisong S.M., Golykh R.N. Foundation of multilevel approach to fracture modeling for materials with submicrostructure applicable for Arctic and Subarctic environment. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(1):156–171. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-156-171>

Введение

Многомасштабные методы численного моделирования [1–4] стали широко применяться как инструмент оперирования на нескольких масштабах и позволили уменьшить степени свободы на основе организации локальных автономных вычислений. С другой стороны, эти методы позволяют получить строгие макроскопические уравнения для многомасштабных задач без разделения процессов их решения и строгих гра-

ничных условий. Сама концепция многомасштабного моделирования появилась в последние десятилетия для описания механического, физического или химического поведения на уровне сплошного тела по данным, получаемым из численных моделей на более тонких масштабных уровнях в системе, не прибегая к эмпирическим конститутивным моделям. Было разработано большое количество методов, использующих множество подходов для

связывания пространственных и временных шкал [5–7].

Одной из ключевых концепций многомасштабного моделирования в последние годы является применение различных методов сокращения сложности таких моделей, в частности, применением специальных численных методов. Однако следует сделать некоторые терминологические замечания. *Многоуровневый* подход применяется в системном анализе, и связан с понятием *уровней* (не обязательно четко разграниченных по масштабам пространства или времени) *системы* (от греч. целое, составленное из частей; соединение), или совокупности элементов, находящихся в отношениях и связях друг с другом, образующих определенную целостность, единство. В данной работе имеется в виду сложная техническая система (СТС), или человеко-машинная система (ЧМС), например, транспортная, состоящая из трубопроводов, насосных станций, резервуаров, операторов и т. д.

Хотя линейная механика разрушения (ЛМР) рассматривает только сплошные твердые тела и не предусматривает рассмотрение иерархии структурных уровней в системах; даже для упрощенного описания кинетики трещин и разрушения неоднородных систем с внутренней микроструктурой и фазовыми переходами необходимо введение многомасштабного рассмотрения (рис. 1).

Отсюда видны и различия методов многомасштабного моделирования и системно-структурного многоуровневого подхода. Многоуровневый подход позволяет обосновать иерархию моделей, облегчающих анализ и разработку новых технических и человеко-машинных систем, менее подверженных неблагоприятным факторам окружающей среды, а также позволяющим, насколько это возможно, обеспечить целостность и ресурс, работоспособность и безопасность СТС в условиях глобального изменения климата и возрастания роли человеческого фактора.

Построение теоретических, математических и численных моделей процессов образования и роста трещин, разрушения материалов с целью оценки и прогноза их длительной прочности, а также надежности и ресурса изделий из них, эксплуатирующихся в том числе и в экстремальных климатических условиях, требует знания структуры и механизмов накопления повреждений на различных масштабных уровнях.

Хотя в последние десятилетия наибольшее распространение получили КЭ-модели макроскопического уровня, наглядно демонстрирующие процессы, происходящие при деформировании и разрушении образцов, деталей и узлов [8–10], а также специализированные конечно-разностные модели, в основном теплофизических и мультифизических процессов [11–13], их основными

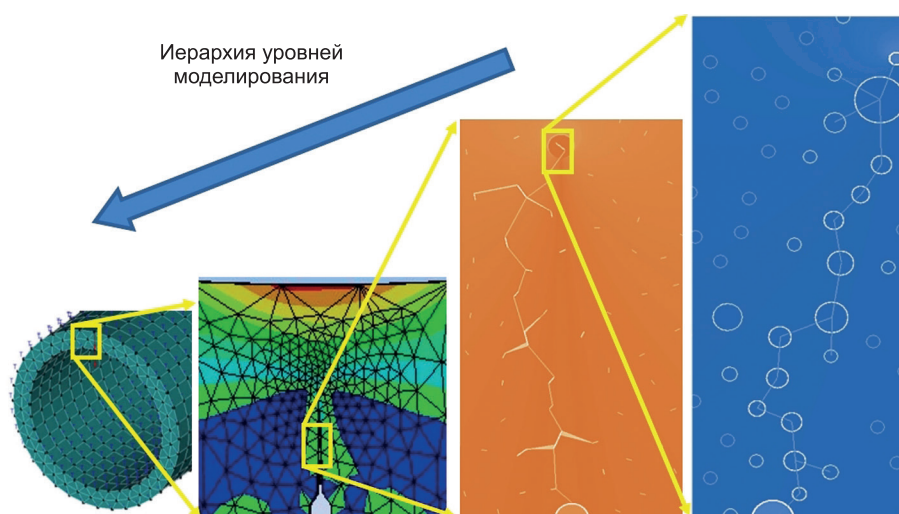


Рис. 1. Уровни моделирования разрушения материалов: *а* – КЭ-модель стенки нагруженной трубы на уровне детали (~0,1 м); *б* – КЭ-модель роста магистральной трещины на макроуровне (~0,01 м); *в* – стохастическая модель роста основной трещины на мезоуровне (~0,1 мм); *г* – стохастическая модель слияния микропор на микроуровне (~1÷10 мкм)

Fig. 1. Hierarchy of the multilevel modeling scales of materials: *a*) FE-model of the loaded pipe wall (~0.1 m); *б*) FE-model of the main crack growth on macroscale (~1 cm); *в*) stochastic model of main crack grows on mesoscale (0.1 mm); *г*) on microscale (1–10 μm)

недостатками остаются трудоемкость учета реальной структуры материалов, границ разделов, фазовых переходов, проблемы пересчета всей сетки при изменении формы образца.

Поэтому в ряде случаев представляется оправданным применение дискретных стохастических моделей [14–17], основанных либо на тех же фундаментальных закономерностях, либо на их дискретных аналогах с учетом достоверно установленных статистических распределений. При этом структура материала естественным образом входит в основу расчета. В основном такие модели применяются на мезо- и микроскопическом структурных уровнях [14, 15, 17], на масштабе вершины магистральной трещины [16], вторичных микротрещин, микропор и дислокаций [14].

Цель настоящей работы заключалась в построении общего алгоритма и решении задач многоуровневого моделирования процессов разрушения материалов на основе анализа структуры и выявления закономерностей развития дефектов в таких материалах, как модифицированный органическим наполнителем пористый бетон, древесина Билинга и лунный грунт (реголит).

Модифицированный органическими наполнителями бетон находит применение в строительстве различных сооружений, включая фундаменты и стены жилых зданий. Несмотря на снижение прочностных свойств, в ряде случаев повышаются демпфирующие, теплофизические и звукоизолирующие свойства бетона, что увеличивает сферу применения его для сейсмоопасных районов и регионов с экстремальным климатом.

Древесина Билинга используется для изготовления строганого шпона, внутренних и наружных облицовочных панелей, столярных изделий, шпал, столбов, столярных и свайных конструкций причалов, пристаней, платформ, подоконников, различной мебели и паркета. Используется для декоративной отделки интерьеров и экстерьеров помещений, террас и садовых объектов; отлично подходит для покрытия полов в жилых и производственных помещениях, транспортных средствах и контейнерах. Благодаря высокому содержанию танина и натурального масла в древесине, плотное дерево устойчиво к самым разным погодным и климатическим условиям, солнечному свету и морской воде, низкой и высокой температуре. Именно поэтому оно отлично подходит для строительства мостов и морских судов, особенно плашкоутов барж и их палуб.

Увеличение внимания к исследованию других планет и малых небесных тел вызывается

перспективами исчерпания земных минеральных ресурсов и планируемому освоению человеческой цивилизацией космического пространства, в частности, Солнечной системы и других звездных систем согласно концепции глобального эволюционизма В.И. Вернадского и К.Э. Циолковского. Для этого необходимы изучение свойств грунтов других планет и создание средств их переработки и использования.

1. Фундаментальные принципы, лежащие в основе многоуровневого моделирования материалов с изменяющейся микроструктурой и фазовыми переходами

Принцип многоуровневости позволяет исследовать иерархии связей структурных компонентов системы, подразделяя их по критериям вложенности на высший, средний и низший уровни управления системой, при этом свойства системы будут разделяться на общие, особенные и единичные (уникальные для системы). Структура системы будет определяться связями подсистем, частей и других элементов системы, таких как фазовый состав и вещество. При применении принципа многоуровневости на первом уровне описываются внутренние качества и свойства системы, а также те признаки, которые выделяют данную систему среди других, внутренние источники развития системы и свойства исследуемой системы как части более сложной системы. Для систем более высокого порядка характерно то, что они не имеют никакого отношения к свойствам, организации и структуре систем более низкого порядка, однако вбирают в себя свойства этих, являясь внешними по отношению к ним.

Создание новых материалов всегда представляло собой трудную задачу, связанную с решением ряда комплексных междисциплинарных задач. Различными принципами руководствуются химия и материаловедение, черная и цветная металлургия, нанотехнологическая отрасль, однако общими остаются фундаментальные физические законы, обуславливающие предельные характеристики и оптимальные соотношения свойств конструкционных и функциональных материалов. В настоящее время мир поставлен перед необходимостью решения ряда насущных вопросов, связанных с безопасностью создаваемых и уже используемых в сложных технических системах материалов, включая энергетические комплексы и протяженные транспортные системы, в том

числе предназначенные для экстремальных климатических условий Севера и Арктики. Анализ этих факторов с позиций современного состояния фундаментальной науки приводит к обоснованию системно-структурного подхода к проектированию и созданию материалов, предназначенных для экстремальных условий эксплуатации [18].

Кроме известных механических и физико-химических принципов создания материалов [19, 20], в связи с развитием новых возможностей компьютерного конструирования, молекулярных и квантовых технологий большое значение приобретают идеи системно-структурного подхода [21], базирующегося на наиболее общих экстремальных принципах, теореме Нётер, синергетике, теории динамического хаоса и теории фазовых переходов.

В то же время в рамках развиваемой концепции 4-й промышленной революции во всем мире для создания новых материалов активно используются принципы машинного обучения как технологии искусственного интеллекта [22, 23].

Хотя последние представляются весьма перспективными для ряда специальных задач, таких как ускоренное построение эмпирических регрессионных зависимостей, оптимизация испытаний, классификация и кластеризация, а также оценка вероятностей для разработки новых составов оксидных соединений, композиционных материалов, электролитов, некоторых металлических сплавов сложного состава, что позволяет разрабатывать материалы с заранее заданным комплексом свойств как макроскопического, так и микроскопического масштаба, исходя из их структуры [24], однако теоретической основой этих методов остаются знания, базирующиеся на фундаментальных принципах, и соответствующие методические подходы. Без них развитие каких-либо технологий искусственного интеллекта не представляется возможным.

Первым из применяемых физических законов и закономерностей следует упомянуть принцип относительности Галилео Галилея. Он касается относительности инерциальных систем отсчета, в механике он относится к динамике системы, их кинетике, скоростям протекания различных процессов на подуровнях какой-либо системы. Возникает многомасштабность процессов (деформации, разрушения и т. д.) не только по объему пространства, но и по времени протекания. Для процессов требуется вводить иерархию не только характерных структурных размеров, но и времени протекания, скоростей реакций и т.д. [25].

2. Материалы и оборудование

Для испытаний образцов из бетона с органическим наполнителем, твердого дерева, кирпича применялось стандартное механическое оборудование с использованием видеозаписи. Такие материалы, как бетон и дерево, могут применяться в широком климатическом диапазоне, включая регионы Арктики. Оценка структурных составляющих производилась металлофизическими методами, анализом морфологии изломов, в частности, с помощью оптического микроскопа «Неофот», электронных растрового «Hitachi TM-3030» и мультимикроскопа СММ-2000.

Характеристики дефектной микроструктуры: размеры, регулярность расположения дефектов и расстояние между ними, выявляются методами морфологического анализа, применяемыми в оптической фрактографии, электронной микроскопии, профилометрии, с использованием, например, сканирующих атомно-силовых и туннельных микроскопов [26].

Судя по микроструктуре поверхности разрушения пористого бетона с органическим наполнителем, характер разрушения вязко-хрупкий, а осуществляется оно по механизму роста и слияния микропор [27, 28].

Смесь для модификации бетона, используемая в работе, был получена вручную, следуя методике, разработанной в Камеруне [29]. Смесь скорлупы разбитых орехов и покрывающей ее фибры масличной пальмы была собрана на маслобойне в г. Кумба, Камерун. После сбора смеси она была промыта чистой водой, затем скорлупа отделена от волокон. Затем фибра проваривалась в растворе 2 %-й NaOH в течение 15 минут, промывалась чистой водой до исчезновения пены и высушивалась в течение двух дней.

Для того чтобы получить оптимальное соотношение волокон в композите, использовалось определенное количество цемента и воды и варьировалось только количество фибры по отношению к количеству песка (доля песка снижалась по объему с эквивалентной заменой органическим волокном). Количество ОПМФ для использования в данной работе варьировалось от 0 до 1,5 % объема песка. Состав образцов с различным содержанием фибры представлен в табл. 1.

После составления смеси она помещалась в формы для изготовления образцов. Испытание на трехточечный изгиб проводилось в соответ-

ствии со стандартом для бетонных конструкций следующим образом:

– Образцы имели призматическую форму и размер $40 \times 40 \times 160$ мм.

– Расстояние между двумя точками опоры составляло 140 мм, образец располагался горизонтально, сила прикладывалась к центральной линии контакта с постоянной скоростью до разрушения образца.

– Сила, приложенная к образцу, регистрировалась на индикаторе штампа, установленном на верхнем нагрузочном пролете, смещение внутри образца – на индикаторе штампа, установленном на нижнем опорном пролете. Получены значения силы и смещения для вычисления предела прочности и модуля упругости на изгиб. Предел прочности и модуль Юнга на изгиб вычислялись для 7-, 28- и 45-дневных образцов из модифицированного бетона.

Прочность на изгиб увеличивается при росте содержания фибры до 0,25 %, однако при дальнейшем росте доли модификатора падает. Прочность на изгиб 45-дневного образца увеличилась с 4,39 до 5,47 МПа, а снизилась до 2,51 МПа. Таким образом, добавление небольшого количества волокна увеличивает прочность смеси из-за дополнительного поглощения фиброй воды и цементации, но в дальнейшем матрице уже не хватает воды.

Модуль упругости при изгибе также увеличивается при малом содержании фибры и падает при высоком.

Для определения прочности на сжатие использовались образцы кубической формы $40 \times 40 \times 40$ мм. Избыточная вода высушивалась перед помещением в нагружающее устройство испытательной машины. Образец нагружался с постоянной скоростью до разрушения. Сила фиксировалась динамическим компаратором в верхней части нагружающего устройства, а смещение внутри образца записывалось на матричном индикаторе, установленном на нижней части опоры. По видеоизображению были сняты показания для оценки силы и смещения.

По стандартным соотношениям механики были получены значения предела прочности и модуля упругости на сжатие. Прочность на сжатие уменьшается с увеличением количества волокон с 21,38 до 6,94 МПа. Это можно объяснить тем, что увеличение количества волокон приводит к увеличению объема зерна. Кроме того, фибра быстро впитывает воду, и цемент не успевает в достаточной мере гидратировать, что при-

Таблица 1

**Весовой состав материалов,
используемых для смеси, кг**

Table 1

Weight content of materials for the mixture, kg

Номер смеси, содержание фибры, %	Цемент	Песок	Фибра	Вода
S1 = 0	383,04	1702,4	0	229,824
S2 = 0.25	383,04	1698,144	3,37288	229,824
S3 = 0.5	383,04	1693,888	6,74576	229,824
S4 = 0.75	383,04	1689,632	10,11864	229,824
S5 = 1	383,04	1685,376	13,49152	229,824
S6 = 1.25	383,04	1681,12	16,8644	229,824
S7 = 1.5	383,04	1676,864	20,23728	229,824

водит к слабому сцеплению смеси, уменьшению сплошности материала и падению прочности композита на сжатие. Модуль упругости также уменьшается с увеличением количества волокон, с 310 до 108 МПа, поскольку увеличение количества волокон приводит к уменьшению количества воды в смеси, поэтому растет пористость и увеличивается хрупкость.

Механическое поведение древесины высокой плотности (лиственница, Билинга, дуб и др.) представляет высокий интерес для строительства в различных регионах страны и мира, поскольку прочность ее практически не меняется в широком диапазоне температур. Так, образцы дерева Билинга, растущего в юго-западных регионах Камеруна, исследованы на механическое поведение при изгибе. Применены испытания на трехточечный изгиб. Моделирование напряженно-деформированного состояния и роста трещины на макроскопическом уровне осуществлено на программном комплексе конечно-элементного анализа ANSYS Workbench 2020 R1, с использованием технологии Smart Crack Growth, введенной в версию 2019. Стохастическое моделирование роста трещин на мезо- и микроуровне использовалось для сравнения скорости роста трещин в случае подхода гетерогенного материала и с учетом механизма микроструктуры и разрушения древесины.

Древесина дерева Билинга по прочности и твердости превосходит древесину дуба, кроме устойчивости к ударным нагрузкам. Ее плотность при стандартной влажности составляет от 740 кг/м^3 до 810 кг/м^3 (табл. 2). Билинга, как и

Таблица 2

Физические и механические свойства древесины (при 13%-й влажности)

Table 2

Physical and mechanical properties of wood (at 13 % water content)

Название дерева	Плотность, кг/м ³	Твердость Моннина (тангенц.), МПа	Предел прочности, МПа			Модуль упругости на изгиб, МПа	Скорость звука (вдоль), м/с	Коэффициент поперечного сжатия
			сжатие	растяжение (вдоль)	изгиб			
Билинга	760	53	63,0	100	90	11 800	8,8	0,41
Лиственница	680	27,8	55,0	123	97	13 200	1,45	0,45
Сосна	530	22,3	44,0	101	79	10 200	1,17	0,49
Дуб	760	56,8	52,0	—	93	15 400	1,40	0,43
Граб	810	71,7	60,0	135	121	—	—	—
Берёза	640	35,0	45,0	161	100	15 400	1,50	0,58
Акация	830	71,0	77,5	—	71	—	—	—
Амарант	880	50,0	—	—	50	—	—	—
Эбен	1050	>80,0	—	—	80	—	—	—

лиственница, обладает высокой водо- и огнестойкостью, поэтому подходит для использования в различных диапазонах температур и влажности и считается одной из самых устойчивых из существующих пород, так как практически не подвержена нападению насекомых, термитов и даже морских моллюсков и хорошо противостоит появлению грибов.

Машина INSTRON 200 кН для испытания на трехточечный изгиб оснащалась камерой, которая фиксировала внешний вид изломов и место излома. Универсальные гидравлические захваты с набором клиновых элементов использовались для проведения испытаний на изгиб, сжатие и т. д. Рама высокой жесткости с минимальным прогибом при максимальной нагрузке (0,9 мм). Перемещение рамы до 110 мм.

Для измерения массы образцов, содержания влаги использовались электронные весы с максимальным диапазоном 0,006–5,1 кг, точностью 1 мг. Для сушки древесины использовалась печь мощностью 2,0–2,2 кВт/ч.

В исследовании изучены образцы содержанием влаги в сухой водной печи и сухой водной печи 14 %. Испытания проводились на 10 образцах (20 × 20 × 360 мм). Определялись модуль упругости при изгибе E_f (МПа) и скорость высвобождения энергии G . Целью испытания на изгиб поставлена оценка разрушающей нагрузки для деревянной балки, находящейся на двух опорах с центральной нагрузкой при скорости около 2 мм/мин.

Для стохастического моделирования на микро- и мезомасштабном уровне использовались количественные данные о структуре, полученные из исследованных микросрезов древесины Билинга (рис. 2).

Задача для грунта (лунный реголит) также решалась методами механики разрушения, а исходные данные брались из экспериментальных исследований, которым соответствовали следующие условия: поры размер 50–100 мкм расположены с минимальным разбросом по нормальному закону, рост трещины происходит путем роста и слияния микротрещин в окрестностях таких пор. Ориентация микротрещин случайная, а среднее расстояние между порами составляет 100–150 мкм. Начальная магистральная трещина может иметь длину до 1 мм.

Для обоснованного моделирования таких хрупких пористых пород с механическими характеристиками, сильно зависящими от влажности, необходимы дополнительные экспериментальные и теоретические исследования [30]. Однако в ряде случаев модель может быть применена и для разрушения хрупких тел с трещинами или порами при нулевой влажности, например, как для задач оценки свойств грунта с помощью ультразвукового воздействия, в том числе в открытом космосе [31, 32].

Для ультразвукового излучателя, имеющего внедряющийся в грунт плоский ударник, коэффициент интенсивности напряжений: $K_I = P_N \sqrt{l} \cdot f(\alpha)$, где P_N = среднее (номинальное) напряжение в

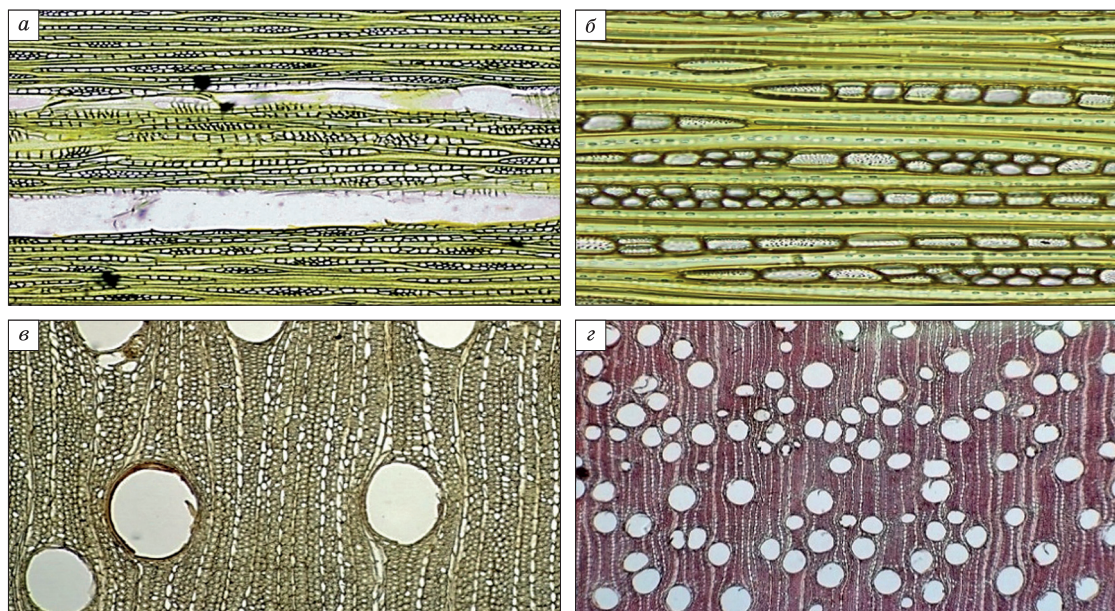


Рис. 2. Микроструктура дерева Билинга в тангенциальном (*а, б*) и поперечном (*в, г*) сечении в масштабе: *а* – 3 мм, *б* – 200 мкм; *в* – 2 мм, *г* – 6 мм

Fig. 2. Bilinga timber microstructure at tangential (*a, б*) and at cross-sectional (*в, г*) directions in scales: *a*) 3 mm; *б*) 200 μm; *в*) 2 mm; *г*) 6 mm

образце, МПа [33], l – характерный размер (длина трещины), $f(\alpha)$ – безразмерная функция, зависящая от кривизны ударника α . Пренебрегая последней, получаем $f(\alpha) = \sqrt{2\pi}$. При характерном воздействии ультразвукового излучателя на грунт $P_N = 10$ МПа, КИН на трещине 1 мм будет равен $K_I = 7,93$ МПа·м^{0.5}.

3. Результаты моделирования и обсуждение

В отличие от вязких материалов, таких как металлы и полимеры, в хрупких композитах на основе бетона или в каменной породе рост трещин подчиняется другим закономерностям. Известны модели разрушения горных пород и хрупких материалов [34, 35], в которых используются закономерности накопления микротрещин, включающие, например, условие необратимости разрушения Бейли и критерий концентрационного разрушения образования трещин [36], основанный на теории перколяции:

$$N'(t) = N^*/\tau, \int_0^{\pi} N' dt = N^*, \quad (1)$$

$$\frac{1}{l^3 l} = e \quad (2)$$

где N^* – средняя концентрация микротрещин, образовавшаяся в образце при его разрушении, которая может описывать накопление струк-

турных повреждений, действие напряжения и зависимость температуры от времени, м⁻³; l – средний линейный размер микротрещины, м; $e = 2,718$ – среднее расстояние между трещинами в образце единичного объема, средний размер которого составляет l .

Разработанная стохастическая модель разрушения модифицирована алгоритмом роста трещин и пор с использованием кинетического подхода (1)–(2). На рис. 3 показаны результаты компьютерной визуализации роста трещины для различных содержаний модифицированного бетона. Скорость трещины, полученная для различных концентраций фибры, увеличивалась при росте содержания волокна, что соответствует эксперименту (см. табл. 3).

Например, для того, чтобы произвести сравнение макроскопической скорости роста трещины с помощью многомасштабного стохастического моделирования, необходимо качественно выявить механизм разрушения древесины и получить количественные закономерности [37]. В случае хрупкого разрушения разрывом (деформация Mode I) раскрытие трещины осуществляется в процессе изгибной деформации образца, когда внешнее нормальное напряжение направлено перпендикулярно трещине [38].

Для анализа трещиноватых деревянных конструкций в рамках механики разрушения и в ре-

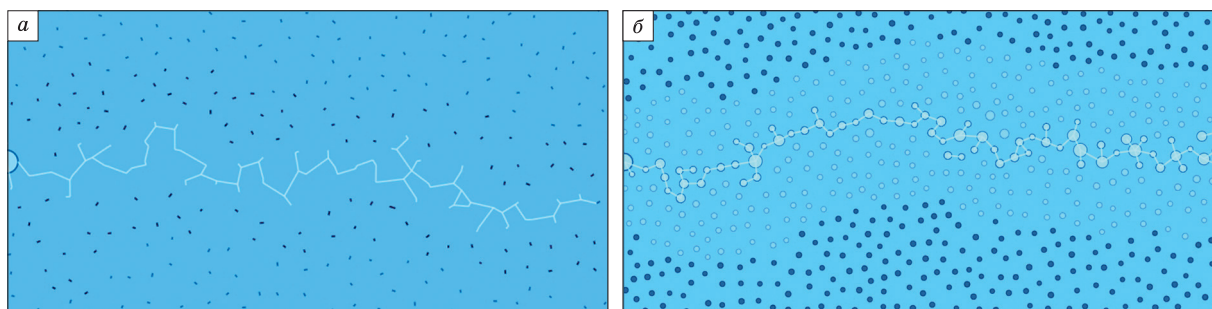


Рис. 3. Стохастическая визуализация роста мезоскопической трещины в пористом бетоне без наполнителя (а) и с максимальным содержанием фибры плодов масличной пальмы 1,5 % (б)

Fig. 3. Stochastic visualization of crack growth at mesoscale in porous cement without (a) and at maximum fiber content, 1,5 % (б)

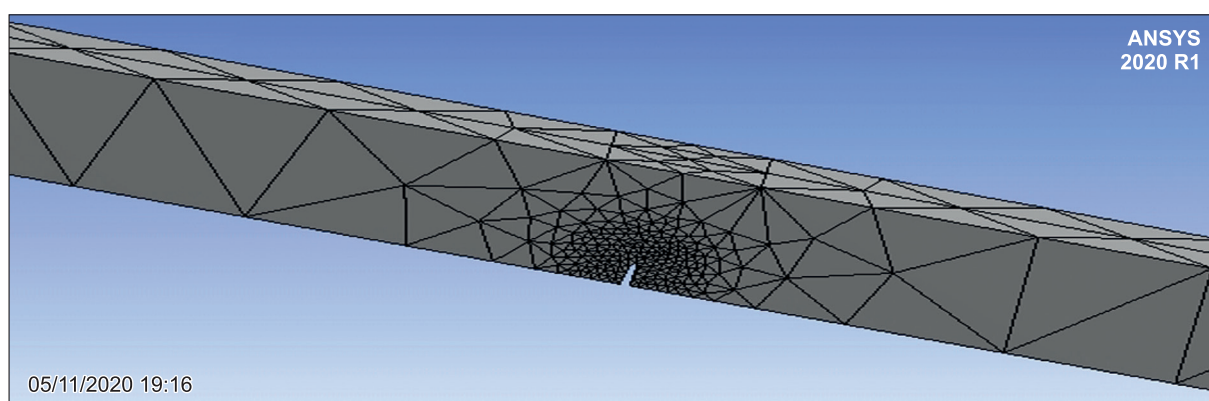


Рис. 4. Геометрия образца из древесины с сеткой КЭ-разбиения в ANSYS

Fig. 4. The geometry of timber sample FE-meshing in ANSYS

альных условиях эксплуатации необходимо учитывать уровень содержания влаги в древесине. Основной проблемой является зависимость от влажности механических свойств материала, а также геометрии образца с растущей трещиной

и без неё. Для лучшего понимания механического поведения нагруженной конструкции исследуется моделирование конструкции с трещиной с учетом изменения влажности.

Численное моделирование выполнено с помощью комплекса конечных элементов ANSYS Workbench 2020R1, с помощью технологии Smart Crack Growth. Геометрия смоделирована в программе SolidWorks с трещинами 4 мм и 8 мм в каждом образце и импортирована в ANSYS Workbench для дальнейшего анализа в ANSYS Mechanical (рис. 4). Коэффициент интенсивности напряжения (КИН) определяет вязкость разрушения материала, в рамках линейно-упругой механики разрушения (ЛМР). Рост усталостной трещины смоделирован с использованием закона Пэриса. Рост трещины был смоделирован на основе образца трещин в режиме растяжения Mode I с начальной длиной трещины 4 и 8 мм.

На рис. 5 представлены кривые деформации образцов без начальной трещины и с трещинами

Т а б л и ц а 3

**Скорость трещины
согласно стохастической модели, м/с**

Table 3

Crack growth rate by stochastic modeling, m/s

Образец	V
S_1	12,0
S_2	17,6
S_3	24,8
S_4	30,5
S_5	33,7
S_6	42,4
S_7	46

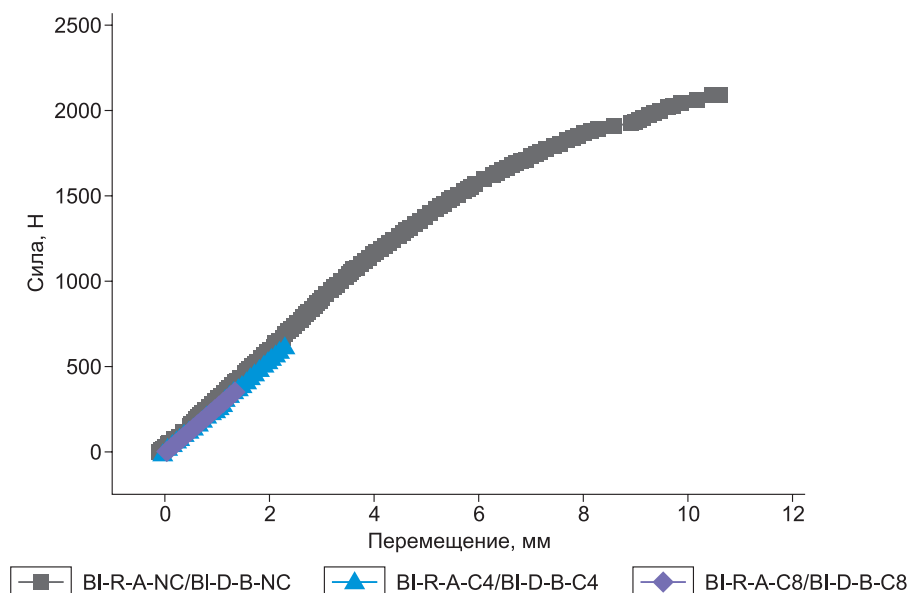


Рис. 5. Диаграмма нагружения для образцов Bilinga без трещины и с трещинами длиной 4 и 8 мм

Fig. 5. Loading curve for Bilinga samples with cracks length 4 and 8 mm

длиной 4 и 8 мм. Для обоих образцов с трещиной не обнаруживается существенных различий в упругом поведении.

Исследование также позволило сравнить поведение различных образцов с начальной трещиной 4 и 8 мм

Расчетные распределения напряжений по мере роста трещины в деревянной балке на 0,333 мм и затем до 0,35 мм представлены на рис. 6.

Но КЭ-моделирование, основанное на концепции изотропного твердого тела, не учитывает структурные неоднородности и анизотропию свойств такого природного композиционного материала, как древесина, даже мягкая [39]. Поэтому для построения модели процессов разрушения необходимо применять подход структурного моделирования. Для древесины также была использована стохастическая модель роста трещины, основанная на механизме вязкой коалесценции пор (сосудов) при росте мелких трещин поперек волокон. Для описания процесса разрушения сложной структуры древесины была введена пространственно-временная иерархия, соответствующая разрабатываемому системно-структурному подходу [40] и отражающая зависимость локальных параметров от нелокальных характеристик напряженного состояния:

$$\delta_C = \frac{2 \cdot K_{IC}}{\pi \cdot \sigma_C^2}; \quad \tau_C = \frac{\delta_C}{c}, \quad (3)$$

где c – скорость упругих поперечных волн в направлении нагрузки, для дерева $c \approx 4000$ м/с. δ_C , τ_C – характерные размер и время масштабного уровня, для мезоуровня $\tau_C \sim 10^{-5}$ с, для микроуровня $\tau_C \sim 10^{-7}$ с.

Исследование также позволило сравнить поведение различных образцов с начальной трещиной 4 и 8 мм. Скорость роста трещин, полученная в эксперименте и в ходе макроскопического моделирования, была проверена с применением стохастического моделирования. Предложен метод анализа роста трещин в дереве в различных условиях окружающей среды, для которых эффект влагопоглощения интегрируется в зону разрушения, так что может быть выявлена связь между механическим поведением древесины и процессом роста трещин. Однако на микромасштабе механизм разрушения описывается законом роста коротких трещин, а большая изменчивость скорости роста трещин на различных масштабах является результатом микроструктурного влияния на локальную движущую силу трещины. Поскольку для древесины закономерности роста коротких трещин исследованы в недостаточной мере, приходится предполагать, что разрушение происходит по механизму роста и коалесценции микропор и микротрещин (см. рис. 2).

Результаты визуализации роста магистральных трещин на мезомасштабе по механизму ро-

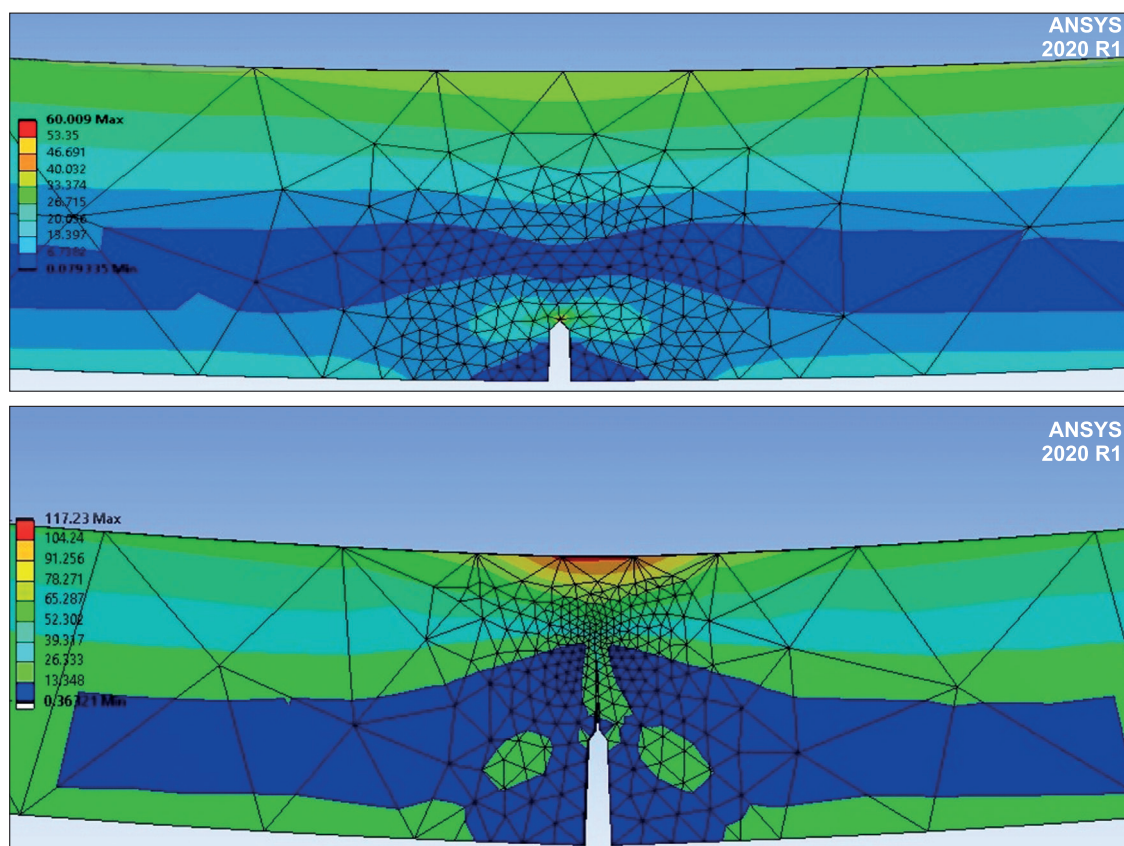


Рис. 6. Распределение напряжений в вершине при росте трещины 0,333 (а) и 0,35 мм (б)

Fig. 6. Stress distribution at crack tip during the growth of crack: а) 0.333 mm; б) 0.35 mm

ста и слияния коротких трещин представлены на рис. 7. Для моделирования роста коротких трещин на микромасштабе использовался механизм слияния микропор (рис. 8).

Таким образом, стохастическое моделирование роста трещин в древесине на мезо- и микромасштабах показывает более низкие локальные коэффициенты интенсивности напряжений и более медленный рост трещин из-за существования масштабнo-временной иерархии. Скорость роста трещин на макромасштабе равна $v_{cr} = 0,845\text{--}0,9 \cdot 10^{-3}$ м/с, что соответствует K_{IC} .

Расчетные скорости роста трещин, полученные при различных интенсивностях локального напряжения K_I при стохастическом моделировании, а также характерные размеры расчетных зон показаны в табл. 4.

Для расчетов воздействия ультразвукового излучателя на грунт были приняты параметры материала, соответствующие вязкости $\gamma = 0,1386$ МПа·с (соответствует коэффициенту поглощения звука на частоте 10 кГц $\nu = 1$ 1/м), поскольку в случае

нулевой вязкости скорость роста трещин становится бесконечной; скорость звука $v = 4500$ м/с; плотность $\rho = 3000$ кг/м³; модуль упругости $E = 6,1 \cdot 10^4$ МПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$; предел прочности на сжатие $\sigma_{bc} = 120$ МПа; предел прочности на растяжение $\sigma_{bt} = 8$ МПа.

Для моделирования дезинтеграции (разрушения) грунта использовалась модель визуализации роста трещин, развивающаяся в ИФТПС СО РАН с 2002 г. в основном для задач растрескивания металлов и вязко-хрупких гетерогенных сред [2, 3, 15]. Хотя для выявления закономерностей разрушения хрупких пород необходимы дополнительные экспериментальные и теоретические исследования, в ряде случаев модель может быть применена и для разрушения скальных пород и грунтов с трещинами или порами как предельного состояния гетерогенных материалов с очень низкой вязкостью (рис. 9). При моделировании разрушения таких материалов было выявлено резкое падение скорости роста трещины при снижении уровня напряжений (КИН) ниже

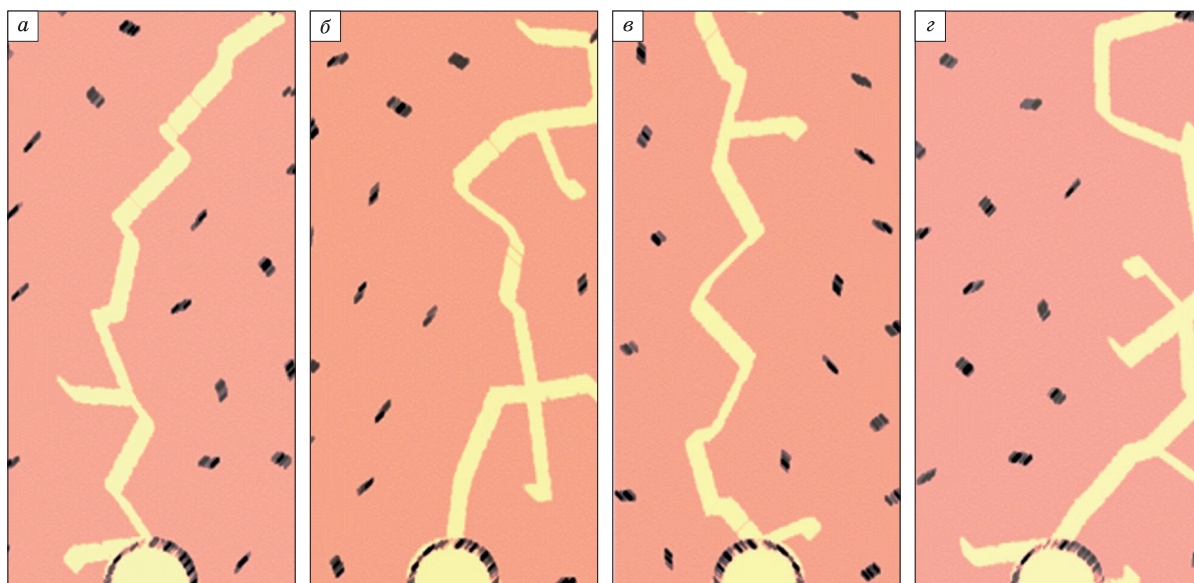


Рис. 7. Рост магистральной трещины в поле микротрещин длиной 10 мкм от вершины диаметром 20 мкм на мезоуровне в расчетной зоны 1200×1200 мкм; расстояние между трещинами 25 мкм. КИН K_I , МПа·м^{-0.5}: 35,0 (а), 26,0 (б), 37,0 (в), 38,0 (г) (см. табл. 4)

Fig. 7. Main crack growth in secondary cracks field from 20 μm tip at 1200×1200 μm area. Distance between crack is 25 μm with normal distribution, at SIF K_I , МПа·м^{-0.5}: а) 35.0, б) 36.0, в) 37.0, г) 38.0 (see Table 4)

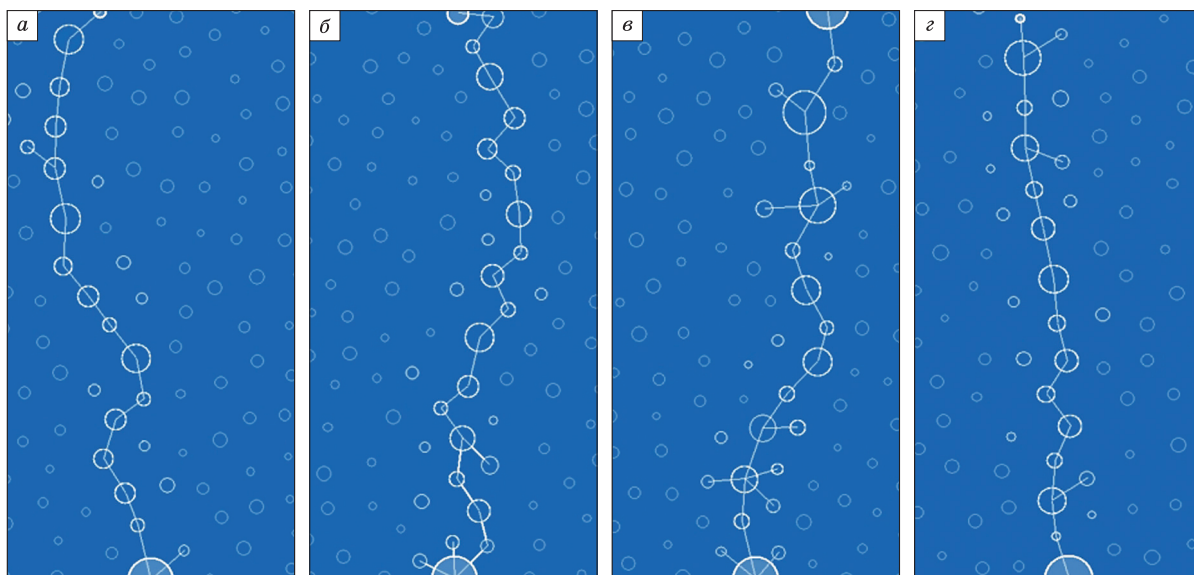


Рис. 8. Рост вторичной трещины по механизму слияния микропор (5-10 мкм) на микромасштабе в области 760×380 мкм. Расстояние между микропорами 10 мкм при КИН K_I , МПа·м^{-0.5}: 53,0 (а), 54,0 (б), 55,0 (в), 56,0 (г) (см. табл. 4)

Fig. 8. Secondary crack growth by micropores coalescence (5-10 μm) in area 760×380 μm and distance between the micropore germs 10 μm at КИН K_I , МПа·м^{-0.5}: а) 53.0, б) 54.0, в) 55.0, г) 56.0 (see Table 4)

критического (табл. 5). Для данного типа породы ниже определенной интенсивности напряжений роста трещины не происходит (или происходит очень медленно, как на рис. 9, в), а стабиль-

ный рост наблюдается только в определенном диапазоне значений, превышение которого приводит к полному хрупкому разрушению структуры трещин.

Таблица 4

Скорость роста трещины v_{cr} в древесине согласно стохастической модели

Table 4

Crack growth rate v_{cr} in timber according the stochastic modeling

Показатель	Мезомасштаб ($\delta_C \sim 100$ мкм)				Микромасштаб ($\delta_C \sim 10$ мкм)			
K_p , МПа·м ^{-0,5}	35,0	36,0	37,0	38,0	53,0	54,0	55,0	56,0
v_{cr} , м/с	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$4,7 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$5,6 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$

Заключение

Метод многоуровневого теоретического, физического и численного моделирования развит в рамках системно-структурного подхода. В отличие от многомасштабного моделирования, многоуровневый метод позволяет абстрагироваться от пространственного масштаба и оперировать с многомерными множествами, включая разновременные и мультифизические модели, путем как построения единых аналитических соотношений, так и сшивки различных уровней численными методами. Метод применен для физи-

ческого и численного моделирования кинетики разрушения материалов с субмикроструктурой, перспективных для экстремальных условий Арктики и Субарктики. В частности, исследованы модифицированный органической фиброй бетон, дерево Билинга и плотный грунт в условиях отсутствия влаги. В последнем случае результаты могут быть использованы и для сооружения фундаментов из лунного реголита.

Для испытаний образцов из бетона с органическим наполнителем, дерева твердых сортов и сухого тонкодисперсного грунта применялось

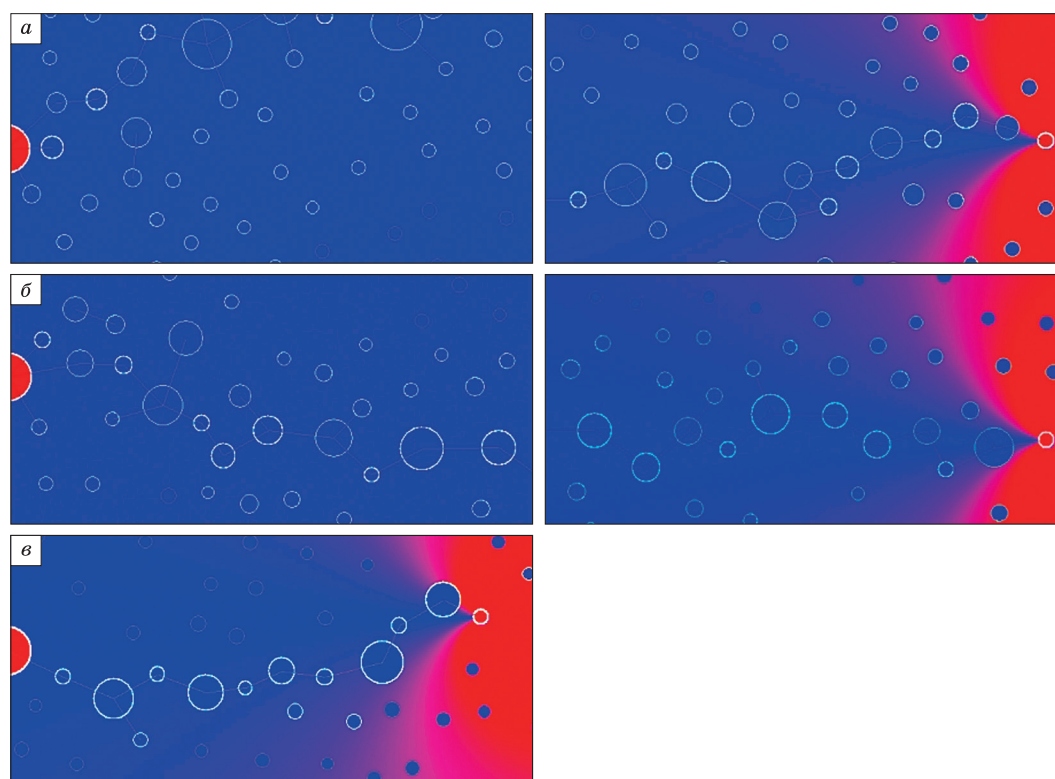


Рис. 9. Результаты визуализации роста трещины в пористом грунте (реголит) на начальном этапе (слева) и в конце (справа, с распределением напряжений в вершине) при различных значениях K_p , МПа·м^{-0,5}: 7,93 (а), 6,0 (б), 4,0 (в)

Fig. 9. Results of crack growth visualization in porous ground (regolith) at initial (left) and final stage (right) at different K_p , МПа·м^{-0,5}: а) 7.93, б) 6.5, в) 4,0

стандартное механическое оборудование с использованием видеозаписи. Для визуализации и оценки скорости роста микропор и микротрещин применена стохастическая модель разрушения, дополненная алгоритмом роста дефектов с использованием кинетического подхода Бейли и теории перколяции.

Введена иерархия структурных размеров и времен разрушения, а также скоростей трещин на различных масштабах. Результаты стохастического моделирования роста трещин в массивах микротрещин и микропор на мезо- и микроуровнях соответственно показывают, что моделирование изгиба деревянной балки сравнимо с результатами конечно-элементного макроскопического моделирования. Скорость трещины, полученная для различных концентраций органической фибры в пористом бетоне, росла при увеличении содержания волокна, что соответствует эксперименту. Сходные результаты получены и для сухого тонкодисперсного грунта.

Список литературы / References

1. Hughes T. J. R. Multiscale phenomena: Green's functions, the Dirichlet-to-Neumann formulation, subgrid scale models, bubbles and the origins of stabilized methods. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 1995;127:387–401. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(95\)00844-9](https://doi.org/10.1016/0045-7825(95)00844-9)
2. Лепов В.В., Архангельская Е.А., Иванова А.А., Лепова К.Я. Многоуровневое иерархическое эволюционное моделирование процессов разрушения материалов. *Вычислительные технологии*. 2008;3(13): 315–322.
[Lepov V.V., Arkhangelskaya E.A., Ivanova A.A., Lepova K.Ya. Multilevel hierarchical evolutionary modeling of the fracture processes of materials. *Journal of Computational Technologies*. 2008; 3(13):315–322. (In Russ.)]
3. Lepov V. Multiscale modelling of damage and fracture processes in nanomaterials. *Journal of Physics: Conference Series*. 2011;1(291):012031.
4. Панин В.Е., Егорушкин В.Е. Деформируемое твердое тело как нелинейная иерархически организованная система. *Физическая мезомеханика*. 2011; 3(14):7–26.
[Panin V.E., Egorushkin V.E. Deformable solid as a nonlinear hierarchically organized system. *Physical Mesomechanics*. 2011;3(14):7–26. (In Russ.)]
5. Weinan E., Engquist B., Huang Z.Y. Heterogeneous multiscale method: a general methodology for multiscale modeling. *Phys. Rev. B*. 2003;67:092101.
6. Wang, D. L. et al. The fracture mechanism of softwood via hierarchical modelling analysis. *J Wood Sci.* 2019;65:58. <https://doi.org/10.1186/s10086-019-1837-x>

Таблица 5

Расчетная скорость роста трещины по модели стохастического роста для пористого грунта в зависимости от интенсивности напряжений

Table 5

Crack growth rate calculated by stochastic modeling for porous ground depending on the stress intensity

v_{crs} , М/с	K_I , МПа·м ^{-0,5}
0,42	7,93
0,29	7,5
0,24	7,0
0,12	6,5
0,076	6,0
0,04	5,5
0,011	5,0
0,002	4,5
<0,0001	4,0

7. Fish J., Wagner G.J., Keten S. Mesoscopic and multiscale modelling in materials. *Nat. Mater.* 2021; 20:774–786. <https://doi.org/10.1038/s41563-020-00913-0>

8. Морозов Е.М. *ANSYS в руках инженера. Механика разрушения*. М.: Ленанд;2014.

[Morozov E.M. *ANSYS in the hands of an engineer. Fracture mechanics*. Moscow:Lenand;2014. (In Russ.)]

9. Lee R. *ABAQUS for Engineers: A Practical Tutorial Book*. Independently Published; 2018.

10. Logg A., Mardal K.A. *Automated Solution of Differential Equations by the Finite Element Method. The FEniCS Book*. Springer; 2012. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-23099-8>

11. Курушин А.А. *Решение мультифизических СВЧ задач с помощью САПР COMSOL*. Moscow: One-Book; 2016.

[Kurushin A.A. *Solving of multiphysical UHF problems with COMSOL CAD software*. Moscow: One-Book; 2016. (In Russ.)]

12. Коваленко А.В., Узденова А.М., Уртеннов М.Х., Никоненко В.В. *Математическое моделирование физико-химических процессов в среде COMSOL Multiphysics 5.2*. СПб.: Лань; 2017.

[Kovalenko A.V., Uzdenova A.M., Urtenov M.Kh., Nikonenko V.V. *Mathematical modeling of physico-chemical processes in COMSOL Multiphysics 5.2*. Saint Petersburg : Lan, 2017. (In Russ.)]

13. Пермяков П.П., Аммосов А.П. *Математическое моделирование техногенного загрязнения в криолитозоне*. Новосибирск: Наука; 2003. 224 с.

[Permyakov P.P., Ammosov A.P. *Mathematical modeling of man-made pollution in cryolitozone*. Novosibirsk: Nauka; 2003. (In Russ.)]

14. Broberg B.K. *Crack and Fracture*. London: Academic Press;1999.

15. Лепов В.В., Ачикасова В.С., Иванова А.А., Лепова К.Я. Структурный подход к многомасштабному моделированию эволюционных процессов в материалах с внутренней микроструктурой. *Наука и образование*. 2015;4(80):82–87.
- [Lepov V.V., Achikasova V.S., Ivanova A.A., Lepova K.Ya. Structural approach to multiscale modeling of evolution processes in materials with internal microstructural. *Nauka i Obrazovanie*. 2015;4(80):82–87. (In Russ.)]
16. Lou, C., Xu, J., Wang, T. et al. Microstructure and pore structure of polymer-cement composite joint sealants. *Sci Rep*. 2021;11:1427. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81088-9>
17. Bisong M.S., Lepov V.V., Landrine T. Physico-mechanical characteristics and multiscale stochastic modeling of cement mortar reinforced with oil palm mesocarp fibers. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 2022;5(88):62–70.
18. Лепов В.В. Надежность и ресурс технических систем в экстремальных условиях эксплуатации. *Западская лаборатория. Диагностика материалов*. 2020;6(86):36–39.
- [Lepov V.V. Reliability and Resource of Engineering Systems in Extreme Environment. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 2020;6(86):36–39. (In Russ.)]
19. Бузник В.М., Каблов Е.Н. Состояние и перспективы арктического материаловедения. *Вестник Российской академии наук*. 2017;9(87):827–839.
- [Buznik V.M., Kablov E.N. Status and Prospects of the Arctic Material Science. *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk*. 2017;9(87):827–839. (In Russ.)]
20. Леонтьев Л.И., Григорович К.В., Костина В.М. Фундаментальные исследования как основа создания новых материалов и технологий в области металлургии. *Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия*. 2016;59(1):11–22.
- [Leontiev L.I., Grigorovich K.V., Kostina V.M. Fundamental research as base of design of the new materials and technologies in the field of metallurgy. *Izvestia Vuzshih Uchebnykh Zavedenii. Chernaya Metallurgia*. 2016; 59(1):11–22. (In Russ.)]
21. Lepov V., Petrov N., Pavlov N. System analysis of the modern materials and technologies in power engineering and industry for the russian north and arctic. *AIP Conf. Proc*. 2023;2552:080026. <https://doi.org/10.1063/5.0112831>
22. Yue Liu, Tianlu Zhao, Wangwei Ju, Siqi Shi. Materials discovery and design using machine learning. *Journal of Materiomics*. 2017; 3(3):159–177.
23. Ziheng Lu. Computational discovery of energy materials in the era of big data and machine learning: A critical review. *Materials Reports: Energy*. 2021; 1:100047.
24. Макаров П.В. и др. Изучение деформации и разрушения геоматериалов и геосред как иерархически организованных систем. *Физическая мезомеханика*. 2005;8:17–20.
- [Makarov P.V. et al. Research of the deformation and fracture of the geomaterials and geomedias as an hierarchically organized systems. *Physical mesomechanics*. 2005;8:17–20. (In Russ.)]
25. Perdikis D., Huys R., Jirsa V.K. Time scale hierarchies in the functional organization of complex behaviors. *PLoS Comput Biol*. 2011;7(9):e1002198.
26. Логинов Б.А. Первый в мире сканирующий зондовый микроскоп в виде спутника как старт этапа научных спутников-лабораторий. *Наноиндустрия*. 2021; 5(14):270–275.
- [Loginov B.A. World's first the satellite scanning probe microscope as a start stage of the scientific laboratory-satellite. *Nanoindustry*. 2021;5(14):270–275. (in Russ.)]
27. Низина Т.А., Балыков А.С. Анализ комплексного влияния модифицирующих добавок и дисперсного армирования на физико-механические характеристики мелкозернистых бетонов. *Региональная архитектура и строительство*. 2016;2:13–25. <https://doi.org/10.5862/MCE.62.2>
- [Nizina T.A., Balukov A.S. Experimental-statistical models of properties of modified fiber-reinforced fine-grained concretes. *Magazine of Civil Engineering*. 2016; 2:13–25. <https://doi.org/10.5862/MCE.62.2> (In Russ.)]
28. Иванов В.В., Егоров П.В., Пимонов А.Г. Статистическая теория эмиссионных процессов в нагруженных структурно-неоднородных горных породах и задача прогнозирования динамических явлений. *ФТПРПИ*. 1990;187/34:32–35.
- [Ivanov V.V., Egorov P.V., Pimonov A.G. Statistical theory of emission processes in stressed structurally heterogeneous rocks and problem of prediction of dynamic phenomena. *FTPRPY*. 1990;187/34:32–35. (in Russ.)]
29. Bisong M.S., Lepov V.V., Landrine T. Physico-mechanical characteristics and multiscale stochastic modeling of cement mortar reinforced with oil palm mesocarp fibers. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 2022;5(88):62–70.
30. Suknev S.V. TCD-based criteria for quasi-brittle fracture of material sand structures. *Procedia Structural Integrity*. 2019;20:30–36.
31. Барсуков Р.В., Генне Д.В., Нестеров В.А., Хмелёв В.Н., Голых Р.Н., Барсуков А.Р. Патент на изобретение 2785271 C1, 05.12.2022. Заявка № 2022123193 от 29.08.2022.
- [Barsukov R.V., Genne D.V., Nesterov V.A., Khmel'ev V.N., Golykh R.N., Barsukov A.R. Patent for Invention 2785271 C1, 05.12.2022. Application No. 2022123193 dt. 29.08.2022. (In Russ.)]
32. Хмелёв В.Н., Голых Р.Н., Quan Q., Барсуков Р.В., Минаков В.Д., Генне Д.В., Абраменко Д.С., Нестеров В.А., Хмелёв М.В. Теоретическая разработка метода контроля свойств твердых взвешенных почв при помощи ультразвукового воздействия. *Южно-Сибирский научный вестник*. 2022;1(41):23–29.
- [Khmelev V.N., Golykh R.N., Quan Q. et al. Theoretical development of Control Method for Hard Extrater-

restrial Soil Properties by the ultrasound impact. *Uzhno-Sibirskiy Nauchny Vestnik*. 2022;1(41):23–29. (In Russ.)]

33. Черепанов Г.П. *Механика разрушения*. М.: УРСС; 2012.

[Cherepanov G.P. *Fracture Mechanics*. Moscow: URSS; 2012. (In Russ.)]

34. Черникова Т.М., Иванов В.В., Михайлова Е.А. О кинетике разрушения материалов при их растяжении. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2005;2(46):75–77.

[Chernikova T.M., Ivanov V.V., Mikhailova E.A. On the fracture kinetics of materials under tension. *Bulletin of Kuzbass State Technical University*. 2005;2(46):75–77. (In Russ.)]

35. Suknev S.V., Novopashin M.D. Criterion of normal tension crack formation in rocks under compression. *Journal of Mining Science*. 2003;39:132–139.

36. Ботвина Л.Р., Солдатенков А.П. О концентрационном критерии разрушения. *Металлофизика и новейшие технологии*. 2017;4(39):477–490.

[Botvina L.R. and Soldatenkov A.P. On the Concentration Criterion of Fracture. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2017;4(39):477–490. (In Russ.) <https://doi.org/10.15407/mfint.39.04.0477>]

37. Glukhikh V.N, Okhlopko A.Y., Sivtsev P.V. *Numerical simulation of deformations of softwood-sawn timber*. Lecture Notes in Computer Science. 2018; 10665LNCS:483–490.

37. Shao Z., Wang F. *Fracture of Wood Along Grain*. In: *The Fracture Mechanics of Plant Materials*. Springer: 2018;27–62. https://doi.org/10.1007/978-981-10-9017-2_3

39. Wang D.L., et al, *The fracture mechanism of softwood via hierarchical modelling analysis*. J. Wood Sci. 2019;65:58. <https://doi.org/10.1186/s10086-019-1837-x>

40. Lepov V.V., Panteleev K.D., Rahmilevich E.G., Yrcev E.S. A system approach to research development and creation of the complex engineering systems for Arctic and Subarctic. *Procedia Structural Integrity*. 2020; 30(22):82–86. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.12.014>

Об авторах

ЛЕПОВ Валерий Валерьевич, доктор технических наук, директор, Researcher ID: F-9875-2011, Author ID: 6508081764, РИНЦ: SPIN-код: 1397-6725, AuthorID: 1747, <https://orcid.org/0000-0003-2360-7983>, e-mail: wisecold@mail.ru

БИСОНГ Самуэль Мбелле, старший преподаватель, кафедра сварки, Author ID: 57196030563, <https://orcid.org/0000-0001-9238-1231>, e-mail: mbellesabi@yahoo.com

ГОЛЫХ Роман Николаевич, доктор технических наук, РИНЦ: SPIN-код: 7832-0909, Author ID: 631124, <https://orcid.org/0000-0002-7708-0665>, e-mail: romangl90@gmail.com

About the authors

LEPOV, Valeriy Valerievich, Dr. Sci. (Engineering), Director, Researcher ID: F-9875-2011, Author ID: 6508081764, РИНЦ: SPIN-код: 1397-6725, AuthorID: 1747, <https://orcid.org/0000-0003-2360-7983>, e-mail: wisecold@mail.ru

BISONG, Mbelles Samuel, Senior Lecturer, Author ID: 57196030563, <https://orcid.org/0000-0001-9238-1231>, e-mail: mbellesabi@yahoo.com

GOLYKH, Roman Nikolaevich, Dr. Sci. (Engineering), РИНЦ: SPIN-код: 7832-0909, Author ID: 631124, <https://orcid.org/0000-0002-7708-0665>, e-mail: romangl90@gmail.com

Поступила в редакцию / Submitted 07.02.2023

Поступила после рецензирования / Revised 20.02.2023

Принята к публикации / Accepted 02.03.2023

Изменение упругих свойств частично насыщенного известняка в процессе высыхания

С. В. Сукнёв✉

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

✉ suknyov@igds.ysn.ru

Аннотация

Представлены результаты экспериментального исследования влияния содержания воды в образце известняка на его упругие свойства – модуль Юнга и коэффициент Пуассона – в процессе высыхания образца после частично-го насыщения. В соответствии с разработанной методикой исследования предварительно были построены диаграммы водонасыщения и водопотери, на основании которых выбран режим частичного насыщения образца. Образец подвергали одноосному сжатию в диапазоне малых обратимых деформаций. Диапазон нагружения образца выбирали таким образом, чтобы исключить образование и накопление структурных изменений (повреждений) в материале. Испытания проводили через определенные промежутки времени в процессе естественного высыхания образца и по диаграммам деформирования рассчитывали значения модуля упругости и коэффициента Пуассона в соответствии с принятым в ИГДС СО РАН стандартом организации СТО 05282612-001-2013. Анализ полученных результатов выявил ряд особенностей механического поведения образца известняка, свидетельствующих о непропорциональной и даже немоноотонной зависимости упругих свойств от содержания воды. Высказана гипотеза, позволяющая качественно объяснить обнаруженные эффекты.

Ключевые слова: известняк, содержание воды, одноосное сжатие, модуль Юнга, коэффициент Пуассона

Финансирование. Работа выполнена в рамках Госзадания по проекту FWRS-2021-0021 с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН в рамках реализации мероприятий по гранту № 13.ЦКП.21.0016.

Для цитирования: Сукнёв С.В. Изменение упругих свойств частично насыщенного известняка в процессе высыхания. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(1):172–178. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-172-178>

Original article

Change in the elastic properties of partially saturated limestone during drying conditions

S. V. Suknev✉

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

✉ suknyov@igds.ysn.ru

Abstract

The article presents the results of an experimental study of the water content effect on the elastic properties of a limestone specimen (Young's modulus and Poisson's ratio) during drying after its partial saturation. We first constructed the diagrams of water saturation and water loss, then on their basis we selected the partial saturation mode of the specimen. The specimen was subjected to uniaxial compression in the range of small reversible deformations. We chose the loading range of the specimen to exclude the formation and accumulation of microstructural changes (damages) in the material. The tests were carried out at certain intervals during the natural drying of the specimen. The values of the elastic modulus and the Poisson's ratio were calculated based on the stress-strain diagrams in accordance with the standard STO 05282612-001-2013 adopted at the Chersky Mining Institute of the North SB RAS. The analysis of the test results revealed the features of the mechanical behavior of the limestone specimen, which indicate a

disproportionate and even non-monotonic dependence of the elastic properties on the water content. We propose a hypothesis that allows us to explain the detected effects qualitatively.

Keywords: limestone, water content, uniaxial compression, Young's modulus, Poisson's ratio

Funding. This study was carried out within the framework of the fundamental research program (FWRS-2021-0021) using scientific equipment of the Core Shared Research Facility (CSRF) of the Federal Research Centre "The Yakut Scientific Centre" (grant number 13.SCRF.21.0016).

For citation: Suknev S.V. Change in the elastic properties of partially saturated limestone during drying conditions. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(1):172–178. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-172-178>

Введение

Прочностные и деформационные характеристики горных пород имеют важнейшее значение в гражданском и геотехническом строительстве при проектировании подземных сооружений, тоннелей, плотин, откосов, дамб, фундаментов [1, 2]. Среди факторов, определяющих прочность и жесткость горных пород, наряду с минеральным составом, структурой, наличием пор, большую роль играет содержание воды [3–5]. Поэтому изучение влияния воды на механические свойства горных пород необходимо для практики разработки горных пород, в частности, при добыче полезных ископаемых, сооружении плотин, прокладывании туннелей, захоронении отходов [6–8].

Присутствие влаги, как правило, приводит к ослаблению породы, т. е. к деградации, снижению прочностных и деформационных характеристик, так называемый *water-weakening effect* [9–16]. Природа явления до конца не изучена, хотя были предложены некоторые механизмы для отдельных видов горных пород [17–24]. Но универсального, хорошо обоснованного объяснения этому эффекту до сих пор не существует, по-видимому, из-за большого разнообразия типов горных пород.

Наибольшее количество работ по влиянию содержания воды (влажности породы) на свойства горных пород относится к прочностным свойствам, прежде всего, к прочности при одноосном сжатии. Влияние влаги на деформационные свойства изучено значительно хуже. В подавляющем большинстве работ модуль Юнга определяется по машинной диаграмме деформирования в качестве «побочного результата» при испытании образца на одноосное сжатие. Такие определения модуля Юнга скальных пород нельзя считать вполне корректными, поэтому полученные результаты носят оценочный характер. Работы по прямому определению модуля Юнга и коэффициента Пуассона крайне редки.

Исследования влияния влажности на механические свойства горных пород обычно ограничиваются изучением свойств образцов в сухом

(воздушно-сухом) и водонасыщенном состояниях. Однако для оценки степени их деградации, с целью обеспечения безопасности ведения горных работ, важно знать, как сильно изменяются свойства при низких и умеренных уровнях водонасыщения. Имеется небольшое число работ, в которых свойства горных пород изучаются в промежуточных (между воздушно-сухим и водонасыщенном) состояниях. Количество промежуточных точек с различным уровнем водонасыщения в этих работах, как правило, невелико. Делать по этим данным какие-то выводы о влиянии влажности на прочностные и деформационные свойства проблематично. К примеру, в работе [15] образцы испытывали всего в трех состояниях: сухом, частично насыщенном и в полностью насыщенном. И на основании полученных данных сделан вывод об отрицательно-экспоненциальном характере зависимости модуля упругости от содержания влаги, хотя с таким же успехом эти данные можно было аппроксимировать и простой линейной зависимостью.

Другой важный момент, на который необходимо обратить внимание, заключается в том, что промежуточные уровни содержания влаги достигаются путем прямого насыщения образца из сухого состояния. Но такое же содержание влаги может быть достигнуто и обратным путем: при высушивании предварительно насыщенного образца. Как было показано в [4], некоторые механические свойства горных пород в первом и втором случаях могут существенно различаться, т. е. на свойства породы оказывает влияние не только содержание влаги, но и способ, которым данное содержание влаги в образце было достигнуто. В настоящее время работы, в которых бы исследовались свойства горных пород в процессе их высушивания, практически отсутствуют.

В [25, 26] исследовали изменение упругих свойств горных пород различной влажности. Объект исследования – вмещающие породы на месторождении алмазов трубки «Ботуобинская». Испытания проводили через определенные про-

межутки времени в процессе естественного высыхания образца, который насыщали водой до максимального уровня, и по диаграммам деформирования рассчитывали значения модуля упругости и коэффициента Пуассона при высоких, умеренных и низких уровнях насыщения. Свойства определяли в соответствии с принятым в ИГДС СО РАН стандартом организации СТО 05282612-001-2013 «Метод определения статического модуля упругости и коэффициента Пуассона горных пород при одноосном сжатии призматических образцов» [27]. Предварительно для образца строили диаграммы водонасыщения и водопотери, измеряя его вес в процессе насыщения водой и затем – в процессе естественного высыхания при комнатной температуре.

В результате проведенных экспериментов установлено, что поведение упругих свойств в зависимости от степени насыщения носит существенно нелинейный характер. Так, при степени насыщения образца известняка, составляющей 20 % от максимального уровня, изменение его модуля упругости и коэффициента Пуассона составило более 90 % от максимального изменения, которое достигается в водонасыщенном состоянии по сравнению с воздушно-сухим состоянием. Поскольку взаимодействие присутствующей в порах влаги с минеральным скелетом горной породы осуществляется через поверхность пор, оно наиболее эффективно при низких уровнях водонасыщения. По мере заполнения поры водой эффективность воздействия влаги на минеральный скелет снижается, поскольку в этом процессе не участвует часть воды, находящаяся во внутренних областях поры. Степень снижения эффективности воздействия влаги, очевидно, определяется

двумя факторами: свойствами минерального скелета и формой поры.

В связи с этим возникает закономерный вопрос, влияют ли условия и уровень предварительного водонасыщения на поведение упругих свойств в зависимости от количества влаги в образце? Другими словами, в какой степени описанные выше механизмы проявляются при частичном насыщении образца влагой, когда значительная часть пор остается незаполненными водой или заполненными частично. В настоящем исследовании была поставлена задача проследить за изменением упругих свойств (модуль упругости, коэффициент Пуассона) частично насыщенного образца известняка в процессе высыхания.

Методика эксперимента

Конкретные режимы водонасыщения должны выбираться для каждого образца исходя из его полных диаграмм водонасыщения и водопотери (при сушке образца естественным путем при комнатной температуре). Диаграммы водонасыщения и водопотери после полного насыщения в течение 72 ч исследованного образца известняка приведены на рис. 1, 2.

После восстановления воздушно-сухого состояния образец насыщали влагой в течение 24 ч. Диаграмма водопотери образца после частичного насыщения приведена на рис. 3.

Измеренные значения (точки) аппроксимированы логарифмической функцией (кривая) вида $-A \cdot \ln(1 + B \cdot C)$, где A , B – константы аппроксимации; C – время сушки в сутках. Для исследованного образца известняка $A = 1$; $B = 145$.

После насыщения на образец устанавливали экстензометры (продольный экстензометр 3542RA

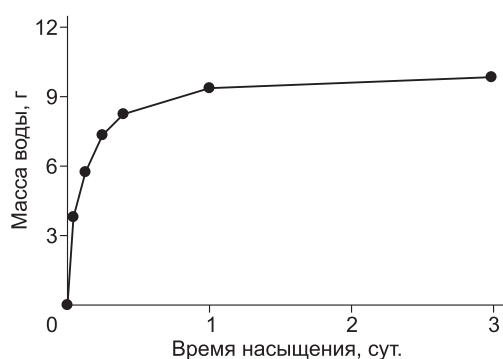


Рис. 1. Диаграмма водонасыщения образца известняка

Fig. 1. Water saturation diagram of a limestone specimen

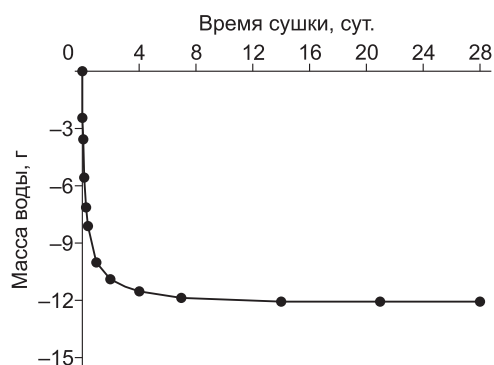


Рис. 2. Диаграмма водопотери образца известняка после полного насыщения

Fig. 2. Diagram of limestone specimen water loss after full saturation

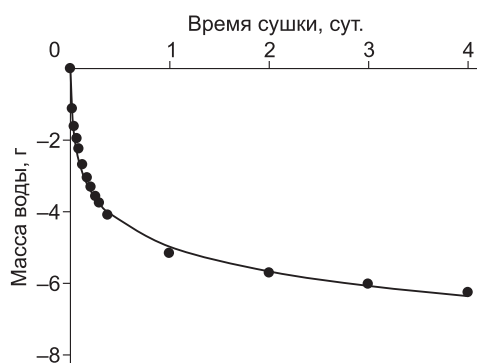


Рис. 3. Диаграмма водопотери образца известняка после частичного насыщения

Fig. 3. Diagram of limestone specimen water loss after partial saturation

и поперечный диаметральный экстензометр 3975 фирмы Epsilon) и помещали образец на испытательную машину UTS 250 (рис. 4). Испытания проводили в процессе естественного высыхания образца через определенные промежутки времени и по диаграммам деформирования рассчитывали значения модуля упругости и коэффициента Пуассона в соответствии с СТО 05282612-001-2013. Цикл испытаний образца составил 4 сут., в течение которых образец оставался на машине. За это время образец терял значительную часть накопленной при насыщении влаги, в результате чего можно было ожидать стабилизации его свойств.

В настоящее время для определения упругих свойств горных пород используется ГОСТ 28985-91, который не отвечает поставленной задаче. Его основной недостаток состоит в необходимости нагружения образца до уровня внутренних напряжений, приводящих к необратимым структурным изменениям в образце, накоплению повреждений, микротрещин, изменению структуры порового пространства, что ведет и к изменению физико-механических свойств образца. В соответствии со стандартом модуль упругости и коэффициент Пуассона материала рассчитывают по разгрузочным диаграммам деформирования образца после его нагружения до заданного уровня, который должен быть не ниже 50 % от предела прочности материала при одноосном сжатии. Поскольку для большинства горных пород необратимые структурные изменения, связанные с процессами образования микротре-

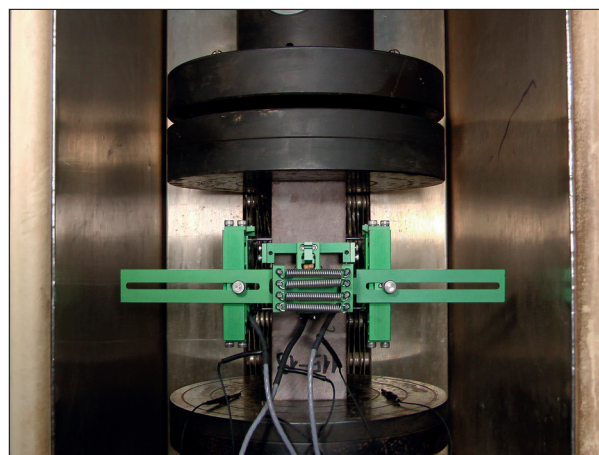


Рис. 4. Образец с экстензометрами, установленный на испытательной машине UTS 250

Fig. 4. Specimen with extensometers installed on the UTS 250 test machine

щин, начинаются при напряжениях, составляющих 30–50 % от предела прочности при одноосном сжатии [28–30], то, строго говоря, определение упругих свойств по ГОСТ 28985-91 нельзя считать физически корректным.

Кроме того, из-за необратимых структурных изменений невозможно повторное испытание образца. Это не позволяет проследить за изменением упругих характеристик материала вследствие изменения его состояния (влажности). Применительно к рассматриваемой задаче пришлось бы испытывать разные образцы, увлажненные до различного уровня водонасыщения. Такое исследование достаточно трудоемко, поскольку связано с изготовлением и испытанием большого количества образцов. К тому же, эти затраты могут оказаться совершенно напрасными, поскольку сама постановка эксперимента является некорректной ввиду разброса свойств от образца к образцу. Опираясь на статистический анализ достоверности полученных результатов, можно будет, в лучшем случае, судить о свойствах материала в контрастных (воздушно-сухом и водонасыщенном) состояниях. Для установления закономерностей влияния влажности на изменение упругих свойств образца горной породы необходимо обеспечить возможность их определения непосредственно в процессе изменения состояния испытуемого образца.

Поэтому для корректного определения свойств материала испытания образца проводились в соответствии со СТО 05282612-001-2013 в диапазоне нагрузок, исключающих образование и

накопление структурных изменений (повреждений) в материале. Снизу этот диапазон ограничен напряжениями, при которых происходит уплотнение образца, т. е. закрываются открытые микропоры и микротрещины. На диаграмме деформирования это проявляется в переходе от начального нелинейного участка к линейному. Сверху диапазон измерения ограничен напряжениями, при которых начинается накопление повреждений, образование новых микротрещин, что приводит к необратимым структурным изменениям. Испытание проводится путем многократного нагружения образца в диапазоне малых обратимых деформаций. Для определения упругих свойств нижнее напряжение принимается равным 0,5 от верхнего напряжения. При этом верхнее напряжение не должно превышать одной трети от предела прочности материала при одноосном сжатии, который определяется предварительно в соответствии с ГОСТ 21153.2-84.

Результаты и обсуждение

На рис. 5, 6 представлены результаты экспериментального определения модуля упругости и коэффициента Пуассона (точки) в процессе высыхания образца. Сразу обращает на себя внимание то, что, в отличие от веса образца, стабилизации свойств материала после 4 сут. сушки не происходит. В процессе высыхания образец быстро теряет влагу, а восстановление свойств происходит значительно медленнее. Для большей наглядности на рис. 5, 6 также приведены результаты расчета ожидаемого изменения свойств (кривые) в предположении пропорциональной зависимости свойств от содержания влаги.

Отметим что, хотя образец в первые часы теряет влагу очень интенсивно, модуль упругости

образца не только не успевает восстановиться, но демонстрирует изменение в обратную сторону, т. е. уменьшается по мере высыхания образца.

Нетипичное, отличающееся от общепринятых представлений поведение упругих свойств известняка в процессе высыхания образца после его полного водонасыщения, т. е. в процессе перехода образца из водонасыщенного в воздушно-сухое состояние, было ранее отмечено в работах [25, 26]. Модуль Юнга в первые часы после начала высушивания увеличивался незначительно, а коэффициент Пуассона показал немонотонное поведение и в первые часы демонстрировал рост, который затем сменялся снижением.

Аномальное поведение упругих свойств свидетельствует о происходящих в материале разнонаправленных физических процессах, связанных с присутствием влаги в образце. С одной стороны, находящаяся в порах вода взаимодействует с минеральным скелетом горной породы, что приводит к уменьшению его жесткости – материал «размягчается». С другой стороны, заполненная водой пора препятствует деформации материала, что приводит к увеличению его жесткости. Причем изменение жесткости самой поры носит выраженный нелинейный, близкий к сингулярному характер. Пока пора не заполнена водой полностью, ее жесткость равна нулю. При полном заполнении жесткость поры быстро возрастает и, если ее сообщение с другими порами затруднено, жесткость стремится к неограниченно высокому значению ввиду свойства несжимаемости жидкости. В таком состоянии заполненная водой пора представляет собой жесткое включение в упругом скелете горной породы. Появление в материале большого количества жестких включений приводит к увеличению его упругих моду-

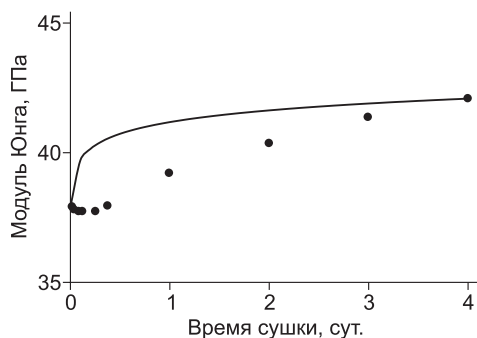


Рис. 5. Зависимость модуля Юнга от времени сушки

Fig. 5. Dependence of Young's modulus on drying time

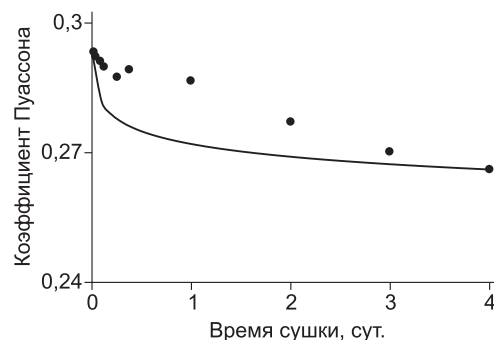


Рис. 6. Зависимость коэффициента Пуассона от времени сушки

Fig. 6. Dependence of Poisson's ratio on drying time

лей, и при определенных условиях эта тенденция может оказаться преобладающей.

Для проверки высказанных гипотез и установления полной картины происходящих в горных породах физических процессов необходимо проведение систематических исследований на возможно большем количестве образцов.

Заключение

Исследуется изменение модуля упругости и коэффициента Пуассона частично насыщенного образца известняка в процессе высыхания. Установлена непропорциональная зависимость упругих свойств материала от содержания влаги в образце. Отмечается аномальное поведение модуля упругости в первые часы после начала сушки, свидетельствующее о происходящих в материале разнонаправленных физических процессах, связанных с присутствием влаги в образце. Ранее аномальное поведение коэффициента Пуассона было отмечено в процессе высыхания образца после его полного водонасыщения. Для установления полной картины происходящих в горных породах физических процессов необходимо проведение дополнительных исследований при различных условиях и режимах водонасыщения.

Список литературы / References

1. Jaeger C. *Rock mechanics and engineering*. Cambridge: Cambridge University Press; 1979. 523 p.
2. Борщ-Компониц В.И. *Практическая механика горных пород*. М.: Горная книга; 2013. 322 с.
[Borshch-Komponiec V.I. *Practical rock mechanics*. Moscow: Gornaya kniga; 2013. 322 p. (In Russ.)]
3. Erguler Z.A., Ulusay R. Water-induced variations in mechanical properties of clay-bearing rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2009;46(2):355–370. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.07.002>
4. Zhou Z., Cai X., Cao W., Li X., Xiong C. Influence of water content on mechanical properties of rock in both saturation and drying processes. *Rock Mech. Rock Eng.* 2016;49(8):3009–3025. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-0987-z>
5. Wong L.N.Y., Maruvanchery V., Liu G. Water effects on rock strength and stiffness degradation. *Acta Geotech.* 2016;11(4):713–737. <https://doi.org/10.1007/s11440-015-0407-7>
6. Reviron N., Reuschlé T., Bernard J.-D. The brittle deformation regime of water-saturated siliceous sandstones. *Geophys. J. Int.* 2009;178(3):1766–1778. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04236.x>
7. Wasantha P.L.P., Ranjith P.G. Water-weakening behavior of Hawkesbury sandstone in brittle regime. *Eng. Geol.* 2014;178:91–101. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.05.015>
8. Pan Y., Wu G., Zhao Z., He L. Analysis of rock slope stability under rainfall conditions considering the water-induced weakening of rock. *Comput. Geotech.* 2020;128, Article 103806. <https://doi.org/10.1016/j.compggeo.2020.103806>
9. Colback P.S.B., Wild B.L. The influence of moisture content on the compressive strength of rocks. *Proceeding of the 3rd Canadian Symposium on Rock Mechanics*; 1965.:65–83.
10. Van Eeckhout E.M., Peng S.S. The effect of humidity on the compliances of coal mine shales. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* 1975;12(11):335–340. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(75\)90166-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(75)90166-7)
11. Hawkins A.B. Aspects of rock strength. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 1998;57(1):17–30. <https://doi.org/10.1007/s100640050017>
12. Vásárhelyi B., Ván P. Influence of water content on the strength of rock. *Eng. Geol.* 2006;84(1-2):70–74. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.11.011>
13. Li D., Sun Z., Zhu Q., Peng K. Triaxial loading and unloading tests on dry and saturated sandstone specimens. *Appl. Sci.* 2019;9(8):1–19. <https://doi.org/10.3390/app9081689>
14. Huang S., He Y., Liu G., Lu Z., Xin Z. Effect of water content on the mechanical properties and deformation characteristics of the clay-bearing red sandstone. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 2021;80(2):1767–1790. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01994-6>
15. Zhao K., Yang D., Zeng P., Huang Z., Wu W., Li B., Teng T. Effect of water content on the failure pattern and acoustic emission characteristics of red sandstone. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2021;142. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104709>
16. Chen X., Feng L., Wang J., Guo S., Xu Y. Cyclic triaxial test investigation on tuffs with different water content at Badantoru Hydropower Station in Indonesia. *Eng. Geol.* 2022;300. Article 106554. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106554>
17. Van Eeckhout E.M. The mechanisms of strength reduction due to moisture in coal mine shales. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* 1976;13(2):61–67. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(76\)90705-1](https://doi.org/10.1016/0148-9062(76)90705-1)
18. Ahamed M.A.A., Perera M.S.A., Matthai S.K., Ranjith P.G., Dong-yin L. Coal composition and structural variation with rank and its influence on the coal-moisture interactions under coal seam temperature conditions – a review article. *J. Pet. Sci. Eng.* 2019;180:901–917. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.06.007>
19. Cai X., Zhou Z., Liu K., Du X., Zang H. Water-weakening effects on the mechanical behavior of different rock types: phenomena and mechanisms. *Appl. Sci.* 2019; 9(20). Article 4450. <https://doi.org/10.3390/app9204450>
20. Ciantia M.O., Castellanza R., Di Prisco C. Experimental study on the water-induced weakening of calcarenites. *Rock Mech. Rock Eng.* 2015;48(2):441–461. <https://doi.org/10.1007/s00603-014-0603-z>
21. Ciantia M.O., Castellanza R., Crosta G.B., Hueckel T. Effects of mineral suspension and dissolution on

- strength and compressibility of soft carbonate rocks. *Eng. Geol.* 2015;184:1–18. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.10.024>
22. Li Z., Liu S., Ren W., Fang J., Zhu Q., Dun Z. Multiscale laboratory study and numerical analysis of water-weakening effect on shale. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2020;2020. Article 5263431. <https://doi.org/10.1155/2020/5263431>
23. Jiang Q., Cui J., Feng X., Jiang Y. Application of computerized tomographic scanning to the study of water-induced weakening of mudstone. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 2014;73(4):1293–1301. <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0597-5>
24. Verstrynge E., Adriaens R., Elsen J., Van Balen K. Multi-scale analysis on the influence of moisture on the mechanical behavior of ferruginous sandstone. *Constr. Build. Mater.* 2014;54:78–90. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.024>
25. Сукнёв С.В. Определение статического модуля упругости и коэффициента Пуассона горных пород при изменении влажности. *Горный информационно-аналитический бюллетень*;2016(7):108–116. [Suknev S.V. Determination of static elastic modulus and Poisson's ratio of rocks under water content variation. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2016;(7):108–116. (In Russ.)]
26. Сукнев С.В. Влияние температуры и степени водонасыщения на изменение упругих свойств скальных пород при переходе из талого в мерзлое состояние. *ФТПРПИ*. 2019;(2):14–22. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20190202> [Suknev S.V. Influence of temperature and water content on elastic properties of hard rocks in thaw/freeze state transition. *J. Min. Sci.* 2019. Vol. 55, No. 2. P. 185–193. <http://doi.org/10.1134/S1062739119025444>]
27. Сукнёв С.В. Опыт разработки и применения стандарта организации для определения упругих свойств горных пород. *Горный журнал*. 2015;(4):20–25. <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.04.04> [Suknev S.V. Experience practice of development and application of internal standard for determination of elastic properties of rocks. *Gornyi Zhurnal*. 2015;(4):20–25. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.04.04>]
28. Martin C.D., Chandler N.A. The progressive fracture of Lac du Bonnet granite. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 1994;(6):643–659. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(94\)90005-1](https://doi.org/10.1016/0148-9062(94)90005-1)
29. Eberhardt E., Stead D., Stimpson B., Read R.S. Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock. *Can. Geotech. J.* 1998; 35(2):222–233. <https://doi.org/10.1139/t97-091>
30. Hakala M., Kuula H., Hudson J.A. Estimating the transversely isotropic elastic intact rock properties for in situ stress measurement data reduction: A case study of the Olkiluoto mica gneiss, Finland. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2007;44(1):14–46. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2006.04.003>

Об авторах

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

About the authors

SUKNEV, Sergey, Dr. Sci. (Engineering), chief researcher, ORCID ID: 0000-0003-0200-0429, Researcher ID: S-7251-2016, Scopus Author ID: 6602361450, e-mail: suknyov@igds.ysn.ru

Поступила в редакцию / Submitted 19.07.2022

Поступила после рецензирования / Revised 14.02.2023

Принята к публикации / Accepted 16.02.2023

ПАМЯТЬ

Галанин Алексей Александрович
(25.02.1969–08.09.2022)



8 сентября 2022 г. на 53-м году жизни ушел из жизни доктор географических наук, главный научный сотрудник Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН Алексей Александрович Галанин – известный специалист в области региональной геокриологии, геоморфологии, эволюционной географии, гляциологии, палеогеографии четвертичного периода.

А.А. Галанин родился 25 февраля 1969 в Ярославле. В 1993 г. окончил геологический факультет Иркутского государственного университета им. Жданова и начал трудовую деятельность в г. Анадырь в НИЦ «Чукотка» ДВО РАН (филиал СВКНИИ ДВО РАН). Был руководителем группы сейсмических станций Чукотского АО и Магаданской ОМСП ГС РАН. В 2011 г. был приглашен на работу в Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН (г. Якутск) на долж-

ность заведующего лабораторией региональной геокриологии и криолитологии. Под его руководством в институте была организована лаборатория абсолютного радиоуглеродного датирования.

Научные интересы Алексея Александровича лежали в области палеогеографии и хронологии распада последнего оледенения, морфодинамики и перигляциальной геоморфологии. В 2009 г. защитил докторскую диссертацию «Каменные глетчеры Северо-Востока России: строение, генезис, географический анализ» в Тихоокеанском институте географии ДВО РАН.

Представление о ледовых маршрутах А.А. Галанина дает перечисление труднодоступных хребтов Восточной Чукотки, Корякского и Колымского нагорий, хребтов Черского, Северного Приохотья, Полярного Урала, Сунтар-Хаята, Южно-Чуйского (Горный Алтай) и Заилийского Алатау (Тянь-Шань). Научные интересы его касались также эоловых образований (тукуланов) Центральной Якутии в бассейнах рек Лена и Вилюй. Результаты его исследований отражены в более чем 260 публикациях, в том числе двух монографиях и 40 статьях в рецензируемых изданиях.

Помимо научной и преподавательской деятельности Алексей Александрович активно популяризировал науку: вел популярные телепередачи о природе, являлся автором серии научно-популярных фильмов про тукуланы Якутии. Был членом редколлегии и активным автором научно-популярного журнала «Наука и техника в Якутии».

Алексей Александрович Галанин был талантливым человеком: превосходно играл и пел на гитаре, писал замечательные стихи, мог увлечь слушателя рассказами о своих экспедиционных путешествиях и исследованиях.

Светлая память об Алексее Александровиче, человеке энциклопедических знаний, неординарных взглядов и кипучей энергии, останется в сердцах его друзей и коллег.

*М.Н. Железняк, А.Н. Федоров,
М.Н. Григорьев, А.А. Куть*

Редактор *Н.А. Лившиц*
Корректурa *З.А. Корнилова*
Компьютерная верстка *З.И. Евсеев*
Обложка *Б.В. Яковлев*

Дата выхода в свет 27.03.2023. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая
Усл. п.л. 20,9. Тираж 100 экз. Заказ № 527. Цена свободная.

Адрес редакции:

677007, г. Якутск, пр. Ленина, 33, тел. 8(4112) 39-06-64, <https://nras.asrsya.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 «Издательство Сфера»
677013, г. Якутск, ул. Сергеляхская, д. 12, корп. 2, оф. 25,
тел. 8 (4412) 73-46-29, e-mail: izd_sfera@mail.ru